누적 손상 이론을 이용한 단순 모사 하중 하에서의 피로 수명 추정에 관한 연구

(A Study on the Fatigue Life Prediction under the Simple Simulated Loads Using the Cumulative Damage Theory)

지도 교수 김 영식

1988년 12월 일

한국 해양 대학 선박 기계 공학과

권 영학, 임 균수, 노 시갑, 김 광환, 이 [illegible]

목 차

1 서 론

실험학적 피로 시험 결과를 이용하여 각종 실구조물의 피로수명을 예측하기 위해서는 우선, 실구조물에 반복부하되는 실동하중(service loads)을 일련의 절차를 통하여 실험실적인 단순하중의 조합들로 바꾸어야 한다. 또한, 이와 같은 단순 모사 하중(simulated load)하에서, 실구조물의 피로수명을 신뢰성 있게 추정할 수 있는 적절한 누적손상이론(cumulative damage theory)이 설정 되어야 한다.

이러한 누적손상이론은 palmgrem과 Miner에 의한 선형 누적 손상이론(linear cumulative damage theory)[1]이 최초로 제안된 이래, 지금까지 여러 연구자들에 의해 다수의 이론이 제안 되어져 있다.

본 논문에서는 이들 누적손상이론들 중 palmgren과 Miner에 의해 제안된 이론과, Landgraf에 의해 제안된 이론[2]에 의해, 단순 모사 하중 상태하에서의 피로수명을 저싸이클 피로시험 결과를 이용하여 추정하고, 이것을 실험치와 각각 비교하여 보았다.

또한, 부하 하중의 형상을 변화시켜, 이들 하중형상의 변화에 따른 피로수명의 변화를 관찰 하였으며, 하중형상의 변화에 따른 피로 파단면의 미시적 양상의 변화를 전자 현미경에 의해 관찰 하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 재료및 시험편

본 실험에 사용한 실험재료는 일반 용접구조물용 재료로서 널리 사용 되고 있는 SM 41 B 강재로서, 그 화학적 성분 및 기계적 성질을 Table 1, Table 2에 각각 나타내었다.

Fig.1은 본 실험에서 사용한 시험편의 형상 및 칫수를 나타내고 있다. 시험편은 판 두께 25 mm인 강판의 중앙에서 압연방향과 평행하게 채취하였다. 이와 같이 채취된 시험편은 선반 가공 후 # 1200번 까지의 사포에 의해 원주 방향으로 연마 되었으며, 평행부와 R부는 산화크롬으로 버핑(buffing) 연마 가공을 행하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 실험 장치

실험에 사용한 시험기로서는 정적 최대 하중 250 KN, 동적 최대 하중 ±100 KN 용량의 폐루프 서보 유압식 재료 시험기 (closed loop servo-hydraulic testing machine)로서, 이 장치의 개략을 photo.1에 나타내었다.

2.2.2 하중 부하 양식

Fig. 2는 저 사이클 피로수명 곡선을 구하기 위해, 한 시험편에 대하여 시험편의 축 방향으로 일정의 전 변형율 진폭 (total strain amplitude)을 반복 부하하는 다수 시험법 (Companion specimen method)[8]의 하중부하 양식을 나타 낸 것이다.

또한, 피로수명추정을 위해 사용된 단순 모사하중의 형태는, Fig. 3에 나타내는 바와같이, 진폭 변동법 (Incremental step test)에 의한 삼각파형,

Sine파형, 사각파형으로 하였으며, 각각의 하중 형태에 있어서 한 블록(block)내의 전 변형률진폭의 구성은 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0%로 하였다.

전 실험을 통하여 변형률비(Strain ratio ; R_ϵ)는 -1인 완전 양진(fully reversed)으로 하였으며, 부하하는 변형률 속도(strain rate)는 0.005/sec로 일정하게 하였다.

본 실험은 실온의 공기 중에서 행하였으며, 실험 결과들은 SI 단위계로 정리되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 부하 파형의 변화에 따른 응력-변형률 거동의 변화

Fig.4, Fig5, Fig6 은 한 블록 내에서의 전 변형률 진폭을 각각 0.2, 0.4 0.6, 0.8, 1.0%의 5 가지로 구성하고, 파형만 Fig. 3 (a), (b), (c)에 나타내는 바와 같은 삼각파형, Sine파형, 사각파형으로 하여, 변동진폭법에 의한 피로하중을 부하하였을 때의 블록수 (number of block)의 변화에 따른 응력-변형률 히스테리시스 루프를 나타낸 것이다.
모든 조건에서 반복 블록수의 증가에 따라 히스테리시스 루프의 세로축인 응력값이 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig.7은 삼각파형으로 변동진폭법을 이용하여 실험을 행하였을 시 각각의 전 변형률 진폭에 대하여, 히스테리시스 루프로 부터 얻어진 블록수의 변화에 따른 응답응력의 변화 양상을 나타낸 것이다. $\varepsilon ta = 0.2\%$에 대한 응력응답은 블록수가 증가함에 따라 조금씩 감소하는 반복연화가 발생함을 알 수 있다. 반면 $\varepsilon ta > 0.2\%$인 경우에 있어서의 응력 응답은 블록수의 증가에 따라 파단수명에 가까운 영역을 제외하면 거의 직선적으로 변화함을 알 수 있다.

Fig.8은 Sine파형으로, 변동진폭법을 이용하여 실험을 행하였을 시, 각각의 전 변형률 진폭에 대한 블록수의 변화에 따른 응답응력의 변화양상을 나타낸 것이다. $\varepsilon ta = 0.2\%$에 대한 응력응답은 전 수명에 걸쳐 거의 일정 함을 알 수 있다. 반면, 고 변형률역에서 수명의 초기에 반복연화가 발생한 후, 블록수의 증가에 따라 서서히 반복경화 되고 있음을 알 수 있다.

Fig.9는 사각파형으로 실험을 행하였을 시 블록수의 변화에 따른 응답응력의 변화양상을 나타낸 것이다.

Fig.10은 각각의 파형에 있어서 $\varepsilon ta = 0.2\%$와 $\varepsilon ta = 1.0\%$에 대한 블록수의 변화에 따른 응답응력의 변화양상을 나타낸 것이다. $\varepsilon ta = 0.2\%$인 조건에서의

응답응력은 사각파형, sine 파형, 삼각파형의 순으로 낮아진다. 한편, $\varepsilon_{ta}=1.0\%$인 조건에서는 사각파형, 삼각파형, sine 파형의 순으로 낮아지며, 이는 경우에 있어서나 사각파형의 응답응력이 가장 높음을 알 수 있다.

3.2 단순 인장곡선과 반복 응력-변형율 곡선

Fig. 11은 SM 41 B 강재의 단순 인장곡선과 부하파형에 따른 반복 응력-변형율 곡선을 각각 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타내져 있는 단순 인장곡선은 피로시험을 행한 시험편과 동일한 시험편을 3%까지 인장 변형 시켰을 때의 응력-변형율 곡선 중 일부를 나타낸 것이다. 한편, 반복 응력-변형율 곡선 중의 각 점들은 각각의 변형율 조건에 대한 응답응력 중 파단 블록수의 1/2인 블록수에서의 응력값을, 그때의 변형율에 대한 응력값으로 취하여 나타낸 것이다. 그림에 나타내져 있는 바와 같이 반복 응력-변형율 곡선 모두는 단순인장곡선의 상부에 존재함을 알 수 있으며, 사각파형 부하시의 반복 응력-변형율 곡선이 가장 상부에 존재하고 있음을 알 수 있다.

3.3 누적손상이론을 이용한 피로수명 추정

3.3.1 저 싸이클 피로수명 곡선

Fig. 12는 수명추정의 기초 데이타로 제공된 SM 41 B 강재의 저 싸이클 피로수명곡선인 $\varepsilon_{ta}-2N_f$ 곡선을 나타내고 있다.[4] 여기서 $2N_f$는 파단까지의 역전수 (number of reversal)를 나타낸다. $\varepsilon_{ta}-2N_f$ 관계는 Basquin eq.[5]과 Manson-Coffin[6]식으로 부터 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_{ta}=\frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^{-b}+\varepsilon_f'(2N_f)^{-c} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

(단 σ_f', E, b, ε_f', c는 각각 실험으로 부터 얻어지게 되는 계수 및 지수이다.)
실험결과를 이용하여 식(1)의 각 계수 및 지수를 구하면 Table 3으로 정리된다.

이와 같은 계수 및 지수는 Landgraf의 누적 피로 손상이론에 의해 수명추정을 행할때 이용된다.

3.3.2 선형 누적 손상이론을 이용한 피로수명 추정

Palmgren과 Miner에 의한 선형 누적 손상 이론에서 어떤 임의의 변형률 $(\varepsilon_{ta})_i$가 1 싸이클 부하될때, 이것에 의해 야기되는 손상량을 D_i라 하면

$$D_i = \frac{1}{(2N_f)_i} \quad \cdots\cdots\cdots (2)$$

로 정의된다. (단, 여기서 $(2N_f)_i$는 $(\varepsilon_{ta})_i$ 부하시에 시험편의 파단 역전수 (number of reversal)로서 앞의 3.2.1 절의 지 싸이클 피로 수명곡선으로 부터 얻어진다)

여기서, 전 수명동안 $(\varepsilon_{ta})_i$가 부하된 싸이클 수를 n_i라 하면 $(\varepsilon_{ta})_i$에 의해 야기되는 손상량 ΣD_i는

$$\Sigma D_i = \frac{(2n_i)}{(2N_f)_i} \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

로 표시된다.

따라서, 전 부하 이력 (load history)에 대한 전 손상량 $\Sigma(\Sigma D_i)$는

$$\Sigma(\Sigma D_i) = \frac{2n_1}{(2N_f)_1} + \frac{2n_2}{(2N_f)_2} \cdots\cdots + \frac{2n_i}{(2N_f)_3} \cdots\cdots (4)$$

로 된다.

선형 누적 손상이론에서는 이와 같은 전 손상량 $\Sigma(\Sigma D_i)$가 1 될 때 파괴가 발생하는 것으로 가정된다.

즉, 파괴의 규준은

$$\Sigma\left(\Sigma D_i\right) \doteq 1 \quad \text{-----------------} (5)$$

로 된다.

이와 같은 방법에 의해 피로 수명을 추정한 결과를 실험을 행하여 얻어진 실제 피로 수명과 비교하여 Table 4에 나타내었다.

단, 이때 실험에 사용된 파형은 Fig. 3 (a)에 나타낸 진폭변동법의 삼각파형이었다.

3.3.3 Landgraf의 누적 손상 이론을 이용한 피로수명 추정

Landgraf의 누적 손상 이론에 의한 손상 파라미터 (damage parameter)는 전술한 저 사이클 피로 수명곡선인 (1)식으로 부터 얻어진다.

여기서, 임의의 $(\varepsilon_{ta})_i$ 부하시 단위 역진수당 재료 내부에 누적되는 손상량 D_i는 부록에 수록된 유도 과정에 의해

$$D_i = \frac{1}{(2N_f)_i} = \frac{1}{2N_t}\left(\frac{(\varepsilon_{pa})_i}{(\varepsilon_{ea})_i}\right)^{\frac{1}{b-c}} \quad \text{-----------------} (6)$$

로 된다.

즉, $(\varepsilon_{ta})_i$ 부하시, 그때의 탄성 변형율 성분 $((\varepsilon_{ea})_i)$과 소성 변형율 성분 $((\varepsilon_{pa})_i)$만 알 수 있으면, 손상량 D_i는 구할 수 있다.

파단의 규준은 전 하중이력에 대한 전 손상량 ΣD_i가 1일 때 이므로

$$\Sigma D_i = \Sigma\frac{1}{(2N_f)_i} = \frac{1}{2N_t}\,\Sigma\left(\frac{(\varepsilon_{pa})_i}{(\varepsilon_{ea})_i}\right)^{\frac{1}{b-c}} = 1 \quad \text{-----------} (7)$$

로 된다.

이와 같은 방법에 의해 피로 수명을 추정한 결과를 Table 5에 나타내었다.
이상에서 알 수 있는 바와 같이 Landgraf의 손상 이론에의해 얻어진 추정수명이 실제의 수명에 더욱 가까우며 이러한 결과로부터, 본 실험에 적용된 모사피로 하중에 대하여 Landgraf의 누적 손상 이론이 선형 누적 손상 이론보다 더욱 정확한 추정수명을 준다는 것을 알 수 있다.

3.4 부하파형의 변화에 따른 파단수명의 변화

Table.6은 Fig.3 (a), (b), (c)에 나타내져 있는 바와 같은 삼각파형, Sine파형, 사각파형의 변동진폭법의 단순하중을 각각 부하하였을 시의 시험편의 파단수명을 비교하여 나타낸 것이다.
삼각파형과 Sine파형 부하시의 파단수명은 거의 동일하게 나타나지만, 사각파형 부하시에는 앞의 두 가지 파형에 의한 파단수명이 현격히 저하한다는 사실을 알 수 있다.

3.5 피로파단면의 파면학적 고찰

photo.2는 다수시험법에 의해 $\varepsilon_{ta}=0.2\%$, $\varepsilon_{ta}=1.0\%$를 각각 부하하여 파단시킨 파면의 거시적인 양상을 나타낸 것이다. 사진으로 부터 알 수 있는 바와 같이, ε_{ta}가 커질수록 파면은 거칠어 지며, 파면상에 나타나는 스텝(step)의 수도 ε_{ta}가 커질수록 많다짐을 알수 있다.

photo.3은 다수시험법에 의해 $\varepsilon_{ta}=0.2\%$, $\varepsilon_{ta}=1.0\%$를 각각 부하하여 파단시킨 파면의 미시적인 양상을 나타낸 것이다.

$\varepsilon_{ta}=0.2\%$인 경우, 파단면은 스트라이에이션(striation)의 형성이 지배적임을 알수 있다.

반면, $\varepsilon_{ta}=1.0\%$인 경우, 파면상에는 스트라이에이션보다는 러브마크(rub mark)와 타이어 트랙(tire track)의 형성이 지배적이게 됨을 알 수 있다.[5), 6)]

photo.4는 진폭변동법(incremental step test)에 의해, 부하파형을 각각 삼각파형, Sine파형, 사각파형으로 하여 피로 파단 시켰을 시의 파단면의 거시적인 양상을 촬영한 사진이다. 부하파형의 변화에 따른 거시적 파면 양상의 변화는 관찰 할 수 없었다.

Photo. 5는 위의 photo. 4 파면을 각각 확대한 파단면의 미시적인 양상을 나타낸 것이다. 삼각파형과 sine 파형의 하중을 부하하였을 시의 파단면의 양상은 거의 동일하게, 리벙과 타이어 트랙, 그리고 스트라이에이션이 혼재된 상태로 나타났다. 반면, 사각파형의 하중을 부하한 조건의 파면상에서는, 이들 이외에 Serrated한 파면이 나타나는 것은, 사각파형의 하중 부하 조건이 충격하중의 양상을 동반함으로 인해, 재료의 변형속도가 하중의 부하속도를 따르지 못하기 때문으로 생각되며, 이의 결과로 피로수명에 있어서도 앞의 삼각파형 또는 sine 파형 부하시 보다 훨씬 단축되는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 SM 41 B 강재에 실험을 통해 단순 모사 피로하중을 부하하여 피로수명을 구하고, 이 실험 결과를 기존의 2가지의 누적 손상 이론에 의해 추정된 피로 수명과 비교, 고찰 하였다. 또한, 부하파형을 삼각파형, sine파형, 사각파형으로 각각 변화시켜, 이들 부하파형의 변화에 따른 수명의 변화를 관찰 하였으며, 이들 피로 파단면의 미시적인 양상도 더불어 관찰 하였다.

이상의 실험을 행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 진폭 변동법을 이용하여 삼각파형, sine파형, 사각파형의 피로 하중을 각각 부하하는 경우 SM 41 B 강재의 반복 응력-변형율 곡선은, 단순 인장 곡선 보다 상부에 위치하여 반복 경화 거동을 나타낸다.

2. 선형 누적 손상 이론에 의해 얻어진 추정수명 보다는 Landgraf의 누적 손상 이론에 의해 얻어진 추정수명이 실험치에 더욱 접근 했다.

3. 부하파형을 삼각파형, sine파형, 사각파형으로 하여 실험을 행한 결과, 삼각파형, sine파형 부하시의 피로 수명은 거의 동일 하였으나, 사각파형 부하시의 피로수명은 현저히 단축 되었다.

4. 다수 시험법에 의해 파단된 파면을 관찰한 결과, 파단면은 저 변형율 부하시에는 스트라이에이션이, 고 변형율 부하시에는 리넹과 타이어 트랙의 형성이 지배적 이었다.

5. 진폭 변동법에 의해 부하파형을 삼각파형, sine파형, 사각파형으로 하여 파단시킨 파단면을 관찰한 결과, 삼각파형, sine파형 부하시의 파단면 양상은 거의 비슷 하였으나, 사각파형 부하시에는 앞의 두 파형에 비해 더욱 serrated한 파면 양상을 띄게 하였다.

〈 참고 문헌 〉

1) Gurney, T., R., Fatigue of welded structures, cambridge univ. press, pp. 368 ~ 369, 1979

2) Landgraf, R., W., Cumulative fatigue damage under complex strain histories, ASTM STP 519, pp. 213 ~ 228, 1973

3) Crews, J., H., Hardrath, H., F., Experimental Mechanics, vol. 23, pp. 318 ~ 320

4) 노재충, 가공공정이 다른 두 종류의 저 탄소강에 대한 저 사이클 피로특성에 관한 연구, 한국 해양 대학, 석사논문, 1988

5) Fuchs, H., O., Stephens, R., I., Metal fatigue in engineering, A wiley interscience pub., pp. 56 ~ 57, 1980

6) Smith, R., W., Hirschberg, M., H., and Honson, S., S., Fatigue behavior of meterials under strain cycling in low and intermediate life range, NASA TND-1574, 1963

7) ASM, Metal Handbook, Fractography and atlas of fractographs (8th ed.), 1974

8) Hotta, T., Ishiguro, T., et al., Fractographic studies on the low cycle fatigue of steels, cracking and fracture in welds, pro of 7th Int. sym. of JWS

〈부 록〉

- Landgraf의 damage parameter의 유도

저 사이클 피로 곡선으로 부터

$$\varepsilon_{ta} = \frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^b + \varepsilon_f'(2N_f)^c \quad \text{-------------} (1)$$

여기서 ε_{ta} : 전 변형률 진폭 (total strain amplitude)

$2N_f$: 파단 역전수 (fatigue life in reversal to failure)

σ_f', E, b, ε_f', c : 저 사이클 피로 시험으로 부터 얻어지는 상수

(1)식을 $(\sigma_f'/E)\cdot(2N_f)^b$로 나누면

$$\frac{E\cdot\varepsilon_{ta}}{\sigma_f'(2N_f)^b} = 1 + \frac{\varepsilon_f' E}{\sigma_f'}(2N_f)^{c-b} \quad \text{-------------} (2)$$

여기서 $\dfrac{E}{\sigma_f'(2N_f)^b} = \dfrac{1}{\varepsilon_{ea}}$

$$\frac{\varepsilon_f'\cdot E}{\sigma_f'} = \frac{1}{2N_t}$$

$2N_t$: 천이점에서의 파단 역전수

$$\therefore \frac{\varepsilon_{ta}}{\varepsilon_{ea}} - 1 = \left(\frac{2N_f}{2N_t}\right)^{c-b} \quad \text{-------------} (3)$$

$$\frac{\varepsilon_{pa}}{\varepsilon_{ea}} = \left(\frac{2N_f}{2N_t}\right)^{c-b}$$

$$\therefore D = \frac{1}{2N_f} = \frac{1}{2N_t}\left(\frac{\varepsilon_{pa}}{\varepsilon_{ea}}\right)^{\frac{1}{b-c}}$$

Table 1. Chemical compositions of test materials.

Materials	Chemical composition (wt. %)								
Desig.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ceq
SM 41 B	0.13	0.28	1.0	0.014	0.004	-	-	-	0.303

Table 2. Mechanical properties of test materials.

Materials	Gauge Length (mm)	Yield Stren. (MPa)	Tensile Stren. (MPa)	Elonga-tion (%)	Red. of Area (%)
SM 41 B	200	289.1	426.6	33	

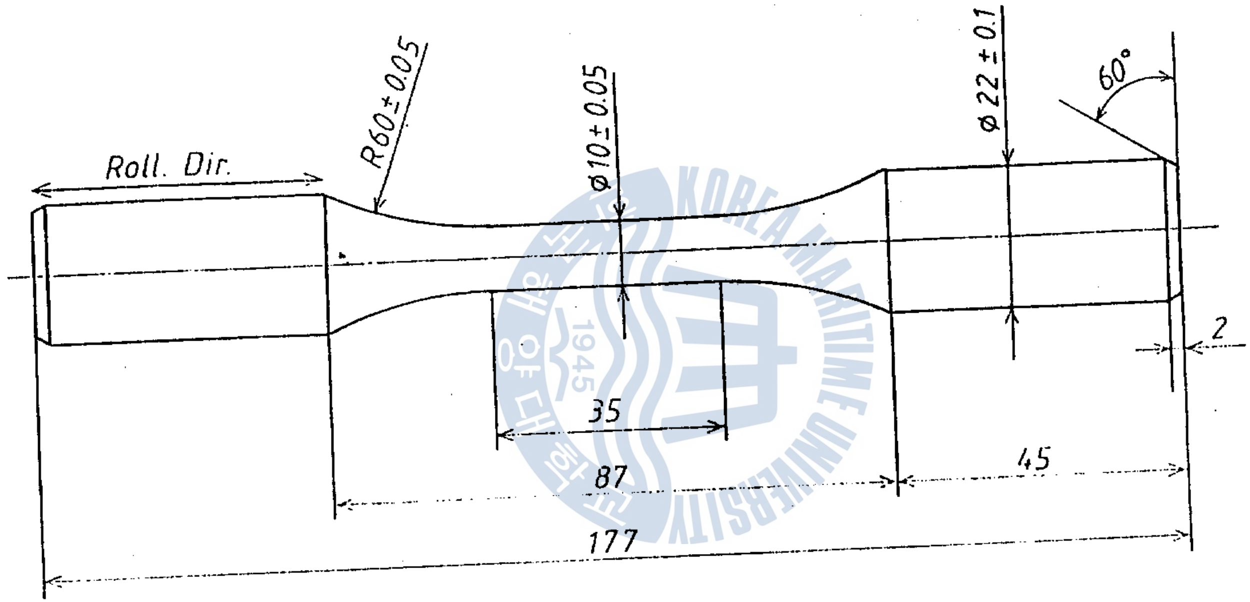


Fig.1. Configuration & dimensions of specimens.

Phototo.1. General views of material testing machine.

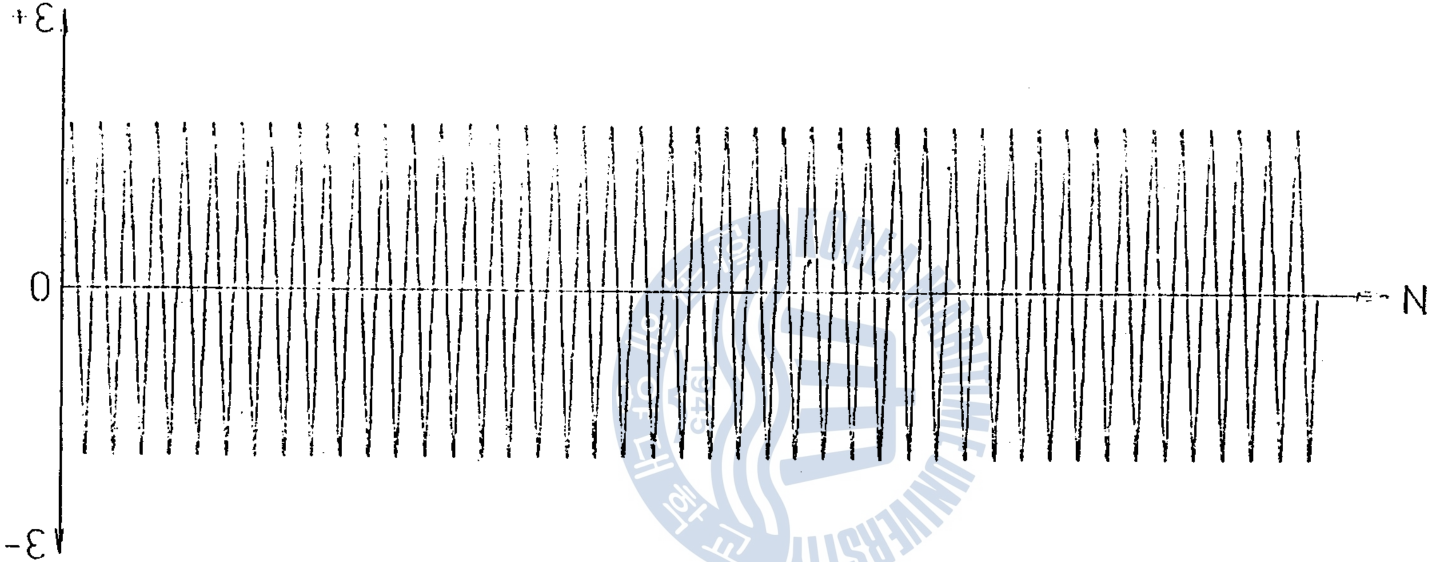
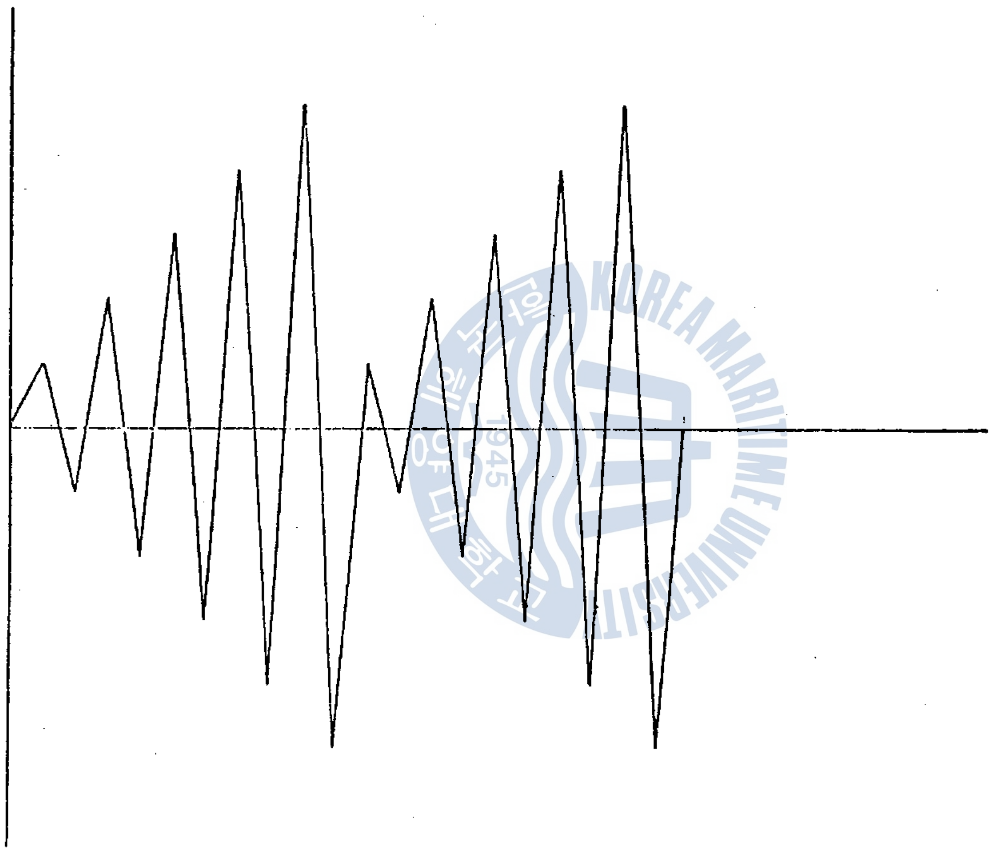
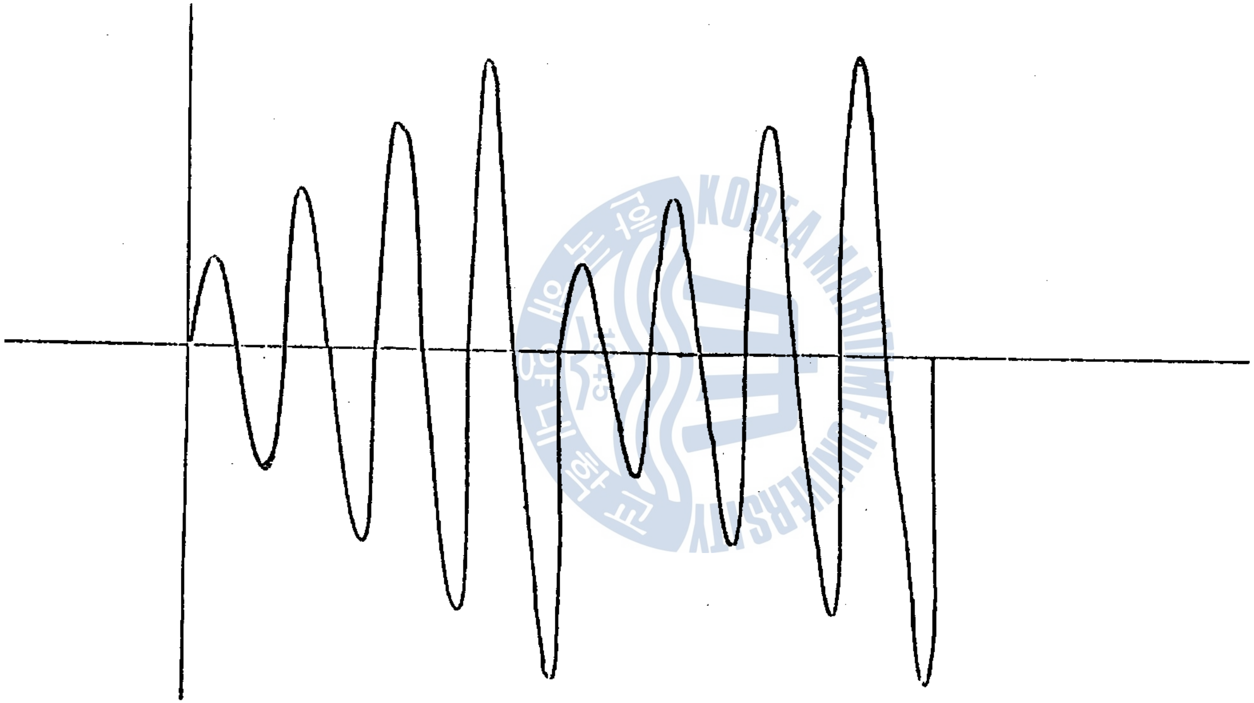


Fig. 2 Type of control condition. (companion specimen method)

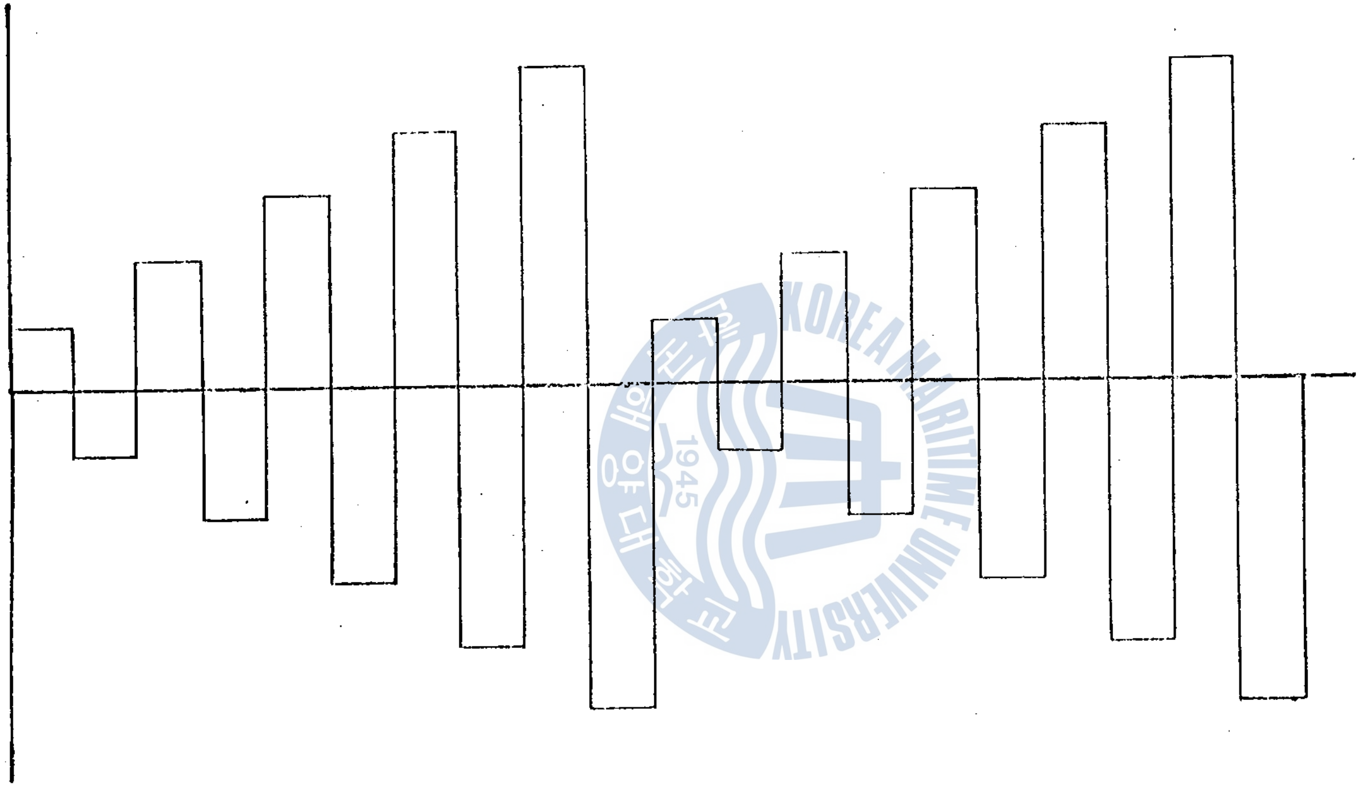


(a) Incremental Triangular waveform



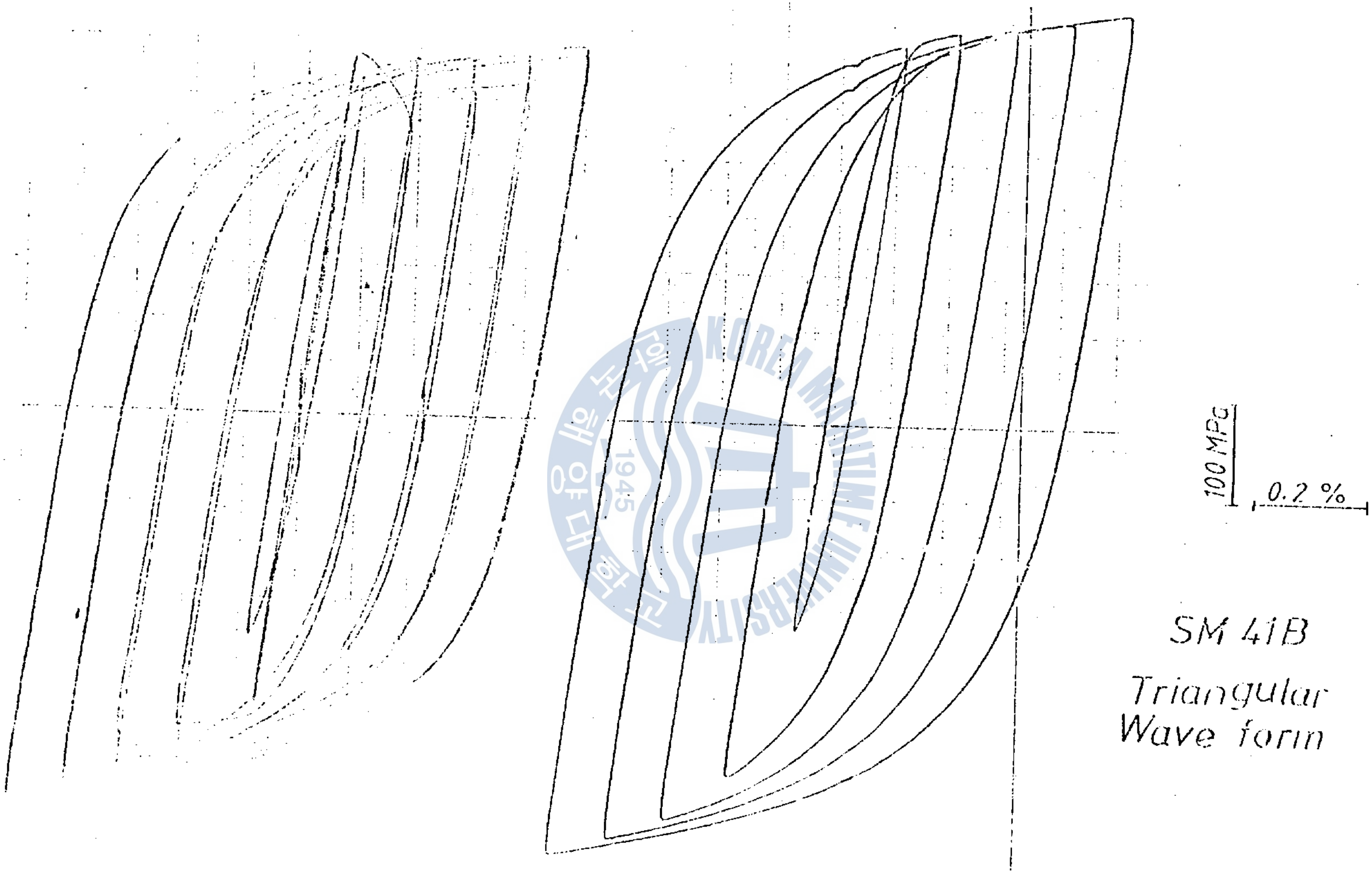
(b)

Incremental sine waveform



(c) Incremental Square waveform

Fig. 3 Types of the simulated load



(1 loop)　　(250 loop)

Fig. 4 Stress-stain hysteresis loops (Incremental step)

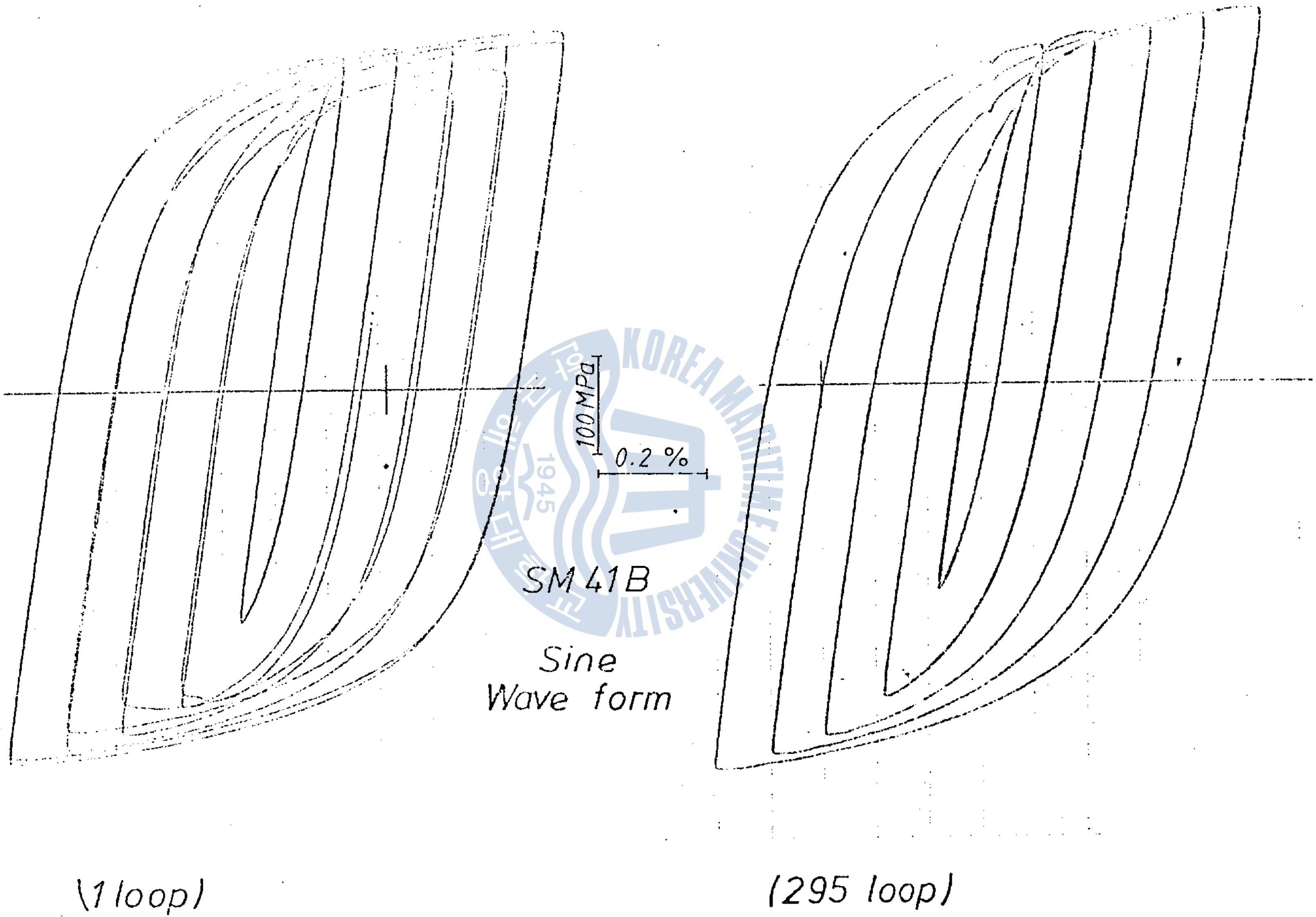


Fig. 5 Stress–strain hysteresis loops (Incremental step)

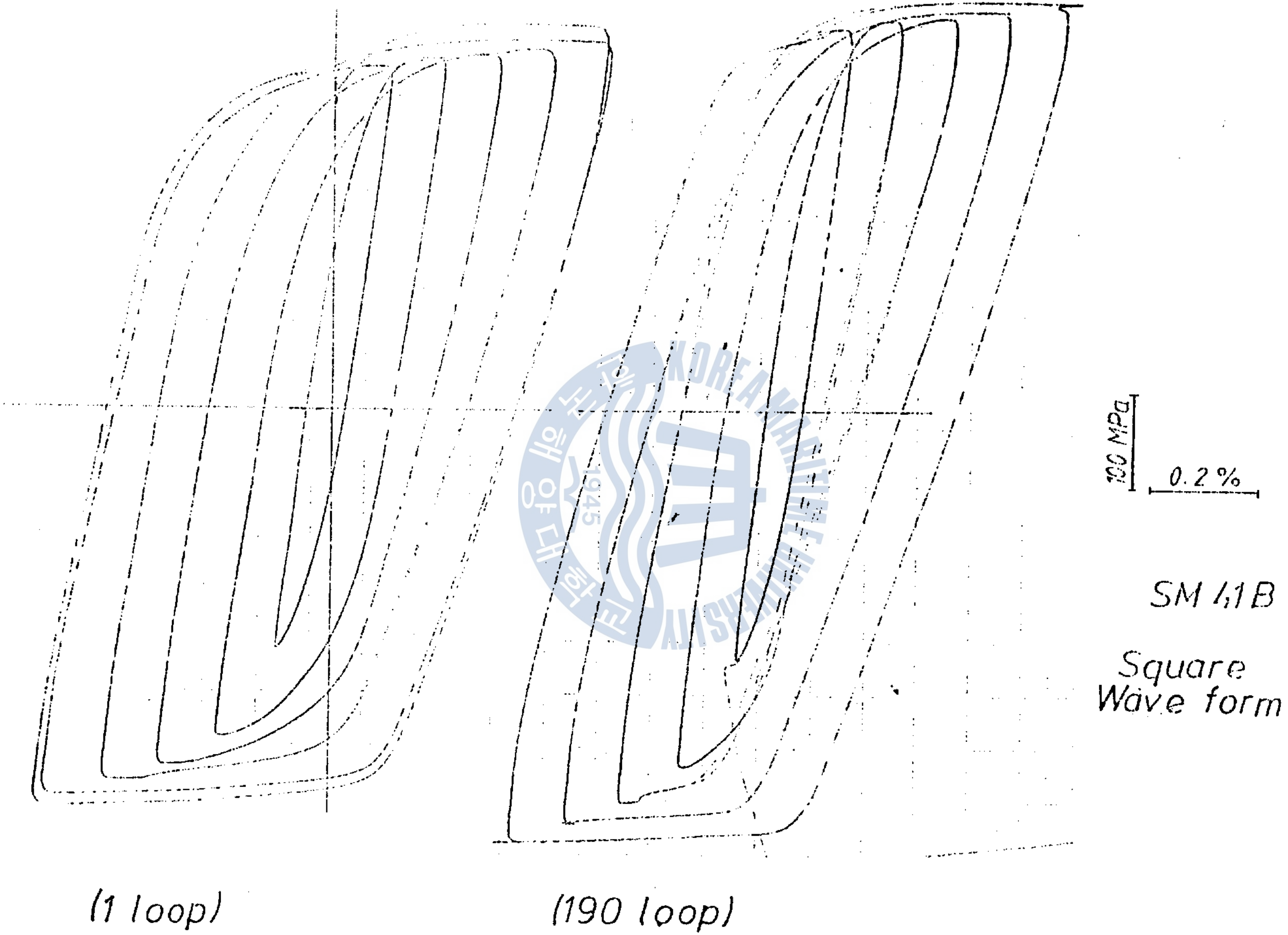


Fig. 6 Stress–strain hysteresis loops (Incremental step)

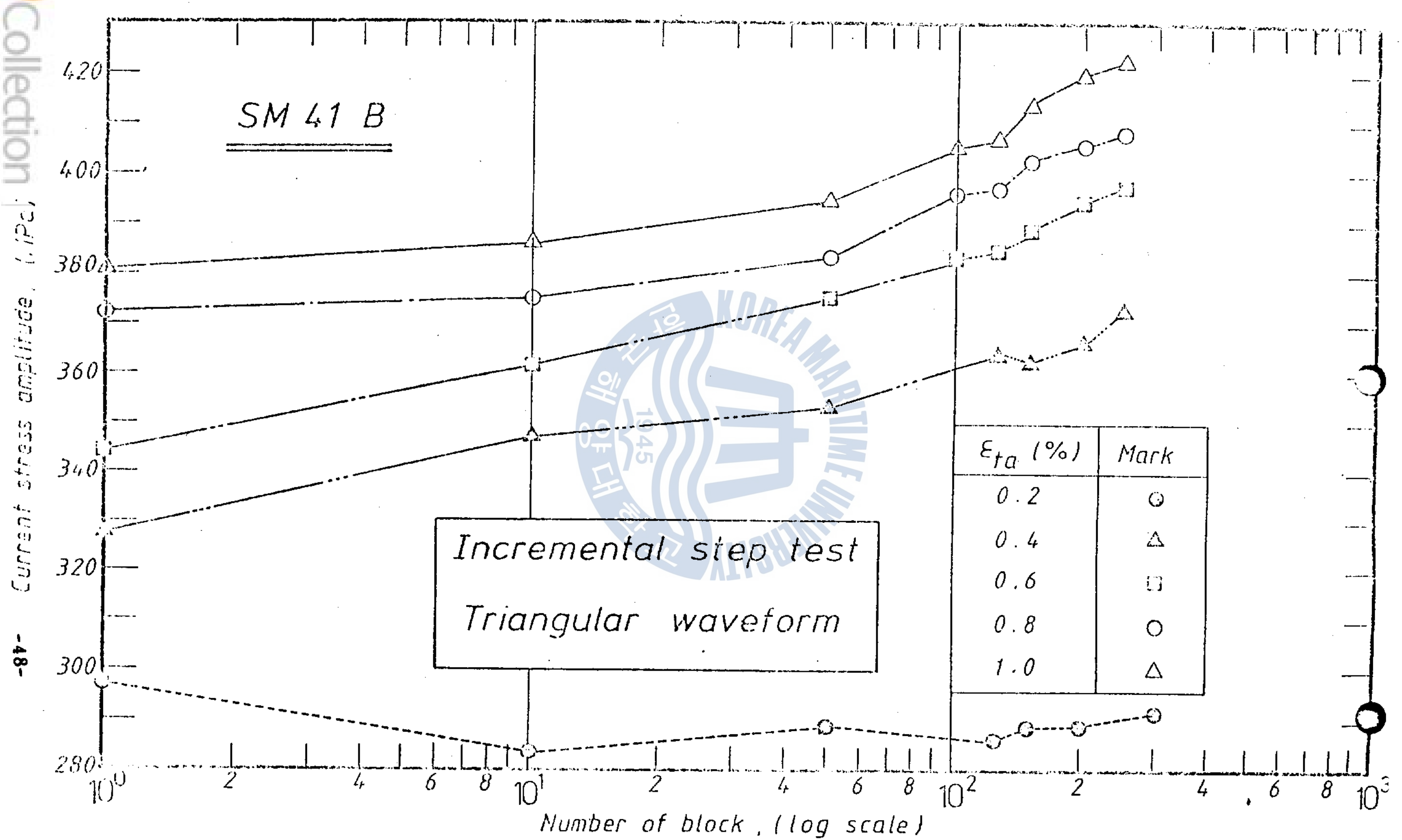


Fig. 7 Variation of cyclic stress amplitude with the change of block in incremental step test.

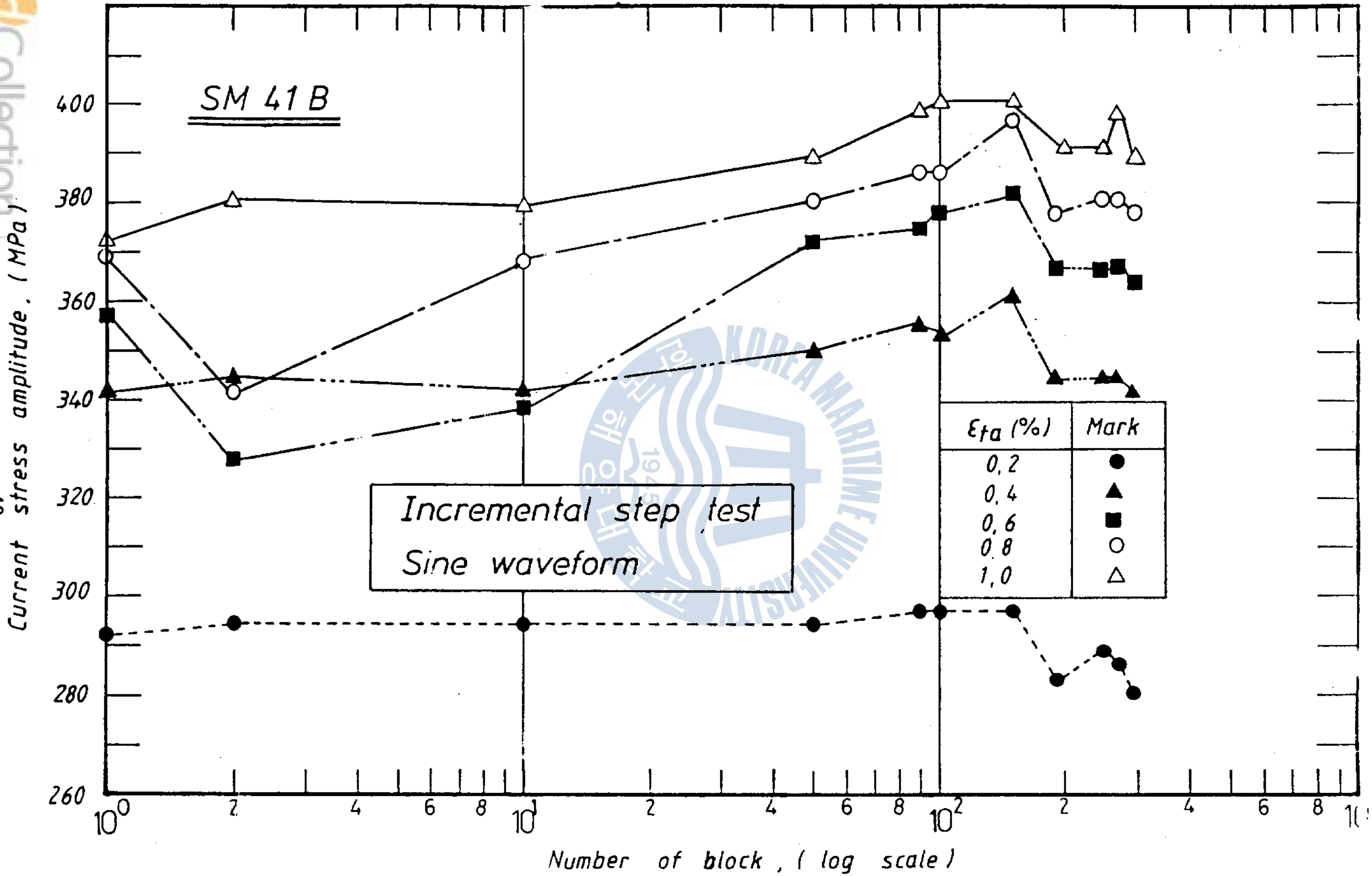


Fig. 8 Variation of cyclic stress amplitude with the change of block in incremental step test.

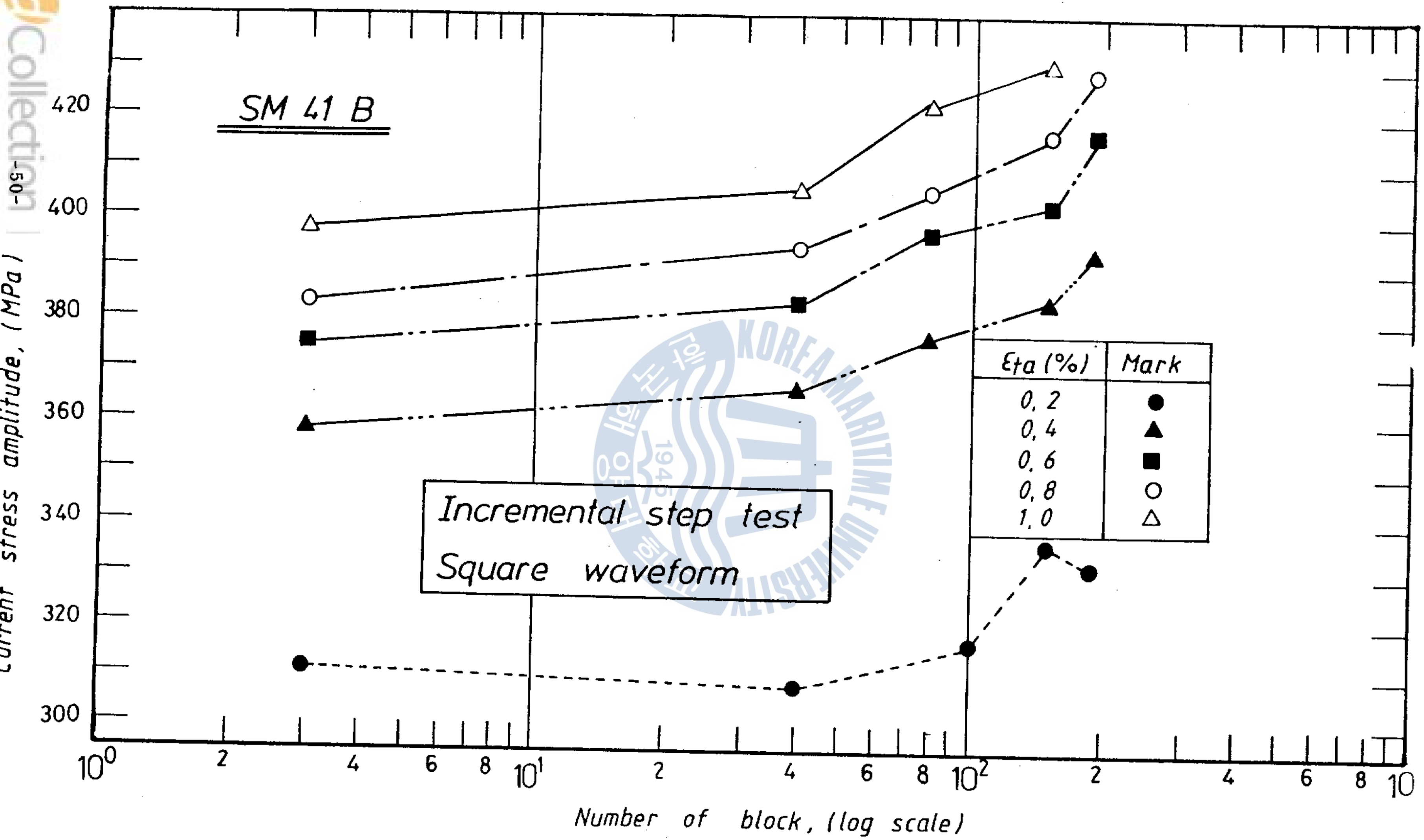


Fig. 9 Variation of cyclic stress amplitude with the change of block in incremental step test.

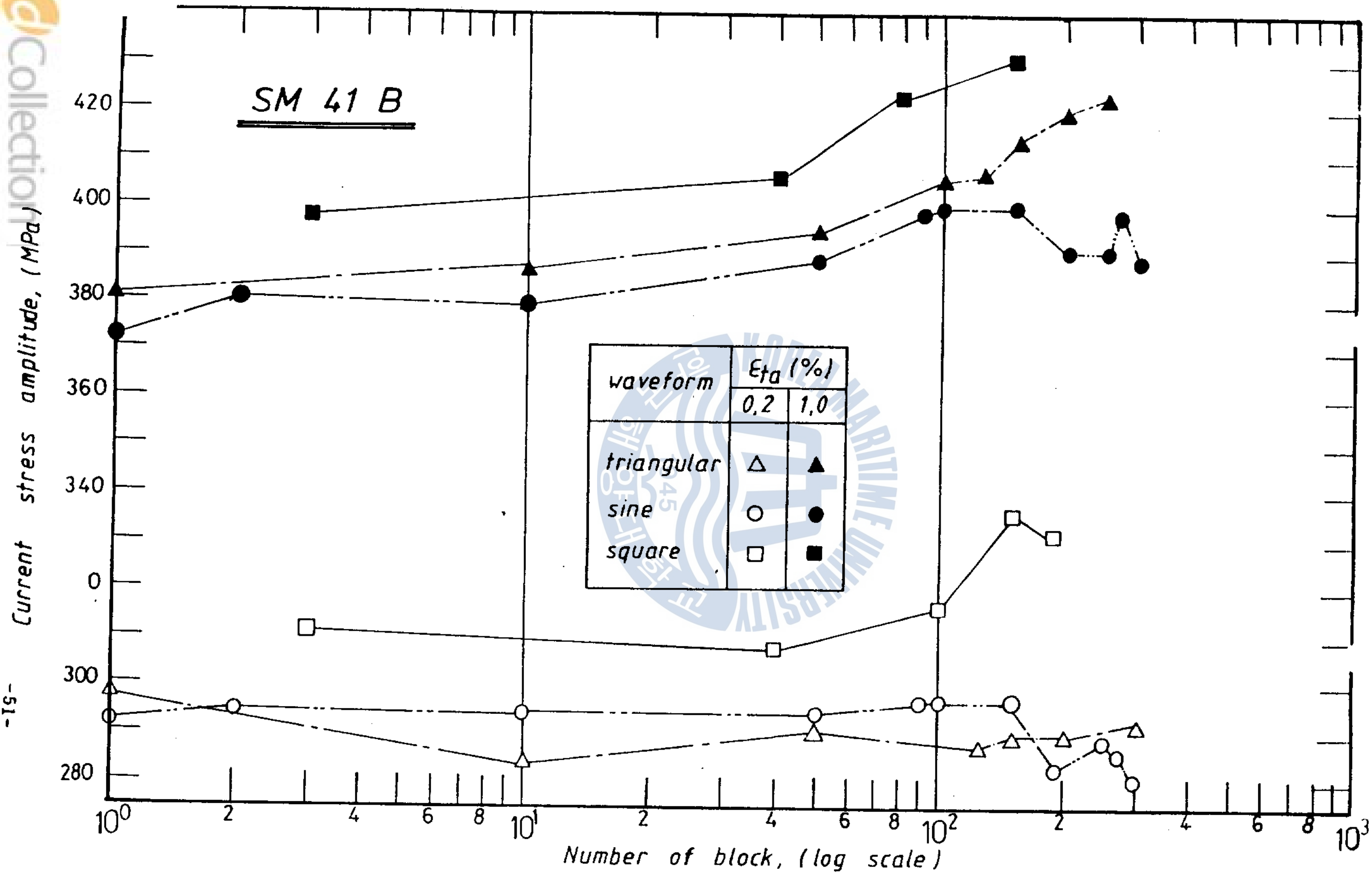


Fig. 10 Comparison of cyclic stress amplitude with the change of load waveform

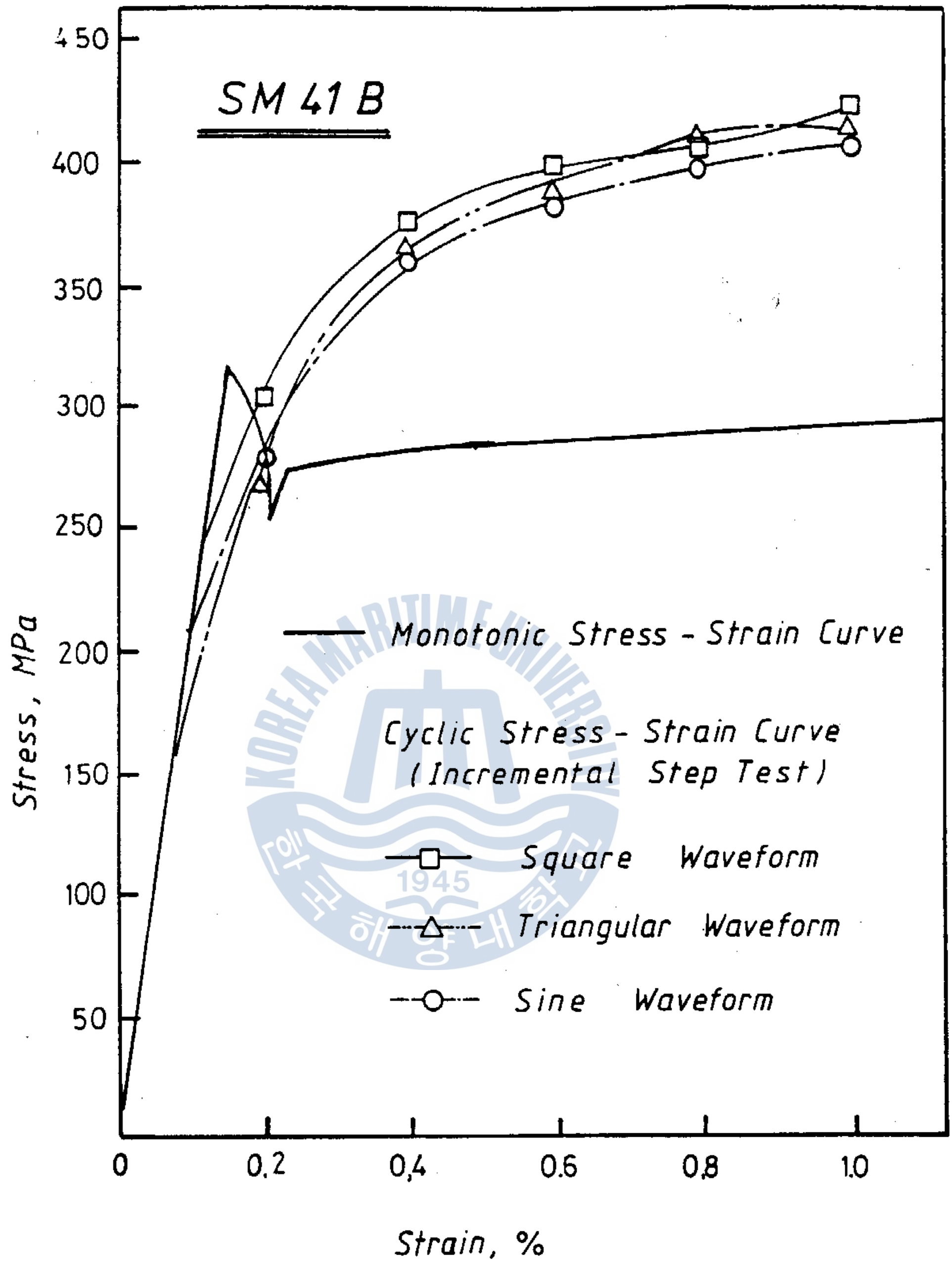


Fig.11 Comparison of Monotonic & Cyclic stress - strain behavior

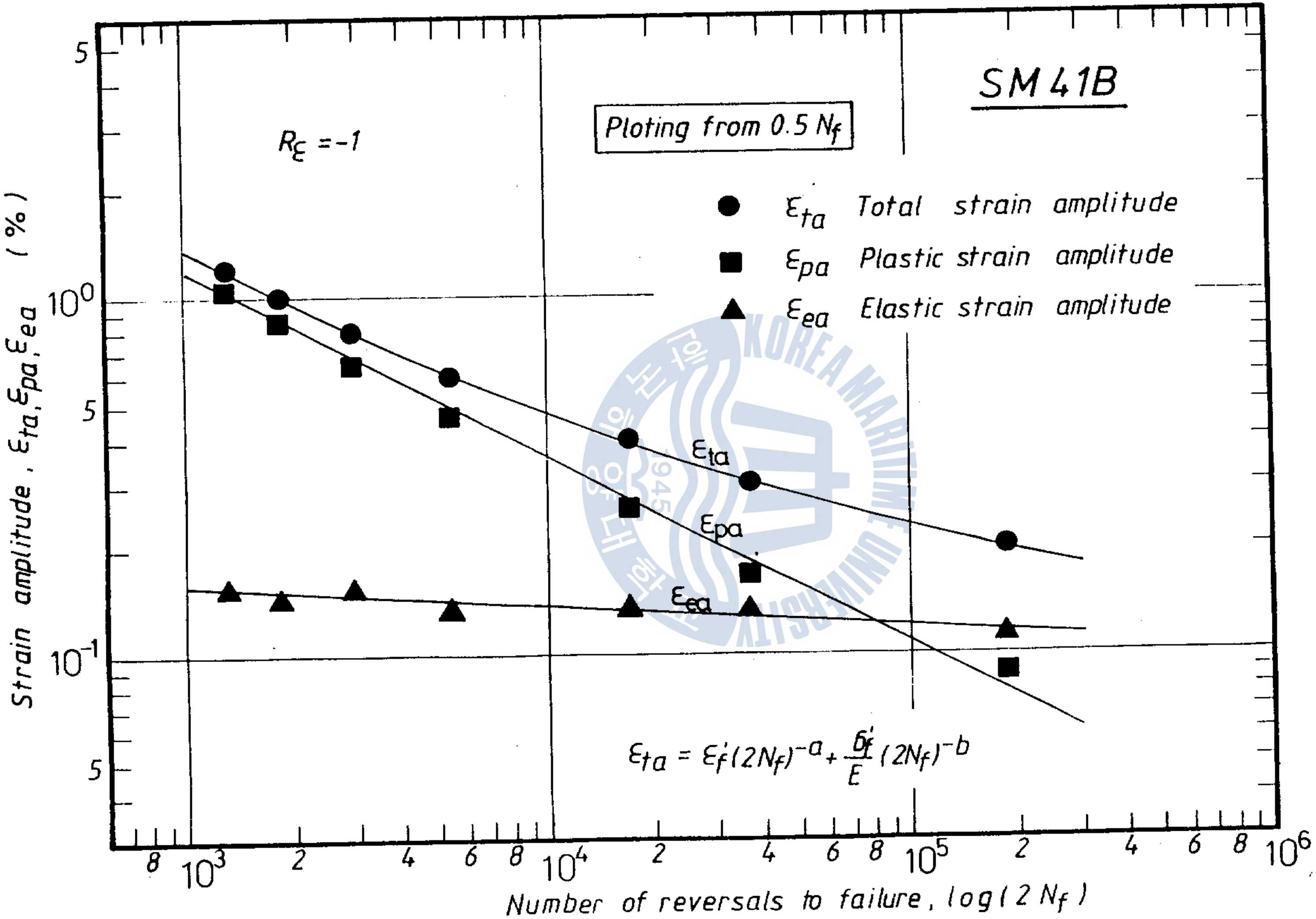


Fig.12. Low cycle fatigue strain-life curve (SM41B, $R_\varepsilon = -1$)

Table 3. Coefficients & exponents of L.C.F Eq.

Material	ε_f'	c	σ_f'/E	b
SM41B	0.351	0.498	0.00237	0.06
SF45A	0.279	0.478	0.00342	0.067

Table. 4

Prediction of life by linear damage theory

Eta	2Nf	Di
0.2%	185000	0.000005405
0.4%	17000	0.000058824
0.6%	5450	0.00018349
0.8%	2900	0.00034483
1.0%	1850	0.00054054

$$\sum D_i = D_{0.2} + D_{0.4} + D_{0.6} + D_{0.8} + D_{1.0} = 0.0011331$$

Predicted N_f = 441 Block

Experimental N_f = 300 Block

Table. 5

Prediction of life by landgraf's damage theory

ε_{ta}	ε_{ea}(%)	ε_{pa}(%)	D_i
0. 2 %	0.1164	0.0836	0.0000059
0. 4 %	0.1255	0.2745	0.0000746
0. 6 %	0.1163	0.4837	0.0003237
0. 8 %	0.1377	0.6622	0.0004509
1. 0 %	0.1509	0.8491	0.0006454

$$\sum D_i = D_{0.2} + D_{0.4} + D_{0.6} + D_{0.8} + D_{1.0} = 0.0015006$$

$$\text{Predicted } N_f = \frac{1}{2\sum D_i} = \underline{333 \text{ block}}$$

$$\text{Experimental } N_f = \underline{300 \text{ block}}$$

Table 6 Comparison of fatigue life

Waveform	Number of block to failure
Triangular	300 block
Sine	306 block
Square	204 block

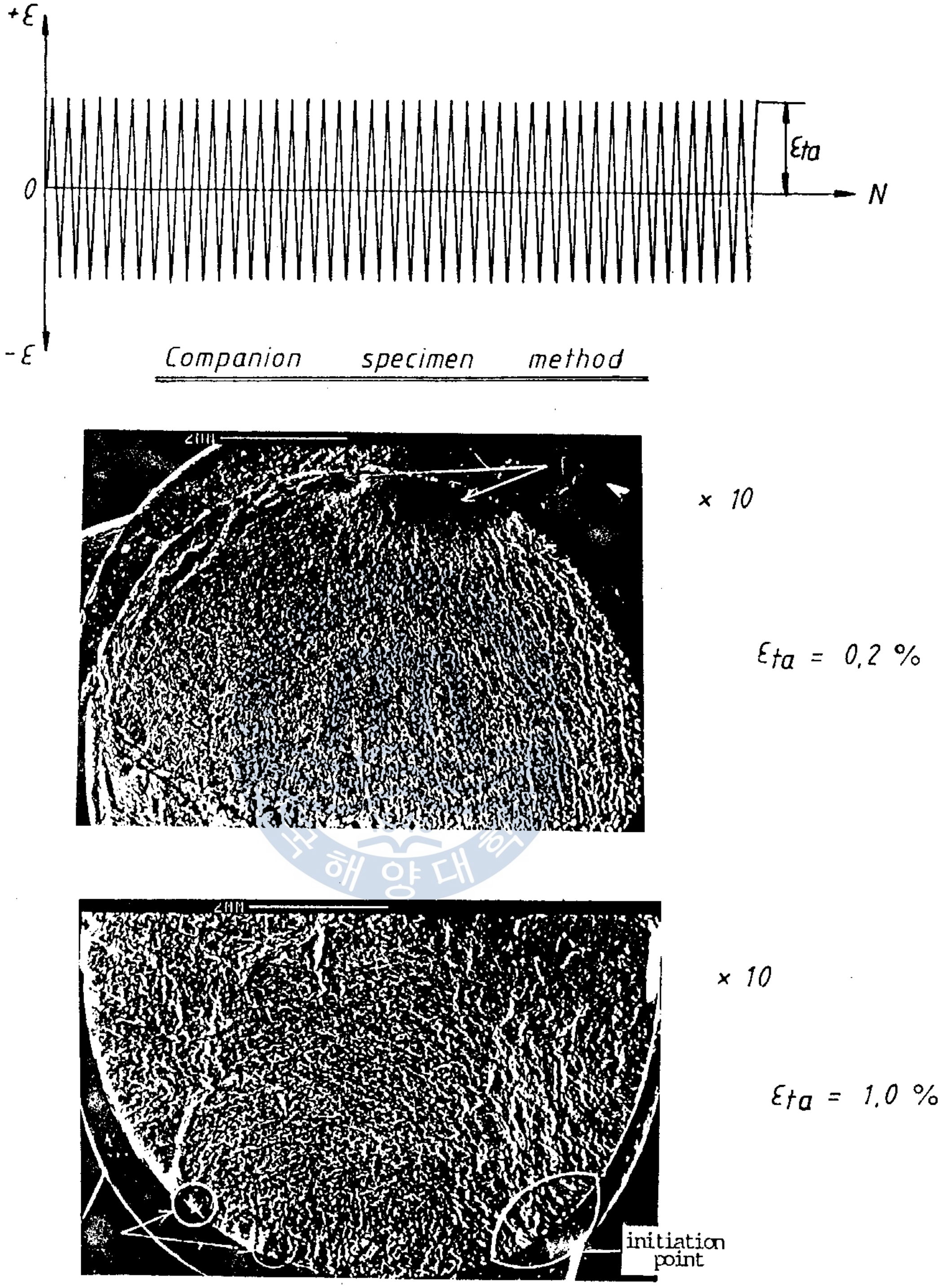
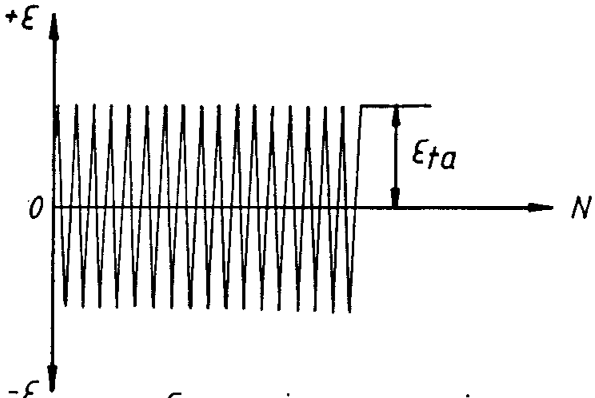
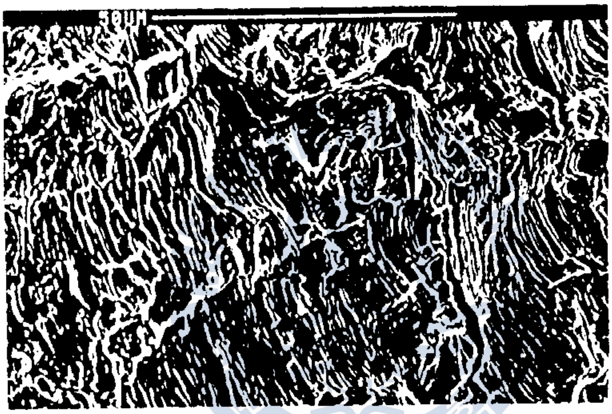


Photo.2 Macroscopic fractographies of the low cycle fatigue fracture surface by companion specimen method.

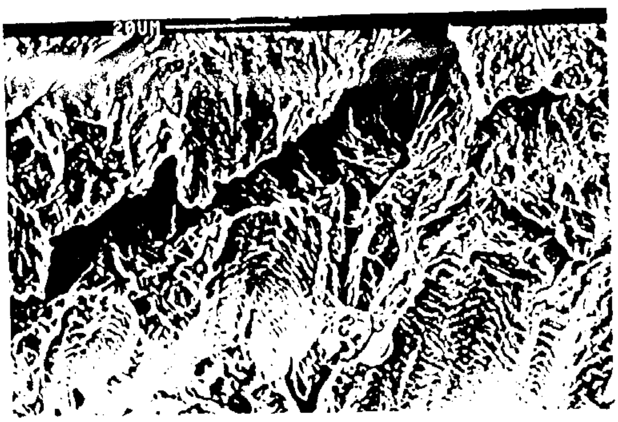


Companion specimen method



× 1000

ε_{ta} = 0,2 %



× 1000

ε_{ta} = 1,0 %

Photo.3 Microscopic fractographies of the low cycle fatigue fracture surface by companion specimen method.

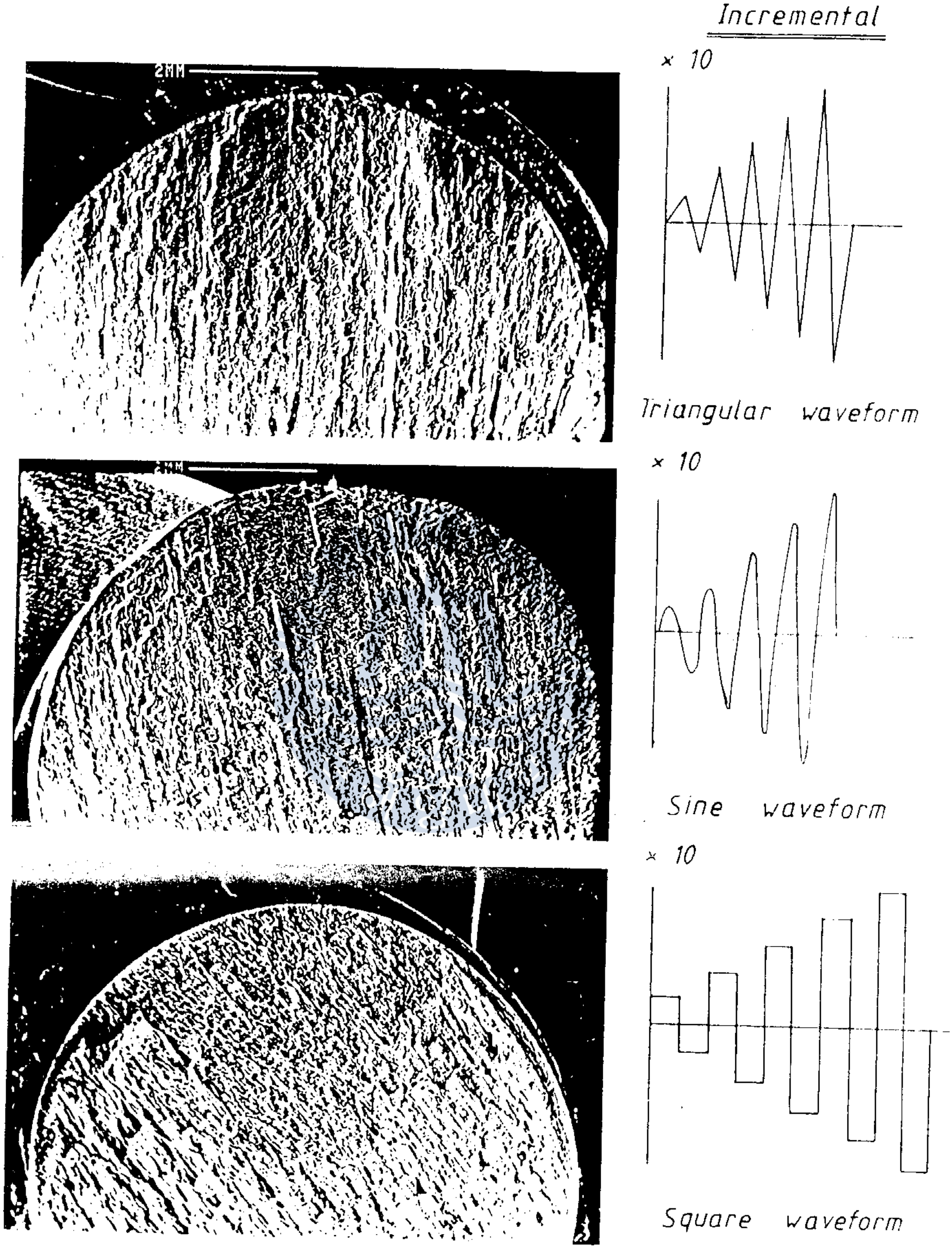


Photo.4 Macroscopic fractographies of the low cycle fatigue fracture surface by incremental step test.

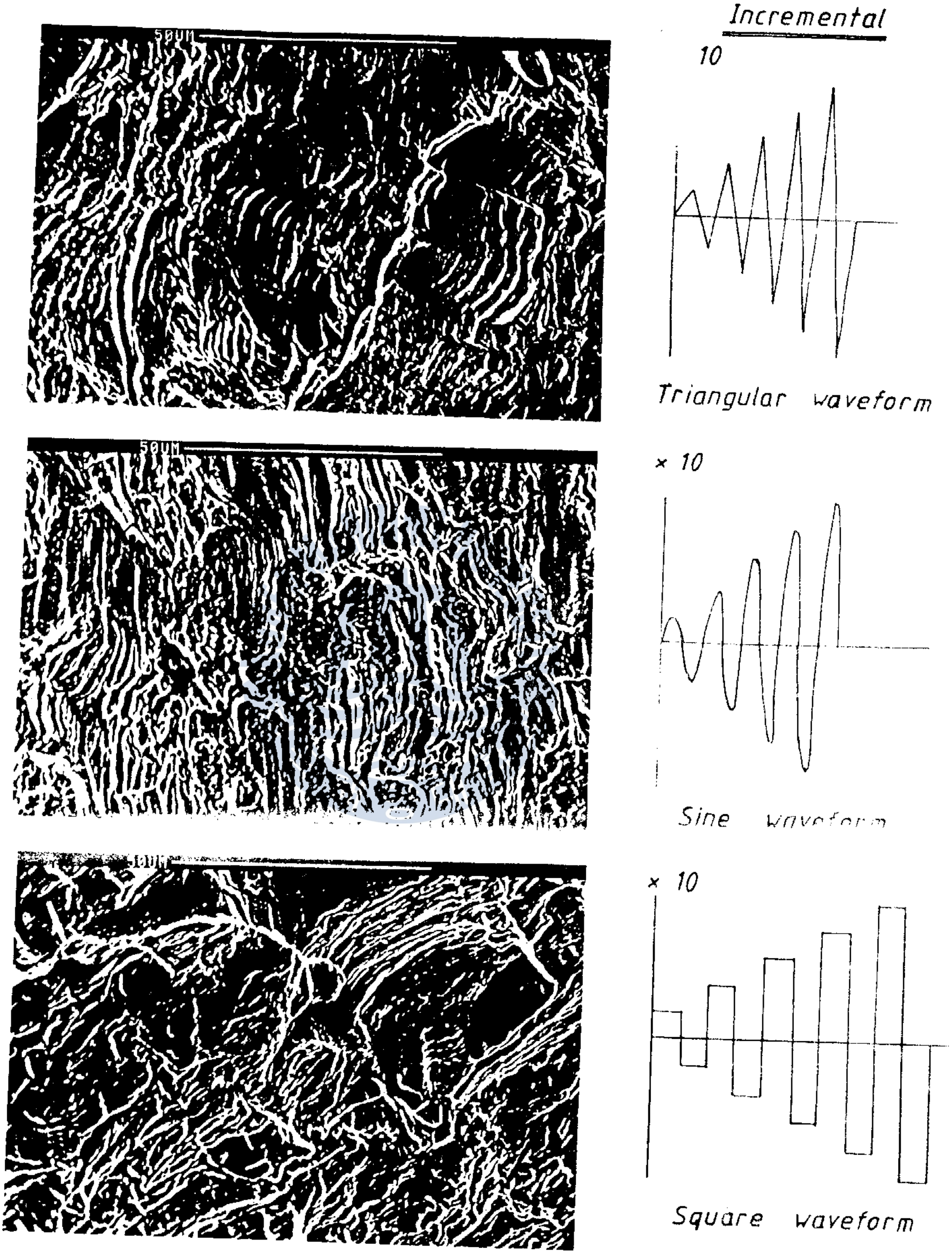


Photo.5 Microscopic fractographies of the low cycle fatigue fracture surface by incremental step test.

微分方程式의 解法에 関한 加重殘餘法등의 比較에 関한 研究

指導教授 王 之 錫

韓国海洋大學 船舶機械工學科 4學年

甘 敬 根　石 尚 澈

鄭 基 錫　鄭 昌 然