
 論 文

大韓造船學會誌
 第25卷 第3號 1988年 9月
 Journal of the Society of
 Naval Architect of Korea
 Vol. 25, No. 3, September 1988

보강덮판으로 인한 균열진전지연 효과에 관한 연구

김상철*, 박문호**, 한문식***

A Study on the Effect of Crack Retardation due to Cover Plate

by

Sang Chul Kim*, Moon Ho Park** and Moon Sik Han***

Abstract

A study of the fatigue fracture accompanied with crack propagation should be investigated systematically by the behavior of the crack propagation. In this study, the effect of crack retardation due to cover plate is investigated by analytical and experimental methods.

Through the analytical and experimental works, it is confirmed that the retardation of fatigue crack propagation is properly controlled by cover plate and the retardation effects may be estimated exactly by the compliance method.

1. 서 론

근래 조선공업이 산업기술과 더불어 급속히 발전되어 감에 따라 선박 및 관련기자재도 일반 구조물 및 기자재와 마찬가지로 점점 고성능, 경량화되며 가혹한 사용조건을 고려하여 재료에 대한 종류, 기능, 사용환경이 나날이 다양화되고 있는 추세에 있다. 그러므로 이들 사용재료에 대한 안전 및 내구성에 있어서의 신뢰도가 더욱 높아져야 한다는 요구가 높아가고 있다.[1]

최근에 발표된 자료[2]에 의하면 일본선급협회에 등록된 선박중 매년 그 10% 이상이 손상되고 있다. 그 주된 원인은 생산단계에서 필연적으로 발생하는 용접, 주물 및 가공결함이 파열, 부식, 과부하 등으로 인하여 주로 피로파괴로 나타나고 있다. 또한 탱크류의 압력용기가 수압시험시 인장강도의 1/10~1/20 정

도의 응력에서 파괴된 예나 기타 박용기기들이 작동후 얼마 안되어 파손된 무수히 많은 예등 박용재료의 실선적용시 파손사태가 급증하므로 이는 강도설계상 심각한 문제로 대두되고 있다. 이러한 문제의 해결을 위해서는 종래의 공칭응력기준의 설계는 부적당하다는 것이 점차 알려졌고, 새로운 강도평가기준의 필요성을 요구하기에 이르렀다. 새로운 파괴방지의 기준은 파괴역학적 수법이다. 즉 파괴들의 원인을 분석한 결과 연성파괴에 의한 것은 별로 많지 않고, 주로 취성파괴에 의한 것임을 감안하여 보아도 결함이 존재하는 물체에 대한 역학적 거동을 다루는 파괴역학의 유용성은 입증할 수가 있다. 특히, 장시간의 규칙 또는 불규칙적인 반복응력을 받아 생기는 crack 진전에 의한 피로파괴의 연구 또한 절실히 필요하다. 이러한 crack 진전을 동반하는 피로파괴의 연구는 대소형 파괴사고를 미연에 방지할 수 있고 설계자료로서 제시할 수 있도록 crack

본 논문은 대한조선학회 1988년도 춘계연구발표회에서 발표된 논문임

접수일자: 1988년 5월 17일, 재접수일자: 1988년 6월 20일

* 정회원, 인하대학교

** 한국에너지연구소

*** 정회원, 한국기계연구소 대덕선박분소

진전저동을 체계적으로 규명하여야 하며 필요에 따라서는 crack 발생 및 진전을 저지시키든가 또는 진전속도를 지연시키는 조치를 취하여야 할 때가 있다. crack 진전을 저지 내지 지연시키기 위하여는 여러가지 연구가 이루어져 있고[3~5] 또한 계속되고 있다. 따라서 본 연구에서는 crack진 평판에 보강덮판을 댄 경우를 대상으로 하여 보강덮판이 crack진 평판의 crack 진전지연에 기여하는 효과를 compliance법을 이용하여 해석하였고, 이 해석의 타당성을 실험을 통하여 입증하였다.

2. 본 연구와 관련된 이론

2.1. 피로 Crack 진전에 대한 파괴역학의 적용

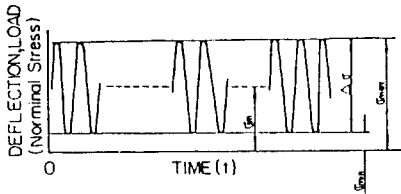


Fig. 2-1 Variation of load at constant-amplitude loading fatigue test

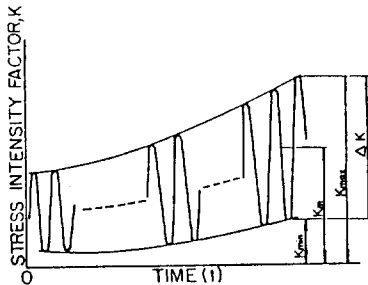


Fig. 2-2 Variation of stress intensity factor at constnt-amplitude loading fatigue test

Fig. 2-1과 같이 일정진폭의 반복하중이 작용할때 응력확대계수 K 는 Fig. 2-2와 같이 변화하고 최대응력확대계수 K_{max} , 최소응력확대계수 K_{min} , 응력확대계수 폭 $\Delta K(K_{max}-K_{min})$, 평균응력확대계수 $K_m=1/2(K_{max}+K_{min})$ 은 crack 진전에 따라 변화한다. Crack 진전속도(da/dN)는 K_{max} , K_{min} , ΔK , K_m 등의 양의 함수로 표현할 수 있고, 다음의 식으로 표시 된다.

$$\begin{aligned} \frac{da}{dN} &= f_1(\Delta K, R') = f_2(K_{max}, R') \\ &= f_3(\Delta K, K_{max}) \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서

$$R' = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

는 응력비(stress ratio)[6]이다.

일반적으로 피로 crack 성장에 영향을 주는 요인은 복잡하다[7]. 파괴역학적 입장에서 정리한 피로 crack 진전속도에 관한 연구를 개괄적으로 살펴보면 실험과 이론에 의하여 얻어진 식들은 극히 많다[8,9].

Paris는 최초로 Irwin의 응력확대계수(stress intensity factor) K 의 함수로서 crack 진전속도를 나타내었다[10]. 즉 crack 진전속도 da/dN 를

$$\frac{da}{dN} = f(K) \text{ 또는 } \frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad (2.2)$$

로 표현하였고, 여기서 a 는 crack의 반길이, K 는 응력확대계수, N 는 반복횟수인데 Paris는 위의 식을

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.3)$$

의 형으로 표현하였다. 여기서 C 와 m 은 재료정수이다. m 의 값은 재료에 따라서 여러가지의 값을 갖는데 보통 $m=0.5\sim 8.0$ 정도의 넓은 값을 취하며 C 도 $10^{-5}\sim 10^{-18}$ 정도를 가짐이 밝혀졌다[11,12].

Crack의 진전은 에너지 해방율(energy release rate) G 가 crack 진전 저항력 R 보다 클 때 일어난다. G 와 R 의 차이가 운동에너지로 얼마나 유용하게 전환되는가에 따라 crack 진전속도를 좌우한다.

Fig. 2-3는 crack 진전이 일정한 응력상태에서 일어나며 에너지 해방율은 crack 진전속도에 의존하지 않으며 또한 crack 진전저항력 R 가 일정하다고 가정하였을 때의 crack 진전상황을 설명한 것인데 이 그림에서 crack 진전 Δa 에 따르는 G 와 R 의 차($G-R$)는 빗금친 부분으로 나타내어지며 이 양만큼의 에너지는 운동에너지로 전환된다.

탄성에너지 해방율은

$$G = \frac{\pi \sigma^2 \cdot a}{E} \text{ (kg}\cdot\text{f/mm)} \quad (2.4)$$

여기서

G : 에너지 해방율

σ : 응력(일정)

a : Crack반길이

E : 재료의 탄성계수

이다. 그러나 판의 끝이 고정되어 있는 경우에는 응력은 crack이 성장하는 동안에 감소하므로 G 는 감소한다. G 가 감소하는 경우를 Fig. 2-4에 나타내었다. 이 경우에 crack은 $G < R$ 이라 할지라도 ABC의 면적이 CDE의 면적과 같을 때까지 계속 진전하여 E점에서는 운동에너지는 0이 되므로 Crack 진전속도는 0이 된다.

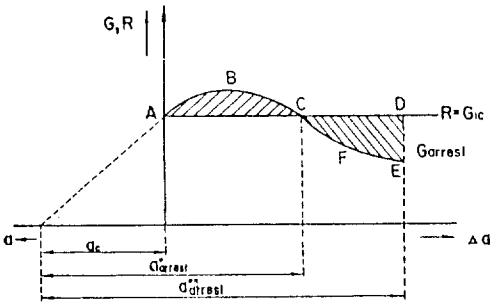


Fig. 2-3 Representation of the kinetic energy

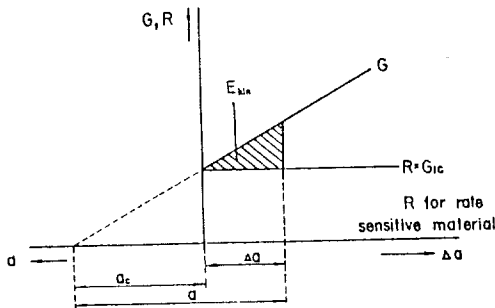


Fig. 2-4 Crack arrest due to decreasing G

G는 한계에너지 해방율(G_{ic})보다 낮기 때문에 crack 진전속도가 0에 도달한 후에 정지되어 피로 crack 진전이 정지된다. 이 낮은 값을 arrest toughness라고 한다. 또한 crack이 진전할 때 crack진 평판보다 인성(toughness)가 높은 보강덜판을 대어서 crack을 정지시켜서 피로 crack 진전을 지연시킬 수 있다.

2.2. Crack 진전과 Compliance와의 관계

중단관통 crack $2a$ 를 갖고 있는 탄성체에 인장하중 P 가 작용할 때 변위를 δ 라고 하면 compliance λ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\delta}{P} \tag{2.5}$$

즉 단위하중당 변위를 나타낸다. 에너지 해방율은

$$G = \frac{du}{dA} = \frac{d}{dA} \left(\frac{P\delta}{2} \right) = \frac{P^2}{2} \cdot \frac{d\lambda}{dA} \tag{2.6}$$

과 같은 식으로 표시되며, 여기서 dA 는 crack 면적의 미소 증분을 나타내며 재료의 두께를 t 라고 하면

$$G = \frac{P^2}{2} \cdot \frac{d\lambda}{dA} = \frac{P^2}{2t} \cdot \frac{d\lambda}{da} \tag{2.7}$$

와 같은 식으로 표시되고 crack이 da 만큼 진전하였을 때 해방되는 에너지를 이 da 부분의 crack을 닫는데 필요한 일량과 같다고 놓으면 다음의 식을 얻는다.

$$G = \frac{du}{dA} = \frac{K_I^2}{E'} \tag{2.8}$$

단,

$$E' = \begin{cases} E & (\text{평면응력}) \\ E/(1-\nu^2) & (\text{평면 변형도}) \end{cases}$$

ν : 포아송비

이다. 식 (2.7)과 식 (2.8)에서 K_I 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_I = \sqrt{\frac{E' \cdot P^2 \cdot d\lambda}{2t \cdot da}} \tag{2.9}$$

따라서 일반적으로 어느 crack을 갖는 부재에서의 응력확대계수 K 는 전체에너지법(total energy method)를 이용하여 식 (2.9)에 의하여 구할 수 있다.

2.3. Crack 진전에 따르는 Compliance의 변화

Isida는 본 시험편과 같은 crack에 대하여 다음과 같이 K 의 값을 제시하였다.[13]

$$K = \sigma \sqrt{a} \cdot Y \tag{2.10}$$

여기서 Y 는 $F\left(\frac{a}{w}\right)$ 로 표시되는 형상계수이며 다음과 같이 주어진다.

$$Y = 1.77 \left[1 - 0.1 \left(\frac{2a}{w} \right) + \left(\frac{2a}{w} \right)^2 \right] \tag{2.11}$$

또한 일반적으로 어느 crack을 갖는 부재에서의 응력확대계수 K 는 total energy method를 이용하여 다음과 같이 표시된다.

$$K = \sqrt{\frac{E' \cdot P^2 \cdot d\lambda}{2t \cdot da}} \tag{2.12}$$

Total energy method에 의한 K 값과 식 (2.10)을 등치하면

$$K = \sqrt{\frac{E' \cdot P^2 \cdot d\lambda}{2t \cdot da}} = \sigma \sqrt{a} \cdot Y \tag{2.13}$$

가 되고 여기서 Y 에 대한 식 (2.11)을 대입하고 $d\lambda$ 에 대하여 풀면

$$d\lambda = \frac{2t \cdot Y^2 \cdot a}{A^2 \cdot E'} da \tag{2.14}$$

와 같이 된다. 위의 식을 적분하면 λ 에 대한 식을 구할 수 있다.

$$\lambda = \lambda_0 + \int \frac{2t \cdot a \cdot Y^2}{A^2 \cdot E'} da \tag{2.15}$$

평면응력의 경우 식 (2.15)에서 $E'=E$ 가 된다.

여기서 λ_0 는 적분상수이며 초기조건으로부터 구할 수 있으며 초기에 crack이 없는 경우에는

$$\lambda_0 = \frac{\delta}{P} = \frac{PL_0/E \cdot A}{P} = \frac{L_0}{AE} \tag{2.16}$$

이며 이 식에서 L_0 는 판의 길이, A 는 판의 단면적이다.

다음에 이 compliance을 이용하여 crack진 평판으로부터 보강덜판으로 얼마의 하중이 옮겨가는지를

알아보기 위하여 하중(P)이 일정하게 작용하고 있을 때 crack진 평판에 걸리는 하중 P_1 과 보강덮판에 걸리는 하중 P_2 를 구하여 보던

$$P = P_1 + P_2 \quad (2.17)$$

$$\lambda_1 = \frac{\delta_1}{P_1}$$

$$\lambda_2 = \frac{\delta_2}{P_2} \quad (2.18)$$

여기서 λ_1 는 crack진 평판에 대한 compliance이고, λ_2 는 보강덮판에 대한 compliance이며 $\lambda_2 = \frac{L_2}{A_2 \cdot E}$ 로 구할 수 있는데 이 식에서 A_2 및 L_2 는 보강덮판의 평형부의 단면적 및 길이이다. 식 (2.18)에서 하중이 작용하였을 때는 δ_1 과 δ_2 가 같아지므로

$$P_1 \cdot \lambda_1 = P_2 \cdot \lambda_2 \quad (2.19)$$

가 된다.

식 (2.17)과 식 (2.19)로 부터 다음 식을 구할 수 있다.

$$P_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot P$$

$$P_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot P \quad (2.20)$$

식 (2.15)을 보면 식 (2.20)에서 crack진 평판 및 보강 덮판의 compliance λ_1, λ_2 은 crack반 길이 a 의 함수임을 알 수 있으며 따라서 crack진 평판 및 보강덮판에 걸리는 하중 P_1, P_2 는 λ_1, λ_2 의 증가와 더불어 감소함을 알 수 있다. 식 (2.20)을 사용하여 보강 덮판에서의 응력확대계수 폭 ΔK 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta K &= K_{\max} - K_{\min} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cdot \sqrt{a} \cdot Y \\ &= \frac{P_{\max} - P_{\min}}{A} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \sqrt{a} \cdot Y \quad (2.21) \end{aligned}$$

3. 시험절차

3.1. 시험재료 및 시험편

본 실험에서 사용된 시험재료는 포항제철에서 생산되는 393MPa(40kg/mm²)급 일반구조용 압연강재이며 한국선급협회(KR 31조) KR연강 RD강의 상당품이다. 인장 시험에 의하여 얻은 재료의 기계적 성질은 항복점(σ_y)이 29kg/mm², 인장강도(σ_u)는 39kg/mm² 그리고 탄성계수(E)는 2.05×10^4 kg/mm²이며 화학성분은 Table 3-1과 같다.

모든 시험편은 압연방향에 수직방향으로 자른후,

Table 3-1. Chemical composition(wt%)

C	Mn	P	S	Ni	Si	Mo
0.15	0.28	0.013	0.021	0.03	0.07	0.01

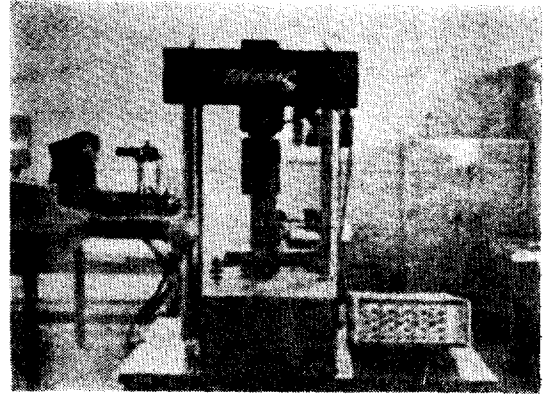


Photo 3-1 Fatigue test apparatus

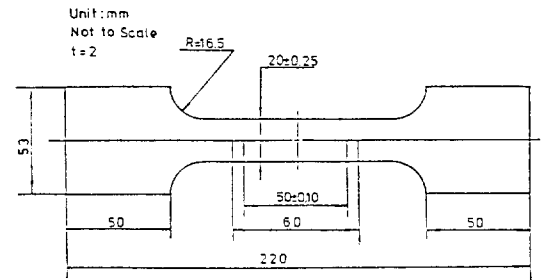


Fig. 3-1 Tensile test specimen

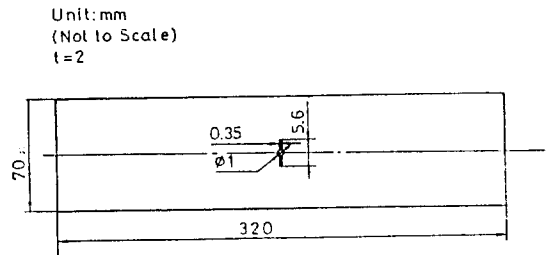


Fig. 3-2 Fatigue test specimen

crack을 압연방향과 같은 방향으로 가공하였다. 재료의 인장시험편은 Fig. 3-1과 같으며 피로 시험편으로서 Fig. 3-2와 Fig. 3-3과 같이 각각 $\phi 1$ mm, $\phi 3.2$ mm의 구멍을 뚫고 가는 실톱(두께 $t=0.35$ mm)으로 노치 길이가 5.6mm가 될때까지 손작업을 한 후 피로시험기로 crack 길이가 평판폭의 1/10인 7mm까지 예비피로 crack을 주었다. Fig. 3-2와 Fig. 3-3에서 각각 구멍을 $\phi 1$ mm 및 $\phi 3.2$ mm로 한 이유는 선 crack매와 구멍 crack에서 발생하는 crack 진전에 대하여 실험하기 위해서이다. 또한 보강덮판재(Fig. 3-4,5)는 crack진 평판재와 동일재료를 사용하여 밀링머신으로 가공한 후 하나는 Fig. 3-5와 같이 $\phi 3.2$ mm의 리벳구멍을 뚫었다. 보강덮판을 댄 시험은 Fig. 3-2와 Fig. 3-4 및 Fig. 3-3

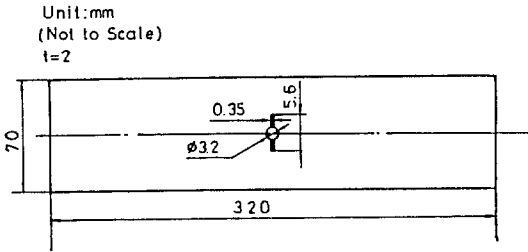


Fig. 3-3 Fatigue test specimen

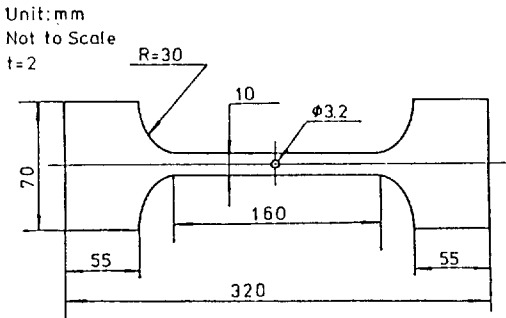


Fig. 3-4 Cover plate

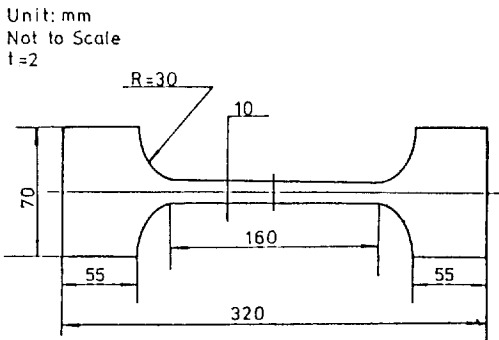


Fig. 3-5 Cover plate with rivet hole

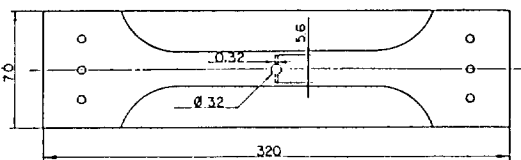


Fig. 3-6 Fatigue test specimen with cover plate

과 Fig. 3-5를 각각 한조로 제작하였는데 이를 Fig. 3-6 및 Fig. 3-7에 보였다.

3.2. 실험방법

Fig. 3-1의 인장시험편에 strain gage를 붙여서 재료의 탄성 계수 E , 항복점 σ_y 및 인장 강도 σ_u 를 구하

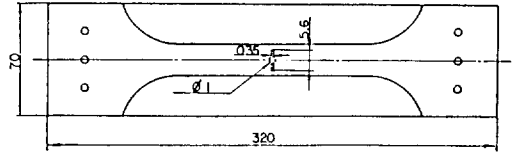


Fig. 3-7 Fatigue test specimen with cover plate

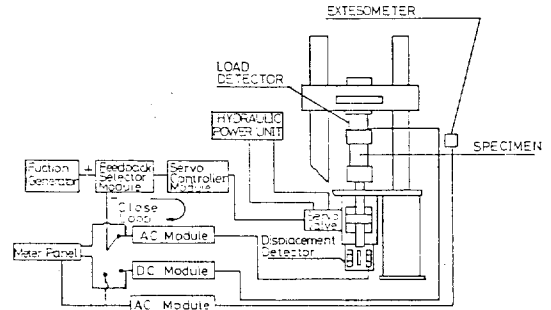


Fig. 3-8 A schematic drawing of fatigue testing machine

였다.

피로시험은 Photo 3-1과 같이 유압 servo 피로시험기(Saginomia Co.; 10ton)을 사용하였으며 Fig. 3-2, Fig. 3-3, Fig. 3-6 및 Fig. 3-7의 시험편을 각각 시험편의 척(chuck)에 장착하고 1/100mm까지 측정할 수 있는 이동식 특수현미경(travelling microscope)으로 crack 선단을 따라가면서 눈금을 읽어서 crack 진행량을 측정하였다. 시험장치의 설명도를 Fig. 3-8에 보였다. 이때 최대하중(P_{max})은 2.0ton 최소하중(P_{min})은 0.4ton으로 응력비(R')는 0.2로 하고 주파수 및 파형은 15Hz의 sine파를 택하였다.

피로시험은 다음의 4가지 경우에 대해서 실시하였다. 즉,

1. 선 crack을 가진 평판일 경우
2. 구멍 crack을 가진 평판일 경우
3. 선 crack을 가진 평판에 보강덜판을 뒀을 경우
4. 구멍 crack을 가진 평판에 구멍이 있는 보강덜판을 뒀을 경우에 대하여 자료를 구하였다.

4. 실험결과 및 결과에 대한 고찰

4.1. 실험결과

각각의 실험에 있어서 반복하중의 진폭은 일정하게 하였으며 반복 cycle수에 대한 crack 진전길이의 관계를 Fig. 4-1~4-4에 표시하였다.

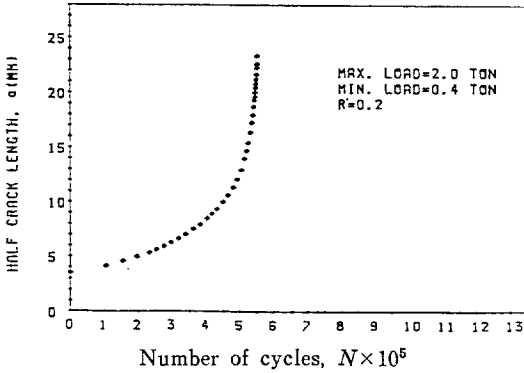


Fig. 4-1 Growth curve for a central crack in structural specimen (line crack)

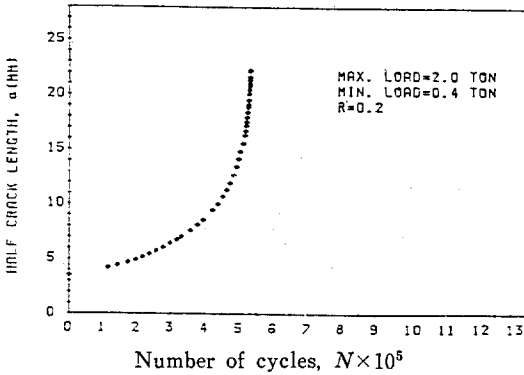


Fig. 4-2 Growth curve for a central crack in structural specimen (rivet hole crack)

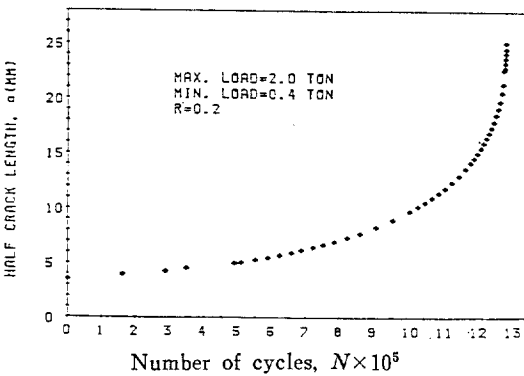


Fig. 4-3 Growth curve for a central crack in structural specimen (line crack with cover plate)

Fig. 4-1 및 Fig. 4-2의 실험자료로부터 ΔK 와 $\frac{da}{dN}$ 의 관계를 구하고 이를 log-log scale로 그리면 Fig. 4-5 및 Fig. 4-6과 같이 된다. 이들 그림에서 보는 바와 같이 양대수 graph 용지에서 ΔK 와 $\frac{da}{dN}$ 는 직선관계로

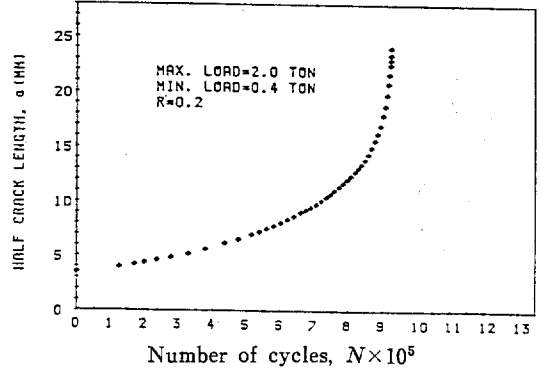


Fig. 4-4 Growth curve for a central crack in structural specimen (rivet hole crack with cover plate)

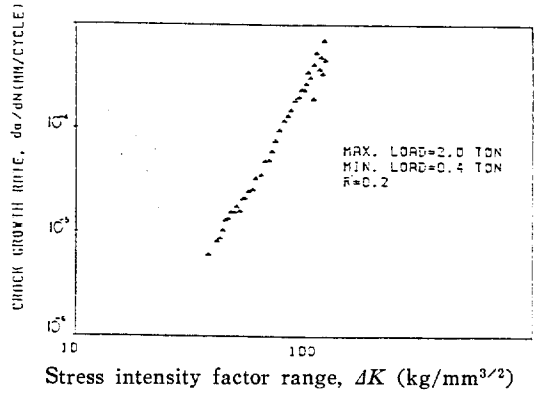


Fig. 4-5 Stress intensity factor range vs. crack growth rate for structural steel (line crack)

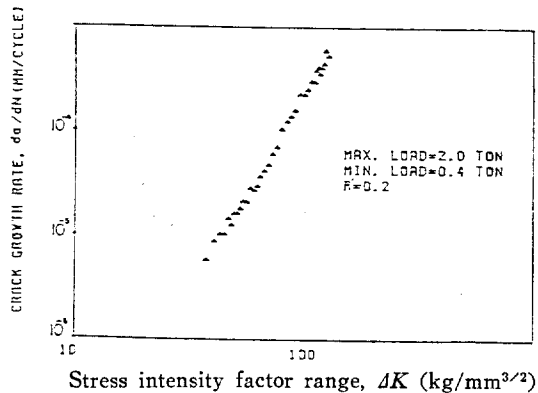


Fig. 4-6 Stress intensity factor range vs. crack growth rate for structural steel (rivet hole crack)

나타남을 알 수 있다. Least square method로 직선의 방정식을 구하면 $\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$ 에서의 기울기 (m)와

상수(C)를 구할 수 있다. 보강덮판을 대었을 때의 cycle 수에 대한 crack 진전길이의 관계는 Fig. 4-3 및 Fig. 4-4에 보였는데 $\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$ 의 식에서 C와 m은 재료의 정수이므로 앞에서 구한 이들 C와 m의 값을 사용하여 보강덮판을 대었을 때의 ΔK 를 실험으로부터 구할 수가 있다.

4.2. 실험결과에 대한 고찰

이상의 실험결과를 종합적으로 검토하여 보진테 반복 cycle에 따르는 선 crack 및 구멍 crack의 진전거동은 Fig. 4-1 및 Fig. 4-2에 보인 바와 같이 양자 공히 cycle수 5.5×10^5 정도에서 파단에 이르고 있으며 이때의 crack 길이는 약 46mm 정도이다. 따라서 양자의 경우를 비교하여 보면 구멍 crack은 구멍의 영향을 거의 받지 않는 것으로 사료된다.

지금 Fig. 4-5 및 Fig. 4-6의 자료를 함께 합치면 Fig. 4-7과 같이 되는데 이 그림에서 보면 이들 자료는 역시 하나의 직선상에 놓인다고 보아도 좋고 이로부터 crack 진전에 대한 Paris 식 $\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$ 가 잘 적용됨을 확인할 수가 있으며 C와 m은 crack의 형상에는 관계하지 않는 재료의 정수임을 알 수 있다. 본 실험에 사용한 재료의 C와 m은 각각 $C = 9.207188 \times 10^{-13}$, $m = 4.209$ 이었다. 또한 이 재료의 최종파단이 일어날 때의 K_I 의 임계값을 계산하여 보면 $162.18 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 임도 알 수 있다.

다음에 보강덮판으로 보강시켰을 경우의 crack 진전거동을 검토하여 보면 Fig. 4-3 및 Fig. 4-4로부터 보강덮판으로 보강하기 전에 비하여 그 수명이 상당히 길어졌음을 알 수 있다. 그러나 선 crack 때와 구멍을 갖는 경우를 비교하여 보면 선 crack 때에는 파단에 이르는 반복횟수가 약 13×10^5 cycle임에 반하여 구멍

을 갖는 경우는 9×10^5 cycle 정도밖에 되지않아 이로 미루어 crack진 평판을 보강덮판으로 보강시키는 경우, 구멍을 갖는 경우가 crack진 평판의 피로수명에 영향을 크게 미치므로 이에 대한 강도 설계시에 검토가 충분히 이루어져야 할 것으로 사료된다. 각각의 crack의

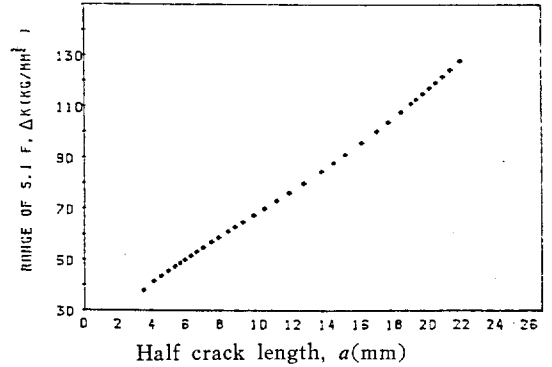


Fig. 4-8 Stress intensity factor range vs. crack length (line crack)

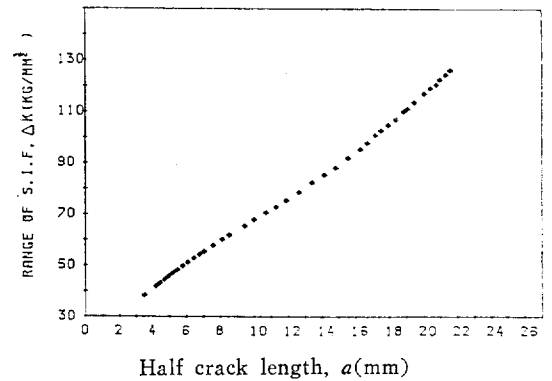


Fig. 4-9 Stress intensity factor range vs. crack length (rivet hole crack)

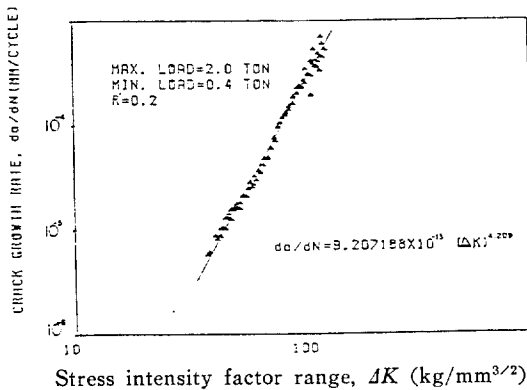


Fig. 4-7 Stress intensity factor range vs. crack growth rate for structural steel

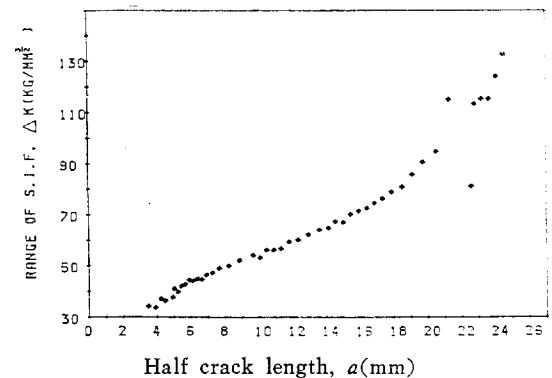


Fig. 4-10 Stress intensity factor range vs. crack length (line crack with cover plate)

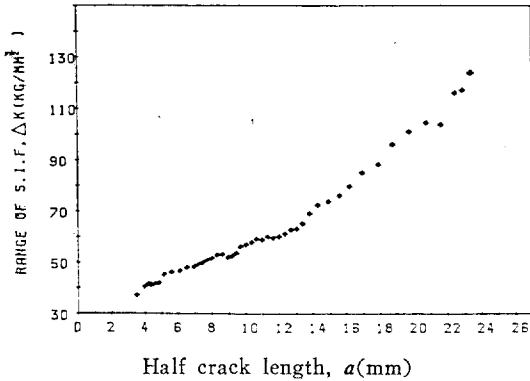


Fig. 4-11 Stress intensity factor range vs. crack length (rivet hole crack with cover plate)

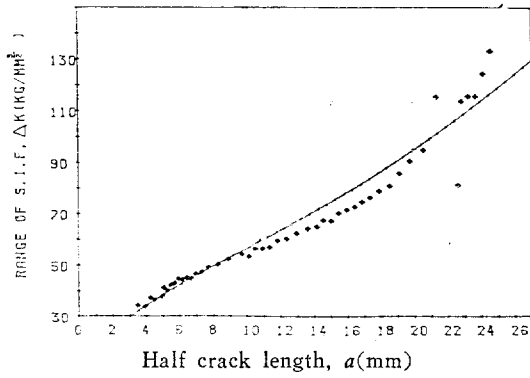


Fig. 4-12 Stress intensity factor range vs. crack length (line crack with cover plate)

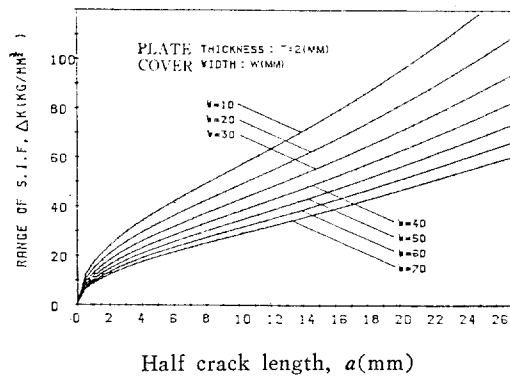


Fig. 4-13 Stress intensity factor range vs. crack length

길이에 있어서의 crack 진전속도를 알아보기 위하여 작성한 Fig. 4-8, Fig. 4-9 및 Fig. 4-10, Fig. 4-11을 검토하여 보면 보강덮판이 없는 경우는 Fig. 4-8 및 Fig. 4-9에서 보는 바와 같이 선 crack의 경우와

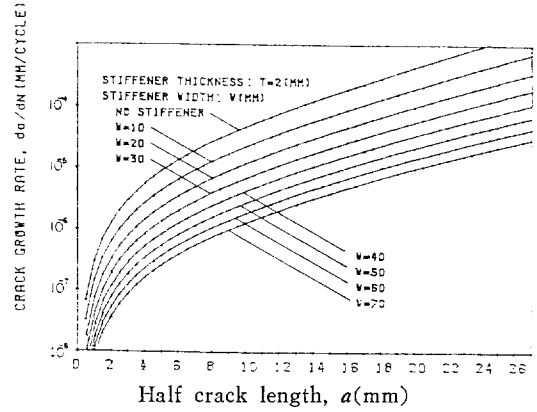


Fig. 4-14 Crack growth rate vs. crack length

구멍 crack의 경우와는 각각의 crack 길이에 있어서의 ΔK 는 동일한 값을 취함을 알 수 있고, crack 진전속도가 $\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$ 으로 표현됨을 감안할 때 양자의 경우 같은 길이의 crack일 경우는 같은 속도로 crack이 전파되어 나갔음을 알 수 있다. 그러나 보강덮판으로 보강을 하였을 경우는 보강덮판으로 보강을 하지 않은 경우에 비하여 같은 crack 길이에 있어서의 ΔK 의 값이 상당히 저하되어 있음을 알 수 있고, 이 경향은 crack 길이가 길어질수록 심함을 알 수 있다. 이로부터 보강덮판이 없는 경우는 crack의 길이가 길어짐에 따라 대체적으로 crack 진전속도가 커지고 있으나 보강덮판을 대었을 경우는 crack 길이 증가에 따르는 crack 진전속도의 증가율이 둔화되어졌음을 확인할 수가 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 보강덮판을 댄 경우도 리벳구멍 등을 갖는 경우가 구멍을 갖지 않는 경우에 비하여 임의의 crack 길이에 있어서의 진전속도가 큼을 알 수 있다. 또한 앞에 나온 그림에서도 이미 지적한 바와 같이 보강덮판으로 보강시켰을 경우 ΔK 의 값이 저하되는 원인에 대하여 검토해 보면 일반적으로 부재에 있어서 crack이 진전하여 나가면 그 부재의 compliance는 커진다. 이와 같이 compliance가 증가하면 증가한 양만큼 작용하고 있는 힘을 보강덮판이 더욱 많이 부담하게 될 것이고 따라서 보강판이 없는 경우에 비하여 ΔK 가 작아진다. 이에 대한 이론적 검토는 2.3절에 밝혔다. 식 (2.21)의 관계를 사용하여 보강판으로 보강시켰을 경우의 주판에서의 선 crack에 따르는 ΔK 의 값을 계산하여 Fig. 4-12에 보였다. 이 그림에는 실험치도 함께 표시하였다. 이 그림에서 해석에 의하여 작성한 곡선과 실험에서 구한 자료는 대체적으로 일치함을 알 수 있으며, 약간의 차이가 나타나는데 이 원

인은 여러가지 있겠으나 실험값의 최종 부분은 파단적전의 것이고 선형 파괴 역학의 적용이 부적당한데 그 원인이 있는 것으로 추측된다. 또한 Fig. 4-12에서 crack의 반길이 a 가 $10 < a < 20$ 때는 실험치선이 이론치선보다 약간 뒤떨어지는 경향을 보였으나 이는 보강덜판이 비교적 큰 응력이 되풀이 하여 결림으로 인한 재질의 변화, 변형경화지수등 기타 여러가지 원인이 있을 것으로 사료되며 다각적인 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

보강덜판의 폭을 여러가지로 변화시켰을 때의 crack 반길이 a 에 대한 ΔK 의 곡선을 Fig. 4-13에 보였다. 이 그림에서 보면 보강덜판의 폭이 크면 ΔK 는 점차 감소하며 보강덜판폭의 증가에 따르는 ΔK 의 감소의 양상을 간단히 파악할 수가 있다. 보강덜판이 있을 때의 각 crack 길이에 대한 crack 진전속도는 $\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$ 의 관계로부터 쉽게 구할 수 있는데 이를 Fig. 4-14에 나타내었다. 이 그림을 이용하면 여러가지 폭의 보강덜판으로 보강하였을 때의 crack 진전속도를 용이하게 구할 수 있다.

5. 결 론

부재내에 crack이 발생하여 전파할 때 crack 성장과 더불어 그 부재의 Compliance는 증가한다. 따라서 기계나 구조물을 구성하는 각 부재에 작용하는 하중의 재분배가 일어나는 이론을 도입하여, 하나의 예로서 주판에 crack이 발생, 피로 등에 의하여 전파하여 갈 때, 보강덜판으로 보강시켰을 경우 보강덜판이 crack 진 평판에서의 crack전과 지연에 기여하는 효과를 해석을 통하여 규명하였고, 실험에 의하여 이 해석방법의 타당성을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 방법은 여러가지 부재로 구성된 구조물 등에서 임의 부재에 crack이 발생하였을 때에도 적용시킬 수 있어 crack 발생 내지 전파가 예상되는 기계나 구조물의 안전설계 내지 안전사용에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Yoshinori Fukui, Yoshio Sasaki, Kiyoshi Moriya, Bulletin of Marine Engineering Society in Japan, Vol. 13, No. 2, p.73, 1985.
- [2] 福島義久, 山本 學, “ディーゼ主機関の最近の損傷例”, 日本海事協會會誌, No. 194, p. 33, 1986.
- [3] Rolfe, S.T., Rhea, D.M. and Kuzmanovic, B. O., “Fracture-Control Guidelines for Welded Steel Ship Hulls”, SSC-244, Ship Structure Committee, Washington, 1974.
- [4] 中井善一, 田中啓介, 川島理生司, “低炭素鋼切欠き材における疲労き裂の傳ばと停留”, 材料, 第32卷 第356號, pp.535-541, 1983.
- [5] Kanazawa, T., “Recent Studies on Brittle Crack Propagation in Japan, Dynamic Crack Propagation, ed. G.C. Sih”, Hoordhoff, Leyden, pp. 565-597, 1973.
- [6] S. Kocanda, “Fatigue Failure of Metals”, Sijthoff and Noodhoff International Publishers, 1978.
- [7] R.P. Wei, “Frature Mechanics Approach to Fatigue Analysis in Design”, *Journal of Engineering Material and Technology*, Vol. 100, April, 1978.
- [8] A.K. Head, Phil, Mag., Vol. 44, Series 7, p.925, 1953.
- [9] H.W. Liu, Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, Vol. 93, p.23, 1961.
- [10] P.C. Paris and F. Erdogan, “A Critical Analysis of Crack Propagation Law”, *Trans. ASME, Journal of Basic Engineering* Vol. 85, No. 4, p.528, 1963.
- [11] L.P. Pook, “Analysis and Application of Fracture Crack Growth Data”, *Journal of Strain Analysis*, Vol. 10, No. 4, 1975.
- [12] S.T. Rolfe and J.M. Barsom, “Fracture and Fatigue Control in Structures”, Application of Fracture Mechanics, Prentice-Hall p.232, 1977.
- [13] William F. Brown, Jr. and John E. Strawley, “Plan Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials”, ASME, Special Technical Publication, No.410.

[1] Yoshinori Fukui, Yoshio Sasaki, Kiyoshi Moriya,