疲勞荷重에 의한 균열 傳播擧動에 미치는 過負荷의 영향에 관한 研究

An Investigation of the Effect of the Overload on the Fatigue Crack Propagation.

KOREA MARITIME UNIVERSITY
한국해양대학교
1945

지도교수 金永植

金克洙

目 次

1. 序論
2. 實驗方法
   2.1 試驗材 및 試驗片
   2.2 實驗裝置 및 實驗方法
3. 實驗結果 및 考察
   3.1 모서리 균열의 傳播特性
   3.2 모서리 균열의 形狀變化
   3.3 모서리 균열의 過負荷에 의한 減速效果(Retardation effect)의 모형화
4. 結論

dCollection

1. 序論

船舶, 항공기, 교량 등의 大型構造物 및 各動機械 또는 壓力容器 등의 安全性 確保를 위한 設計에 있어서 가장 重要한 問題로 이들 構造物의 疲勞破壞를 如何히 防止하느냐 하는 問題라 할 수 있다.

이러한 問題를 해결하기 위해서는 構造物 部材 內部에 存在하는 空孔(Void) 介在物(Inclusion) 등의 材料자체의 各種欠陷, 토우 균열(Toe Crack), 가로 균열, 세로균열, 라메라 테어(Lamellar tear) 등의 熔接時 수반되는 熔接균열, 構造物의 形上 不連續部 등의 應力集中部를 起點으로 發生傳播하는 疲勞균열의 發生機構가 解明되어야 하며 이를 기초로 構造物의 使用수명 예측이 可能해져야 할 것이다.

이러한 疲勞균열 중 引張에 의한 貫通균열은 지금까지 많은 硏究가 行해져 왔으나 平面굽힘 荷重에 의한 表面균열에 대해서는 충분히 밝혀져 있지 않다.

平面굽힘 反復荷重에 의한 表面균열은 降伏點(yield point)보다 낮은 使用條件下에서도 構造物의 各種欠陷등의 應力集中部를 起點부터 균열이 發生 傳播하여 臨界균열 길이(Critical crack length)까지 이르게 되면 그 후 순식간에 構造物 全体의 破斷을 초래하게 된다. 疲勞균열에는 Fig.1 과 같이 引張·壓縮荷重에 의하여 構造物 部材의 두께를 貫通하면서 傳播하는 貫通균열과 굽힘反復荷重에 의한 表面균열로 대별되고.

또 表面균열에는 半圓形균열(Semi circular crack), 半楕圓形(Semi elliptical) 四分圓形(quarter circular) 四分楕圓(quarter elliptical) 등으로 細分된다.

특히 四分圓形 四分楕圓形균열을 모서리균열(corner crack)이라고 하며, 이러한 모서리 균열은 균열이 伝播함에 따라 形狀変化가 현저하게 나타난다.

実際 構造物에 加해지는 反復荷重은 일정하지가 않고, 荷重크기의 변화가 아주 심한 것이 사실이다.
그러나 지금까지는 일정크기의 反復荷重에 의한 疲労균열 伝播特性에 대해서는 많은 研究報告가 있으나 자주 変動하는 荷重크기에 의한 균열 伝播特性에 대해서는 잘 알려져 있지 않다.

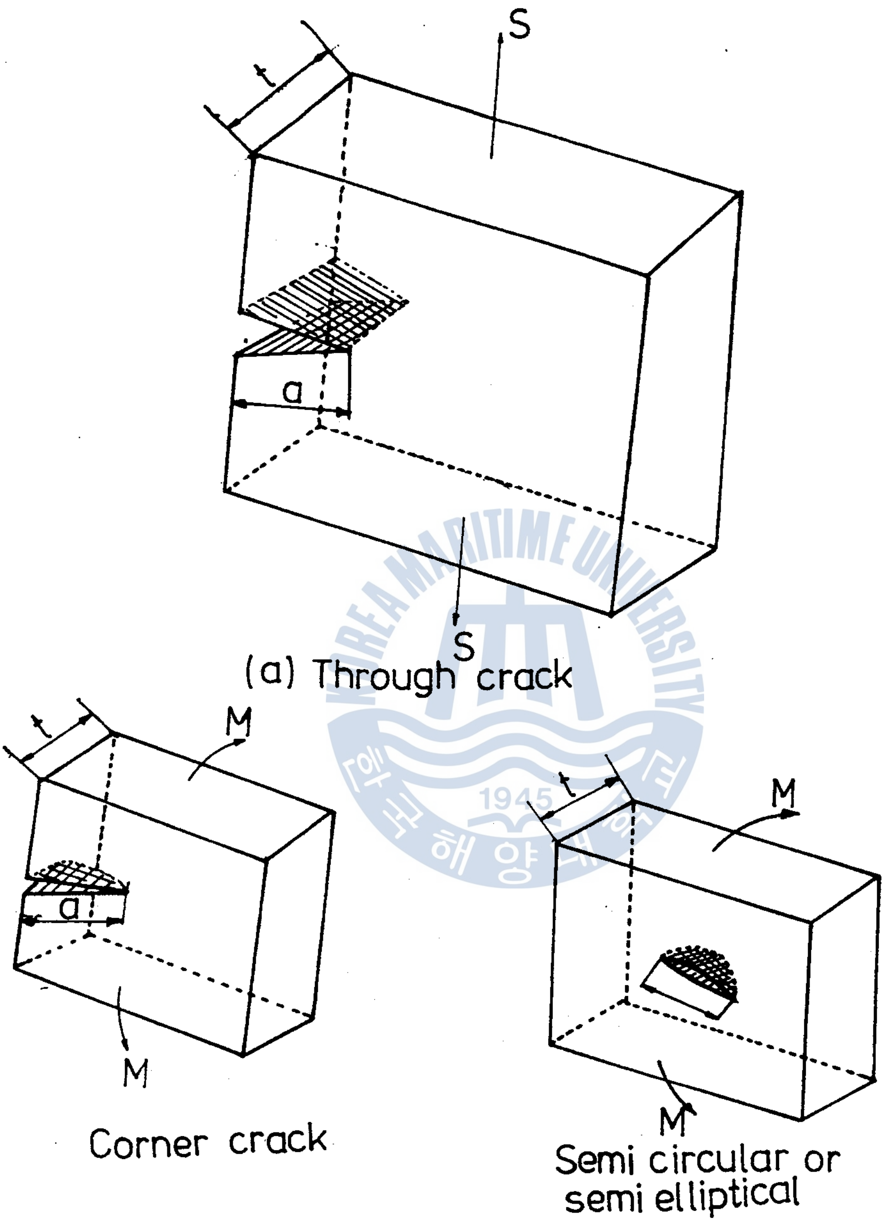
本 研究는 最近 小形 高速 船舶의 外板材料로 많이 使用하는 5086-H116 알루미늄 합금재 에서의 모서리 균열이 伝播함에 따라 変化하는 減速効果(Retardation effect)를 検討함과 아울러 過負荷에 의한 減速効果(Retardation effect)를 모형화 하기위한 目的으로 행하였다.

2 実験方法

2-1 実験材 및 実験片

本 実験에 使用한 試験材는 5086-H116 알루미늄 合金材의 化学的 成分 및 機械的 特性은 Table 1에 나타내고 있다.

dCollection



(a) Through crack

Corner crack

(b)Surface crack

Fig. 1. Fatigue crack

dCollection

試驗片은 壓延方向을 길이方向과 一致시켜 Fig.2 와 같은 치수로 機械加工 하여 고운 두께를 최고 #2000 까지의 사포 (Sand Paper) 로 연마해서 研磨加工 하였다

노치 (Notch)는 片側貫通노치 (edged through notch)로서 0.2mm 슬로팅 커터 (Slotting Cutter)를 利用하여 밀링 머신 (Milling machine) 에서 機械加工 하였다.

2-2. 實驗裝置 및 實驗方法

實驗에 사용한 試驗機는 本 研究室에서 考案 製作한 片心 輪式 定變位 平面 굽힘 疲勞 試驗機로서 이것의 概略圖는 Fig.3에, 外觀은 Photo 1에 보인다.

板狀 試驗片의 一端은 덮개 (Cover)를 덮어 固定볼트로 固定하고 自由端은 片心輪의 回轉에 의하여 反復的으로 平面굽힘 荷重을 받게 하였다. 이 片心輪의 外周에는 볼 베어링을 끼워서 試驗片과의 사이에 摩擦을 피할 수 있도록 하였고 試驗片은 同時에 3個까지 걸 수 있도록 하였다.

그리고, 片心輪의 片心量 및 固定端과 荷重点과의 길이 (Fig.2의 L_1) 또는 固定端과 노치 (Notch)와의 길이 (Fig.2의 L_2)를 變化시켜 應力을 미세하게 調節할 수 있도록 하였다.

荷重 反復의 回數測定에는 펄스 (pulse)式 센서 (Sensor)와 電子積算 回轉計 (Digital integrating counter)를 利用한 回轉數 測定器 (Counter Unit)를 製作하여 10^8回까지 精密하게 測定하였고, 균열 성장 길이 (Crack Growth length)는 一定한 反復 荷重

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교
dCollection

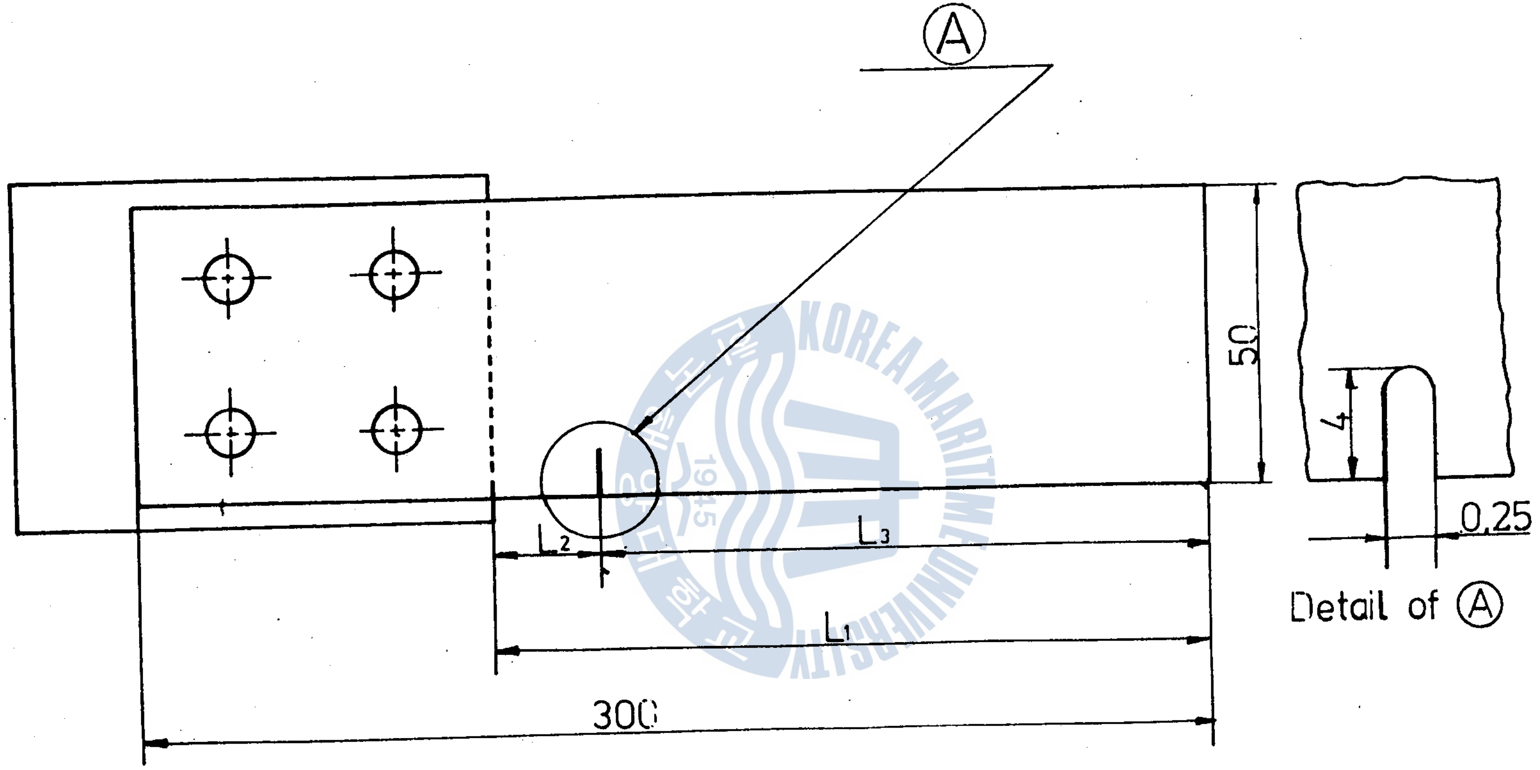


Fig. 2 Configuration and dimension of specimens

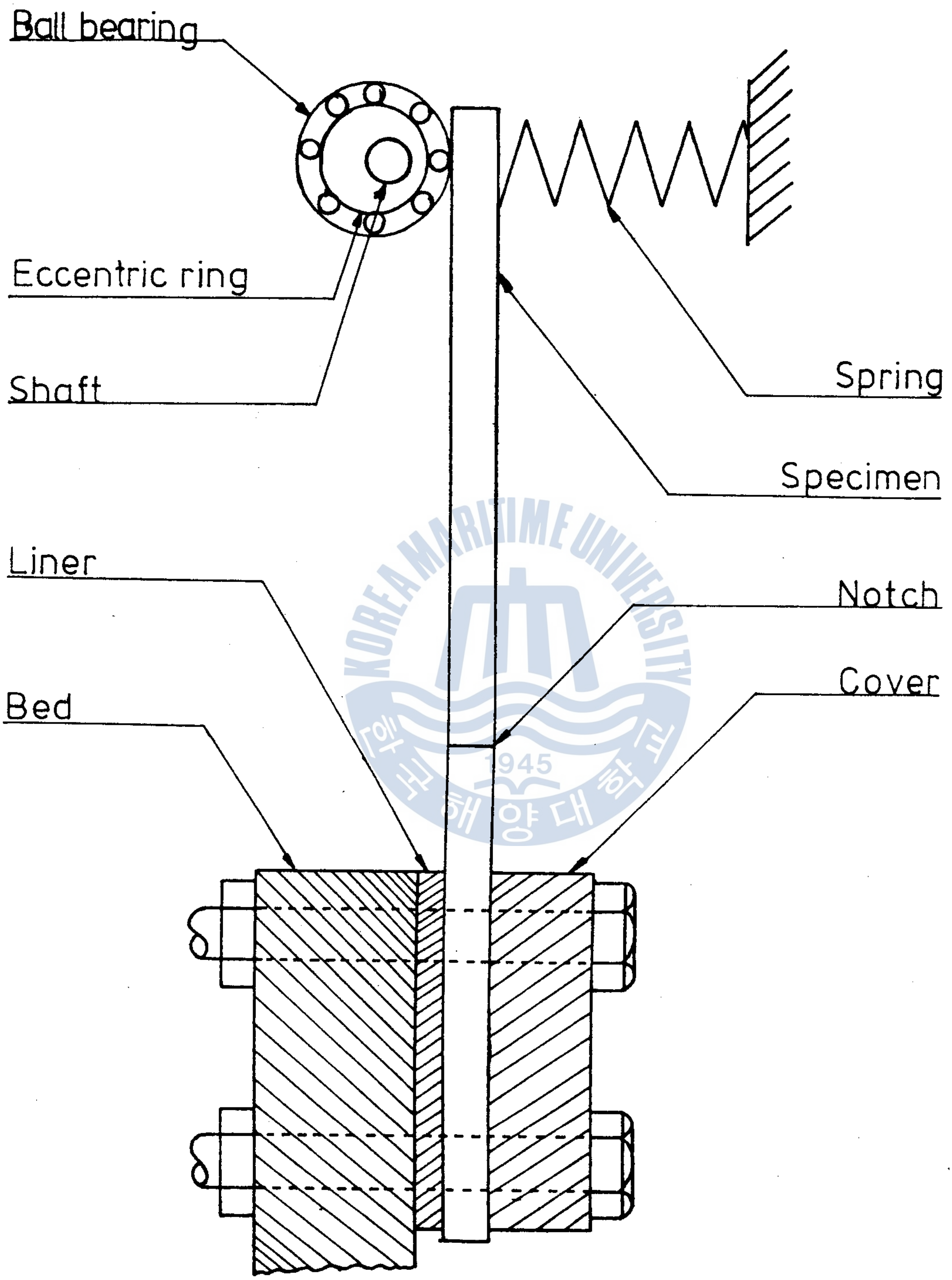
dCollection

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of materials

Material	Chemical compositions (wt%)								Mechanical properties		
	Mn	Cr	Cu	Mg	Si	Ti	Fe	Al	T.S kg/mm^2	Y.S kg/mm^2	El. %
5086-H116 Al-Alloy	0.36	0.132	0.02	3.7	0.05	0.015	0.27	Res.	42	30	12

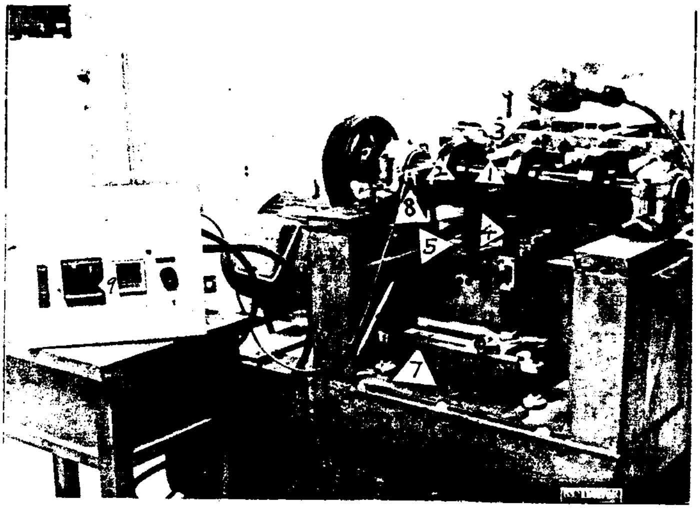
을 加한 후 移送顯微鏡 (Travelling & Reading Microscope)을 利用하여 0.01 mm 까지 測定하였다.

實驗에 使用한 應力의 形態는 Fig.4 및 Fig.5에 表示한 바와 같이 應力比 R=0인 片振應力이며, 反復荷重의 速度는 600 cpm로 하였다. 여기서 Fig.5는 2段의 片振平面굽힘 應力形態로서 이와 같은 應力形態를 利用하여 破面에 비이치마크 (Beach mark)를 만들어, 모서리 균열의 形狀變化를 連續的으로 觀察하였고, 또한 이로서 過負荷 (Over load)의



Schematic diagram of the bending fatigue tester

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교
dCollection



1. Eccentric Ring
2. Ball Bearing
3. Spring
4. Specimen
5. Cover
6. Bed
7. Travelling or Reading Microscope
8. Sensor
9. Counter unit

Photo 1. General view of the bending fatigue tester

영향을 檢討 하였다

그리고 反復 휨 應力은 다음과 같이 구하였다.

$$S = \frac{3Et\delta}{2L_1^2} \times \frac{L_2}{L_1} \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서 E: 彈性係數 (Young's modulus 1200 kg/cm²)

t: 시험편 두께 (mm)

δ: 片心量 (mm)

Collection

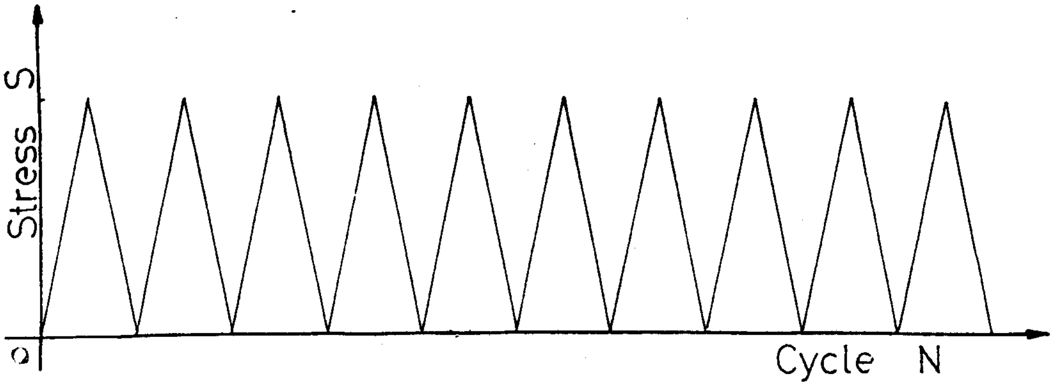


Fig.4 Stress pattern for measurement of crack propagation rate in fatigue test

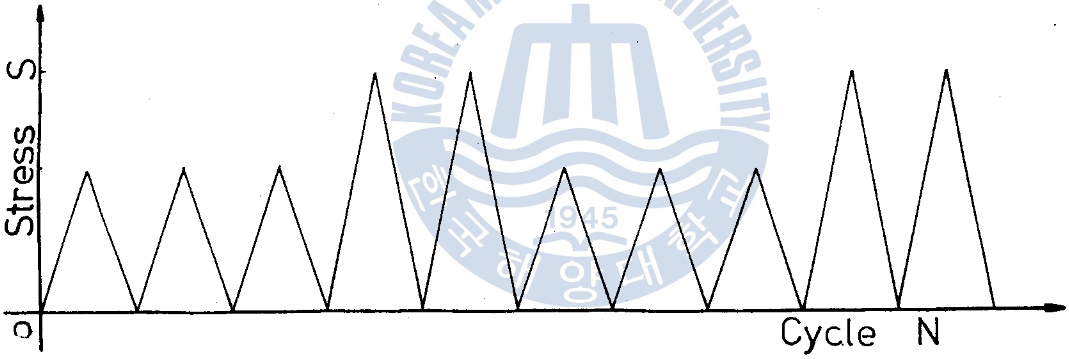


Fig.5 Stress pattern for observation of fracture surface in fatigue test

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교

3 實驗結果 및 考察

3-1 모서리 균열의 伝播特性.

Fig.6은 疲勞균열의 機構를 보이기 위한 그림이다

最初에 疲勞균열 先端의 応力集中部를 起点으로 하여 最大 剪斷応力 方向을 따라 슬립(slip)이 일어난다 (1, 2 段)

dCollection

이 슬립 때문에 균열은 開口 (Opening) 되어 成長하면서 또, 다른 슬립면 (Slip plane) 이 나타난다 (3段)

加工硬化 (Work hardening) 와 應力增加로 또 다른 슬립면을 일으키면서 균열 先端 (Crack tip) 이 무디게 (Blunting) 된다 (4段)

塑性変形 (Plastic deformation) 은 균열 先端 (Crack tip) 주위에 形成되어 彈性領域 (compressed plastic deformation) 이 形成된다

이 結果, Fig.5 의 5段 에서 보이는 바와 같이 균열 先端이 닫혀 (Closing) 지면서, 날카롭게 (Sharpening) 된다

균열의 開口 (Opening or blunting) 와 閉口 (Closing or Sharpening) 의 反復으로 每回 마다 典型的인 리플 (ripple) 模樣 (Pattern) 으로 스트라이에이션 (Striation) 이 形成된다

一般的으로 疲労균열의 伝播特性은 균열길이 伝播速度 (Crack-length propagation rate) da/dn 와 應力強度係數範囲 (Stress-intensity factor range) 와의 관계에 의해 評価된다

Fig.7 은 本実驗에서 구한 알루미늄 合金材에 대해 da/dn 와 ΔK 와의 관계를 兩対数座標에 表示한 것이다

여기서, 應力強度係數 ΔK는 Kawahara 가 提示한 式(2)을 인용하였다

이 그림에 의하면, ΔK가 增加함에 따라, 즉 균열길이가 증가 함에 따라 균열전파속도가 빨라짐을 보여 주고 있다

$$\Delta K = \frac{1}{2}\Delta S_b\sqrt{\pi a} \qquad \text{여기서} \quad \Delta S_b : \text{굽힘 反復荷重}, \quad a : \text{균열 길이} \qquad (2)$$

Collection

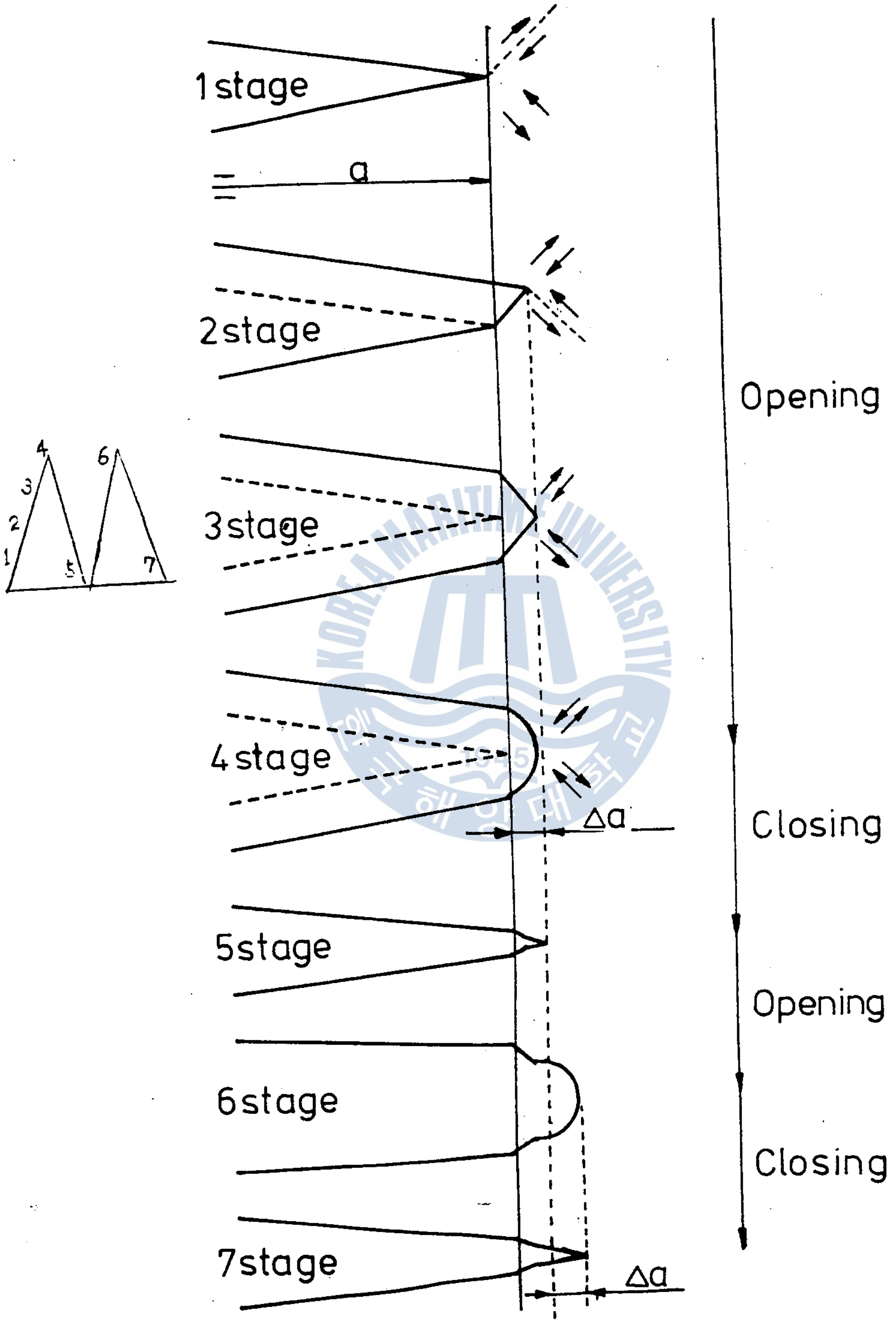


Fig.6 A model for fatigue crack growth

dCollection

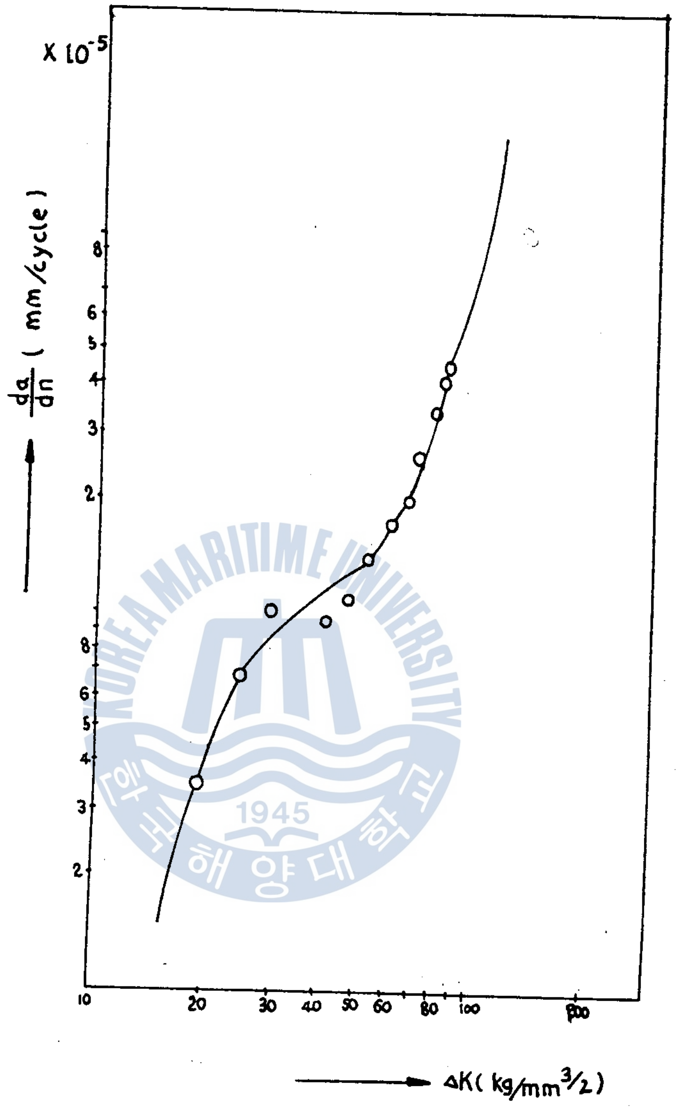


Fig.7 Relation between stress intensity factor and crack propagation rate

3. 2 모서리 균열의 形狀變化

Fig.8은 6.6mm 두께의 5086-H116 알루미늄 合金材 試驗片에 Fig.5

2段의 應力形態와 같이 反復荷重을 加하여 片側貫通까지 (Edged through-notch)로 부터 発生伝播한 모서리 균열의 巨視的 破面 樣相인 비이치 마크(Beach mark)를 보인다

이에 의하면, 모서리 균열 발생 초기에는 板表面에 나타난 균열길이와 두께 방향에 나타난 균열길이는 거의 같게 나타나지만 균열길이가 成長함에 따라 균열길이의 差에 板表面에 나타난 균열길이가 현저하게 커지고 있음을 알수 있다

3-3. 모서리 균열의 過負荷에 의한 減速効果 (Retadation effect) 모형화

實際, 構造物의 경우 一定한 振幅의 反復荷重을 받는 경우는 드물고, 不規則한 크기의 反復荷重을 받는 것이 보통이다

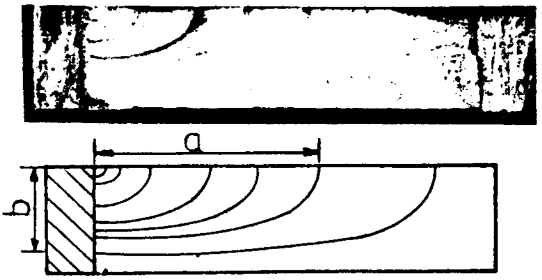
따라서 균열成長挙動에 미치는 過負荷의 영향을 檢討 할 필요가 있다.

Fig. 9는 모서리 균열의 成長挙動에 미치는 過負荷의 영향을 檢討하기 위하여 加한 경우와 一定한 振幅의 균일應力을 加한 경우에 대해 균열進展길이 a와 反復回數 N과의 관계를 片対数座標(Graph)에 過負荷直後에 表示한 것이다

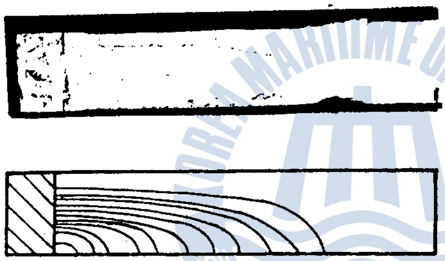
이 結果에 의하면 균열 진전길이 速度는 현저히 느린 樣相을 보이고 있다

이와같이, 過負荷直後 균열進展速度가 느리게 나타나는 理由는 다음과 같이 考察된다.

Collection



5086-H116 Al-Alloy 8mmt



5086-H116 Al-Alloy 6.6mmt

Fig.8 Macrographs and beach marks of fracture surface

Fig.10에 보이는 바와 같이 過負荷에 의하여 넓은 塑性 領域이 초래되어 材料의 部分的인 變形이 일어나지만, 應力을 제거하면 塑性領域은 彈性 材料에 싸이게 된다

彈性領域에 싸인 균열先端 주위의 塑性領域 內에는 彈性領域 材料에 의해 壓縮應力이 作用하고 그 結果 Fig.10 처럼 잔류應力이 나타난다. 이 잔류응력은 疲勞균열 伝播機構인 開口作用이 일어나지 못하도록 방해하고 방향으로 作用한다

그러므로, 荷重反復回数 N가 증가하여 이 잔류応力을 극복해야만 다시 균열 成長이 일어나서, 원래의 균열 伝播速度로 돌아오게 되는 것으로 思料된다.

以上과 같은 実験結果를 이용하면, 過負荷直後 균열進展速度 $(da/dn)_{retard}$ 와 정상적인 균열進展速度 $(da/dn)_{normal}$ 와의 사이에는 다음과 같은 관계가 成立한다

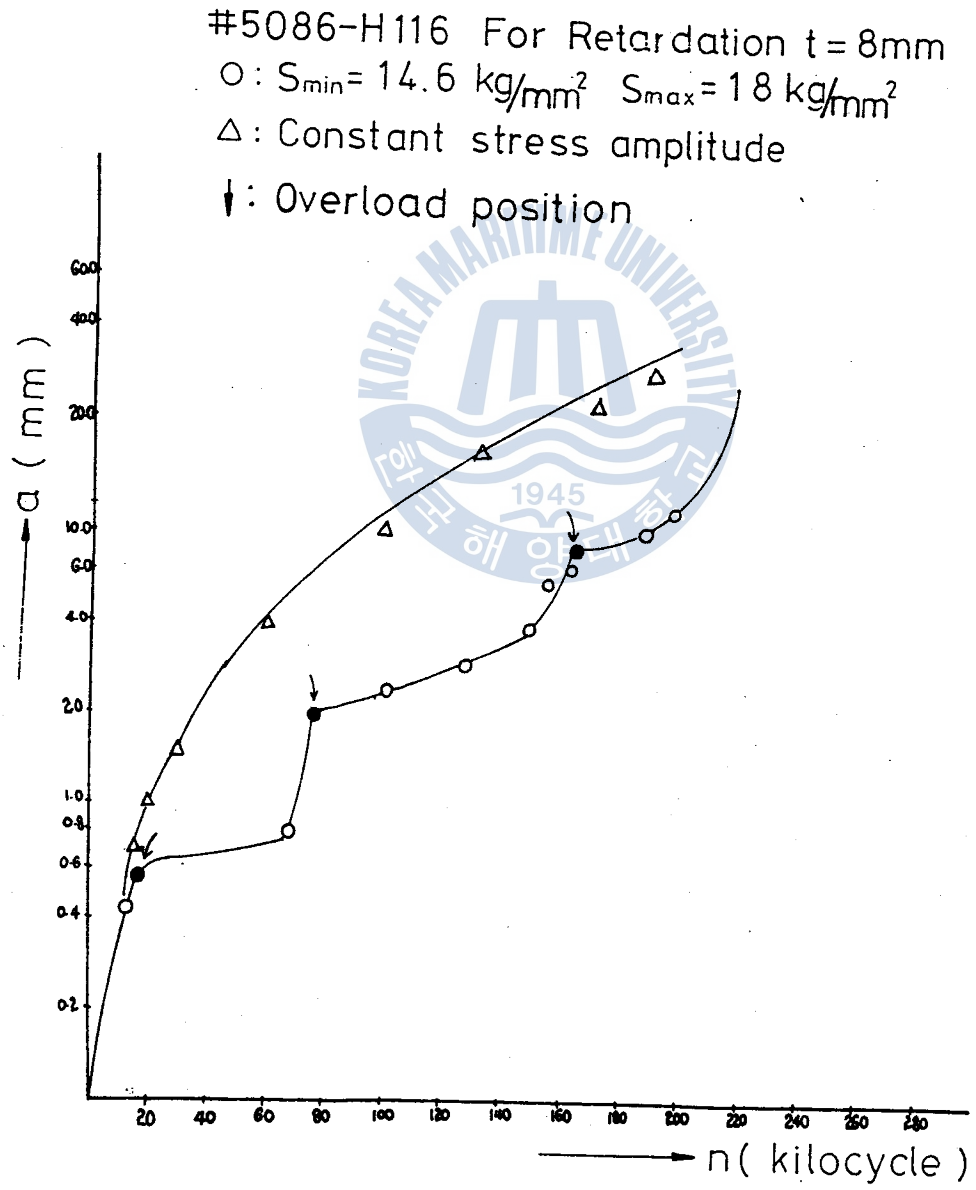


Fig.9 Retardation as a result of overload

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교

dCollection

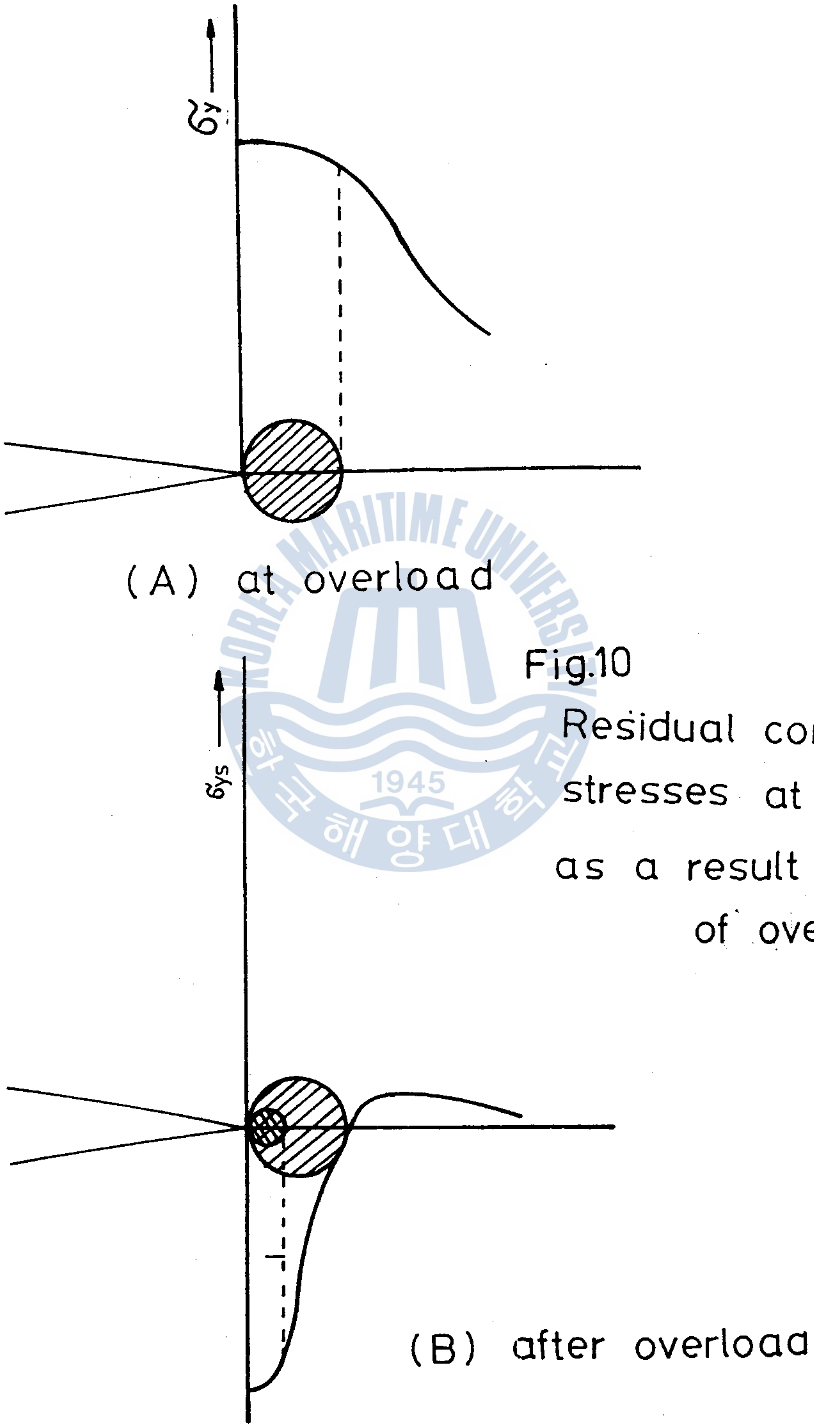


Fig.10 Residual compressive stresses at crack tip as a result of overload

過負荷가 있기 前까지의 균열길이를 a_o라 할때 過負荷에 의해 生成된 塑性領域의 크기 r_{po}는 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$r_{po} = \frac{1}{2}\frac{\Delta S_o^2 a_o}{\sigma_{ys}^2} = \frac{1}{2\pi}\frac{\Delta k_o^2}{\sigma_{ys}} \quad \text{-------------} (3)$$

여기서 : ΔS_o : over load stress

Δk_o : Overload stress intensity factor

균열이 過負荷에 의해 生成된 塑性領域의 크기 r_{pi}는

$$r_{pi} = \frac{1}{2}\frac{\Delta S_i^2 a_i}{\sigma_{ys}^2} = \frac{1}{2\pi}\frac{\Delta k_i^2}{\sigma_{ys}^2} \quad \text{-------------} (4)$$

여기서, ΔS_i : i^{th} cycle's stress

Δk_i : i^{th} cycle's stress intensity faction 이다

그러나. r_{pi}는 內部에 있다

또한 減速变数 (Retardation Parameter)를 ϕ라 하면,

$$\lambda = a_o + r_{po} - a_i = \lambda \text{로 취하여} \quad \text{--------} (5)$$

$$\phi = \left(\frac{r_{pi}}{a_o + r_{po} - a_i}\right)^m = \left(\frac{r_{pi}}{\lambda}\right)^m \text{이고,} \quad \text{--------} (6)$$

여기서, 指数 m는 材料常数이다

따라서, $a_i + r_{pi} < a_o + r_{po}$ 일때, $(da/dn)_{retard} = \phi (da/dn)_{normal} = \phi f(\Delta k)$ ------ (7)

그리고, $a_i + r_{pi} \ge a_o + r_{po}$ 일때는, 균열은 過負荷의 領域을 넘어서서.

減速变数 (Retardation Parameter)는 $\phi = 1$ 이다

實驗結果를 이용하여. 계산적 방법에 의해 계수 m값을 구하면,

過負荷에 의해 生成된 塑性 領域의 크기가 커지면 커질수록 ϕ는 1보다 매우 작아져서 減速効果 (Retardation effect)는 더 증가한다

따라서 本實驗에서 구한 자료에 의하여 材料常数 m 값은 式(6)(7)에 의하여 같이 계산적으로 구할 수 있다.

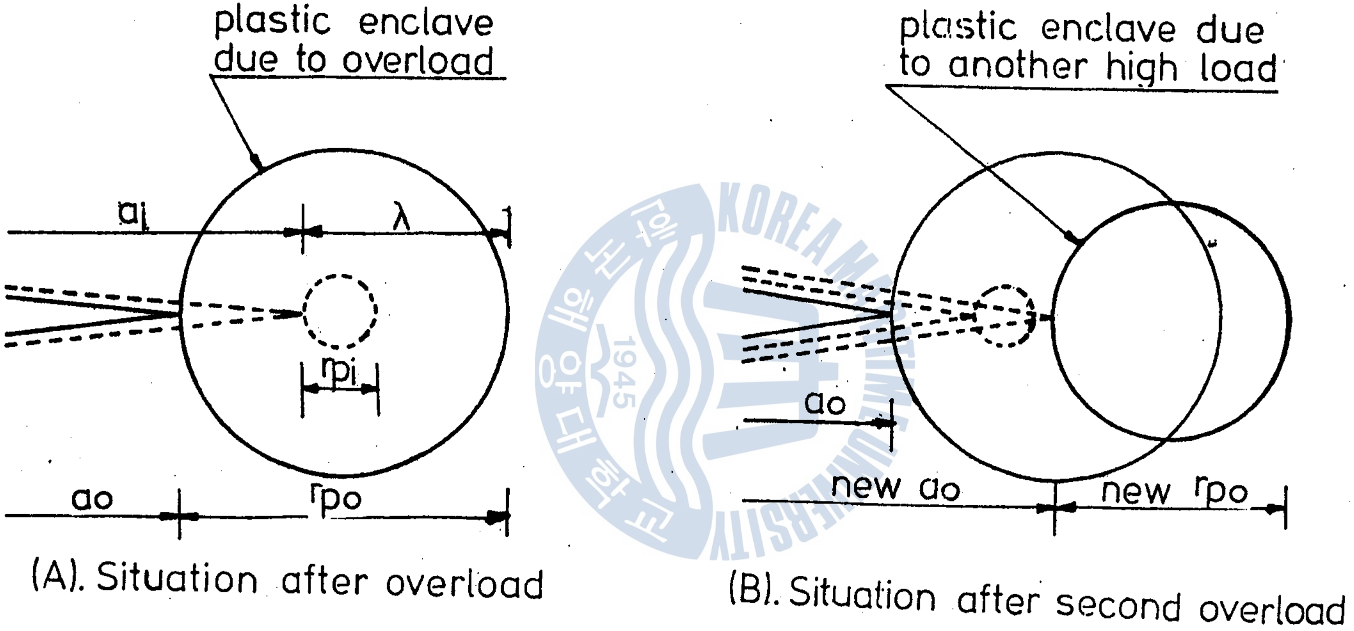


Fig.11 The model of Retardation

$\phi = (da/dn)_{retard} \,/\, (da/dn)_{normal}$

$= 6.83 \times 10^{-5} / 9.99 \times 10^{-5} = 0.6837$

$\phi = (r_{pi}/\lambda)^m$ 에서.

$r_{po} = C \dfrac{\Delta S_o^2 a_o}{\sigma_{ys}^2} = \dfrac{1}{2} \dfrac{\Delta S^2 a}{\sigma_{ys}^2}$ (∵ θ = 0 이므로)

$= \dfrac{1}{2} \times \dfrac{18.0^2 \times 6.75}{31.0^2} = 35.3$

$r_{pi} = C \dfrac{\Delta S_i^2 a_i}{\sigma_{ys}^2} = \dfrac{1}{2} \dfrac{\Delta S_i^2 a_i}{\sigma_y s^2} = \dfrac{1}{2} \dfrac{12.5^2 \times 8.07}{31.0^2} = 27.14$ (∵ θ = 0 이므로)

따라서 本 實驗에서 구한 자료에 의하여 材料常數 m 값은

다음과 같이 계산적 방법에 의하여 구할 수 있다.

λ는 $\lambda = a_o + r_{po} - a_i = 6.75 + 35.3 - 8.07 = 33.98$

式(b)에 따라

$\phi = \left(\dfrac{r_{pi}}{\lambda}\right)^m$ 兩對數를 취하면

$m = 1.87$

이와 같이 材料常數 m 값은 材料마다 各各 實驗的으로 구할 수 있다.

4 結 論

小形 高速 船舶의 外板材料로 使用되는 508-H116 알루미늄 合金材를 試驗材로 하여 片側貫通 노치 (edged through notch)로 부터 發生 伝播한 모서리 균열의 形状変化와 伝播特性, 그리고 過負荷에 의한 영향을 検討한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 모서리 균열의 균열進展에 따른 균열 初期에는 균열 길이와 깊이가 같으나, 균열이 成長함에 따라 균열 길이가 더 길어진다.
2. 過負荷의 영향으로 減速効果 (Retardation effect)는 현저하고 Retardation Parameter를 결정하는 材料常数 m 값은 1.87 이다

參考文獻

1. ASM : Failure Analysis and Prevention, Metal Hand book, Vol. 10, ASM, Ohio, pp 332~372 (1975)

2. ASM : Fractography and Atlas of fractography, Metal Handbook, Vol. 9, ASM, Ohio, pp. 49~62, 161~280 (1975)

3. JWS ; 鉄鋼溶接部の破面写真集, 黒木出版社, 大阪, pp 398~403 (1975)

4. David Broek ; Elementary Engineering Fracture Mechanics, Sijthoff & Noordhoff, Netherlands, pp. 80~86 (1978)

5. 金永植, 趙相明 ; 平面굽힘 疲労荷重에 의한 鋼熔接部의 모서리 균열 伝播特性, 大韓機械学会 論文集, Vol. 6, No. 3, PP. 232~238 (1982)

6. 金永植, 金英鍾, 平面굽힘 疲労荷重에 의한 알루미늄 合金材의 모서리 균열 伝播挙動에 関한 研究, 大韓機械学会 学術大会 抄録集, 1983年度 春季 p 105~108

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

Collection