韓國産業應用學會誌, 제5권, 제1호, 3-9, 2002.2
J. Korean Society of Industrial Application, Vol.5, No.1, 3-9, February, 2002

coaxing 효과가 피로한도에 미치는 영향에 관한 연구

이종형*, 유덕상**, 송득중***
Jung-Hyoung Lee*, Duck-Sang Yoo**, Duek-Chung Song***

<Abstract>

In the field of design of mechanical structure and expectation of life time, characteristic of fatigue limit comes out to be the most important problem. In this paper, in order to get fatigue limit, (I) investigate the aspects of economy, time and confidence comparing two methods: the method by fracture probability introducing statistical conception and the staircase method. And (II) examine the experience approaching fatigue limit and coaxing effect. The value of fatigue limit by staircase method in very effective in view of practical use, and coaxing comes out by the same material effect as restraining crack progress, not as strengthening the tip of crack alone.

Key Words : Fatigue limit, Coaxing effect, Staircase method, Fatigue failure, Crack growth

1. 서 론

기계산업은 오늘날 경제의 원동력이 되고 있으며 경제발전에 따라 점차 대형화 되고 있다. 그리고, 기계산업의 대형화에 따라 기계부품이나 구조물에서 발생하는 사고로 인한 인적, 경제적 손실이 커지는 것은 필연적일 것이다.

기계에 사용되는 기계재료는 여러과정을 거쳐서 사용할수 있게되는데 결과적으로 사용도중에 파괴되는 현상이 일어나고, 수명을 다하지 못하게 된다. 이와같은 현상은 재료가 피로를 일으켰다고 생각되는 것이며, 항공기, 자동차, 조선, 레일, 각종 공작기계등은 사용도중에 파괴가 일어남은 부인 못 할 사실이며 일반적으로 기계가 놓여지는 장소가 많아짐에 따라 그 기초가 되는 고강도강[1,2,3]즉, 신뢰성 있는 재료

* 금오공과대학교 기계공학부 교수
730-701 경북 구미시 신평동 188
E-mail leejh@knut.kumoh.ac.kr
** 대구기능대학 메카트로닉스과 부교수
703-721 대구시 서구 평리5동 1495
E-mail yds@tgpc.ac.kr
*** 울산기능대학교 기계공학과 교수
681-280 울산시 중구 동동 81
E-mail dcsong@upc.ac.kr

* Prof., Faculty of Mech. Eng. kumoh national university of Techonolog
188 shinoyung-dong Kumi Kyungbuk 730 -701 Korea
** Prof., Faculty of Mechatronics. daegu Polytechnic collage
1495 pyouungleedong seagu daegu 703-721 korea
*** Prof., Faculty of Mech. Eng. Ulsan Polytechnic collage
81 Dongdong Chunggu Ulsan 681-280 Korea

의 개발이 요망되고 있는게 현실이다.

피로파괴에 의한 손실을 막기위해 파괴역학을 도입하여 안정성과 경제성을 고려한 설계나, 이미 균열이 존재하는 기계부품이나 구조물의 잔여 수명을 예측할수 있다. 기계구조물의 설계나 수명의 예측에 있어서 가장 중요한 것은 피로한도의 특성에 관한 문제이다.

피로한도의 특성 및 정류균열[4,5]에 관한 연구는 현재 많이 행해지고 있으나 검출, 측정 등의 어려움 때문에 여러 가지 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 피로한도를 구하는데 있어서 통계학적인 개념[6,7]을 도입하여 파단확률로서 구하는 법과 Staircase법으로 구하는 법을 비교 검토하여 경제적, 시간적, 신뢰성에 대하여 모색하고 또한 피로한도치에 달한 시험편에 대하여 관찰하고, coaxing효과에 대한 검토를 가하였다.

2. 실험방법

2-1 시험편

본 연구에서 사용한 시험편은 국산 기계 구조용 탄소강 SM20C와 SM45C이다.

Table1. Chemical Composition(%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SM20C (A Series)	0.20	0.26	0.75	0.029	0.034
SM45C (B Series)	0.45	0.23	0.67	0.034	0.021

Table2. Mechanical Properties

Material	Yield strength (kg/㎟)	Tensile strength (kg/㎜)	Elonga -tion (%)	Hardness (HB) (Hs)
SM20C (A Series)	0.20	0.26	0.75	0.029
SM45C (B Series)	0.45	0.23	0.67	0.034

화학성분은 Table1과 기계적 성질은 Table2와 같으며 시험편형상은 ASTM E606규격에 따라 기계가공 하였으며, Fig.1과 같다. 또한 시험편의 평활재 부분을 Sandpaper (#100, #220, #320, #400, #600, #800, #1000, #1200)로 연마하고 산화크롬 0.3μ과 산화알루미늄 0.1μ으로 표면을 경면연마 작업을 한 다음 나이탈 3%로 부식하고, 알콜로 세척 후 광학 현미경으로 관찰하였다.

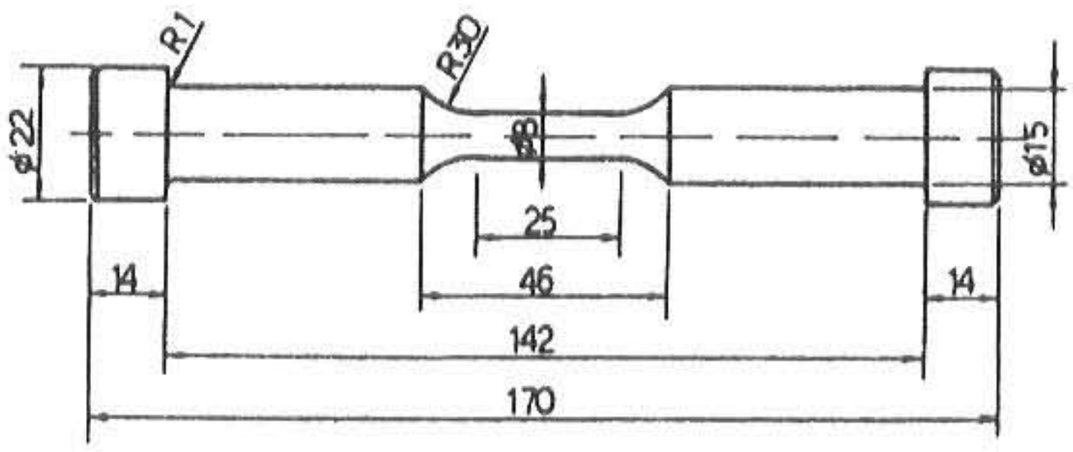


Fig.1 Geometery of Specimen

2-2 실험장치

본 실험에 사용한 시험기는 전기 유압 서어보식 피로시험기(INSTRON MODEL 1350)이며, 최대하중은 10Ton이다.

이때 파형은 정현파형을 사용하였으며, 주파수는 20Hz이며, 응력비 R=0, 반복수는 Recorder Counter에기록하였다.

반복수 N= 1×10^4에서부터Replica로 2×10^4 간격으로 시편표면을 채취하여 광학 현미경으로 관찰 후 촬영하여 인화한 사진을 이동 현미경으로 균열길이를 측정하였다.

시편이 파괴된 후에는 광학 현미경 400배로 확대사진 촬영하였다. 초기의 균열 길이를 발견하기는 어렵지만 Replica로 파단시까지 채취하여 파단직후의 균열길이로부터 초기까지의 주 균열을 찾아오면서 균열길이를 측정하면 초기 균열길이를 쉽게 구할 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1 Coaxing 효과

Fig.2, Fig.3에 평활재의 피로한도 σ_{wo}에 관한 Coaxing효과의 실험결과를 나타낸다.

초기재료의 피로한도의 값 (A Series : σ_{wo}=31.5 kg/mm^2, B Series : σ_{wo}=37.4 kg/mm^2)이하의 응력으로부터 소정의 반복횟수마다(1×10^6혹은 1×10^7회)응력을 단계적으로 증가시키면 모든시험편에서 피로한도는 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

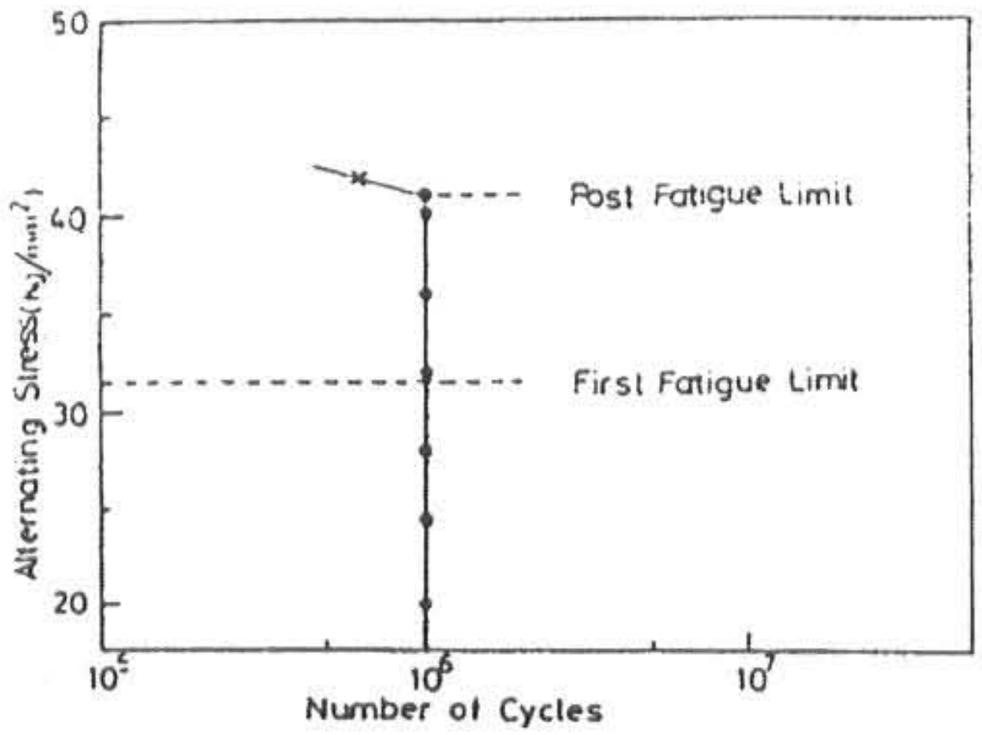


Fig.2 Effect of Coaxing on σ wo (A Series)

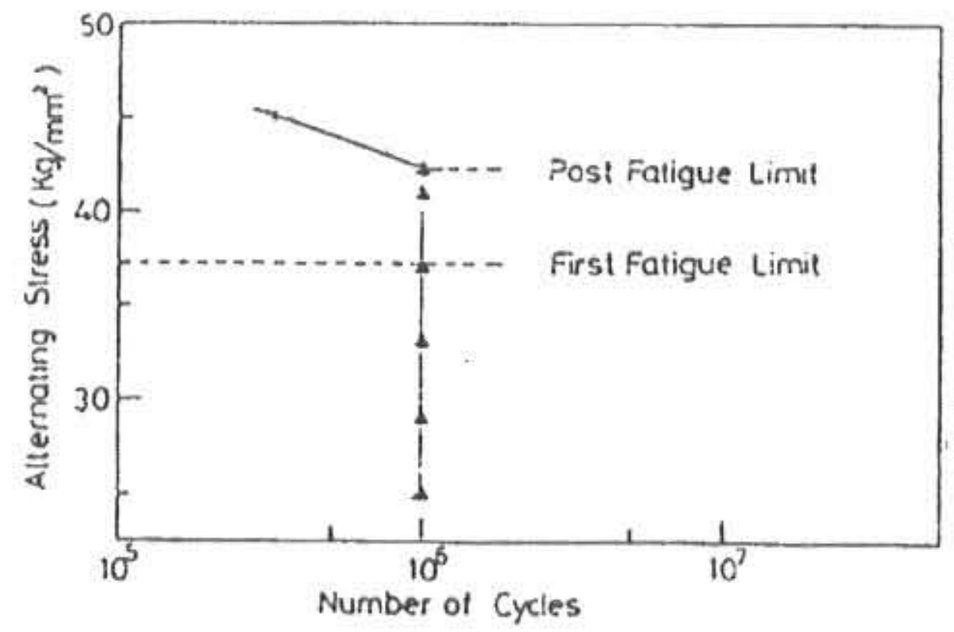


Fig.3 Effect of Coaxing on σ wo (B Series)

결과의 상세한 수치를 Table. 3 에 나타낸다. Coaxing효과가 강 종류에만 존재하는 것은 잘 알려져 있고 명료한 피로한도란 운전멈춤 영향의 존재와 함께 변형시효에 관련된 현상이라고 생각되고 있다.[10,11]

종래 Coaxing효과의 실험은 거의가 평활재에 대해서 행해져 왔고, 따라서 변형시효는 균열발생에 유도되는 미끄럼에 대한 억제작용이라고 하는 관점에서 포착된다.

Table.3 Result of Fatigue Tests on Smoothed Specimens

Material	A Series		B Series	
Specimen number	Alternating stress (kg_f/mm^2)	Number of cycles	Alternating stress (kg_f/mm^2)	Number of cycles
1	20	1×10^6	25	1×10^6
2	24	1×10^6	29	1×10^6
3	28	1×10^6	33	1×10^6
4	32	1×10^6	37	1×10^6
5	36	1×10^6	41	1×10^6
6	40	1×10^6	45	320000 Fracture
7	42	623400 Fracture		

명료한 피로한도를 가지는 철강의 평활재에 있어서는 제1단계의 균열진전에서 제2단계의 균열진전에의 이행을 결정하는 응력이 피로한도 σ_{wo}인 것이 밝혀지고 있다.[12]

즉 피로한도는 σ_{wo}이하의 응력의 반복에서는 제1단계의 슬립밴드 내에 균열이 생기더라도 그것이 결정립의 크기에 관련한 어느 치수 이상으로는 되지않고, 피로한도 σ_{wo}이상의 응력이 반복에서는 제1단계의 슬립밴드(Slip band) 균열이 제2단계의 균열로 이행되고 파괴에 이른다.

평활재의 Coaxing효과는 슬립밴드 균열의 선단에서의 강화인 것을 나타낸 西谷들의 결과는, Coaxing에 의해 제1단계에서 제2단계에서 이행을 결정하는 응력이 상승했다고 해석된다.

小林, 大久保, 西谷들의 평활재에 대한 결과에서는 강화는 정지하고 있는 제1단계의 슬립밴드 균열의 첨단의 그것이고, 제1단계와 제2단계 균열의 거동의 차이는 평활재의 균열에서 제2단계 균열로의 이행을 결정하는 응력이라고 생각하면, 제2단계의 균열진전에 대한 억제작용이 강화되고 있는 본질적인 기구의 상이에 의한 것이 아니라고 생각된다.

Coaxing을 받을 경우에 재료내에서 균열의 진전을 억제하는 것과같은 효과가 생긴다고 하는 것은 변동응력의 누적 피로 손상을 검토하

는 관점에서 중요한 의미를 갖고있고 향후의 보다 정밀한 연구가 요망된다.

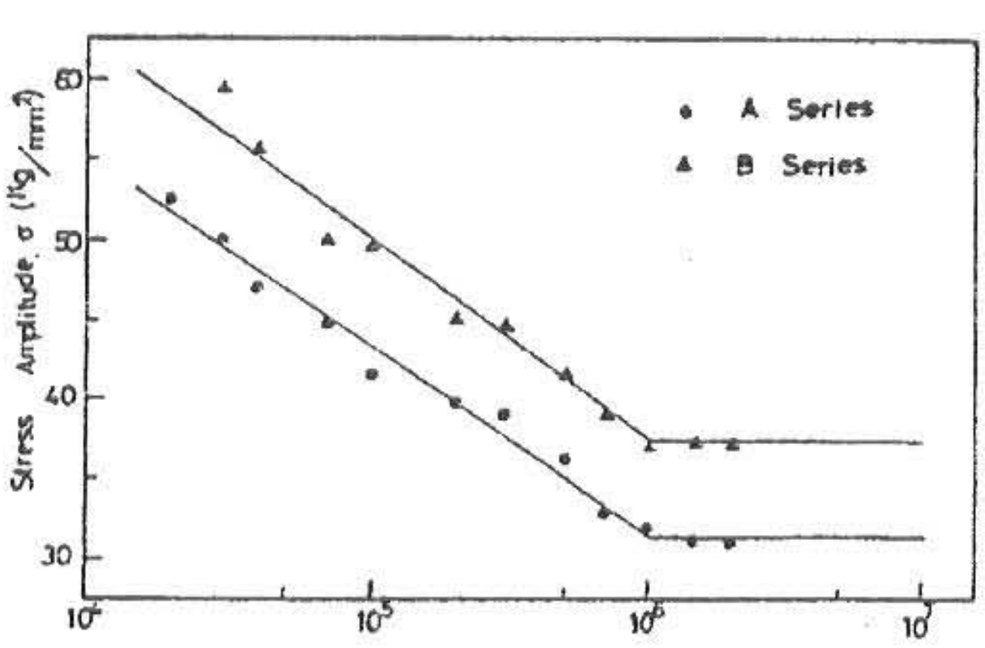
3-2 피로한도

Fig.4에서 응력 σ와 파단회전수 N의 관계를 나타낸다.

SM20C(A Series) 및 SM45C(B Series)의 피로한도는 각각 σ_{wo}=31.5 kg/mm^2, σ_{wo}=37.4 kg/mm^2을 얻었다.

여기에서 피로한도의 값을 가능한한 정확히 얻기 위해서 통계학적인 개념을 도입한 각 응력레벨에 있어서 파단확률의 결과를 Table.4에 정리, 제시한다.

파단확률은 피로한도를 중심으로 피로한도 근방의 응력레벨이 높을수록 탄소함유량이 많을수록 높아지는 경향을 나타내고 있다.



Number of cycle .N

Fig.4. σ-N Curvers

Table.4. Varieties Stress of Limit of Fatigue Statistical Data

STRESS (kg/mm^2)		TEST EXPERIMENT NUMBER (N)		TOTAL FRACTURE NUMBER (n)		FRACTURE RATIO n/N × 100 (%)	
A SERIES	B SERIES	A SERIES	B SERIES	A SERIES	B SERIES	A SERIES	B SERIES
28	34	50	50	5	8	10	16
29	35	50	50	9	12	18	24
30	36	50	50	15	17	30	34
31	37	50	50	21	23	42	46
32	38	50	50	28	29	56	58
33	39	50	50	36	37	72	74
34	40	50	50	46	44	92	88

또한, 동일 응력레벨에서 동일재료의 시험편을 가지고 피로시험을 행하였을 경우 그 수명은 일정치 않고 산발적이다.

따라서 선택된 응력이 설정된 응력반복수에 달하기 이전에 파단된 시험편수와 실험한 시험편총수와의 비를 구하고 파단하지 않은 시험편의 비율이 50%에 대응하는 응력을 고려해야 함을 말해주고 있다.

Fig.5, Fig.6은 파단확률을 정규확률지에 나타낸 그림이다.

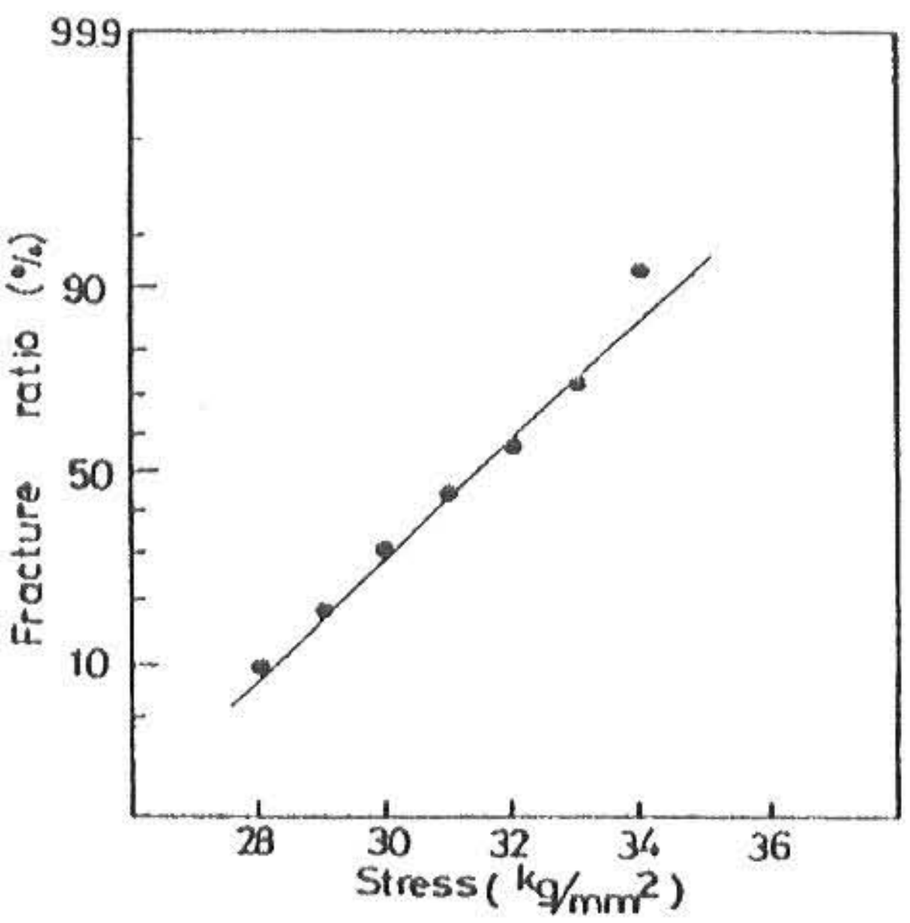


Fig.5 Fracture Probability (A Series)

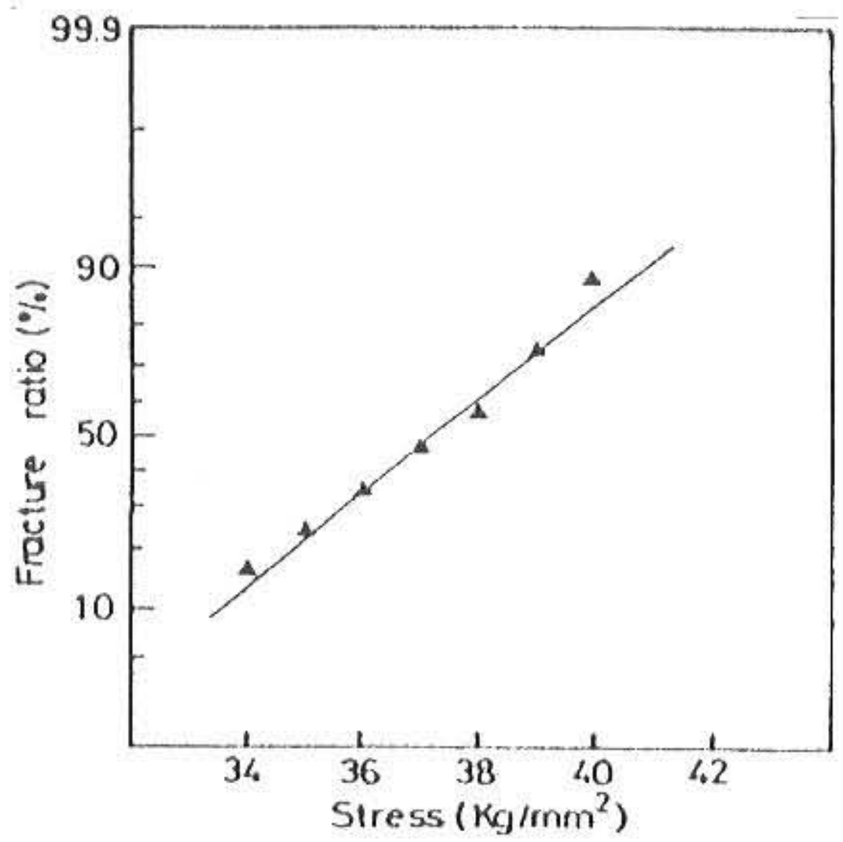


Fig.6 Fracture Probability (B Series)

다음으로 통계적 방법을 사용하는 것에 의해 소수의 시험편으로서 신뢰성이 높은 특징을 행

하는 것이 될수 있는 Staircase법이 금속재료의 피로시험에 있어서 개발되고 있는 것에 착안해서 이 방법을 적용해서 피로시험을 행하였다.

σ-N곡선에서 경사부의 회귀직선식은 식(1)과 같이 구한다.

$$\log N = \alpha_1 + \beta_1 \sigma \qquad (1)$$

$$\beta_1 = \frac{\sum_{n=1}^{n} (\log Ni - \log \bar{N})}{\sum_{i=1}^{n} (\sigma - \bar{\sigma})_2} \qquad (1\text{-}1)$$

$$\alpha_1 = \log N - \beta_1 \alpha \qquad (1\text{-}2)$$

파단수명의 대수의 표본 편차는 식(2)에서 구한다.

$$\sigma(\log N) = [1/(n-2) \sum_{i=1}^{n} \log \ni - (\alpha_1 + \beta_1 \sigma)^2\}^2 \ ]^{\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

피로한도의 표본표준 편차는 식(3)과 같다.

$$\sigma(s) = 1/1 \ \beta_1 1 \sigma(\log N) \qquad (3)$$

Staircase법은 Dixon & Mode가 폭약의 시험방법의 검사를 가한 것이지만 ransom &Mehl[6]가 피로시험에 도입했다.

Sample 크기가 적은 경우의 Staircase법에 대해서는 Brownlee들의 연구[13]가 있다.

여기에 의해서 Sample크기가 적을때는 모집단의 표준편차 σ의 추정정도는 두드러지게 저하하지만 모평균 μ의 추정정도는 그 정도로 저하하지 않는다.

μ의 추정만을 문제로 할 때는 Sample갯수가 수개일때도 충분히 실용가능하다. 더구나 추정치 μ는 극히 용이한 방법으로 계산할 수 있다. n개째의 응력진폭을 y(i)라고 하면 μ은 다음식으로 구할 수 있다.

$$\mu = (y(2) + y(3) + \cdots\cdots + y(n+1)/n$$

식으로 유도된다.

수평부 피로한도 (σ_{wo})는 Staircase법에 준해서 다음 식에 의해서 결정된다.

$$\sigma_{wo} = \{\sigma(2) + \sigma(3) + \cdots + \sigma(n+1)\}/n \quad (4)$$

보통 사용되고 있는 피로시험법에서 피로한도를 구하는 경우 많은 시편이 사용되고 있다.

이것에 대하여 Staircase법은 시험편수가 30~40% 적게 사용되어 자주 이용되고 있다. 이 방법은 반복응력의 응력단계의 크기(표준편차 정도의 크기, 0.7-1 kg/mm^2를 미리 정해두고, 예상되는 피로한도 근방의 [R=0의 경우 : 피로한도 (σ_{wo})≒항복응력 (σ_{ys})] 반복응력에서 시험을 행한다. 소정반복횟수 (10^6회)이내에서 파단할 때는 다음의 시험은 한 단계 내려서 행하고, 파단하지 않은 경우는 한 단계 올려서 시험을 행한다. 이 결과로부터 피로한도를 구한다. 상기 식(4)를 이용하면,

$$\sigma_{wo} = \{\sigma(2) + \sigma(3) + \cdots\cdots + \sigma(n+1)\}/n$$
$$= (29.3 + 30.2 + 31.1 + 30.2 + 31.1 + 30.2 + 29.3) / 7$$
$$= 30.2 \ kg/mm^2 \qquad (5)$$

$$\sigma_{wo} = (34.6 + 35.6 + 36.6 + 37.6 + 36.6 + 35.6 + 36.6) / 7$$
$$= 36.2 \ kg/mm^2 \qquad (6)$$

과 같이된다.

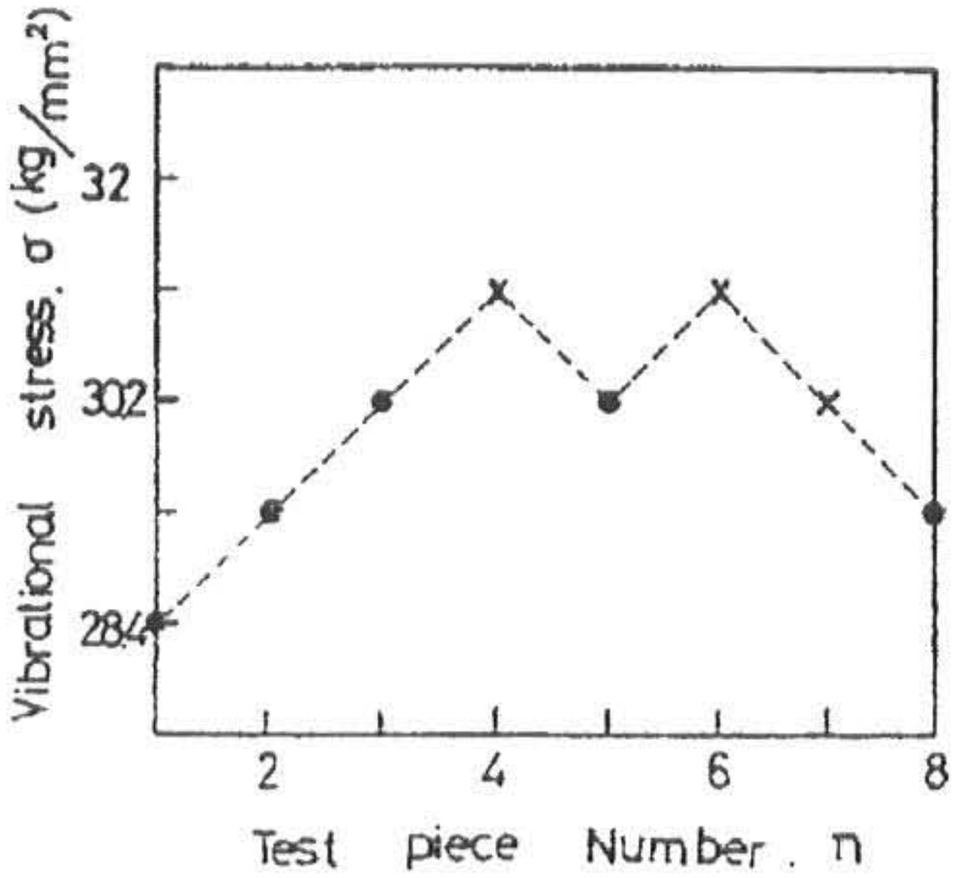


Fig.7 Result of Staircase measurement (A Series)

상기식에서 첫번째의 응력진폭은 계산에 사용하지 않는다. 그것은 1회의 응력을 선정하기까지는 파단(또는 비파단) 시험이 계속되는 것이 있고, 계통적인 오차가 생길 염려가 있기 때문이다.

Fig.7과 Fig.8은 유효시험편 7개의 경우이지만, 5개의 시험편을 사용하더라도 그 오차는 그다지 중대하지 않고 실용할 수 있는 것이 증명되고 있다.[8,9]

식(5)와 식(6)의 결과로부터 피로한도의 값에 대한 결과는 파단확률에 대한 피호한도의 값과 거의 일치하고 있다.

따라서, 상기식(4)을 이용한 Staircase법은 공학적 의미에서 중하다고 보고, 실제 사용에 있어서 유효하다.

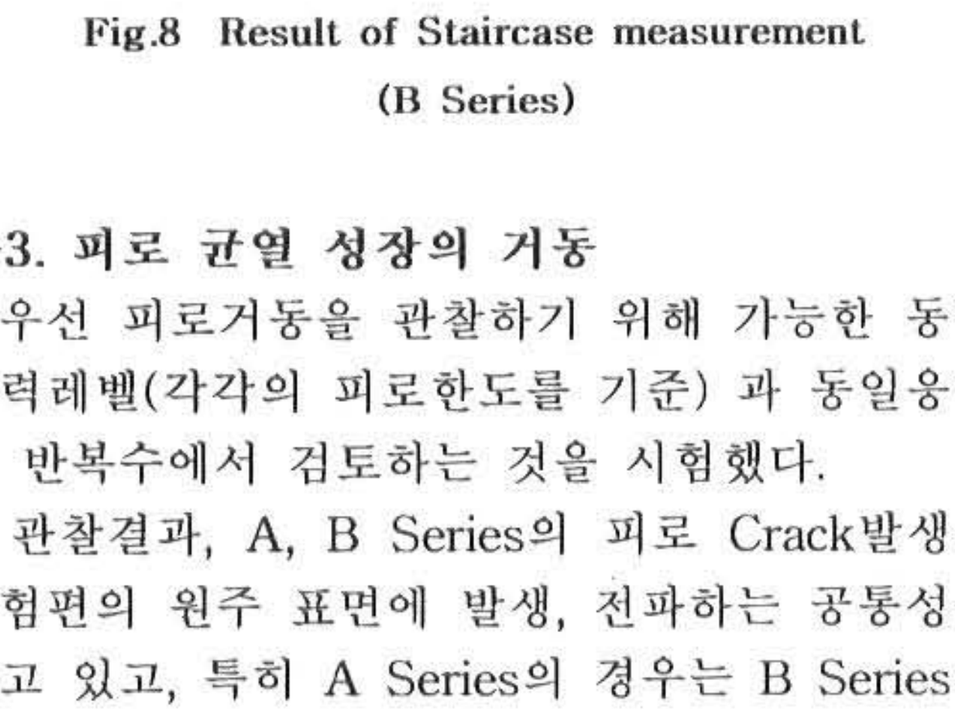


Fig.8 Result of Staircase measurement (B Series)

3-3. 피로 균열 성장의 거동

우선 피로거동을 관찰하기 위해 가능한 동일 응력레벨(각각의 피로한도를 기준) 과 동일응력의 반복수에서 검토하는 것을 시험했다.

관찰결과, A, B Series의 피로 Crack발생은 시험편의 원주 표면에 발생, 전파하는 공통성을 갖고 있고, 특히 A Series의 경우는 B Series의 경우보다 균열발생빈도가 많이 원주 표면에 걸쳐서 관찰되었다. 또, 원주 표면에서 수개의 균열이 단편적으로 발생 전파해서 최종적으로 이것들중에서 선택된 균열의 연결에 의해 최종파괴가 생긴다.

균열의 거동에 대해 광학 현미경으로 관찰한 균열길이 ℓ과 반복수 N와의 관계를 정리한 일례를 Fig.9 및 균열진전속도 $d\ell/dN$과 ℓ 과의 관계를 Fig.10, Fig.11에 표시하면 식(7), 식(8)의 관계식이 성립한다.

$$d\ell/dN = 95.6\times 10^{-6}\ \ell^{1.14}\text{(A Series)} \quad (7)$$

$$d\ell/dN = 107.8\times 10^{-6}\ \ell^{1.35}\text{(B Series)} \quad (8)$$

또 Crack은 A, B Series에 관계없이 σ의 대소로서 $\ell - N$ 곡선에 기울기($d\ell/dN$)가 결정되고 있다.

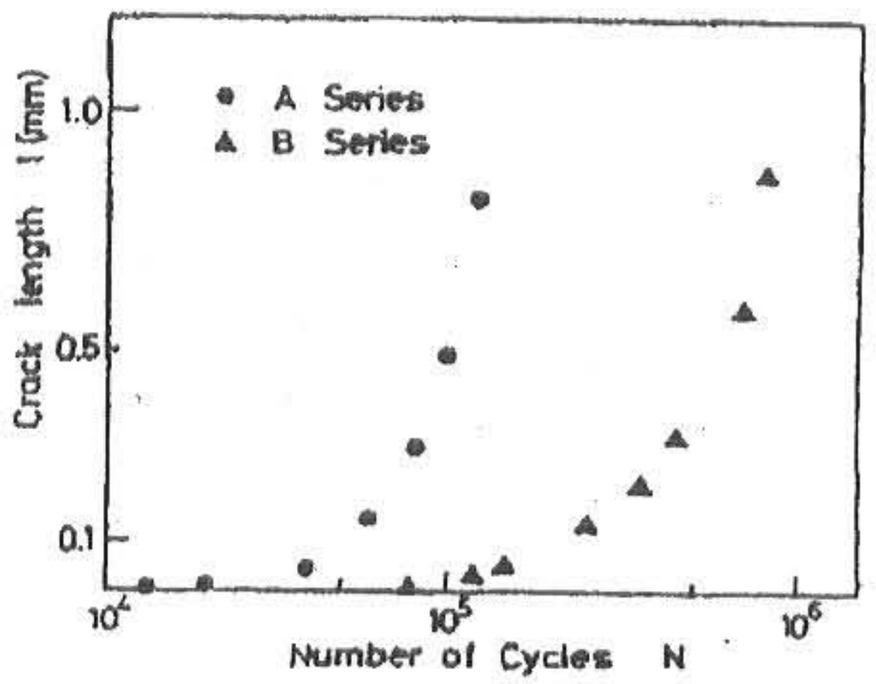


Fig.9 $\ell - N$. Curvers

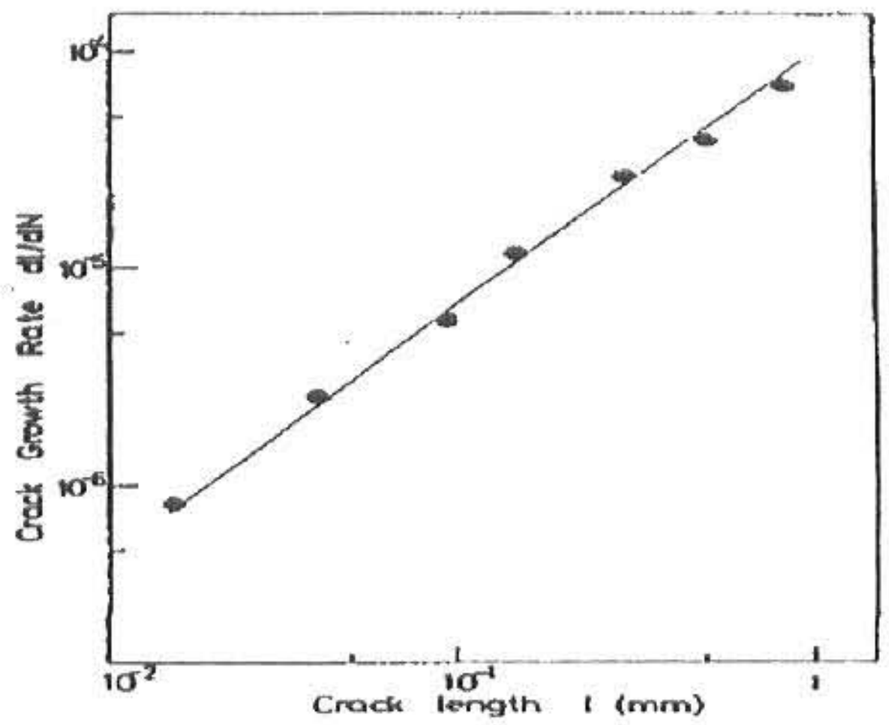


Fig.10 $d\ell/dN$ Diagram (A Series)

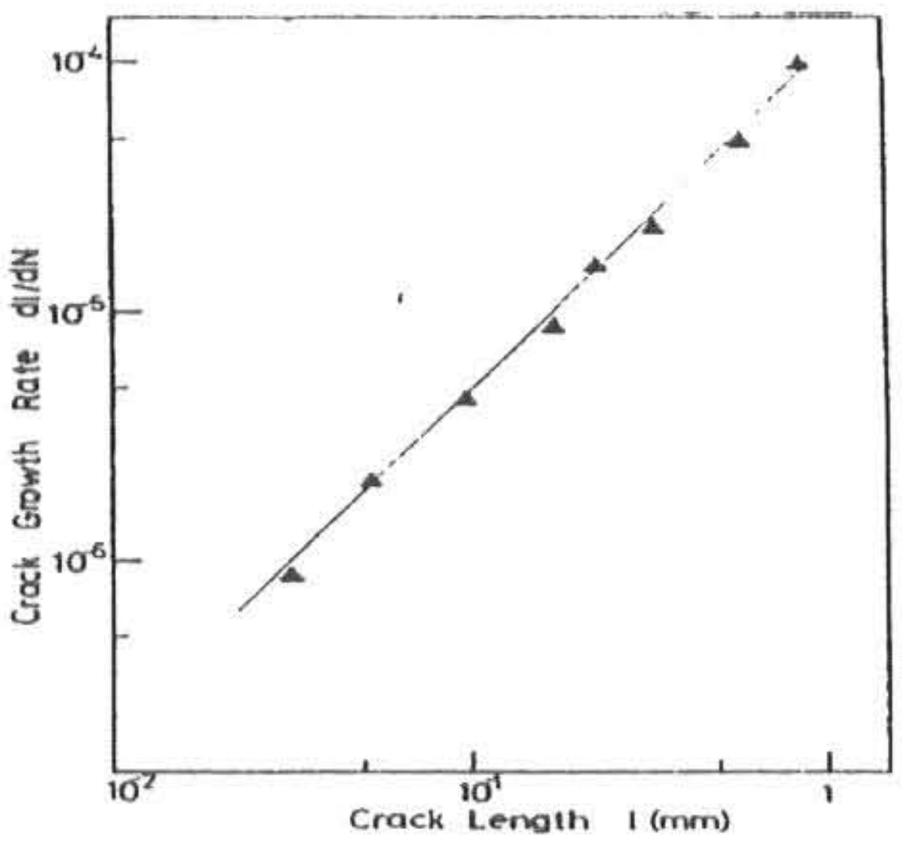


Fig.11 $d\ell/dN - \ell$ Diagram (B Series)

4. 결 론

본 연구에서는 기계 구조용탄소강 {SM20C(A Series), SM45C(B Series)}에 대한 피로한도 특성에 대하여 다음과 같이 결론을 얻었다.
결과들을 요약하면 다음과 같다.

(1) Staircase법으로써 구하는 피로한도의 값은 실용상에 있어서 유효하다.

(2) Coaxing은 균열의 선단만의 강화로서는 아니고 균열의 진전을 억제하는 것과 같은 효과를 재료에 준다. 또한 기계구조용 탄소강 (A, B Series)의 Coaxing효과는 A Series가 B Series보다 더 크게 나타난다.

(3) 탄소강의 피로 균열 발생은 시험편의 원주 표면에 발생, 전파하는 공통성을 갖고 있고 특히 A Series는 B Series 보다 균열 발생빈도가 높다.

본 연구는 2001년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구 된 논문으로 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1) 横堀武夫 外 7人 : 金屬材料の 强度と破壞 東京, 丸善 (1970)
2) Kobayashi, H. and Nakazawa, H. : A Stress Criterion for Ratohue Crack Propagation in Metals, Proceedings of International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Vol. 2 (1972)
3) LEE. J. H and Kobayashi, H.: Fatigue Limit and Non-propagative Crack for Smooth and Pro-cracked Specimen in a Carbon Steel. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Vol. 477 (1986) pp. 1209 - 1214
4) J. T. Ransom & R. F. Mehl, ASTM, Special Tech. Pub., No. 137(1952) p. 3
5) E. Epremian & R. F. Mehl, ASTM, Special Tech. Pub, No. 137(1952) p. 25
6) F. Gatto, Metaux Corrosion_Industries, Vol. 32, (1957) p. 18
7) YOSHIMOTO, I.:Fatigue Test by staircase Method with small samples", Transction of the JSME, Vol. 26 (1960) pp. 918-925
8) Kommers, J. B. , Proc. ASTM, Vol. 43 (1943) p. 749
9) J. C. Gresskreutz, ed.. : Fatigue Crack Propagation, ASTM. STP 415, American Society for Testing and Materials, Jun. (1974)
10) S. R. swanson, ed.. : Fatigue Testing, ASTM STP 566, American Society for testing and Materials, oct. (1974)
11) J. T. Fong. ed.. : Fatigue Mechanism, ASTM, STP 675, American Society for Testing and Meterials, oct. (1979)
12 Okubo, H. and S, Kitaoka, J. Appl, Phys. , Vol. 139 (1968) p. 2966
13) K. A. Brownlee et al : The up-and-down method with small samples, J. Amer. statis. Assm. 48(1953), 262

(2001년 11월 17일 접수, 2002년 2월 20일 채택)