

알루미늄합금板材(Al5083)의 疲勞特性에 미치는 冷間圧延量과 安定化處理의 영향

Effect of Cold Working and Stabilizing Treatment on the Fatigue Properties of Aluminum Alloy 5083

李載淳* · 吳澤烈** · 박경순***
J.S.Lee, T.Y.Oh, K.S.Park

Abstract

A study was made of the effect of cold working and stabilizing temperature on the fatigue properties of Aluminum alloy 5083. The amount of cold working ranged from 14% to 35% and stabilizing temperature was 120°C~160°C.

Rotary bending fatigue test was carried out, and it was found that 1) E specimen that had been cold worked by the cold reduction of 35% and stabilized at 160°C for 2 hours was showed the most excellent fatigue limit and endurance ratio and, 2) By the results of the between crack propagation behavior and stress intensity factor, E specimen was showed the better resistance to fatigue crack growth than others.

1. 緒 論

Al-Mg合金은 機械의 性質과 용접성이 우수하고 부식에 대한 저항성이 크기 때문에 工業用 素材로 널리 使用되고 있다. 主要 첨가 원소인 Mg과 Mn의 含量이 增加하면 機械的 性質과 피로 저항이 증가하나 압연시 균열의 發生이 增加하는 등 加工이 어렵고 성형성이 나빠진다.^(1,2)

피로파괴란 機械의 構造材가 應力을 반복적으로 받을 경우에 파괴되는 현상을 말하며, 파괴 강도 또는 탄성한도 이하의 應力상태에서도 파괴된다.

材料의 강도와 파괴는 여러가지 함수로 나타나며 균열의 발생 및 전파 기구에 대한 論文은 多様하다.

獨逸의 Wöhler⁽³⁾는 1866年頃 Wöhler곡선(S-N curve)를 提案하여 疲勞限度의 존재를 발견하였고, Ewing, Rosenhain⁽⁴⁾은 1900年頃 현미경 관찰에 의해서 鐵鋼材料의 slip band와 균열의 발생을 발견하였고, 1920년경 Griffith⁽⁵⁾는 金屬의 표면 또는 内部의 결함이나 미시적 균열에 의해서 應力集中이 발생한다는 内部應力 理論을 提案하였다.

* 建國大學校 工科學

** 慶熙大學校 工科學

*** 洪陵機械工業會社

Head⁽⁶⁾는 1953년경 균열 전파법칙을 提案하였는데

$$L^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1}{24\sqrt{2}Ea^{\frac{1}{2}}ef} \right] \frac{s^3}{(s_y - s)^2} (N_{\infty} - n)$$

S_y = 降伏點 N_{∞} = 파괴까지의 회전수
 s = 응력진폭 ef = 파괴의 끝부분
 n = 회전수 L = crack 길이

식으로 나타내었다.

A. S. Tetelman 과 A. J. McEvily⁽⁷⁾ 등은 피로균열은 介在物에서 形成되어서 空孔(void)을 따라서 進展된다고 主張하였고, Wood⁽⁸⁾ 및 Dehlinger는 轉位の 이동에 依하여 空孔이 생기고 이들 空孔이 이동하여 空孔의 cluster (송이·무리)를 形成한다. 空孔의 cluster에 應力이 集中되면 균열이 發生한다고 주장했다. 즉 空孔의 集함에 따라서 疲勞破壞의 結果가 생긴다는 것이다.

또한 균열 成長舉動은 오래전부터 研究되어 왔고, 그 중에서 특히 균열로 因한 破壞진행에 있어서 여러가지 조건은 균열전단의 소성영역의 크기, 應力분포 양상 및 변형의 값 또는 그 舉動만으로 결정되고, 이것은 그 주위영역의 탄성應力이 特異性(singularity)에 지배된다고 생각한 것이다. 여기서 균열전단의 特異性的 強度(intensity)를 表示하는 工學的量을 應力擴大係數(stress intensity factor) K 라 하고, 이에 대한 概念은 Irwin⁽⁹⁾이 최초로 발표하였다.

또 Paris등은 1962년 Irwin의 解析理論을 利用하여 疲勞균열 傳播速度와 應力擴大 係數와의 關係를 最初로 發表하고, Paris와 Erdogan의 4乘則⁽¹⁰⁾을 발표함으로써 疲勞균열 傳播速度는 比較的 少數의 試驗片을 사용하여 실험에서 얻어진 균열의 傳播曲線을 기초로 하여, 應力擴大係數에 依한 취급의 유용성이^(10,11) 지적되었다. 最近 이러한 問題와 관련하여 理論的, 實驗的 研究가 많이 行해지고 있으며, 이들의 結果를^(10~12) 綜合하여 보면 균열 傳播速度를 應力擴大係數로 表示하면 $dl/dN = C\Delta K^m$ 로 表示된다. 여기서 m 은 많은 實驗結果에 의하면 반드시 4가 아니고 2~7의 값으로 表示된다.

그러나 應力擴大係數의 특징은 負荷形式이나 시험편의 모양, 그리고 균열의 모양이 포함되어 있지 않으므로 어떤 경우에도 成立해야 한다고 볼 수 있으나 本 實驗과 같은 回轉굽힘 疲勞시험의 경우, 아직도 應力擴大係數에 대한 式이 유도되고 있지 않으므로 무한관재의 應力擴大係數

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} \dots\dots\dots (1)$$

의 式을 적용하면 균열傳播速度에 관한 式은 크게 나누어 아래와 같은 式을 적용하고 있다.

$$\frac{dl}{dN} = C\sigma^n l^n \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dl}{dN} = C\Delta K^m \dots\dots\dots (3)$$

그리고, 균열이 進전되어가는 現象은 傳播速度 $\left(\frac{dl}{dN}\right)$ 와 應力擴大係數(ΔK)의 $\log - \log$ Graph로써 表示되는데, 이 Graph의 특징은,

- (1) 균열이 傳播되지 않는 臨界值(ΔK_{th})가 存在하고, 균열의 擴大範圍가 이 임계치를 넘어서면 급격하게 進전하는 I 段階.
- (2) 線形的인 關係가 있는 II 段階
- (3) 傳播速度 $\left(\frac{dl}{dN}\right)$ 가 應力擴大範圍에 아주 敏感하게 하여 곧 바로 疲勞破壞가 일어나는 III 段階가 있다.

本 실험에서는 機械的性質을 向上시키기 위한 間接압연과 시료연화 現象을 방지하기 위한 安定화 처리조건을 변화시켜 구조용 材料로 널리 사용되는 Al 5083에 대하여, 피로한도, 내구비(endurance ratio) 이외에 피로균열전파 속도 등을 分析 檢討하였다.

2. 實驗方法

2.1 시료의 준비

용해는 ฝรั่งC유를 사용하는 반사로에서 하였으며 機械的性質에 나쁜 영향을 미치는 수소와 비금속 개재물의 함량을 줄이기 위해서, 장입금속, 사용도구, 용해보 등을 통한 수분의 흡수를 억제하였다.

용해로의 溫度를 830~850℃까지 올려준 후, 장입계산된 원료를 장입하고 용해한 후 holding furnace 에서 Mg을 첨가하고 dross를 제거하였다.

가스의 용해도가 溫度와 壓力에 따라 변하므로 용탕이 응고하면 수소와 다른 종류의 가스가 응고한후 存在하게 된다. 따라서 응고하기전 탈가스제를 용탕에 첨가하여 이들을 제거하여 주었다. 化學性분은 주형에 주입되는 동안 試片을 채취하여 분광분석기를 이용하여 分析하였으며 分析値는 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition(Unit: Wt pct)

Material	Al 5083	Cr	0.152
Al	Bal.	Si	0.082
Mg	4.34	Ti	0.036
Mn	0.664	Cu	0.004
Fe	0.147	Zn	0.005

주조는 반연속 수축 주조방법(shower type)으로 하였다. 주조된 slab는 편석과 수지상정 사이의 제 2 상 때문에 연성과 가공성이 나빠서 550℃에서 12시간 유지후, 공냉하여 균질화 처리를 하고 열간압연 후 풀립처리를 343℃에서 2시간 유지 후 炉冷하여 주었다. 그 후 材料를 강화시키기 위해서 냉간압연을 14~35%하였다.

주요 합금원소로서 Mg을 함유하는 Al-Mg 합금은 가공경화된 후 時間이 경과함에 따라 연화현상(age softening)이 일어난다. 이 연화현상은 Mg의 함량과 냉간압연량이 클수록 현저하며, 이 현상을 방지하여 안정된 機械的性質을 얻고 가공성을 增加시켜 주기 위해서 120~160℃로 가열하여 안정화 처리를 하여 주었다.

2.2 인장시험

인장시험은 30TON용량의 만능시험기를 사용하여 0.1mm/min의 변형속도로 하였고, 각 조건에 따라서 준비된 3개의 시편을 시험하여 산술평균치를 data로 사용하였다.

2.3 피로시험

응력-수명 곡선을 구하기 위해서 최대용량 10 kgf·m, 회전수 3400rpm인 피로 시험기(Ono's type rotary bending fatigue machine)를 사용하였다.

疲勞限度 σ_w 는 시험편 10個 이상을 사용하여 Stair's Case Method로 0.5 kgf/mm²씩 up-down하여 決定하였다. 이것을 토대로 하여 semi-log graph에 疲勞限度曲線(S-N curve)를 作成하였다.

또 疲勞균열 擧動의 관찰 및 측정은 一定回轉數마다, 시험기에서 시험편을 分離하여 광학현미경으로 관찰하였다. 균열길이의 측정은 광학현미경에 부착된 O. S. M을 사용하였고, 各應力마다 3個 이상의 시험편을 사용하여 平均값을 data로 했다. 또 여기서 말하는 疲勞 균열의 길이는 圖孔노치의 直徑 d를 포함한다.

Fig. 1의 (a)와 (b)는 疲勞限度를 구하기 위한 평활재 시편과 균열 성장 擧動을 관찰하기 위한 원공노치 시험편의 크기를 나타낸다. 표면 거칠기가 疲勞限度에 영향을 미치고, 균열 전파시험에서 시편표면에서의 미시 균열의 관찰을 용이하게 하기 위해서 시편의 頂部를 Burasso와 산화알루미늄으로 연마하였다.

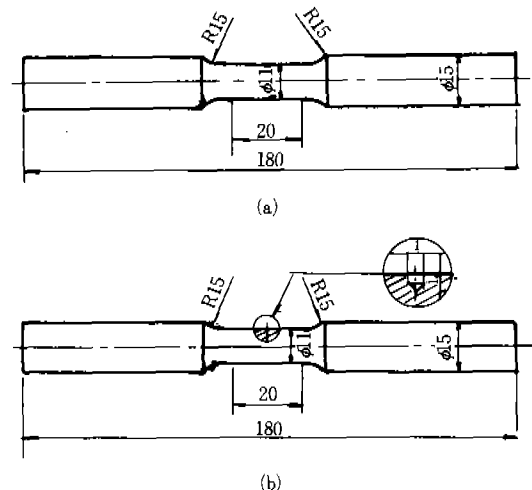


Fig. 1. Geometry of fatigue test specimens.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 인장시험

냉간 압연량과 안정화 처리의 조건에 따른 인장강도를 Table 2 에 나타내었으며, Al 5083 은 냉간가공에 의해서 강화되는 속성이기 때문에 냉간압연량이 클수록 인장성질이 대략적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

Table 2. Mechanical properties of Al 5083

Specimen	Percent Cold Reduction (%)	Stabilizing Treatment	T.S. (Kgf/mm ²)
A	14	-	40.5
B	29	120°C, 2hr	38.4
C	32	-	38.9
D	33	140°C, 2hr	39.7
E	35	160°C, 2hr	39.6

3.2 疲勞限度와 S-N曲線

Fig. 2~Fig. 6은 各 材料의 S-N曲線을 表示하였고 Fig. 7은 위 S-N곡선을 종합하여 나타내었다. 여기서 疲勞限度 이상의 應力이 반복적으로 作用하는 경우, 時間強度(10⁷ cycle)의 측면에서는 Fig. 7에서 볼 수 있는 것처럼 C,D,E材가 우수하고, 公稱굽힘應力(nominal bending stress) 25kgf/mm² 이상에서는 거의 같은 값을 갖는다. 냉간압연량과 안정화 처리 溫度에 따른 疲勞限度 내구비를 살펴보면, 疲勞限度는 냉간압연량의 증가와 더불어 약간씩 증가를 보이고 있으며 냉간압연량이 가장 높은 E材(35%)가 가장 높은 疲勞限度(13kgf/mm²)를 나타내고, 냉간압연량이 가장 낮은 A材(14%)가 가장 낮은 疲勞限度(10kgf/mm²)를 보이고 있다.

또한 安定化處理를 한 B材(29%, 120°C, 2 hrs), D材(33%, 140°C, 2hrs), E材(35%, 160°C, 2hrs)의 경우 安定化處理 溫度의 증가와 더불어 疲勞限度가 증가하는 양상을 보이고 있다.

Table 3은 각 조건에 따른 疲勞限度와 내구비를 나타낸다. 여기서 내구비는 24.7%~32.8%

의 범위를 갖고 냉간압연량과 安定化處理 溫度가 줄수록 점차 내구비가 증가하는 경향을 분수 있다. 이는 Al 5083材가 연성재료이므로 항복강도이하의 낮은 應力이 반복적으로 作用하는 경우에는 결함이 notch로서 응력집중원이 되어 피로강도는 A材가 최저 피로한도를 나타낸다고 생각된다.

Table 3. Fatigue limit and endurance of the specimens

Specimen	Fatigue Limit (Kgf/mm ²)	Endurance Ratio (%)
A	10	24.7
B	10.5	27.3
C	12.0	30.8
D	12.0	30.2
E	13.0	32.8

3.3 疲勞균열 舉動

Al 5083材의 疲勞균열 舉動을 Fig. 8~12에 각각 表示하였다.

疲勞균열의 傳播 舉動을 $\sigma=25\text{kgf/mm}^2$, $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$, $\sigma=15\text{kgf/mm}^2$ 에서 실험한 결과로서 $\sigma=25\text{kgf/mm}^2$ 에서는 A, B, C, D, E 材가 거의 같은 舉動을 하고 있으나, 점차 反復應力이 낮아짐에 따라 疲勞균열 傳播曲線은 回轉數에 따른 기울기가 다른 것을 볼 수 있다. 이는 S-N曲線에서의 구배와 밀접한 관계가 있으며 E材가 가장 높은 疲勞限度가 됨을 알 수 있다. 또 균열의 成長 曲線은 平均 균열 길이가 약 2mm정도까지는 거의 一安하게 성장하고 있으며 그후 급격히 成長하는 舉動을 보이고 있다.

따라서 균열이 2mm까지 成長하는 疲勞 壽命은 전체 파단수명에 대하여

A材는 $\sigma=25\text{kgf/mm}^2$ 일때 49%

$\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 일때 50%

$\sigma=15\text{kgf/mm}^2$ 일때 57%

B材는 $\sigma=25\text{kgf/mm}^2$ 일때 50%

$\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 일때 50%

$\sigma=15\text{kgf/mm}^2$ 일때 47%

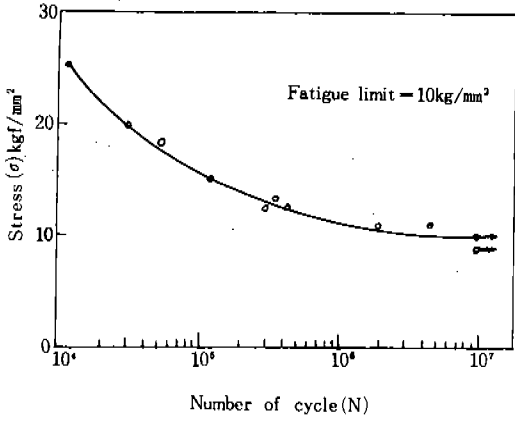


Fig. 2. S-N Curve (A series)

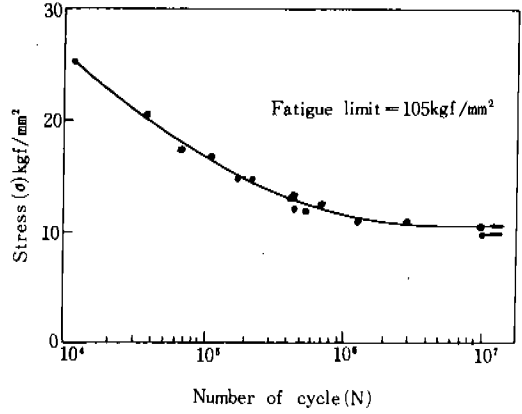


Fig. 3. S-N Curve. (B series)

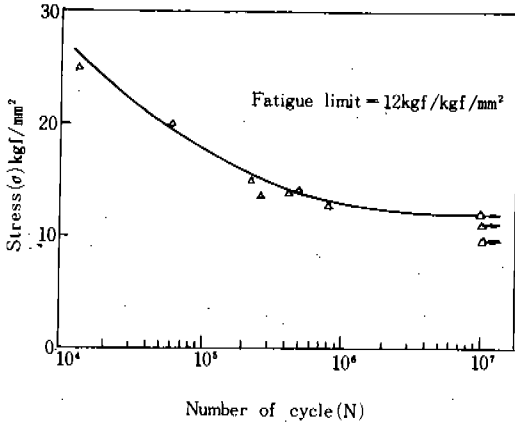


Fig. 4. S-N Curve (C series)

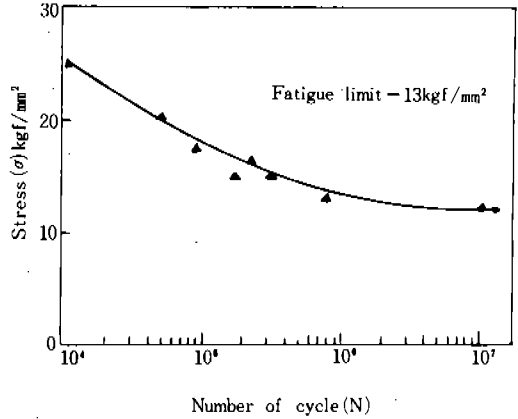


Fig. 5. S-N Curve (D series)

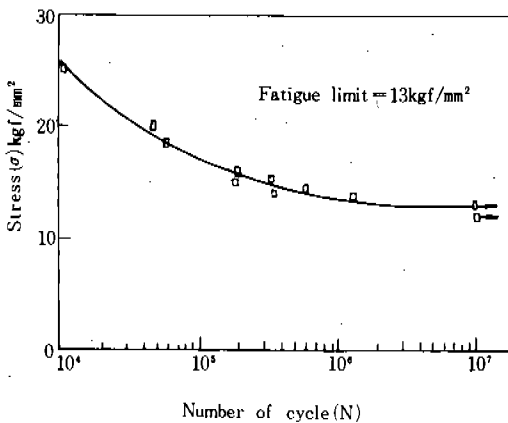


Fig. 6. S-N Curve (E series)

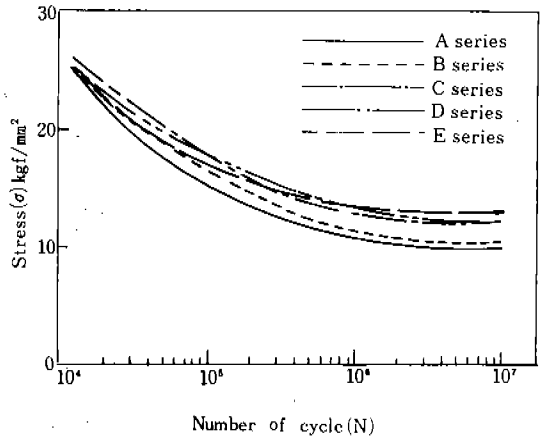


Fig. 7. S-N Curve.

C材는 $\sigma = 25\text{kgf/mm}^2$ 일때 48%
 $\sigma = 20\text{kgf/mm}^2$ 일때 56%
 $\sigma = 15\text{kgf/mm}^2$ 일때 45%
 D材는 $\sigma = 25\text{kgf/mm}^2$ 일때 54%
 $\sigma = 20\text{kgf/mm}^2$ 일때 54%
 $\sigma = 15\text{kgf/mm}^2$ 일때 50%

E材는 $\sigma = 25\text{kgf/mm}^2$ 일때 62%
 $\sigma = 20\text{kgf/mm}^2$ 일때 63%
 $\sigma = 15\text{kgf/mm}^2$ 일때 80%

로서 E材가 가장 우수함을 알 수 있다. Fig. 13은 $\sigma = 15\text{kgf/mm}^2$ 의 균열舉動을 各材料에 對하여 plot한 것이다.

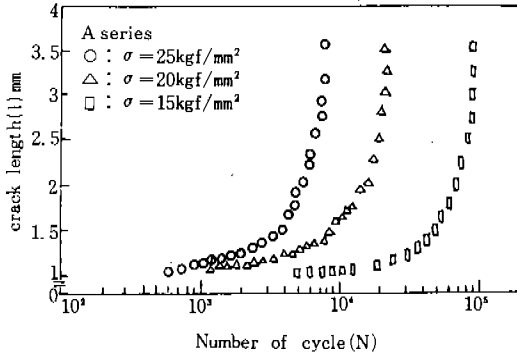


Fig. 8. I-N Curve (A series)

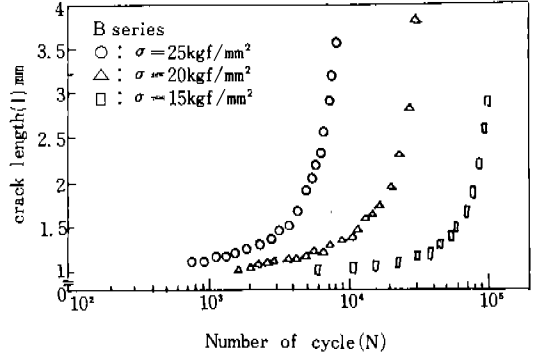


Fig. 9. I-N Curve (B series)

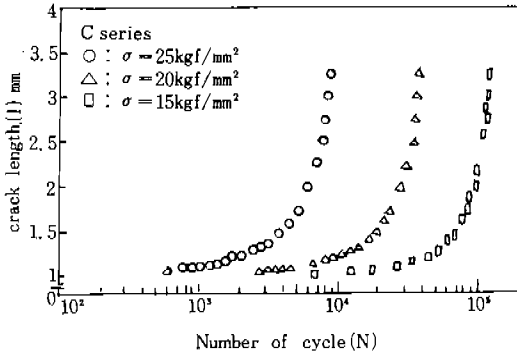


Fig. 10. I-N Curve (C series)

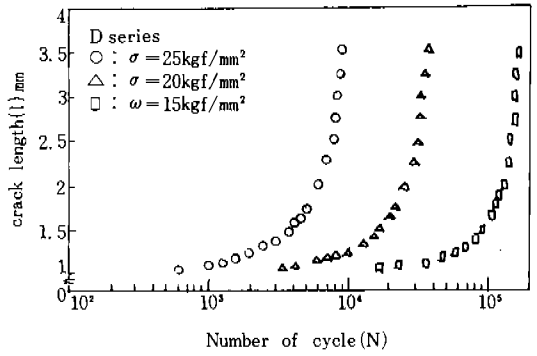


Fig. 11. I-N Curve (D series)

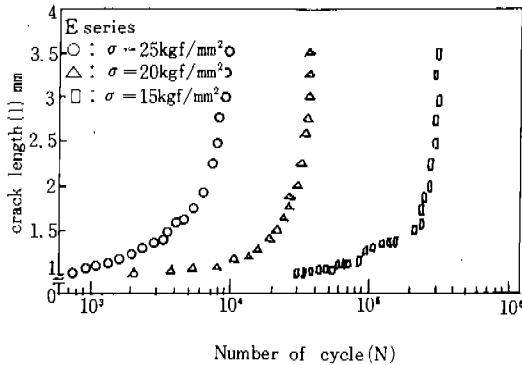


Fig. 12. I-N Curve (E series)

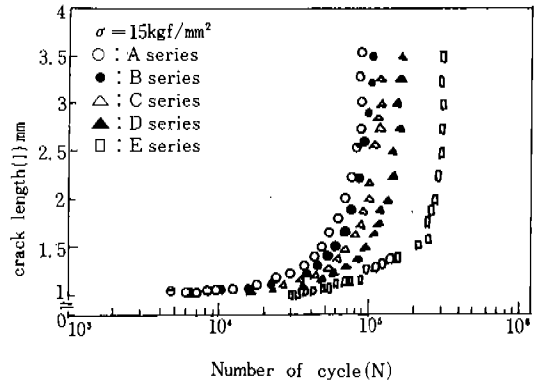


Fig. 13. I-N Curve

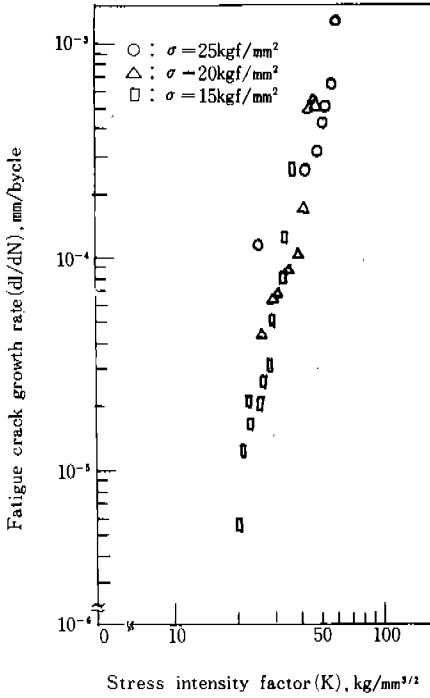


Fig. 14. dl/dN-K diagram (A series)

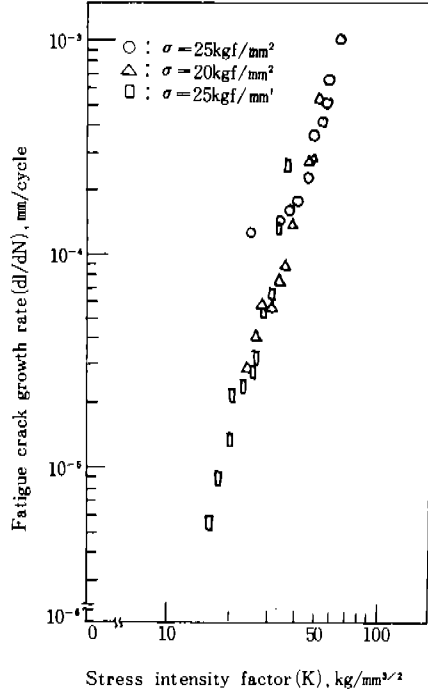


Fig. 15. dl/dN-K diagram (B series)

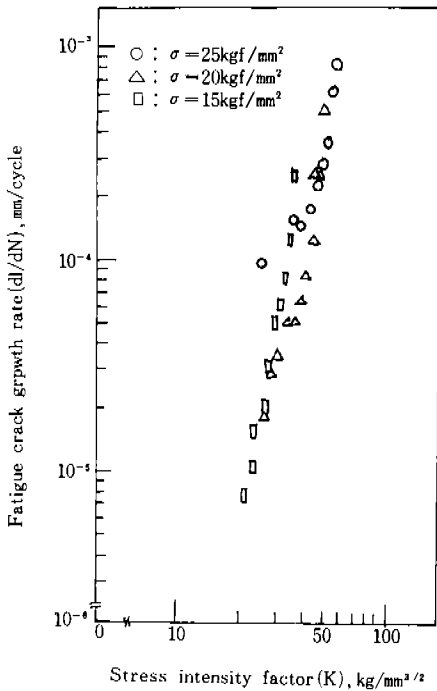


Fig. 16. dl/dN-K diagram (C series)

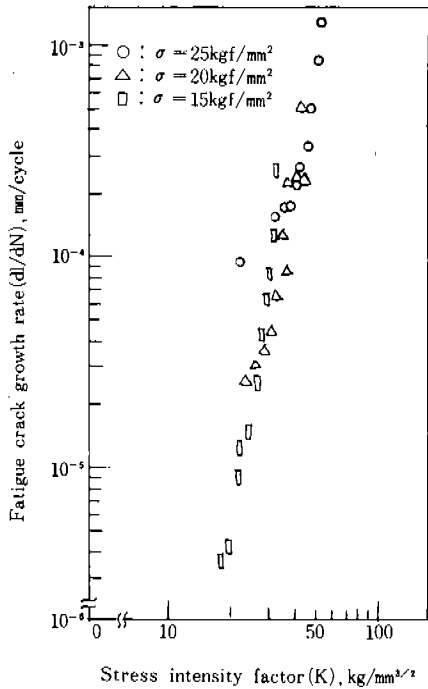


Fig. 17. dl/dN-K diagram (D series)

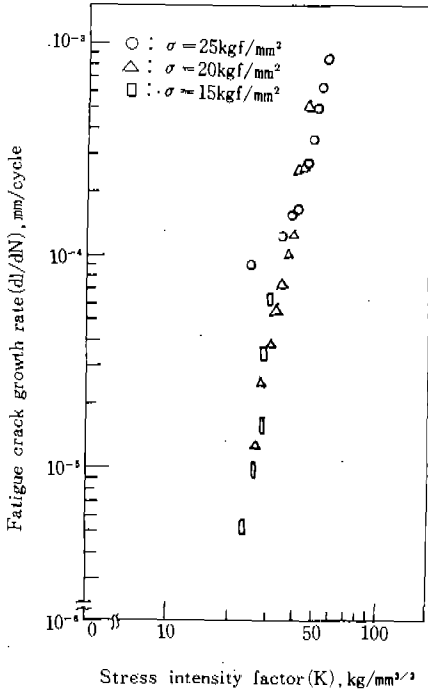


Fig. 18. dl/dN-K diagram (E series)

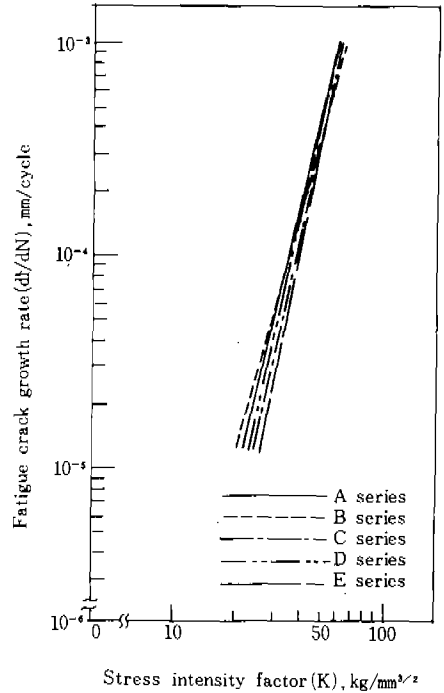


Fig. 19. dl/dN-K diagram

3.4 疲勞균열 傳播速度

피로균열 傳播速度를 應力擴大係數와의 關係로 정리한 것이 Fig. 14~18이고, Fig. 19에서 종합해 보면 E材가 傳播速度가 가장 작음을 알 수 있다.

한편, 냉간압연량이 증가하면 할수록 피로균열 전파저항은 커지고, 시효연화 현상을 방지하기 위한 安定化處理 溫度가 增加하면 할수록 피로균열 전파저항은 커진다. 이것은 구조용 Al 5083板材의 제조공정에 重要한 의미를 가지고 있으며, E材가 피로파괴에 대한 저항이 최대가 되는 우수한 機械의 性質을 갖는다.

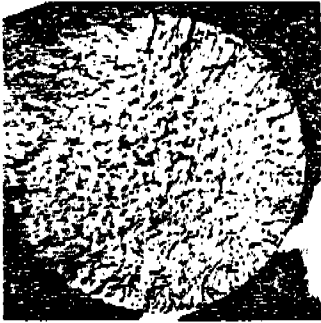
3.5 回轉굽힘應力下에서의 巨視的 疲勞破壞樣相

巨視적으로 變形이 생기지 않는 취성 파괴의 特性을 갖는 回轉굽힘應力下에서는 表面에 最大應力이 作用하므로 疲勞균열은 表面에서 발생한다.

應力 level을 다르게 作用한 후 파단한 C材와 E材의 파단면을 photo. 1에 나타내었으며 파단면의 양상이 서로 다름을 관찰할 수 있다.

Photo. 1(a)는 (c₁)에 比하여 破面이 거칠다. 이것은 (a₁)의 경우 高應力에서 크랙이 원주전면에 발생하여 이들이 成長하면서 疊體되어 内部로 傳播되기 때문이다. 또 C材나 E材 모두 表面에서 발생한 1個의 크랙이 成長하여 最終破壞에 이르는 것을 알 수 있다. 또 이들 破面에서 疲勞균열 傳播의 破面과 最終순간 破面으로 나눌 수 있고 이들은 photo. 1의 作用應力이 낮아짐에 따라 (a₂), (b₂), (c₂)와 같은 양상으로 變化한다.

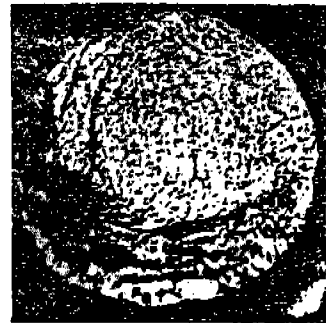
여기서 應力이 낮아짐에 따라서 最終破斷面(B)의 크기가 점차 작아지고, 中心의 위치에서 편심정도가 증가하고, 疲勞破斷面(A)는 점차 매끈한 斷面의 特性을 갖고 巨視的인 물결무늬(striation)의 특징을 관찰할 수 있다. 이러한 특징은 냉간압연량, 安定化處理 溫度에 무관하게 一定하게 나타난다.



(a₁) $\sigma = 25 \text{ kgf/mm}^2$

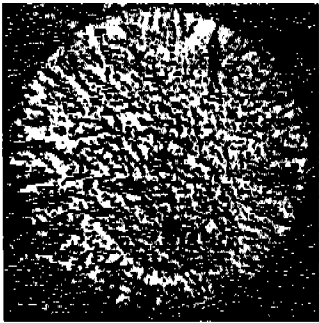


(b₁) $\sigma = 20 \text{ kgf/mm}^2$



(c₁) $\sigma = 15 \text{ kgf/mm}^2$

(1) C series



(a₂) $\sigma = 25 \text{ kgf/mm}^2$

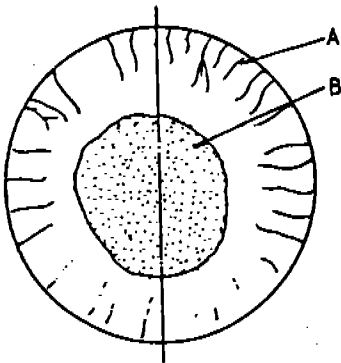


(b₂) $\sigma = 20 \text{ kgf/mm}^2$

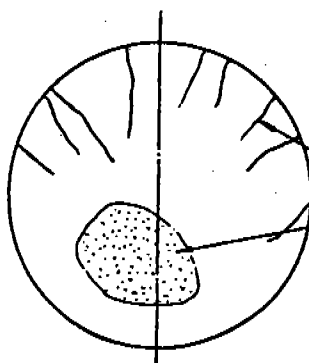


(c₂) $\sigma = 15 \text{ kgf/mm}^2$

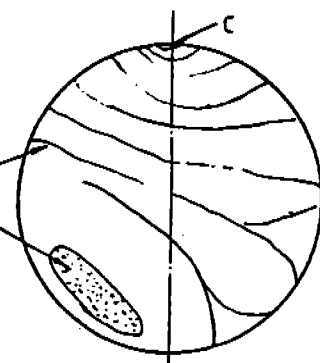
(2) E series



(a₃) $\sigma = 25 \text{ kgf/mm}^2$



(b₃) $\sigma = 20 \text{ kgf/mm}^2$



(c₃) $\sigma = 15 \text{ kgf/mm}^2$

A : Fatigue fracture,
 B : Final fracture,
 C : Fatigue crack initiation point.

Photo. 1. Fractography of rotating bending load.

4. 結 論

알루미늄합금 (Al 5083) 板材의 냉간압연량과安定化處理溫度를變化시켜, 反復굽힘 疲勞試驗과 疲勞균열 傳播시험을 實施하여 얻은 結果는 아래와 같다.

(1) 回轉굽힘시험에서 冷間圧延量과 安定化處理溫度가 가장 높은 E材가 疲勞限度와 耐久比에 있어서 가장 높은 13.0kgf/mm²와 32.8%를 각각 얻었다.

(2) 冷間圧延量과 安定化處理溫度가 増加함에 따라 疲勞限度 및 耐久比가 増加한다.

(3) 균열傳播速度에서 E材가 가장 느리게 傳播하며 應力擴大係數의 觀點에서 傳播저항이 가장 크다.

(4) 回轉굽힘시험에서 거시적 피로 파단면을 관찰할 때 作用 應力이 낮아 짐에 따라 파단면은 매끈하고 물결무늬 (striation)를 관찰할 수 있고 최종 파단면은 크기가 점점 작아지며 中心의 위치에서 편심의 정도가 増加하는 현상을 관찰할 수 있다.

參 考 文 獻

1. ALUMINUM, Vol. 1, Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagram, Kent R. Van Horn, pp. 195-196 (1967).
2. ALUMINUM Alloys, Structure and Properties, L. F. Mondolfo, p. 311, 314 (1976).
3. 黒木剛可郎, 大森官次郎 共著, 金屬의 強度と 破壞, 東京, 森北出版社, pp. 40~47 (1977).
4. 石橋定 著, 金屬의 疲勞と 破壞의 防止, 東京, 養賢堂, pp. 112~131, pp. 9~10 (1976).
5. H. A. Griffith, Phil. Trans, Roy. Sol, A 221 (1970), p. 163.
6. 横堀武夫 著, 材料強度學, 東京, 技報堂, pp. 250~254 (1974).
7. A. S. Tetelman and A. J. McEvily, Fracture of Structural Materials, John Wiley & Sons, p. 216 (1966).
8. G. R. Irwin, Analysis of Stress and Strain Near the End of a Crack Traversing a Plate, Trans. ASME, Journal of Applied Mech., Vol. 24, pp. 361~364 (1957).
9. P. C. Paris and F. Erdogan, A Critical Analysis of Crack Propagation, Journal of Basic Engineerings, Trans of the ASME, Vol. 85, No. 4, p. 528 (1963).
10. P. Paris and F. Erdogan, A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Trans. ASME, Ser. D, pp. 528-534 (1963).
11. H. W. Liu, Fatigue Crack Propagation and Applied Stress Range an Energy Approach. Trans. ASME, Ser. D, pp. 116-122 (1963).
12. M. Isida, Effect of Width and Length on Stress Intensity Factors of Internally Cracked Plates Under Various Boundary Conditions, Int. J. of Fracture Mech., Vol. 7, No. 3, pp. 301~316 (1971).
13. Donald C. Stouffer and John F. Williams, A Model for Fatigue Crack Growth with a Variable Stress Intensity Factor, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 525 - 536 (1979).
14. D. N. Lal and V. Weiss, A Notch Analysis of Fracture Approach to Fatigue Crack Propagation, Metallurgical Transactions, Vol. 9A, pp. 413-426 (1978).
15. R. P. Wei, Fracture Mechanics Approach to Fatigue Analysis in Design, J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 100, pp. 113-120 (1978).
16. P. J. E. Forsyth, Fatigue Damage and Crack Growth in Aluminum Alloys, Act a Metallurgical, Vol. 11, pp. 703-715 (1963).
17. P. O. Ritchie and J. F. Knott, Mechanisms of Fatigue Crack Growth in Low.