
碩士學位論文

油壓疲勞試驗機의 製作과
腐蝕疲勞 龜裂成長特性

濟州大學校 大學院

機械工學科



1994年 12月

油壓疲勞試驗機의 製作과 腐蝕疲勞 龜裂成長特性

指導教授 金 貴 植

玄 昌 海

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1994年 12月

玄昌海의 工學碩士學位 論文을 認准함



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

審査委員長

金 亨 宇



委 員

권 기 린



委 員

金 貴 植



濟州大學校 大學院

1994年 12月

**A Manufacture of Hydraulic Fatigue Testing
Machine and Corrosion Fatigue Crack
Growth Behaviors**

Chang-Hai Hyun

Supervised by professor Gui-shik Kim



**A THESIS SUMMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
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	3
1. 연구배경	3
2. 연구목적	4
II. 유압피로시험기 제작	6
1. 시험기 구성	6
2. 이론해석	13
3. 결과 및 고찰	23
3. 1 시험기 동작 및 출력 파형	23
3. 2 시뮬레이션 결과	27
III. 부식피로 균열성장 특성	29
1. 재료 및 방법	29
2. 결과 및 고찰	34
2. 1 부식 피로 균열 성장 길이	34
2. 2 부식 피로 균열 성장 특성	36
2. 3 부식 감응성	39
2. 4 파단면 관찰	41
IV. 결 론	43
V. 참고문헌	45

Summary

A hydraulic fatigue testing machine was manufactured using a personal computer, a proportional valve, a hydraulic system. A numerical simulation by 4 order Runge-Kutta method was done for examining the dynamic quality of the hydraulic fatigue testing machine. Corrosion fatigue crack growth behaviors of SGH41 in the 3% NaCl aqueous solution was investigated with this hydraulic fatigue testing machine. The results can be summarized as follows;

1. This hydraulic fatigue testing machine can be controlled loading waves, stress ratios, frequency by personal computer. The loading waves which can be used in the fatigue test are a sine wave, triangle, square of single acting and double acting.

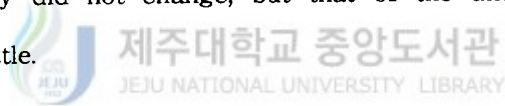
2. When the displacement of a piston is finished, the pressure of the return region is falling rapidly, so rapid fatigue test can be done. Because there is the difference of pressure displacement, the double rod cylinder must be used.

3. In the comparison with the uncoated specimen, corrosion fatigue crack

growth rate of SGH41 in the 3% NaCl aqueous solution is reduced by anti-corrosion effect of zinc and the crack closure.

4. The correlation between the stress intensity factor range ΔK and crack growth rate da/dN for the coated specimen and the uncoated specimen follows Paris rule in 3% NaCl aqueous solution : $da/dN = C(\Delta K)^m$. Where m the slope of the correlation, and is 2.24 for the coated specimen and 3.66 for the uncoated specimen.

5. The corrosion sensitivity of the coated specimen was about one third as sensitive as that of the uncoated specimen under the low region of ΔK . Under the whole region of ΔK , the corrosion sensitivity of the coated specimen nearly did not change, but that of the uncoated specimen was low little by little.



I . 서 론

1. 연구배경

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, 피로하중이 가하여졌을 때 미세한 균열이 발생하여 서서히 파단에 이르는 것이 피로파괴의 특징이다.

이러한 피로 현상에 대한 연구는 1829년 J Albert에 의해 처음 시작되었으며(西岡邦夫 등, 1985), 피로 균열의 진전 거동에 대한 연구는 1970년대초 Elber 에 의하여 피로 균열 開口현상이 보고(Elber, 1971)된 이후 미소한 균열에 관한 연구(北川英夫 등, 1985.), 변동 하중하의 피로 문제에 관한 연구(송지호, 1990) 등 수많은 연구들이 행하여졌다. 최근에는 피로파괴 해석에 파괴 역학적 수법과 파단면 정밀관찰등에 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(吳世旭 등, 1987). 해수 및 파랑으로 인한 부식 피로 현상은 해양 구조 부재의 손상 및 파괴에 중요한 인자가 되며, 부식피로에 관한 국내의 연구를 보면 고장력강의 부식 피로 기구 해석(하희석 등,

1993), 해양 환경 중에서 자동차 프레임강의 부식 피로 균열 성장(이상열 등, 1992), 고장력강들의 용접재의 열영향부와 용착금속에 대한 부식 피로균열성장(김귀식, 1988) 등 많은 연구가 있다.

따라서 이러한 환경에서 돌발적인 파괴를 미연에 방지하고 인명과 재산의 피해를 극소화하는 안전 설계와 그 수명을 정확하게 예측하기 위하여 환경에 따른 재료의 기초적 성질을 정확히 파악하는 것이 대단히 중요하다.

금속의 피로에 대한 실험은 항공기, 선박, 해양구조물 등의 수명 예측에 대단히 중요하게 대두되어 외국에서는 유압서보 피로시험기 개발에 대한 연구가 활발히 전개되고 있고(西見一郎, 1985), 컴퓨터를 이용하여 피로 거동을 고정 밀도로 측정 한 사례도 보고 되고 있다(菊川眞 등, 1980). 국내에서도 피로시험기와 퍼스널 컴퓨터의 인터페이스를 시도한 예가 있으며(문한규 등, 1986), 퍼스널 컴퓨터에 의한 피로시험 자동화 및 피로거동 측정(朴准來, 1988), 컴퓨터를 이용한 랜덤파형 작성과 피로시험에 관한 연구(송지호 등, 1989)가 보고 되기도 하였다.



2. 연구 목적

해안지대에서 강의 부식 속도는 해염 입자의 량, 기온, 강우량 등에 의해 차이가 있지만 100~1000 μ m 정도로 추정(Q & A, 1992)되고 있으므로 해안지역에서 사용되는 구조용 강재에 있어서는 반드시 부식 방지 처리가 필요하다. 부식방지를 위한 구조용 강재로는 아연도금 강재를 많이 사용하고 있는데 이는 부식환경 중에서 아연이 철강에 대하여 희생 양극으로 작용하여 소지재인

강의 부식을 방지하는데 효과적이기 때문이다. 아연도금강재의 부식에 대한 연구로서는 해안지역에서 아연도금강재의 내식성에 대한 연구(高田 등, 1993)와 아연도금강판의 피로거동에 대한 연구(서창민 등, 1992) 등이 보고되고 있으나 아연도금강재의 부식피로에 대한 연구는 거의 없다. 따라서 아연도금 강재를 구조용 부재로 사용하기 위해서는 부식피로 특성에 대한 연구가 필요하다.

부식피로특성에 대한 연구를 위해서는 다양한 환경 조건과 여러가지 하중조건을 충족시킬 수 있는 시험기가 필요하다. 여러가지 하중을 부여하고 정밀 측정을 위해서는 컴퓨터를 이용해야 하며 고속·고정도의 응답성이 요구되므로 전자밸브를 이용하는 것도 필수적이다. 이러한 시험기가 시판되고 있으나 고가이고 또한 새로운 시험 조건에 맞도록 구조를 변경하거나 응용소프트웨어를 변경 확장하기가 대단히 곤란하다. 따라서 저렴한 가격으로 위의 조건을 어느정도 충족시킬 수 있는 피로시험기의 제작에 대한 기초연구가 필요한 실정이다.



본 연구에서는 비교적 데이터 처리속도가 빠른 80386계의 CPU를 사용한 퍼스널 컴퓨터와 비례전자밸브 및 유압기기 등을 이용하여 확장이 용이한 피로 시험기를 제작하고, 수치시뮬레이션을 통해 동적 특성을 파악하였으며, 이 자체제작한 피로시험기를 이용하여 아연 도금 강판 SGH41에 대하여 부식피로 균열성장 특성을 검토하였다.

II. 유압 피로 시험기 제작

1. 시험기 구성

1. 1 기능

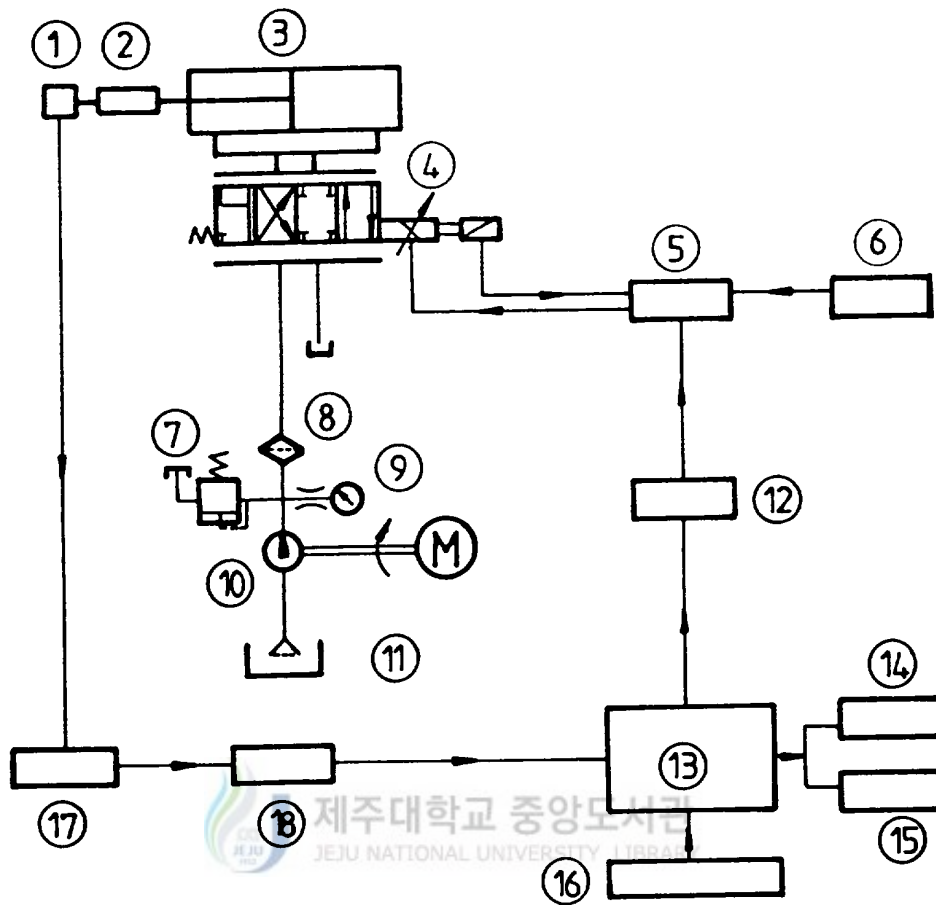
본 연구에서 제작 목표로 하는 유압 피로 시험기는 컴퓨터를 이용하여 제어할 수 있도록 하였으며 다음과 같은 기능을 갖도록 설계 제작되었다.

- (1) 입력파형은 정현파, 사각파, 삼각파를 준다.
- (2) 입력파형의 하중은 양진과 편진이 가능하다.
- (3) 실험 사이클을 임의의 주파수에 맞출 수 있다.
- (4) 실험한 사이클 수를 모니터에 자동으로 기록한다.
- (5) 실험한 시간을 모니터에 자동으로 기록한다.

유압 피로 시험기의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 유압 동력원으로 사용한 유압 펌프는 UCHIDA사의 기어 펌프로서 토출량은 8.6 cc/rev이며, 유압 펌프 구동용 전동기는 회전수 1720 rpm 이고, 정격출력은 3.7 kw 이다. 비례전자밸브는 증폭기로부터 공급되는 전류 신호에 비례한 유량을 유압 실린더로 공급하도록 한다. 제어기로는 80386 마이크로프로세서를 내장한 퍼스널 컴퓨터를 사용하며, 연속계 신호와 이산계 신호를 연결시켜 주는 A/D 및 D/A 변환기는 14비트의 분해능을 갖는 Advantch사의 PCL - 714을 사용한다. 유압 실린더에서 시험편에 가해지는 하중은 로드셀에서 감지하여 A/D변환기를 통하여 퍼스널 컴퓨터로 읽어드리고, 실험 상황을 화면에 나타나도록 하며 원하는 데이터를 저장할 수도 있고, 직접 프린터나 플로터로 출력할 수 있도록 하였다.

시험기에 사용된 주요 부품은 Table 1에, 시스템의 유압 구동부와 제어부는 Fig. 2에 나타내었다.

피로 시험은 오랜시간을 필요로 하므로 유압유의 온도 상승에 따른 유압유의 밀도저하와 캐비테이션 현상등 여러가지 문제를 발생 시킬수 있기 때문에 유온의 상승을 억제하기 위하여 오일 탱크내에 냉각수 순환장치를 설치하였다.

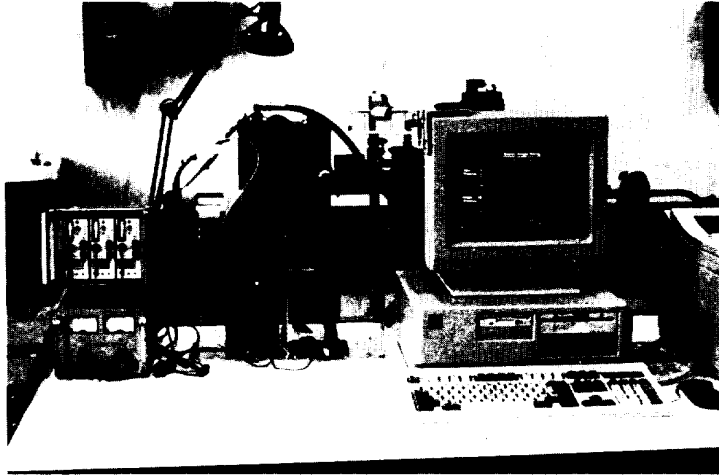


- | | |
|---|-----------------------|
| 1. load cell | 10. hydraulic pump |
| 2. test specimen | 11. hydraulic tank |
| 3. hydraulic cylinder | 12. D/A converter |
| 4. proportional control valve | 13. personal computer |
| 5. proportional control valve amplifier | 14. printer |
| 6. power supply | 15.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

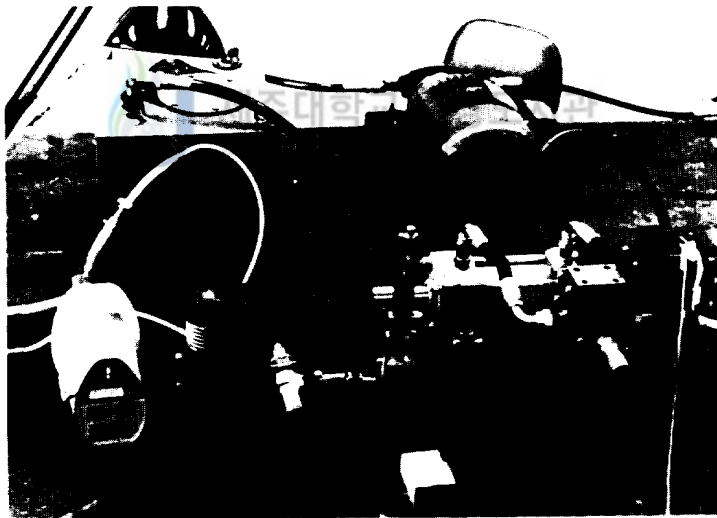
Fig. 1 Block diagram of fatigue testing machine

Table 1. Principal part of fatigue testing machine

NAME	MODEL	MANUFACTURER	NOTE
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 COMPUTER	80386	ATOM	
HYDRAULIC CYLINDER	63-50	NAMDO	Cap. 6ton
POWER SUPPLY	SM-60	NICE ELECTRONIC CO.	30V, 3A
STRAIN AMPLIFIRE	DPM-612A	KYOWA	$\pm 5V$
HYDRAULIC PUMP	GSD-AOSO8A-AO	UCHIDA	8.6cc/rev
RELIEF VALVE	BT-0374	FUJIKEN	
ELECTRIC MOTOR	TTH-0374HP-505K	OL-JI ELECTRONIC CO.	1720rpm, 13.6A
PRINTER	HP-505K	SAMSUNG HP	
FILTER	15P 1 10C 50MM 1 88	PARKER	



(a) control part



(b) hydraulic system part

Fig. 2 Photograph of fatigue testing machine

1. 2 시험기 운용 프로그램의 순서도

본 연구에서는 시험기의 운용을 위한 응용 소프트웨어는 Quick Basic 언어를 이용하였다. 시험기 운용 프로그램은 대화식으로 이루어져 누구나 쉽게 사용할 수 있도록 하였으며, 프로그램 순서도는 Fig. 3에 나타내었다.

프로그램의 주요 구성(SUB 문)을 살펴보면 다음과 같다.

- (1) CONSTANT : 시스템과 관련된 각종 상수의 초기값과 물리적 변수값들이 주어진다.
- (2) WAVE : 양진의 정현파, 사각파, 삼각파형, 그리고 편진의 정현파, 사각파, 삼각파형의 신호를 사용자의 선택에 따라서 벨브로 보낸다.
- (3) GRAPH : 취득된 데이터를 화면에 그래프로 출력한다.



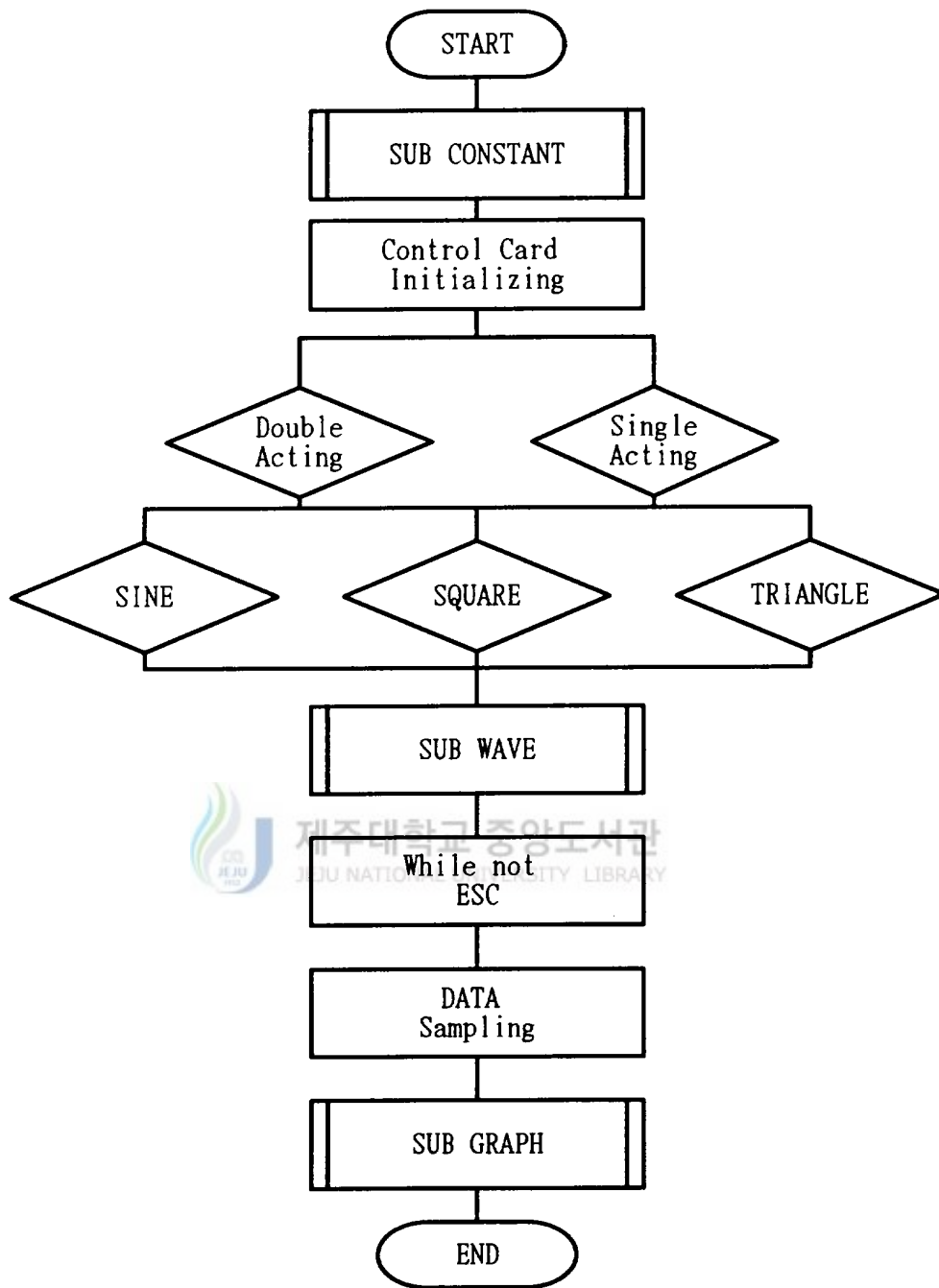


Fig. 3 Flow chart of control system

2. 이론해석

2. 1 제어계의 유압 회로와 작동 원리

본 연구에서 제안하는 피로 시험기는 유압 펌프와 유압 밸브 그리고 유압 실린더로 되어 있으며, 유압 밸브는 재료의 피로 시험 조건 및 재료에 가해지는 피로 파형을 구현하기 위하여 비례 전자식 제어 밸브(Proportional control valve)를 사용하였다.

Fig. 4는 설계·제작된 피로 시험기의 블록 선도를 나타낸 것으로 컴퓨터에서 발생된 제어 신호는 밸브 제어기를 거쳐 밸브 스톱을 구동시킨다. 이 때, 유압 원으로부터 공급된 유압력은 밸브를 통하여 실린더로 공급되어 유압 실린더가 움직이게 된다. 결국, 피로 시험에 필요한 제어기로부터의 신호에 따라 유압 실린더를 구동시키는 개회로 제어계이다.

Fig. 5는 피로 시험기의 유압 회로도를 나타낸 것으로 작동 원리를 설명하면 다음과 같다. 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 공급하면 되고, 편진 압축을 필요로 하는 경우는 실린더 헤드부, 편진 인장을 필요로 하는 경우는 실린더 로드부에 압력유를 가하면 된다.

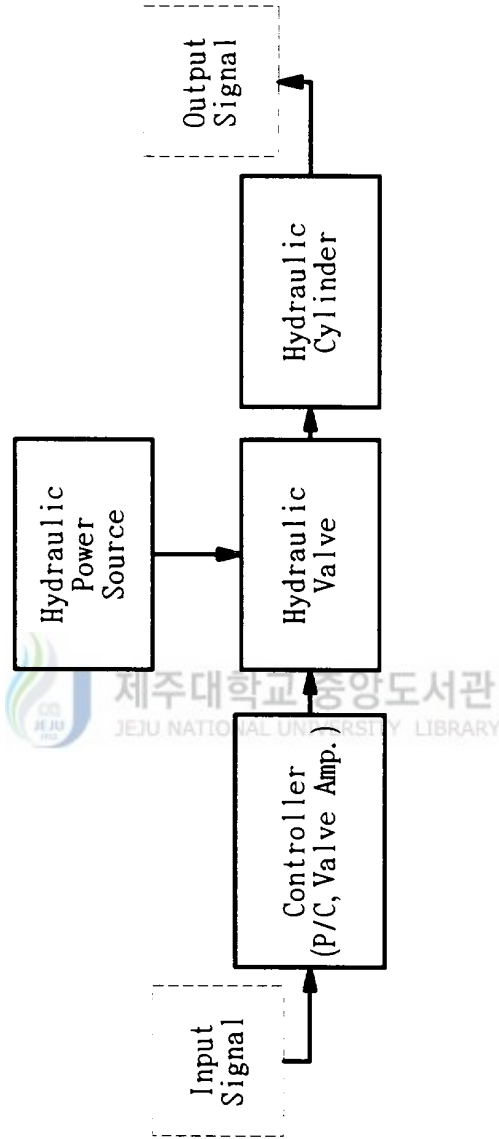


Fig. 4 Block diagram of open loop system for fatigue test

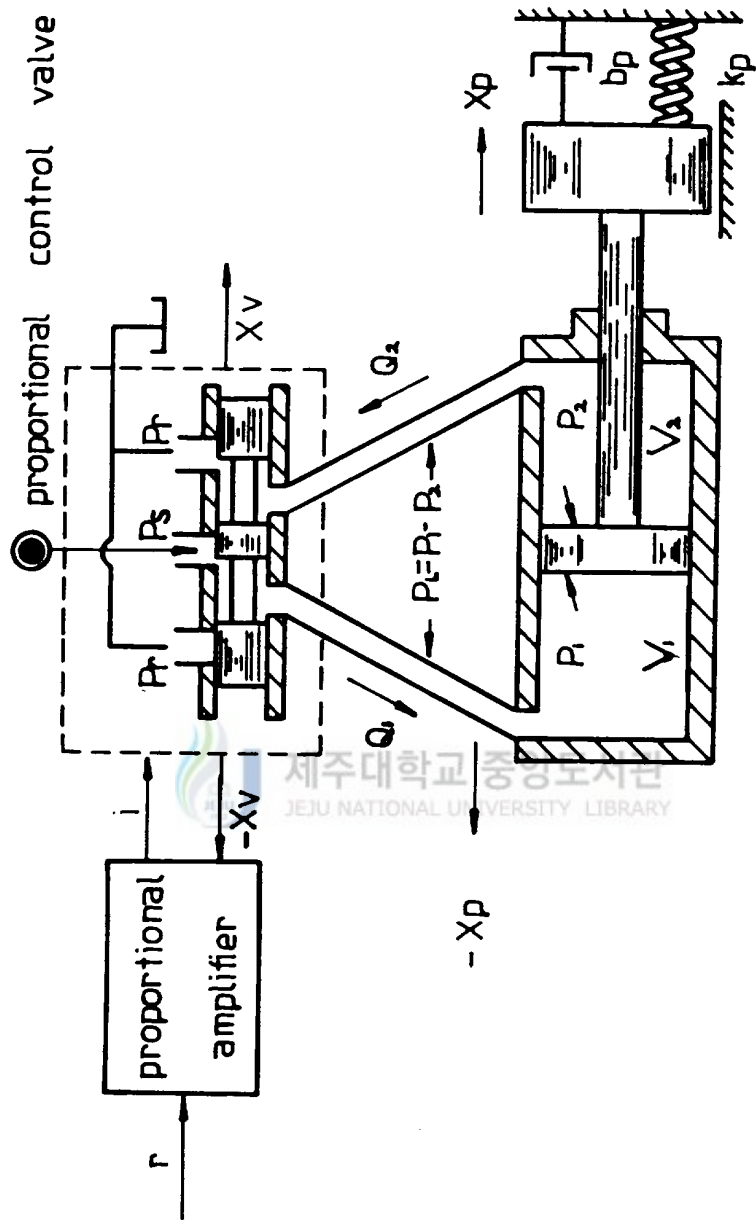


Fig. 5 Hydraulic circuit for numerical analysis

2. 2 제어계의 모델링

본 연구에서는 비례 전자 밸브와 편로드 실린더로 구성된 제어 시스템의 특성을 이론적으로 조사할 목적으로 제어계의 수학적 모델을 구하고자 한다. 여기에서 밸브-실린더-부하계 사이의 수학적 모델링을 위한 전제조건은 다음과 같다.

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

2. 2. 1 실린더 헤드부로 압력이 공급될 때 (압축시)

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

$$A_v \cdot C_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)} = A_{p1} \cdot \frac{dx_p}{dt} + \beta (V_1 + A_{p1} \cdot x_p) \frac{dP_1}{dt} \quad (1)$$

여기에서, A_v : 비례전자밸브의 개구 면적, C_v : 비례전자밸브의 유량계수, ρ : 기름의 밀도, P_s : 공급압력, P_1 : 실린더 헤드부 작동압력($-x_p$ 일때는 귀환압력), A_{p1} : 실린더 헤드부 단면적, x_p : 피스톤 변위, β : 기름의 압축율, V_1 : 밸브에서 실린더 헤드부까지의 체적을 의미한다.

P_2 와 P_3 사이의 연속 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_v \cdot C_v \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_2 - P_3)} = A_{p2} \cdot \frac{dx_p}{dt} - \beta(V_2 - A_{p2} \cdot x_p) \frac{dP_2}{dt} \quad (2)$$

여기에서, V_2 : 실린더 로드부에서 밸브까지의 체적을 의미한다.

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

$$K \cdot i = m_v \cdot \frac{d^2 x_p}{dt^2} + b_v \cdot \frac{dx_v}{dt} + k_v \cdot (x_v + x_{10}) \quad (3)$$

$$P_1 \cdot A_{p1} - P_2 \cdot A_{p2} = m_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} + b_p \cdot \frac{dx_p}{dt} \quad (4)$$

여기에서, K : 밸브의 이득, i : 밸브 구동 전류, m_v : 밸브 스톱의 질량, b_v : 밸브 스톱의 마찰 계수, x_v : 밸브 스톱의 변위, k_v : 밸브 스프링의 스프링 상수, P_2 : 실린더 로드부 압력, A_{p2} : 실린더 로드부 단면적, m_p : 피스톤의 질량, b_p : 피스톤의 마찰 계수를 의미한다.

2. 2. 2 실린더 로드부로 압력이 공급될 때 (인장시)

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

$$A_v \cdot C_v \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_s - P_2)} = A_{p2} \cdot \frac{dx_p}{dt} + \beta(V_2 + A_{p2} \cdot x_p) \frac{dP_2}{dt} \quad (5)$$

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

$$A_v \cdot C_v \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_3)} = A_{p1} \cdot \frac{dx_p}{dt} - \beta(V_1 - A_{p1} \cdot x_p) \frac{dP_1}{dt} \quad (6)$$

밸브의 운동 방정식 및 실린더의 운동방정식은 다음과같이 나타낼 수 있다.

$$K \cdot i = m_v \cdot \frac{d^2 x_p}{dt^2} + b_v \cdot \frac{dx_v}{dt} + k_v \cdot (x_v + x_{i0}) \quad (7)$$

$$P_2 \cdot A_{p2} - P_1 \cdot A_{p1} = m_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} + b_p \cdot \frac{dx_p}{dt} \quad (8)$$

2. 3 이론 해석에 필요한 물리 정수

수치 계산에 필요한 각종 상수들 중에서 비례 전자 밸브에 관련된 상수는 이 제품의 생산 회사의 카다로그를 참고 하였다.

Fig. 6은 사용된 밸브의 보드 선도를, Fig. 7은 이 밸브의 입력 전압에 따른 유량 선도를 나타내고 있다. 이들 그림으로부터 피로 시험기에 사용된 밸브는 65[Hz] 정도의 성능을 가지고 있으며, 시험기의 사용 영역(± 5 [V])에 있어서는 선형성이 유지되는 밸브임을 알 수 있다.

그 외에 계산에 사용된 수치들을 아래에 제시한다.

$$\text{시스템 사용 압력 [bar]} = 50 \text{ [bar]}$$

$$\text{작동유의 밀도 [} \rho \text{]} = 860 \text{ [kg/ m}^2 \text{]}$$

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

$$\text{실린더 헤드부 단면적 [} A_{p1} \text{]} = \frac{\pi}{4} \times 0.0063^2 \text{ [m}^2 \text{]}$$

$$\text{실린더 로드부 단면적 } [A_{r2}] = \frac{\pi}{4} \times (0.0063^2 - 0.003^2) [m^2]$$

$$\text{실린더 로드 질량 } [m_p] = 2 [kg]$$

$$\text{밸브 A포트에서 실린더 헤드부까지의 체적 } [V_1] = 1.96 \times 10^{-5} [m^3]$$

$$\text{밸브 B포트에서 실린더 로드부까지의 체적 } [V_2] = 1.25 \times 10^{-5} [m^3]$$

$$\text{실린더 피스톤의 마찰 계수 } [b_v] = 98 [N \cdot s/m]$$

$$\text{피스톤 최대변위 } [mm] = 10 [mm]$$



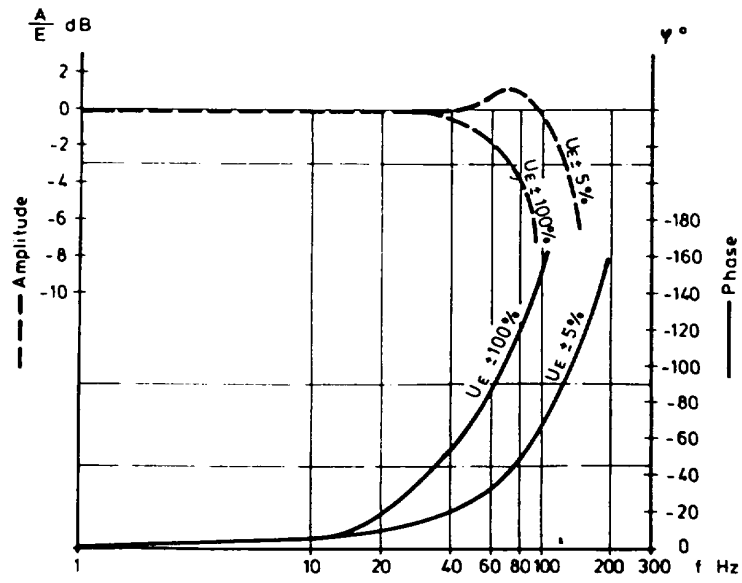


Fig. 6 Bode diagram of proportional control valve

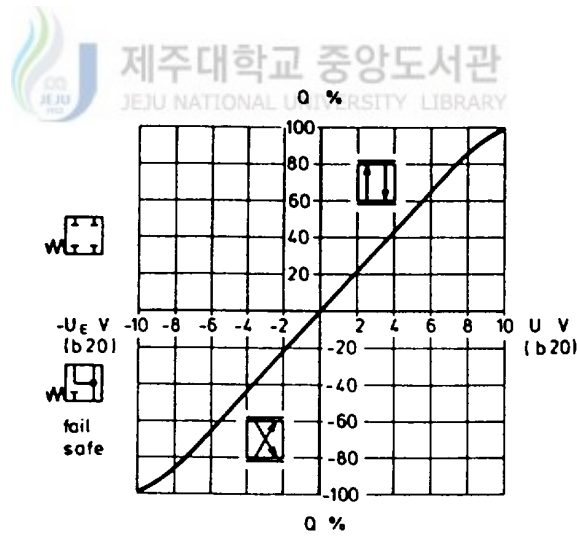


Fig. 7 V-Q diagram of proportional control valve

2. 4 수치 시뮬레이션 프로그램의 순서도

2. 2절의 제어계의 모델링을 통하여 구한 방정식에 의해, 시스템의 동특성을 시뮬레이션하기 위하여 프로그램을 작성하였다. 수치해석 방법으로는 이 방정식들에 다수의 비선형 항들이 포함되어 있으므로 4계 Runge-Kutta법을 사용하였다. 주 프로그램의 순서도를 Fig. 8에 나타내었으며, 각각의 서브루틴의 기능에 대하여 설명을 하면 다음과 같다.

- (1) CONSTANT : 수치해석에 사용되는 각 변수들의 초기값과 계수값들이 주어진다.
- (2) RUNGE : 실린더의 운동 방정식을 비롯하여 제어계의 방정식들을 수치 해석한다.
- (3) DATAC : 수치해석에서 얻어진 결과값들을 Format에 맞게 변환한다.
- (4) GRAPH : 실험 결과를 컴퓨터 화면에 그래픽 출력으로 제시한다.
- (5) DATAS : 변환된 결과값들을 File로 저장한다.

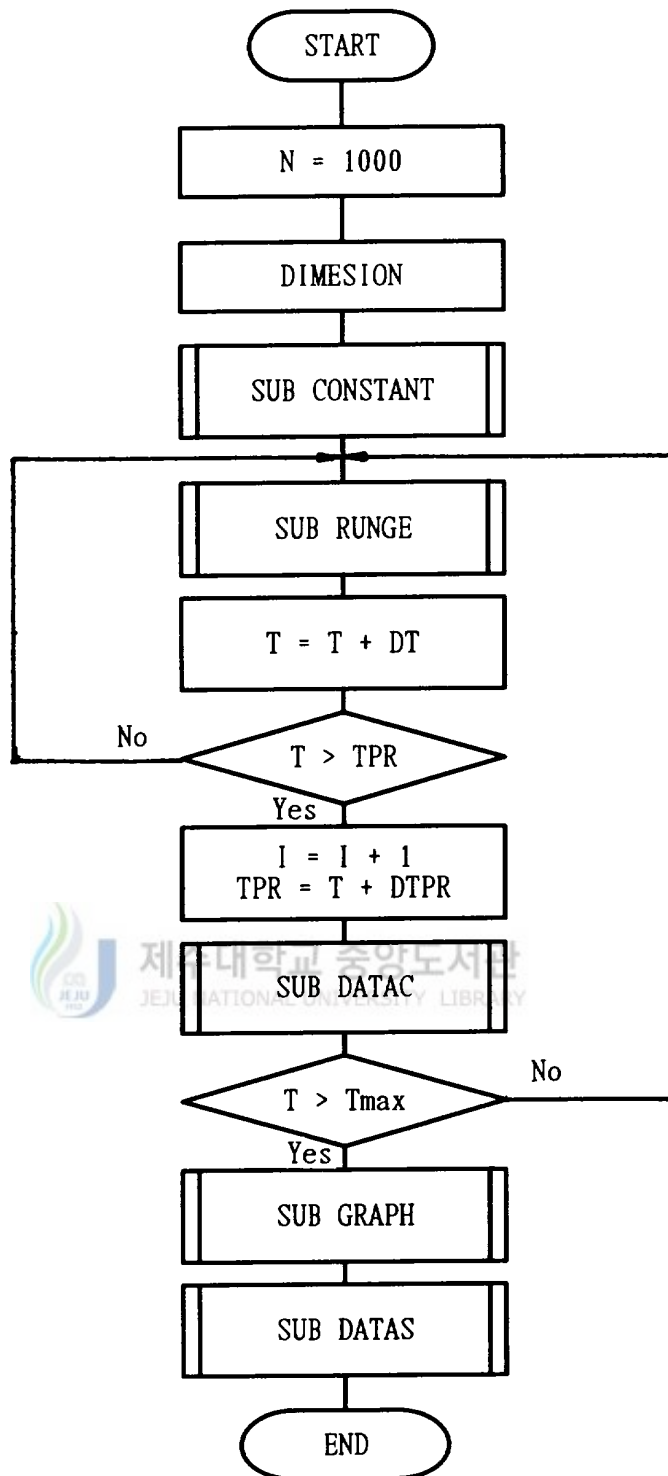


Fig. 8 Flow chart of numerical analysis

3. 결과 및 고찰

3. 1 시험기 동작 및 출력 파형

80386계의 CPU를 사용한 퍼스널 컴퓨터를 사용하여 제작한 피로시험기의 작동을 살펴보면, 퍼스널 컴퓨터의 keyboard를 통하여 Fig. 9, 10과 같이 입력된 양진과 편진의 파형신호(정현파, 삼각파, 사각파)는 디지털 신호이므로 D/A 변환기를 거쳐 아날로그 신호로 바뀌어 비례전자밸브 Amplifier를 통해 비례전자밸브를 제어 하였다. 한편, 모터와 유압펌프를 통해 발생된 유압은 릴리프 밸브에서 필요한 압력으로 제어되고 필터를 통하여 비례전자밸브로 유입된다.

컴퓨터의 신호에 의해 비례전자밸브의 스펴이 작동하므로 유압은 작동 실린더의 헤드부와 로드부로 작용하여 로드부 끝에 부착된 척과 하중 감지를 위해 설치된 로드셀의 선단에 부착된 척 사이에 고정된 시험편에 피로하중을 가하게 된다. 로드셀에서 감지된 하중신호는 스트레인 Amplifier를 거쳐 증폭되고 A/D 변환기를 통해 디지털 신호로 바뀐 다음 다시 컴퓨터의 모니터에 실험 파형, 사이클수 그리고 실험시간을 나타내어 실험의 상황을 항상 파악할 수 있도록 되어 있다.

Fig. 11에는 릴리프 밸브에서 압력을 10kgf/cm^2 로 하고, 실험 주파수를 3.83Hz 로 하여 양진 하중의 정현파를 입력했을 때 출력 파형을 나타낸 것이다. 컴퓨터에서 입력된 파형에 의해 시험편의 변위로 주어지는 출력파형이 정상적인 정현파이고, 또한 실험 사이클수와 실험 시간 그리고 실험 주파수를 나타내고 있어 시험기의 작동이 정상적임을 알 수 있다.

Material Fatigue Testing

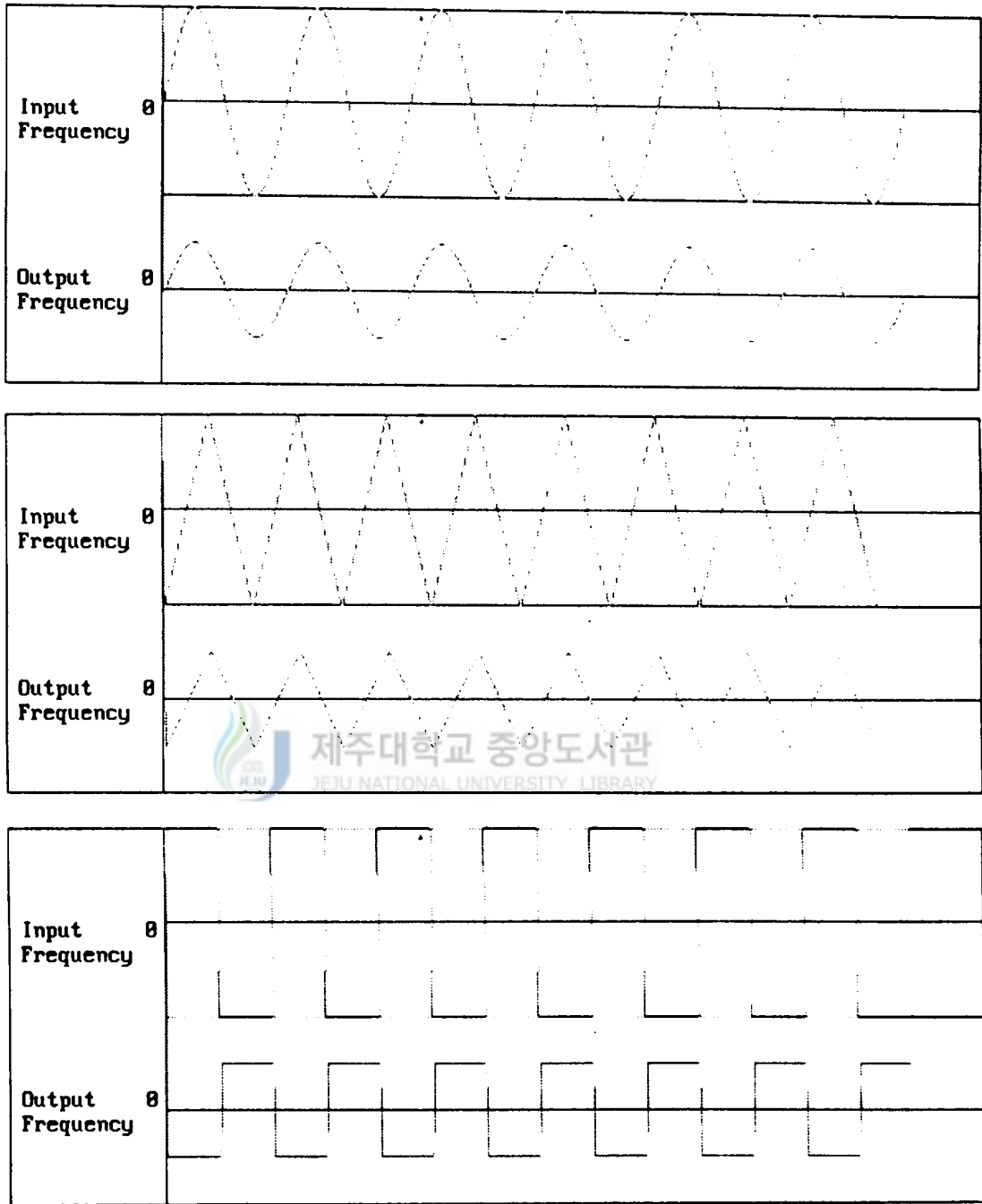


Fig. 9 Wave signal (double acting)

Material Fatigue Testing

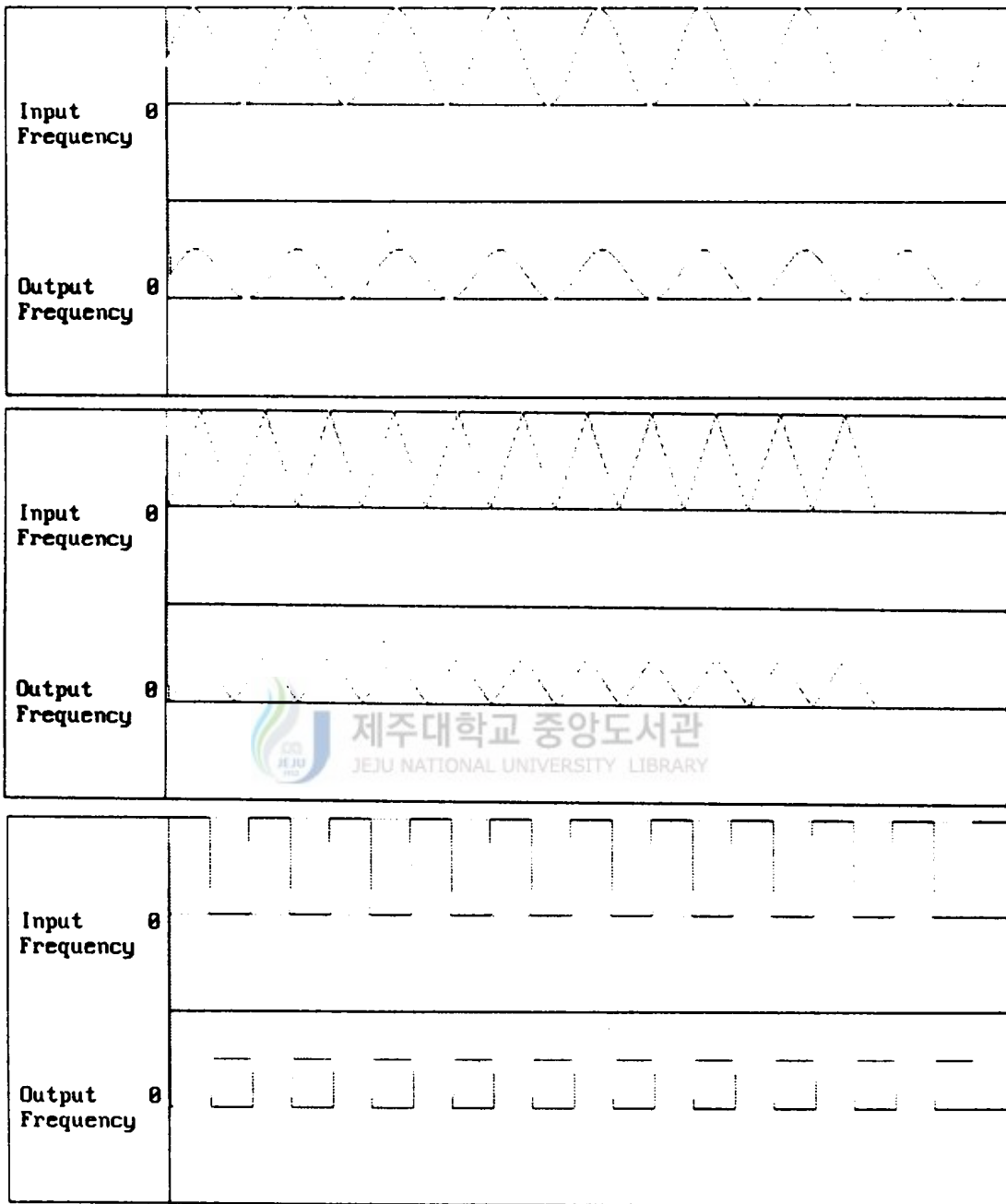
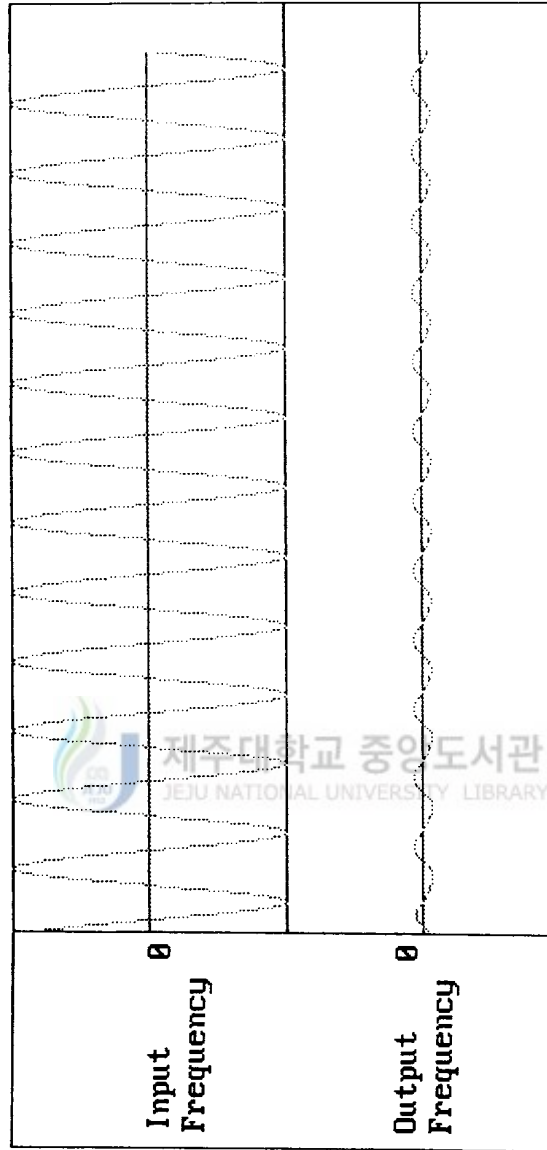


Fig. 10 Wave signal (single acting)

Material Fatigue Testing



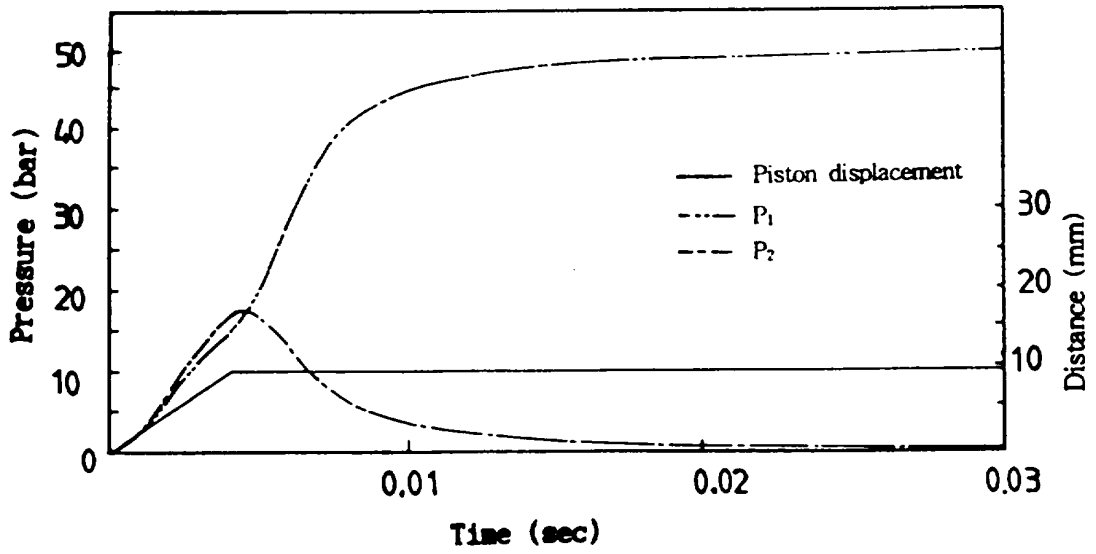
Period = 31.111MS
 Experiment Time = 0.001251sec
 Experiment Frequency = 3.0524 kHz

Fig. 11 Monitoring of experimental situation (cycle, time, wave, Hz)

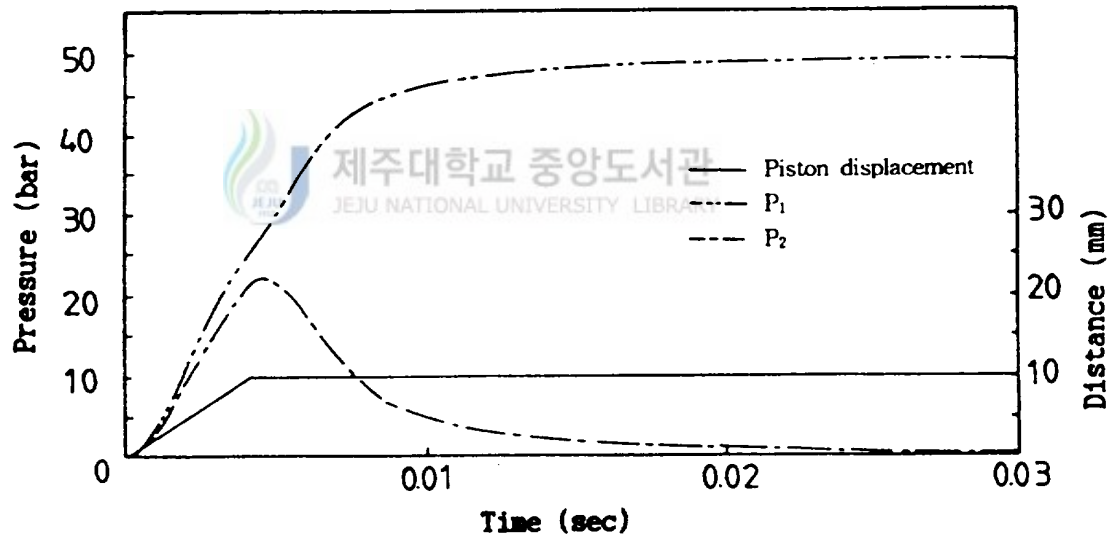
3. 2 시뮬레이션 결과

피스톤의 운동은 유압이 실린더 헤드부로 공급되는 경우와 로드부로 공급되는 경우로 나눌 수 있다. 실린더 헤드부로 압력(P_s)이 공급되는 경우의 공급 압력의 변화(P_1)와 return부의 압력 변화(P_2) 그리고 피스톤의 변위는 Fig. 12의 (a)에 나타내었고, 실린더 로드부로 압력이 공급되는 경우의 공급 압력의 변화(P_1)와 return부의 압력 변화(P_2) 그리고 피스톤 변위는 Fig. 12의 (b)에 나타내었다.

두 상황을 비교해 보면 실린더 헤드부로 압력이 공급될 때 밸브의 개구면적은 같은데 반하여 피스톤 전·후부의 단면적이 다르기 때문에 피스톤 최대 변위까지 움직이기 전까지는 같은 시간에 같은 유량이 들어오고 빠져나가지 못하기 때문에 Fig. 12의 (a)와 같이 공급 압력보다 return부의 압력이 높게 나타나고 있다. 실린더 로드부로 압력을 공급할 때는 로드부의 단면적이 작기 때문에 Fig. 12의 (b)와 같이 압력 상승은 전술한 상황에 비해 빠르고 헤드부 즉 return부의 압력이 공급 압력보다 낮게 나타나고 있다. 이것은 편로드 유압 실린더를 사용하였기 때문으로 생각되며 양로드 유압 실린더를 사용함으로써 해결할 수 있을 것이라고 생각된다. 또한, 실린더의 변위가 끝났을 때의 return부의 압력은 매우 빠른 속도로 떨어지기 때문에 시스템의 상황이 시뮬레이션 상황과 같다면 매우 빠른 실험이 가능하다고 판단된다.



(a) when P_s is enhanced head part



(b) when P_s is enhanced rod part

Fig. 12 Result of simulation (P_1 : pressure of supply,
 P_2 : pressure of return)

III. 부식 피로 균열 성장 특성

1. 재료 및 방법

1. 1 실험 재료

본 연구에 사용한 실험재료는 포항종합제철주식회사 제품인 열연용 아연도금 강판인 KSD350G SGH41의 판재이며, 재료의 화학적 성분은 Table 2에, 기계적 성질은 Table 3에 나타내었다. 시험편은 아연 도금된 것(coated specimen)과 도금부를 기계적으로 연마하여 제거한 나재 시험편(uncoated specimen)으로 두께 2mm의 판재를 Fig. 13과 같은 형상으로 가공하였다. 노치의 형상은 길이 10mm이고 노치 선단 부근의 각도는 60도로 가공하였으며, 균열 성장 길이를 측정하기 위하여 시험편의 양측면을 에머리페이퍼(#2000)로 정세 연마 하였다.

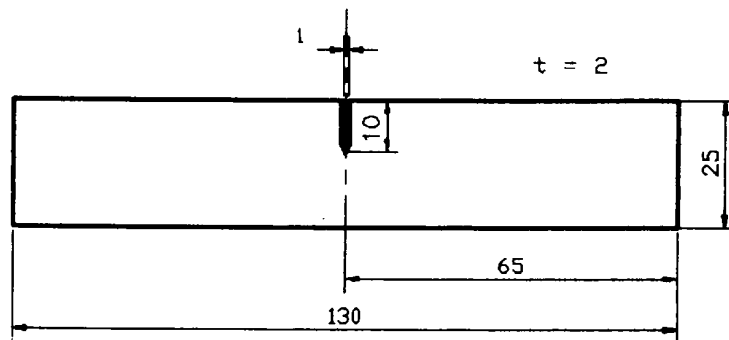


Fig. 13 Test specimen (unit : mm)

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(kgf/mm ²)	TS(kgf/mm ²)	EL(%)
39.2	51.5	32

1. 2 실험 환경

실험 환경은 부식 피로 균열 성장 특성의 비교 데이터를 얻기 위하여 공기 중과 증류수를 용질로 하여 만든 3% NaCl 수용액을 사용했으며, 실험 온도는 실온이다. 부식 피로 실험 장치는 Fig. 14에 나타낸 바와 같이 투명한 아크릴로 제작하여 실험 도중 이동 현미경을 사용하여 부식 수조 밖에서 시험편의 균열 상태를 측정할 수 있게 하였다. 항온 수조는 플라스틱 수조이며, 부식 수조와 항온 수조의 사이에 플라스틱 펌프(금성사, PF-064D)를 설치하여 실험 용수를 순환시켜 시험편이 항상 용액 속에 잠기게 하였고, 순환 회로 배관은 합성수지 호스를 사용하였다. 용량은 5ℓ로 하였고, 수용액의 농도 변화와 오염을 방지하기 위하여 1주일에 1회 새로운 용수로 교환하였다.

1. 3 실험 방법

시험편의 양단을 시험기의 척에 고정하고 먼저 시험편을 공기 중에서 응력 반복 속도(f)를 4.29Hz, 하중 386 kg/mm^2 의 정현파를 주어 약 0.5 mm의 예비 균열을 발생시켰다. 본 실험은 공기 중과 3% NaCl수용액 중에서 응력비 ($R=P_{\min}/P_{\max}$)를 -0.77, 하중 반복 속도(f)를 4.29Hz로 하여 정현파를 주었다.

부식 피로 균열 성장의 측정은 적당한 반복 횟수(N)에서 피로 시험을 중단하고 1/50mm의 측정 오차를 갖고 있는 하이트게이지에 배율 100배의 현미경을 부착한 이동 현미경 및 금속 현미경 (JOIF, XJZ-6)을 사용하여 각각 100배와 500배의 배율로 하였고, 금속현미경 사용시는 다이얼게이지(1/100)을 부착하여 시험편의 측면 균열 길이를 측정하였다. 응력반복 횟수(N)는 PC의 모니터에 표시되도록 하였다. 이 측정치로부터 균열 길이(da)와 반복 횟수(dN)의 관계, 또 da/dN 과 응력확대계수(ΔK)와의 관계를 구하였으며, 응력확대계수 (ΔK) 계산식(Yagane, 1988)은 다음과 같다.

$$\Delta K = \sigma \sqrt{\pi a} F(\zeta) \quad (9)$$

여기에서 $0.5 < \zeta \leq 0.6$ 일 때

$$F(\zeta) = 1.12 - 0.213\zeta + 10.55\zeta^2 - 21.72\zeta^3 + 30.39\zeta^4 \quad (10)$$

$0.5 > \zeta > 0.2 \geq$ 일 때

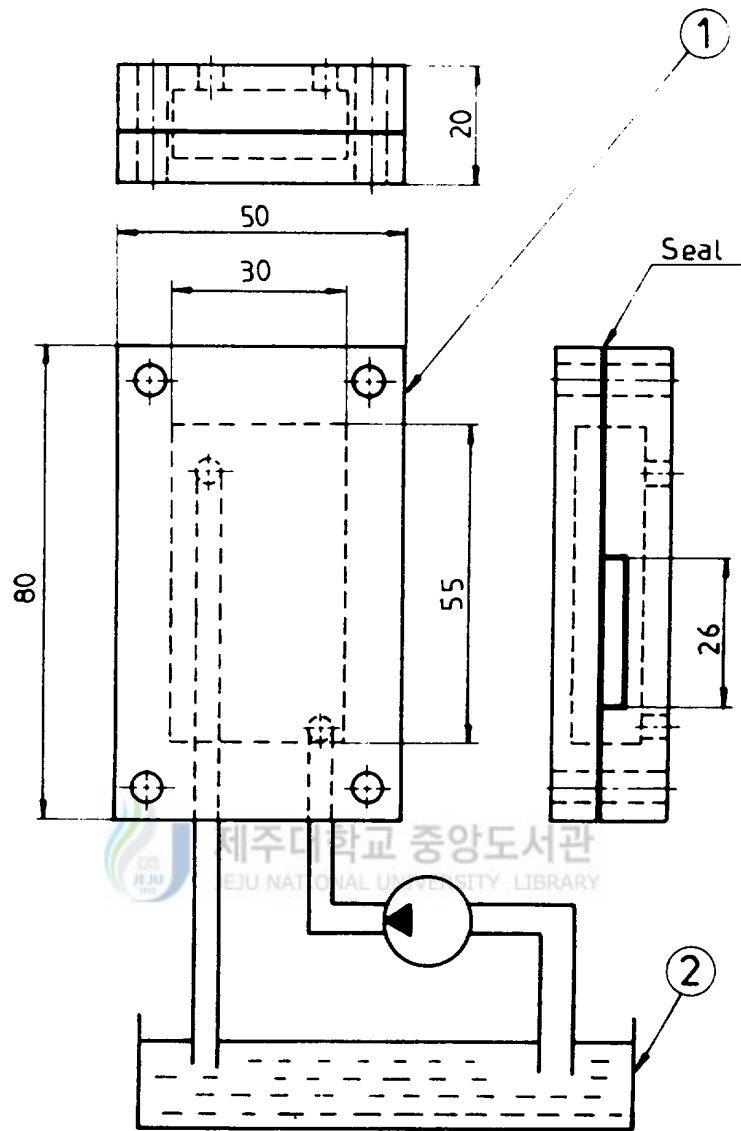
$$F(\zeta) = 0.265(1 - \zeta)^4 + (0.857 + 0.265\zeta)/(1 - \zeta)^{1.5} \quad (11)$$

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

(B : 시험관의 두께, W : 시험편의 폭, t = 노치의 길이, c : 노치선단에서의 균열 길이, P : 하중, σ : 응력, a : 전체 균열 길이, F : 시험편 형상 계수)

시험편의 파단면 관찰은 전자 현미경을 이용하였다.





① corrosion cell

② water tank

Fig. 14 Experimental apparatus for corrosion fatigue test (unit : mm)

2. 결과 및 고찰

2. 1 부식 피로 균열 성장 길이

공기 중과 3% NaCl 수용액 중에서 SGH41재의 도금된 시험편과 아연 도금 부를 제거한 나재시험편의 피로 균열 길이와 사이클 수와의 관계를 Fig. 15에 나타내었다. 피로 하중 반복 횟수의 증가와 더불어 균열 길이가 증가하였다. 나재 시험편을 3% NaCl 수용액 중에서 실험한 것이 코팅된 시험편을 공기 중에서 실험한 것 보다 더 균열 성장이 빠르다. 이것은 나재시험편이 피로 하중과 더불어 부식이 작용하였기 때문으로 생각된다. 3% NaCl 수용액 중에서 코팅된 시험편과 나재 시험편의 부식 피로 하중에 의한 균열 성장 속도는, 코팅된 시험편의 아연 성분이 방식 작용을 하기 때문에 코팅된 시험편이 나재 시험편 보다 균열 성장 속도가 훨씬 느리게 나타나고 있다.

코팅된 시험편을 공기 중과 3% NaCl 수용액 중에서 균일하게 피로 하중을 주어 시험한 것을 보면, 공기 중에서 보다 3% NaCl 수용액 중에서의 균열 성장 속도가 느리게 나타나는데 이것은 도금 층의 아연이 철 보다 이온화 경향이 크기 때문에 아연의 양극 반응과 철의 음극 반응으로 인하여 부식이 억제되고, 아연의 부식으로 인한 생성물이 균열 폐구현상 (遠藤吉郎 등, 1982 ; 駒井謙治郎 등, 1984)때문으로 생각된다. 부식 생성물의 균열 폐구현상 등에 대하여서는 Komai 등(1984)은 부식 생성물의 균열폐구현상을 부식 생성물에 의한 썩기 효과로 평가하고 있는데 이는 부식 생성물이 균열 선단에서 썩기 작용을 함으로서 균열 성장이 지연되는 것으로 본 실험에서도 이러한 현상 때문에 3% NaCl중에서 도금된 시험편의 균열 성장 속도가 느리게 나타나는 것이다.

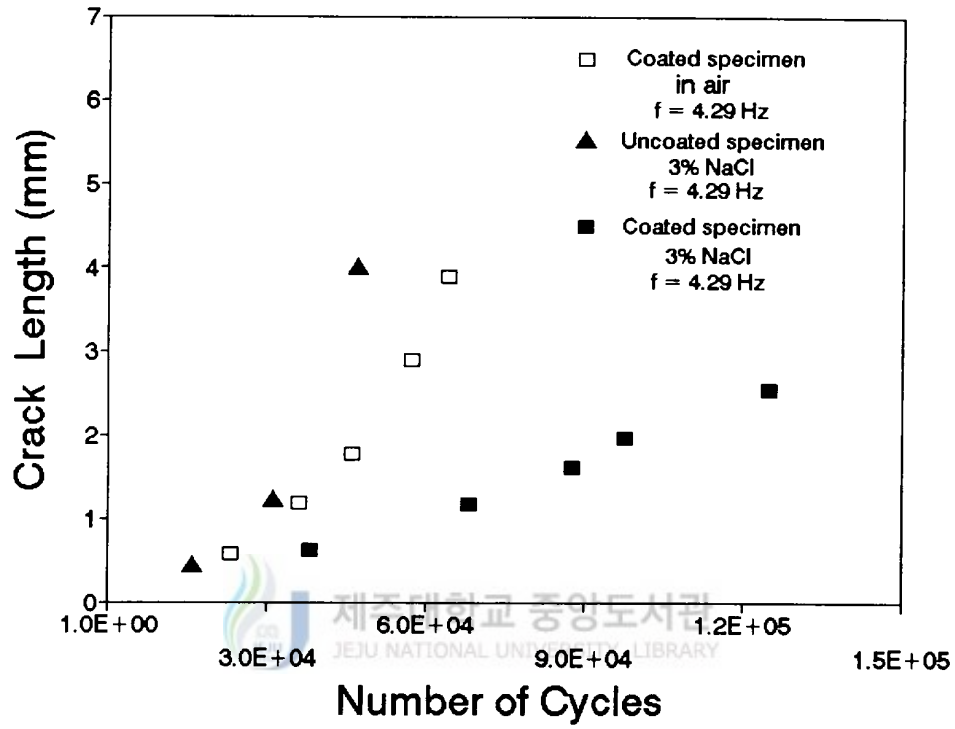


Fig. 15 Relationship of crack length and number

2. 2 부식 피로 균열 성장 속도 특성

Fig. 16은 공기 중과 3% NaCl 수용액 중에서 SGH41의 도금된 시험편과 나재시험편의 표면 균열 진전 속도 da/dN 에 대한 응력확대계수범위 ΔK 값과의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 16에서 보인바와 같이 나재시험편의 3% NaCl 수용액 중에서의 균열 성장은 부식의 영향에 의해 도금된 시험편의 공기 중의 결과 보다 빠르다. 공기 중의 시험편은 코팅된 것이지만 공기 중에서의 도금층의 응력부담 효과는 거의 없다고 간주되므로 두 데이터를 직접 비교하였다. 그리고 3% NaCl 수용액에서의 나재 시험편과 도금된 시험편의 균열 성장 속도는 나재시험편이 도금된 시험편보다 빠르다. 이는 아연도금층에 의한 전기 방식 효과와 전술한 바와 같은 균열 폐구현상 때문이다. 그리고 da/dN 는 ΔK 값이 커짐에 따라서 양 log스케일의 그래프에서 직선적으로 빨라지고 있으므로 다음과 같은 Paris의 법칙을 적용할 수 있다.(1971;Gerberish 등, 1982)

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (12)$$

Table 4는 Fig.16에서 실험치를 (12)식의 Paris의 법칙에 의하여 최소자승법으로 계산한 실험 상수 C 와 m 값을 정리한 것이다.

Table 4에 의하면 도금된 시험편은 공기 중에서 보다 3% NaCl 에서 실험 상수 C 값은 커지고 있는데 비해 기울기를 나타내는 실험 상수 m 값은 작아지고 있고, 3% NaCl 에서의 나재시험편은 실험 상수 C 값이 가장 작는데 비해 기울기를 나타내는 지수 m 값은 가장 크게 나타나는 경향을 보이고 있다.

Table 4. The experimental constants C and m
of Paris' rule [$da/dN = C(\Delta K)^m$]

Environment \ Experimental constant	m	C
3% NaCl (Coated specimen)	2.24	7.0×10^{-9}
3% NaCl (Uncoated specimen)	3.66	1.05×10^{-10}
in air (Coated specimen)	2.78	3×10^{-9}

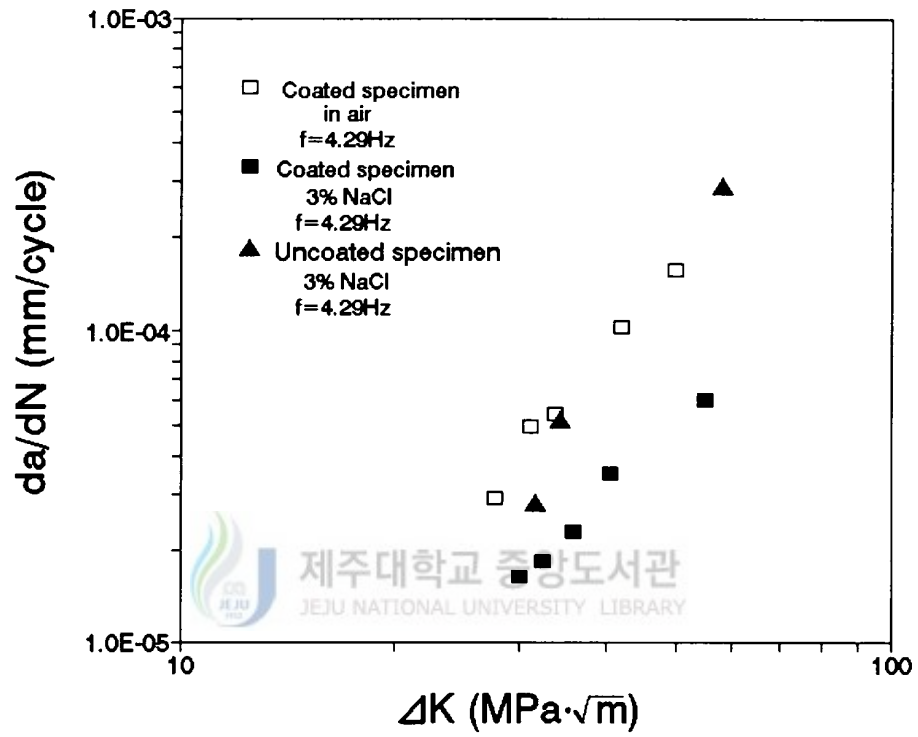


Fig. 16 Relationship between crack propagation rate and stress intensity factor range

2. 3 SGH41의 환경감응성

Fig. 17은 3% NaCl 수용액에서 도금된 SGH41의 시험편 및 도금 피복을 제거한 나재 시험편의 부식감응성 S 에 대한 응력 확대 계수 범위 ΔK 와의 관계를 나타낸 것이다. 부식감응성은 Fig. 16의 실험치에 의해 공기 중에서 균열 성장 속도 $(da/dN)_{air}$ 에 대한 3% NaCl 수용액 중에서 $(da/dN)_{corr}$ 의 비로 계산한 것이다. 즉, $S = (da/dN)_{corr} / (da/dN)_{air}$ 이다. 여기에서 $(da/dN)_{air}$ 는 부식의 영향을 받지 않은 것으로 간주하였다.

먼저 ΔK 의 대소에 따른 S 의 관계를 살펴보면, 나재 시험편과 도금된 시험편 모두 ΔK 값이 작은 영역일수록 고 ΔK 영역에서 보다 부식감응성이 크고, 도금된 시험편의 부식 감응성은 나재 시험편의 1/3정도이다. 그리고 ΔK 값이 큰 영역일수록 도금된 시험편보다 나재 시험편의 부식 감응성의 감소가 크다. 부식감응성이 ΔK 값이 작은 영역에서일수록 크게 나타나는 이유는 ΔK 값이 작은 영역, 즉 균열 초기 단계에서는 반복응력에 비해 부식의 영향이 더 민감하지만, ΔK 값이 크게 되는 영역, 즉 부식 피로 파괴 단계에서는 부식보다 반복응력의 영향이 더 커지기 때문이다.

그리고 도금의 유무에 따른 S 의 정도는 도금된 시험편이 나재시험편 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 유기 하였기 때문이다.

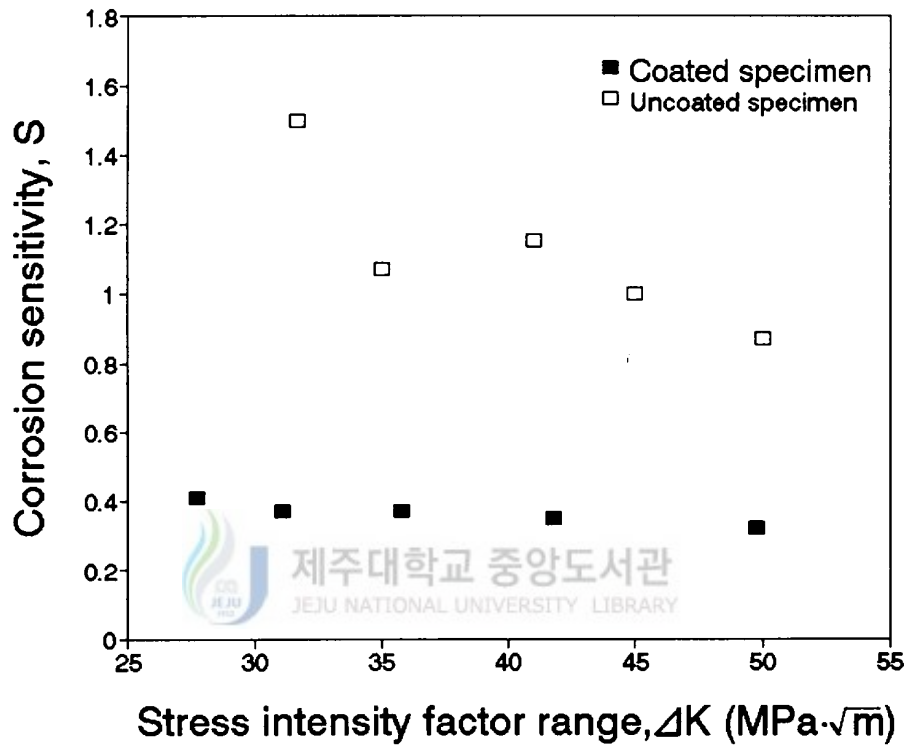


Fig. 17 Relationship between corrosion sensitivity and stress intensity factor range

2. 4 파단면 관찰

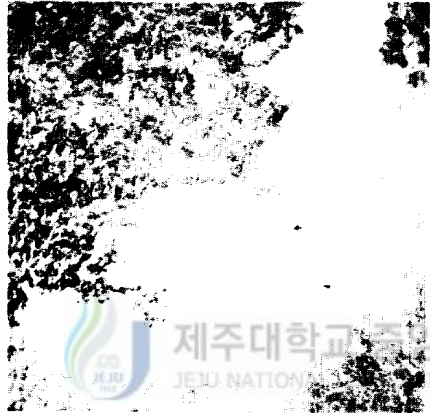
공기 중과 3% NaCl 수용액 중의 부식 피로 시험후 파단면에 대하여 전자현미경에 의하여 관찰한 결과는 Fig. 18에 나타내었다.

Fig. 18의 a는 공기중, b는 3% NaCl 중의 나재 시험편, c는 3% NaCl 수용액 중의 도금된 시험편의 파단면을 나타낸다.

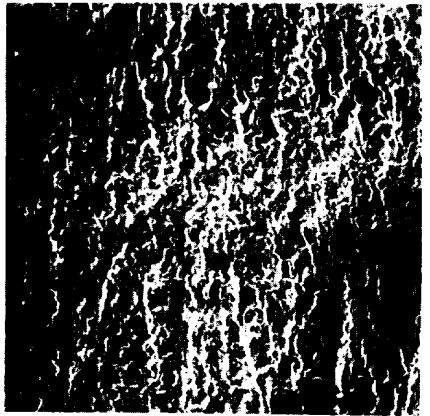
공기 중의 파단면은 입내연성파면을 나타내고 있고, 3% NaCl 중의 나재 시험편은 철의 부식 생성물이 파단면에 잔존되어 있는 상태로 보이고 있다. 한편 3% NaCl 수용액 중의 도금된 시험편은 아연의 부식 생성물이 파단면에 나타난 상태로 보인다. 이는 부식 용액 중의 나재 시험편은 부식에 의해 공기 중의 시험편 보다 균열 성장 속도가 가속됨을 나타내고 있다. 동일한 부식 환경 중에서의 도금된 시험편은 나재 시험편과 전혀 다른 양상 즉, 아연의 부식 생성물이 존재하고 있는데 이는 아연 도금층의 전기 방식 작용에 의해 철의 부식이 방지된 것과 아연의 부식 생성물에 의한 균열을 나타내고 있다. 따라서 앞에서 서술한 바와 같이 아연의 전기 방식 작용과 아연의 부식 생성물에 의해 도금된 시험편의 부식 피로 균열 성장 속도가 저하되는 현상을 나타내고 있다.



(c) 3% NaCl (coated specimen)



(b) 3% NaCl (Uncoated specimen)



(a) in air (coated specimen)

Fig. 18 Fractography of test specimen ($\times 40$)

IV. 결 론

퍼스널 컴퓨터와 비례전자밸브 및 유압 기기 등을 이용하여 유압 피로 시험기를 제작하고, 그 동적 특성을 조사하기 위하여 수치 시뮬레이션을 행했다. 그리고 이 자체 제작한 피로 시험기에 의하여 3% NaCl 수용액 중에서 SPH41의 부식 피로 균열 성장 특성에 대해 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 제작된 유압피로시험기는 컴퓨터에 의하여 제어할 수 있으며, 편진과 양진의 하중파형(정현파, 사각파, 삼각파)을 입력하여 피로시험을 할 수 있다.

2. 실린더의 변위가 끝났을 때 return부의 압력이 매우 빠른 속도로 떨어지기 때문에 빠른 피로 시험이 가능하며, 인장시와 압축시의 압력변위의 차를 없애기 위해서는 복동실린더를 사용하여야 한다.

3. 3% NaCl 수용액 중에서의 SGH41의 부식 피로 균열 성장 속도는 아연의 전기 화학적 부식 방지 작용과 부식 생성물에 의한 균열폐구현상으로 인하여 부식에 의해 가속된 나재 시험편 보다 저하한다.

4. 3% NaCl 수용액 중에서 SGH41 도금된 시험편과 나재시험편에 대한 응력 확대계수범위 ΔK 와 균열성장속도 da/dN 의 관계는 Paris [$da/dN = C(\Delta K)^m$]의 법칙에 따르고, 기울기인 지수 m 값은 도금된 시험편은 2.24이고, 나재 시험편은 3.66이다.

5. 응력확대계수범위 ΔK 값이 작은 영역에서는 도금된 시험편의 부식 감응성은 나재 시험편의 1/3 정도이며, ΔK 값의 전 영역에 걸쳐서 도금된 시험편의 부식감응성은 거의 변하지 않으나 나재 시험편의 부식감응성은 점차 저하하였다.

V. 참고 문헌

- Elber, W. 1971. "The Significance of Fatigue Crack closure". ASTM STP 486, 230-242.
- 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). 46, 412. 1337-1343.
- Gerberish. W. W, R. H. Van stone and A. W. Gunderson. 1982. "Fatigue Properties of fracture mechanics for selection of Metallic structural materials." ASTM. Metals park, Ohio, 65-67.
- 하 회 석, 이 성 근. 1993. "고장력강의 부식 피로 균열 전파에 미치는 하중파형의 영향과 양극 용해 기구의 역할". 한국해양공학회지. 7, 1147-155.
- 김 귀 식. 1987. "Corrosion Fatigue Crack Initiation Behavior of 80kg/mm² High-Tensile Strength Steel Weldment in Synthetic Sea Water". Journal of The Society of Materials Science Japan. 36, 401.141-146.
- 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関する研究". 日本機械學會論文集(A). 50, 456. 1453-1460.
- 이 상 열, 임 중 문, 임 우 조, 이 종 락. 1992. "해양 환경 중에서 자동차 프레임용 강재의 부식 피로 전파 거동에 관한 연구". 한국해양공학회지. 6, 2. 244-263.
- 西岡邦夫, 田中道七. 1985. "疲労基礎と設計への展開". 일본재료학회지. 35, 389. 121-122.

- 문한규, 방건웅, 김엄기. 1986. "피로 시험을 위한 MTS와 Micro computer 의 Interface". 대한기계학회 1986년도 추계 학술대회 초록집. 29-33.
- 吳世旭, 金在喆, 崔榮秀. 1987. "SS41의 부식피로균열 傳播特性에 미치는 3.5% NaCl 수용액의 影響." 한국해양공학회지, 1, 1. 111-119.
- 박응래, 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. 12, 1. 123-130
- Q & A. 1992. "海岸地帯の鋼構造物の防食法". Zairyo-to-Kankyo. 41. 199-200.
- 서창민, 강성수, 황남성, 오상섭. 1992. "아연도금강판의 점용접재의 피로 거동에 관한 연구". 대한기계학회논문집. 16, 8. 1503-1992.
- 송지호. 1990. "변동 하중의 피로 파괴". 대한기계학회지, 30, 2. 115-130.
- 高田, 高野, 仲田, 井關. 1993. "海洋地域における熔融亞鉛めき鋼の耐食性". 材料. 42, 472. 934-940.
- 北川英夫, 中曾根 祐司, 下平益夫. 1985. "高張力鋼平翳材の腐食疲勞における微小表面き裂の成長." 日本機械學會論文集, 51, 463. 587-595.
- 西見一郎. 1985. "最近の油壓サーボ試驗機と油壓裝置について". 日本油壓工業會, 油壓. 28,4. 29-35.
- 송지호, 김종한, 김정엽. 1989. "유사 랜덤 하중 파형 작성과 이를 이용한 랜덤 하중 하의 표면 피로 균열진전에 관한 기초적 검토" 대한기계학회논문집. 13, 1. 125-134.
- 菊川鎮, 城野政弘, 田中建一, 田畑文天, 村田洋一. 1980. "ミニコンプロタの利用にまろ 疲勞試驗機における計測の高精度自動化." 材料, 29. 1240-1246.
- Yagane. 1988. 破壊力學. 培風館. 31-36.

감사의 글

본 논문을 위해 성심으로 지도하여 주신 김귀식 교수님께 감사를 드리오며, 논문교열을 위하여 애써주신 김만수 교수님과 권기린 교수님, 그리고 항상 따뜻한 조언과 격려를 아끼지 않으신 허종철 교수님, 현명택 교수님, 임종환 교수님께도 감사 드립니다.

한편, 바쁘신 가운데도 많은 도움과 격려를 주신 한국기계연구소의 윤소남 박사님과 응용역학실험실 여러분, 전주공업기술원 관계자 여러분, 그리고 대학원 동기생 여러분께 감사를 드립니다. 또한, 실험장치를 제작하는데 도움을 주신 한림공고 기계과 선생님들과 성우공업사 문인보 사장님, 그리고 실험재료를 공급해주신 금정산업 김보균 사장님께도 감사드립니다.

끝으로 이 논문이 있기까지 변함없는 관심과 사랑으로 보살펴준 어머니와 장인·장모님께 깊은 감사의 마음을 전하며, 아울러 어려운 여건에서도 인내하며 도와준 사랑하는 아내 숙자와 귀여운 딸 은우, 회원, 아현과 함께 이 소중한 기쁨을 나누고 싶습니다.