

引張鋼棒의 疲勞破壞舉動에 關한 基礎的 연구

鄭 榮 和* · 沈 教 誠**

A Basic Study on Behavior of The Fatigue Fracture of Tension Bar

Yeong Hwa Jeong, Gyo Sung Shim

ABSTRACT

The fatigue tension tests were performed by use of the specimens without and with a hole, 1/4 crack and 1/2 crack, made of SS41 and S45C steel round bars.

Followings were these results.

It was shown that in the base metal and the specimen with a hole the fatigue strength of the high strength steel bars was lower than that of the low strength steel bars under the low stress range.

It was shown that the fatigue strength of the specimen with a hole was nearly same as that of the base metal, but the fatigue strength of the specimens with the crack was much lower than that of the base metal.

It was shown that the fatigue strength of the specimens with the crack was much lower than that of the other specimens under the high stress range.

I. 서 론

강구조물은 공용중 안정을 확보할 수 있도록 내적, 외적 조건을 고려하여 설계되지만 구조물 제작과정상 포함되는 불가피한 결함, 부재중의 리벳 구멍, 보울트 구멍, 노치, 급격

한 단면변화, 사용중에 발생한 균열이나 마모, 부식등에 의하여 응력집중 현상이 유발되며, 이러한 응력집중은 피로균열의 발생 및 성장을 촉진시켜 불의의 파괴를 일으키는 일이 종종 발생하고 있다.

인장강봉의 사용은 구조물 및 기계요소에 있어서 현수교와 사장교의 현수삭 및 내풍삭, 케이블카의 케이블, 각종 볼트, 크레인의 훅, 전기관차 전동기축, 전기모터축, 기름펌프

* 江原大學校 工科大學 土木工學科 副教授

** 日本國 岡山大學 大學院 博士課程

축, 포크레인 페이로다의 바케트축 등에서와 같이 그 사용성이 많다. 물론 기계요소를 포함한 많은 경우에는 인장만을 받는 경우보다는 비틀림과 조합응력을 받는 경우가 많다.

본 논문에서는 인장강봉에 있어서 결합 형태에 따른 피로파괴 현상을 규명하고, 하중변화에 따른 균열진전 효과를 살피고져, SS41 및 S45C 두 종류의 강봉으로 소재 및 인공결합을 갖는 시험봉을 제작하였다.^{1,2,3)}

인공결합 주변에 무한한 슬립밴드 형성과 축적등으로 많은 소성 변형이 발생하고 포화상태에 이르러 균열이 발생함으로 각각 결합의 형상에 따른 인장피로 포화상태에 이르러 균열이 발생함으로 각각 결합의 형상에 따른 인장피로 시험을 행하고 이 결과를 이용하여 작용최대응력-피로수명선도(S-N)를 그려서 하중 및 재료에 따라 노치부위의 균열전파 및 피로거동을 규명하고자 한다.

2. 피로강도 해석이론

2-1. 피로균열 진전속도

Paris^{3,4)}등은 하중작용회수에 대한 피로균열의 진전속도 da/dN 는 일정한 범위의 하중반복 회수에 따라 정해지는 응력확대계수의 변동범위 ΔK 의 함수로 됨을 밝혔다. 이에 따라 응력확대 계수의 계산 및 균열변동길이 da 의 측정등에 대한연구가 매우 중요하다.

$$da/dN = C(\Delta k)^m \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

- a = 균열길이
- N = 하중작용회수
- ΔK = 응력확대계수의 변동범위
- C, m = 재료에 따른상수

2-1-1. 응력확대계수

파괴역학을 이용하여 피로균열성장율과 피로수명을 구하기 위해서는 응력확대계수의 계산이 필수적이다.

선형과괴역학에서 균열면에 수직하게 작용하는 균열로부터 멀리 떨어진 외 응력을 받는 무한한 중앙에 길이 2a의 균열이 존재할 때 응력확대계수는

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad \dots\dots\dots(2-2)$$

이다. 그러나 일반적 구조부재는 유한 폭을 가지고 균열은 3차원 상태에서 자유표면으로부터 전파되는 경우가 많으므로 이러한 영향을 고려하기 위해 수정계수 F(a)가 이용된다. 즉

$$K = F(a)\sigma\sqrt{\pi a} \quad \dots\dots\dots(2-3)$$

이때 수정계수 F(a)는 다음과 같다.

$$F(a) = F_w \cdot F_s \cdot F_e \cdot F_g \quad \dots\dots\dots(2-4)$$

- 여기서
- F_w : 유한폭 수정계수
 - F_s : 자유표면 수정계수
 - F_e : 균열모양 수정계수
 - F_g : 응력분포 수정계수

이와 같은 이론을 바탕으로 하중조건, 노치형상, 시험편 또는 부재형상등을 고려하여 응력확대계수 계산식등이 많이 발표되고 있다.

Neuber⁵⁾는 Fig. 2-1.과 같은 노치와 균열을 갖는 환봉 시험편에 대하여 노치 깊이가 무한이 크고 노치밑의 반지름이 a인 환상노치환봉시험편에 인장력 f, 휨모멘트 M_b , 전단력 g, 토크 M_t 가 작용하는 경우 아래 2-5 식과 같다고 하였다.

$$\alpha = \frac{\frac{a}{\rho}\sqrt{\frac{a}{\rho}+1} + \left(\frac{1}{2} + \nu\right)\sqrt{\frac{a}{\rho}+1} + (1+\nu)\left(\sqrt{\frac{a}{\rho}+1} + 1\right)}{\frac{a}{\rho} + 2\nu\sqrt{\frac{a}{\rho}+1} + 2} \quad \dots\dots\dots(2-5)$$

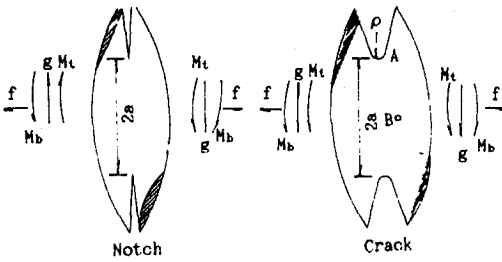


Fig. 2-1. Forms of notch and crack

이에 대응하는 환상균열 환봉시험편에 대한 응력확대계수 K는 아래식 2-6식과 같다고 하였으며⁵⁾

$$K = \frac{1}{2} \frac{f}{\pi a^2} \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots(2-6)$$

이 외에도 Fig. 2-2와 같은 균열깊이 C, 반지름 a인 임의의 경우에 대한 응력확대계수는 2-7식과 같다고 하였다.⁵⁾

$$K = \frac{f}{\pi a^2} \sqrt{\frac{\pi a C}{0.8a + 4C}} \dots\dots\dots(2-7)$$

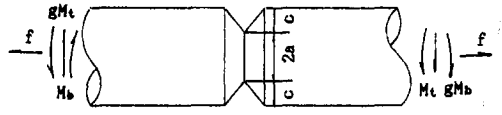


Fig. 2-2. Annuiation crack of round bar

2-1-2. 피로균열 진전길이 da의 측정

(1) 래프리카 이용

파단부 표면에 래프리카를 부착 균열을 복사하여 확대경으로 확대시킨 후 눈금자로서 균열길이를 실측한다. 이 방법으로 1단계방법과 2단계방법이 있다. 1단계방법은 정확한 복사기술로 탄소필름을 파괴 표면에 직접 증착시켜 소재시험편을 분리하여 복사시킨다. 표면의 그림자 부분은 일반적으로 거친 부분이기 때문에 선명하지가 않다. 직접탄소 래프리카법은 전해에 의하여 또는 화학적으로 직접 복사할 수 있다. 2 단계방법은 파괴표면을 좀더 세밀하게 고체형상으로 복사하는 방법으

로 고체형상에 래프리카를 부착하여 그림자부분을 좀더 세밀히 복사하여 관찰할 수 있다.^{6~9)}

(2) 현미경 이용

최소눈금이 0.02mm인 마이크로메터를 부착시킨 이동식 측정현미경(Travelling microscope)을 피로시험기 옆에 설치하여 균열길이를 측정하는 방법이다.

(3) 크랙메터 이용

근래 모든 실험에서 전기적신호가 통제판독 그리고 분석에 이용된 이래 이 설비는 사용되는 시험편 표면에 전기적으로 격리된 크랙-게이지를 부착하여 전기량으로 진전하는 균열을 추적하여 측정방법에 따라 시험편의 전기적 저항으로 추적하는 데서 발견되며 기본적으로 직접전위 방법이 이용된다.^{10~12)}

(4) 포토그래피 이용

피로실험중 시험편 표면의 균열진전거리는 피로시험기 옆에 연속사진 촬영기를 설치하여 시험중 시험편에 진전하는 균열길이를 연속적으로 촬영하여 측정할 수 있으며 파단부 표면에서는 SEM(Scanning electron microscopy) 및 TEM(Transmission electron microscopy)과 같은 전자 현미경으로 비취마크(beach mark)를 촬영하여 피로수명 및 하중에 따른 1 사이클당 균열진전거리를 측정한다. 이와 같은 방법은 파단부 표면의 한정된 부분에서 1블럭당 균열진전 거리를 측정하는데 이용하며 사진은 확대된 형태로 보여진다.^{13~15)}

2-2. S-N 선도

강재의 피로에 대한 저항력은 기본적으로 Fig. 2-3과 같은 S-N선도에서 피로수명을 통하여 추정하며 Fig. 2-3과 같이 유한 피로수명과 무한피로수명으로 구분한다. 유한피로수명은 하중반복회수 10⁵사이클 이상의 고사이클 영역에서의 피로로 구분되며 무한피로수명을 피로한도라고 한다.¹⁶⁾

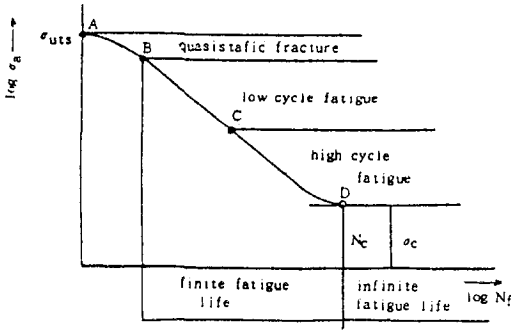


Fig. 2-3. Division of curve into various regions

피로실험 결과 강재의 피로강도를 추정하기 위하여 사용하는 S-N 곡선의 종류에는 구조용 탄소강처럼 특정된 응력진폭의 크기에서 곡선이 수평선으로 변하는 즉 재료가 피로한도를 갖는 경우와, 비철금속에서처럼 피로한도를 갖지않고 반복회수 N이 증가함에 따라 곡선이 점점 밑으로 향하는 경우의 두 가지 종류가 있다. S-N곡선의 종류에는 여러가지가 있으나 주로 많이 사용하는 식은 아래 2-8식인 Wöhler식^{17,18)}이다.

$$\sigma = a - b \log N \quad (\sigma > \sigma_w) \quad \dots\dots\dots(2-8)$$

σ_w : The stress of fatigue limit

이식으로 구한 값으로 작용최대응력(S)과 피로수명(N)과의 관계를 Fig. 2-4와 같이 Log-Normal 상에 플로트하여 피로수명을 구한다.¹⁹⁾

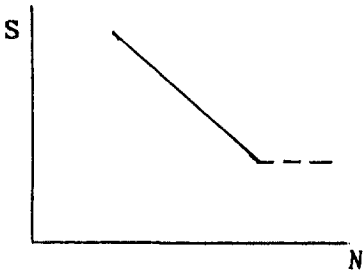


Fig. 2-4. Type of S-N curve by wöhler

이와 같이 Whöler는 피로 특성을 작용응력과 피로수명의 관계(S-N)와 피로한계로 나타냈으며, 이때 피로수명은 최대작용응력보다 작용응력 폭에 더 큰 영향을 받는다고 했다. 그러나 Gerber는 평균응력도 피로수명에 상당한 작용을 한다고 했으며 Goodman은 이를 좀더 발전시켜 다음과 같이 발표했다.

$$\text{Gerber : } \frac{S_u}{S_f} + \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^2 = 1 \quad \dots\dots\dots(2-9)$$

$$\text{Goodman : } \frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_u} = 1$$

여기서 $\left\{ \begin{array}{l} S_f : \text{인장강도} \quad \sigma : \text{실제과괴응력} \\ S_m : \text{평균응력} \quad S_u : \text{최대응력} \\ S_a : \text{하중폭} \end{array} \right.$

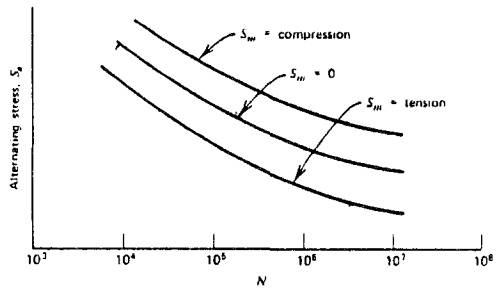


Fig. 2-5. Effect of mean stress on fatigue life

3. 실험

3-1. 사용재료

본 실험에서 사용된 강재는 시중에서 구입한 것으로 KSD 3503 일반구조용 강 SS41과 KSD 3752 기계구조용 강인 S45C이다. 사용강재에 대한 기계적 성질과 화학적 성분은 Table 3-1.과 같다.

Table 3-1. Chemical composition and mechanical properties of base metal

Steel	Chemical composition(%)					Mechanical Properties		
	C	Si	Mn	P	S	Yielding Point(kg/mm ²)	Tensile Strength(kg/mm ²)	Extansion Modulus(%)
SS41	0.16	0.17	0.61	0.030	0.033	58.06	70.54	5%
S 45C	0.49	0.25	0.64	0.014	0.013	68.12	88.49	5%

3-2. 시험봉의 형상 및 치수

3-2-1. 소재시험봉

KSD 3503 일반구조용 압연강재 SS41과 기계구조용 강재 S45C 두 종류로 하였다. 그 시험봉의 형상 및 치수는 Fig. 3-1과 같다.

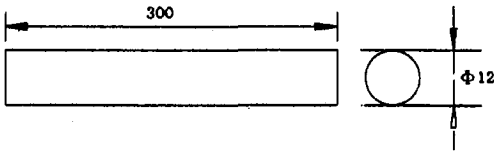
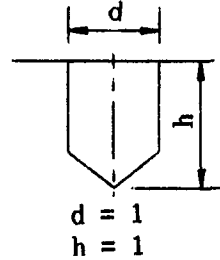


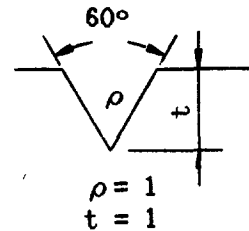
Fig. 3-1. Base metal specimen(unit=mm)

3-2-2. 인공결합 시험봉

각종 강구조물에 사용하는 강봉에 있어서 강봉이 제작되는 과정, 또는 사용 중 외적인 요인에 의하여 미소한 결함이 발생하였을 경우에는 강재의 피로강도에 영향을 미친다. 일본재료학회 논문집에서 강재의 개재물은 미소 균열 즉 결함의 문제로 간주하여 강재에 인공 결함을 주어 피로시험을 행하여 결함의 영향에 의한 피로강도등을 측정하였다.^{20,21)} 각종 구조물에 사용중 미소한 결함이 발생하였을 경우에 대하여 인공적인 결함을 모델링한 시험봉을 SS41과 S45C 두 종류로 제작하였다. 인공결합 치수는 Fig. 3-2와 같다. 인공 결함 시험봉은 Fig. 3-3과 같이 하나의 Hole과 Crack으로 제작하였다.

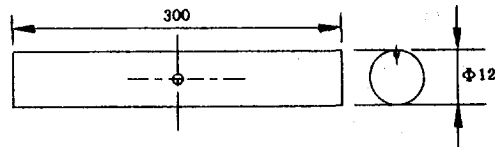


(a) Artificial flaw of hole

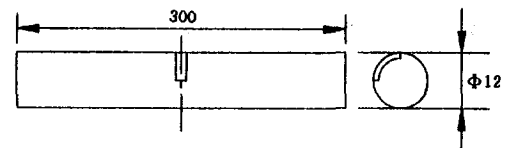


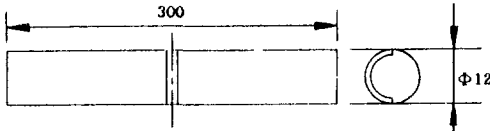
(b) Artificial flaw of crack

Fig. 3-2. Form of artificial flaw (unit=mm)



(a) Specimen with hole





(b) Specimen with 1/4 crack and 1/2 crack

Fig. 3-3. Specimen with artificial flaw
(unit=mm)

3-3. 시험장치

본 연구에 사용한 기계는 강원대학교 공과대학 토목공학과에서 보유중인 Shimadzu EHF-UB25-70으로 전기유압SERVO식 피로시험기이다. 이 시험기는 load제어, strain제어, stroke제어를 할 수 있으나 본 시험에서는 20 ton load cell을 사용하여 load제어를 이용했다.

3-4. 시험 하중

일정진폭하중하에서의 피로시험은 파형을 정현파로 사이클수는 10~20HZ를 사용하였다. 최소하중은 거의 영으로 하고 최하중은 응력이 항복응력에 가까운 값으로부터 점차 여러단계로 변화를 주어 시험을 행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

피로시험을 실시하여 구한 결과로 Whöler의 S-N 곡선식 $\sigma = a - b \log N$ ($\sigma > \sigma_w : \sigma_w =$ 피로한도)을 이용하여 일본 강도로교 표준시방서에 의한 피로한계수명 2×10^6 사이클을 기준으로 작용최대응력과 피로수명과의 관계를 log-normal상에 플롯 하여, 재료에 따른 피로특성과 결함의 형상에 따른 피로 특성을 비교하였다.

4-1. 시험봉 종류에 따른 피로강도

4-1-1. SS41

hole결합시험봉의 피로강도는 소재시험봉의

그것과 비슷하나 1/4균열시험봉이나 1/2균열 시험봉의 경우는 피로강도가 현저히 낮음을 볼 수 있다. hole결합보다는 균열의 경우가 응력집중현상이 큰 때문이 아닌가 생각된다.

또, 1/2균열시험봉의 경우 높은 응력범위에서는 1/4균열시험봉보다 피로강도가 낮다가 점차 증가되어 28kg/mm²이하에서부터 반대로 됨을 볼 수 있다.

결함이 클수록 높은 응력범위에서 응력집중이나 결함절단시의 잔류응력 등의 영향을 더 크게 받기 때문이 아닌가 생각된다.

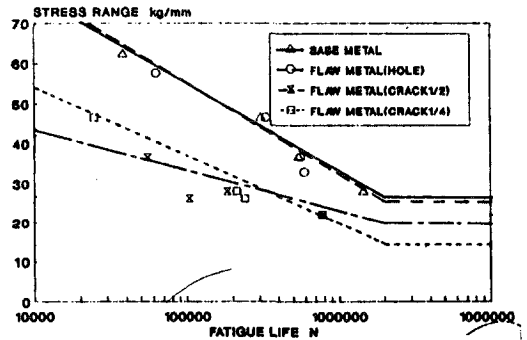


Fig. 4-1. S-N curves of SS41 Specimens

4-1-2. S45C

SS41의 경우와 거의 비슷한 경향을 보이고 있다.

그러나 낮은 응력범위(일본 강도로교 시방

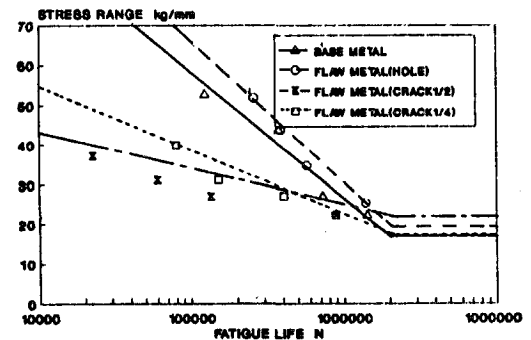


Fig. 4-2. S-N curves of S45C Specimens

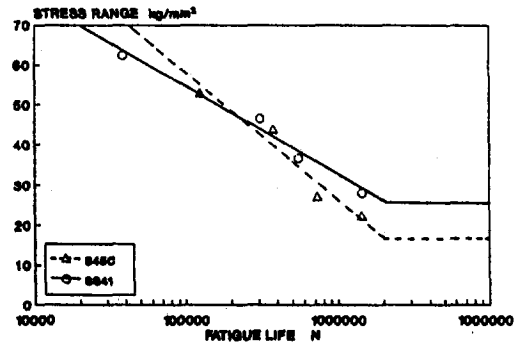
서상의 피로수명 2×10^6 회 근처에 해당하는 응력범위)에서는 1/4균열시험봉의 경우 소재 시험봉이나 hole결합시험봉과 거의 같은 피로강도를, 1/2균열 시험봉의 경우 소재시험봉이나 hole결합시험봉에서 보다 오히려 다소 높은 피로강도를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

균열의 크기나 형태가 어느 한계 이하일 때는 낮은 응력범위에서 그 균열이 피로강도에 별 영향을 미치지 않기 때문이라 생각된다.

4-2. 재료에 따른 피로강도

소재시험봉이나 hole결합시험봉에서는 높은 응력범위일 때 고강도강인 S45C의 피로강도가 저강도강인 SS41의 그것보다 높다가 점차 낮아져서 응력범위 47.5 kg/mm^2 이하에서 부터는 오히려 반대로 됨을 볼 수 있다.

고강도는 인성(靱性)이 적어서 낮은 응력범위로 오랜동안 반복하중을 받으면 오히려 피로강도가 낮아지는 것이 아닌가 생각된다.



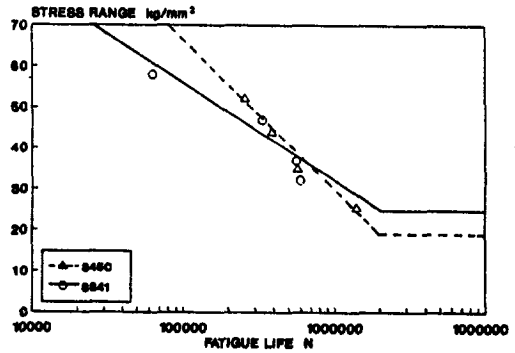
$$(SS41) Y = 163.539 - 21.9062 * \text{LOG}(N),$$

$$R = -.990247$$

$$(S45C) Y = 209.865 - 30.6067 * \text{LOG}(N),$$

$$R = -.972055$$

Fig. 4-3. S-N curve of base metal



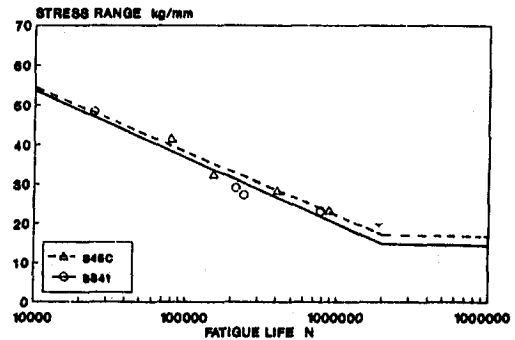
$$(SS41) Y = 155.671 - 20.714 * \text{LOG}(N),$$

$$R = -.9192$$

$$(S45C) Y = 245.969 - 36.149 * \text{LOG}(N),$$

$$R = -.9806$$

Fig. 4-4. S-N curves of bar with a hole



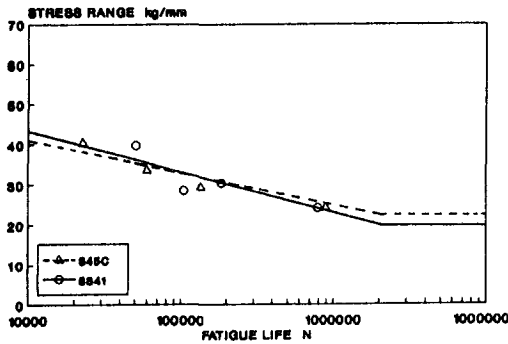
$$(SS41) Y = 82.7237 - 9.2524 * \text{LOG}(N),$$

$$R = -.8474$$

$$(S45C) Y = 119.8518 - 16.3958 * \text{LOG}(N),$$

$$R = -.9683$$

Fig. 4-5. S-N curves of bar with 1/4crack



$$(SS41) Y = 90.2005 - 11.429 * \text{LOG}(N), \\ R = -.8712$$

$$(S45C) Y = 82.0935 - 9.9470 * \text{LOG}(N), \\ R = -.9726$$

Fig. 4-6. S-N curves of bar with 1/2crack

1/4균열시험봉에서는 모든 응력범위에서 고강도인 S45C의 피로강도가 저강도인 SS41의 그것보다 다소 높음을 알 수 있으나 1/2균열시험봉에서는 소재시험봉이나 hole결합시험봉에서와 반대로 높은 응력범위에서 고강도인 S45C의 피로강도가 저강도인 SS41의 그것보다 오히려 낮다가 점차 커져서 반대로 됨을 볼 수 있다. 결함이 커지면 높은 응력범위에서 응력집중이나 결함절단시의 잔류응력 등의 영향을 더 크게 받기 때문이 아닌가 생각된다.

5. 결 론

강봉을 사용하여 부재에 미소한 결함이 발생하였을 경우에 대하여 결함의 형상을 Hole, Crack 1/2, Crack 1/4로 제작한 시험봉을 사용하여 강종을 SS41, S45C로 바꿔가면서 일정진폭하중하에서 피로시험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

소재시험봉이나 hole결합시험봉의 경우 낮은 응력범위에서 고강도인 S45C의 피로강

도가 저강도인 SS41의 그것보다 오히려 낮음을 볼 수 있다. 고강도강은 인성(靱性)이 낮기 때문이 아닌가 생각된다.

hole결합시험봉의 피로강도는 소재시험봉의 그것과 비슷하나 균열시험봉의 피로강도는 현저히 낮음을 볼 수 있다. hole결합보다는 균열에서 응력집중현상이 크기 때문이 아닌가 생각된다.

균열시험봉의 경우(특히 1/2균열) 높은 응력범위에서 다른 시험봉에 비해 피로강도가 현저히 낮다가 점차 증가되어 아주 낮은(일반 강도로교 시방서의 피로수명 2×10^6 근처) 응력범위에서는 피로강도가 소재시험봉이나 hole결합시험봉의 그것과 비슷(1/4균열)하거나 오히려 높아(1/2균열)짐을 볼 수 있다. 결함이 클수록 높은 응력범위에서 응력집중이나 결함절단시의 잔류응력 등의 영향을 더 크게 받다가 낮은 응력범위에서는 별 영향을 받지 않기 때문이 아닌가 생각된다.

참 고 문 헌

1. T YOKOBORI, J., KAWASAKI S., NAKANISH M., KAWAGISH. Rep. Res Inst, Star. AND. Frac. of Materials. Tohoku Univ. Vol. 5, p. 25(1969).
2. Hironobu Nisitani, Hiroshi Noguchi, Hisayaki, VCHIHORI, Hiroshi NAKAE, "A Examination of Notch Effects in the Fatigue of Carbon Steel by Linear Notch Mechanics", 日本機械學會 論文集, 54卷, 503號, 87.
3. David Broek, "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Martinus Nijhof Pub., pp. 250~453(1982).
4. Erdogan, F., "Crack Propagation Theories", NASA CR-901.
5. H. Neuber, "Kerbspannungs Lehre", Springer-Verlag, Berlin.(1937).
6. K. Mills, the other, "Metals Hand Book

- Nintch Edition”, Volume 12 Factography, ASM Hand Book Committee.
7. J. N. Greenwood, D. R. Miller and J. W. Suniter, *Acta Metal.*, Vol. 2, pp. 250~258(1954).
 8. R. L. Coble, *J. Appl. Phys.*, Vol. 34, pp. 1676(1963).
 9. K. Hull and D. E. Rommer, *Philos. Mag.*, Vol. 4, pp. 673~687(1959).
 10. TTIDIV., HARTRUN CORPORATION ST, Augustine, “Fractomat & Krak-Gage”(1989).
 11. Hartman, H. R., Churchill, R. W., “Kark-Gage, a new Transducer for Crack Growth Measurement”, Keystone, Co, October(1981).
 12. H. S. Pearson, G. J. Gilbert., “Automated Crack Growth Testing Evaluation of a Bonded Foil Crack-Gage System”, ASTM Spring Meeting New Orleans, (1981).
 13. J. D. Embury and R. B. Nicholson, *Acta Met.*, pp. 403~417(1965).
 14. G. Thomas and J. Nutling, *Ji. of Inst. Metals*, pp. 81~88(1969).
 15. H. L. Gibson, “Close-up Photography and Photomacrography,” Publication No N-12, Kodak
 16. P. Lukas, “Fatigue of Metallic Material” Spring-Verlag, Berlin(1937)
 17. 河本實, “金屬の 疲勞と設計”, コロナ社, pp. 33~36, pp. 43~45(昭和 47年)
 18. T. R. Gurney, “Fatigue of Welded Structures”, Cambridge University. Press. England, (1968).
 19. 壺堀武夫, “材料強度”, 技報堂出版株式會社, pp. 150~151(昭和 56年).
 20. N. Tamra, H. Nakamura., “Fatigue Strength of Notched Specimens under Variable Loadings”, 日本材料學會 論文集, 第 36 卷, 407 號
 21. C. Urashima, S. I. Nishida, “Low Cycle Fatigue Properties under Rotating Bending of Machine Structural Steels”, 日本機械學會 論文集, A編 53卷, 492號