

<論 文>

層狀複合板材의 疲勞破壞舉動에 관한 研究

權 寧 俊* · 申 昌 均**

(1988年 1月 25日 接受)

A Study on the Fatigue Fracture Behavior of Laminated Composites

Young Jun Kwon and Chang Kyun Shin

Key Words : Laminates(層狀接合材), Stress Intensity Factor(應力擴大係數), Fatigue Life(疲勞壽命), Crack Growth Rate(龜裂增加率), Fracture Behavior(破壞舉動)

Abstract

Laminated Composites, SS41—Cu—SS41 plates are made by brazing bonding and hot bonding process. Fatigue repeated plane bending tests are carried out and the fracture behavior of Laminated composites, SS41—Cu—SS41 plates are compared with that of homogeneous steel, SS41 plates. The following results are obtained ; (1) The fatigue life of the brazing bonding plates is higher than those of SS41 plates and hot bonding plates under high stress. (2) The relations between the fatigue crack growth rate, da/dN and stress intensity factor are,

$$da/dN = 4.7 \times 10^{-10} K^{3.20}, \text{ for SS41}$$

$$da/dN = 7.8 \times 10^{-9} K^{2.43}, \text{ for CAH}$$

$$da/dN = 3.6 \times 10^{-9} K^{2.54}, \text{ for CAB}$$

$$da/dN = 1.58 \times 10^{-9} K^{2.94}, \text{ for PAH}$$

$$da/dN = 1.23 \times 10^{-9} K^{2.69}, \text{ for PAB}$$

1. 序 論

最近에 科學이 高度로 發達함에 따라 多様な 使用條件에 適應할 수 있는 材料에 對한 要求가 急増하고 있다.

특히 疲勞荷重을 받는 構造物에서는 部材內에 存在하는 龜裂이 大型事故의 主要原因으로 나타나고 있어 單一板材로 된 部材에서 생기는 致命的인 破壞를 막거나 그 破壞速度를 늦출 수 있는 層狀複合板材에 對한 觀心이 高潮되고 있다.

그러나 層狀複合板材에 對한 研究는 아직 初步段階에서 單純引張, 굽힘에 依한 應力分布分析에 對

한 論文은 多數나와 있으나^(1~5) 노치나 龜裂이 있는 層狀複合板材의 應力分布를 計算하는 論文^(6~10)은 매우 적은 實情이다.

本 研究는 Arrester型 片노치를 넣은 SS41—Cu—SS41 層狀複合板材와 SS41板材를 平面굽힘試驗片으로 製作한 다음 試片의 形狀, 作用應力의 크기를 달리하면서 平面굽힘疲勞試驗을 實施하여 材料相互間의 疲勞壽命과 破壞舉動을 比較, 考察하였다.

2. 實 驗

2.1 實驗材料 및 試驗片

本 實驗에 使用된 材料는 軟鋼 SS41板과 板사이 에 0.5mm 두께의 Cu를 境界層으로한 熱間接着 層

* 三星綜合技術院

** 正會員, 陸軍士官學校 圖學科

狀複合板材, Brazing 熔接層狀複合板材 및 SS41單一板材의 3가지 實驗材料로서 試驗片을 製作하였으며 試驗片의 熱處理는 750°C에서 40分間 어니링한 다음 爐中 冷却하였다.

實驗材의 化學的 成分과 機械的 性質은 Table 1에 表示하였다.

試驗片의 形狀은 Fig. 1과 같으며 試驗片의 名稱은 便宜上 製作方法, 材料의 接合形狀에 依해 Table 2와 같이 略字로 表示하였다.

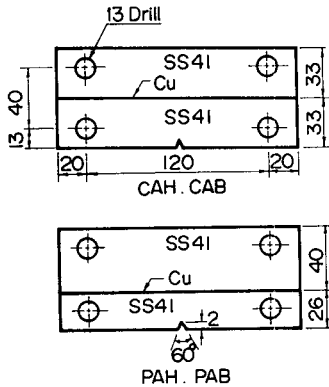


Fig. 1 Shapes of specimen

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties

Chemical compositions(%)					
SS41	C	Si	Mn	P	S
	0.20	0.22	0.54	0.22	0.16
Mechanical properties					
SS41	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)		
	42	32	28		

Table 2 Shapes and dimension of specimens

Symbol	Material	Location of layer	Manufactured method
SS41	SS41		
CAH	SS41, Cu	Center layer	Hot weld
CAB	SS41, Cu	Center layer	Brazing weld
PAH	SS41, Cu	Eccentric layer	Hot weld
PAB	SS41, Cu	Eccentric layer	Brazing weld

2.2 實驗方法

本 實驗에 使用된 試驗機는 Schenk型의 平面 荷重 疲勞 試驗機 (容量, 20kgf-m, 2700rpm)이며 試驗片 表面의 龜裂 길이는 運轉中 測定이 困難하므로 任意 回轉數 N에서 試驗片을 機械로부터 分離하여 1/400mm까지 읽을 수 있는 마이크로메타를 附着한 光學顯微鏡으로 測定한후 다시 機械에 걸고 實驗을 繼續하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 疲勞 龜裂 傳播 曲線

疲勞 龜裂 傳播 狀態의 實驗 結果를 Fig. 2에 表示하였다. 여기서 縱軸의 龜裂 길이 a는 노치 길이와 反復 應力에 依해 생긴 龜裂 길이를 합한 것이며, 應力 σ는 試驗片에 作用한 純粹 平面 荷重 應力이다. 龜裂의 길이는 試驗片에 作用하는 應力 方向에 垂直인

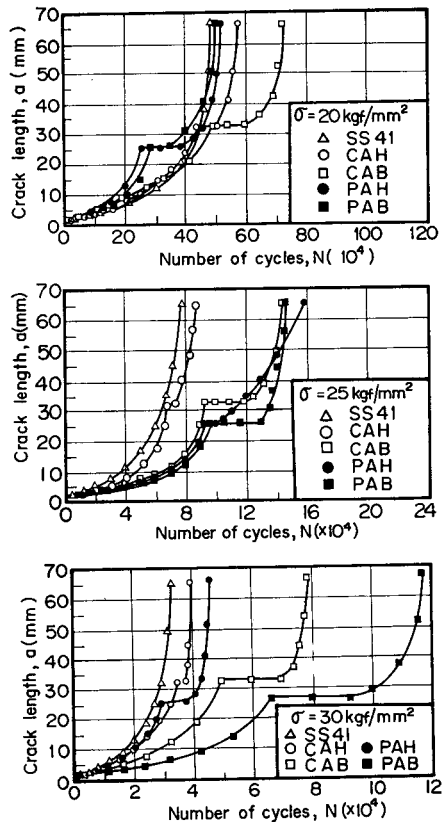


Fig. 2 Crack length versus cycle curves

길이로 測定하였으며, 試驗片의 表面과 背面의 龜裂長이를 平均한 값이다.

Fig. 2에서 作用應力과 試驗片의 形狀에 따라 疲勞壽命을 比較하여 보면 $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 下에서는 PAH材와 PAB材는 SS41材에 비해 各各 12.6%와 6.2%의 小幅增加에 그쳤으나 CAH材와 CAB材는 各各 28.5%와 58.7%의 增加를 보였다.

$\sigma=25\text{kgf/mm}^2$ 下에서는 PAH材, PAB材 및 CAB材는 SS41材보다 各各 100%, 85% 및 82.5%의 疲勞壽命向上을 보여 주었으나, CAH材의 境遇는 SS41材에 비해 4.8%의 增加에 그쳤다.

$\sigma=30\text{kgf/mm}^2$ 下에서는 PAB材와 CAB材는 SS41材보다 各各 241.6%와 129.2%의 疲勞壽命向上을 보였으나 PAH材와 CAH材의 境遇는 32.6%와 15%의 增加에 그쳤다.

以上の 結果를 考察해 보면

(1) 全般的으로 層狀複合板材의 疲勞壽命增加率은 作用應力의 크기가 늘어남에 따라 SS41材보다 더 커졌다.

(2) Barzing接着材인 PAB材와 CAB材의 疲勞壽命은 熱間接着材인 PAH材와 CAH材보다 作用應力이 커짐에 따라 더 커졌다.

(3) 試片內의 Cu境界層이 노치先端에서 가까운 곳에 있는 PAH材와 PAB材의 疲勞壽命은 $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 의 底應力下에서는 Cu境界層이 試片幅의 中央에 있는 CAH材와 CAB材보다 적었으나 $\sigma=25\text{kgf/mm}^2$, $\sigma=30\text{kgf/mm}^2$ 로 增加함에 따라 오히려 훨씬 큰 값을 보였다.

(4) 龜裂傳播曲線에서 縱軸에는 龜裂長이 a 를 對數座標로, 橫軸에는 反復回數 N 를 一般座標로 나타내면 Fig. 3과 같이 疲勞龜裂傳播段階가 몇개의 直線部分으로 나타남을 볼 수 있다. 여기서 SS41材는 龜裂傳播가 第一段階는 아주 짧은 시간 동안 빠르게 進行되고, 第二段階는 比較的 長時間동안 느린速度로 龜裂이 傳播되다가 第三段階에서 短時間동안 急速히 進行, 破壞가 됨을 보여준다. 그러나 層狀複合板材의 龜裂傳播狀態를 보면 試片의 노치先端에서 Cu境界面까지는 SS41材와 類似한 2~3段階의 直線部分으로 進行되며 龜裂이 Cu層境界面에 到着하면 일시 龜裂傳播가 停滯되면서 層이 分離되고, 이 分離된 面上의 任意脆弱한 部分에서 새로운 龜裂이 發生되어 初期 龜裂과 連結되면서 다시 SS41材의 第二段階 以後의 龜裂傳播狀態와 비슷한 1~2段階의 直線部分을 거쳐서 갑자기 破壞된

다.

(5) 光學顯微鏡에 依해 破壞龜裂傳播狀態를 觀察해 보면, Fig. 4(a, b)에서와 같이 層狀複合板材의 境遇는 Cu層內에서 橫方向으로 龜裂이 생겨 상당 기간동안 層이 分離되다가 SS41材의 任意 境界面

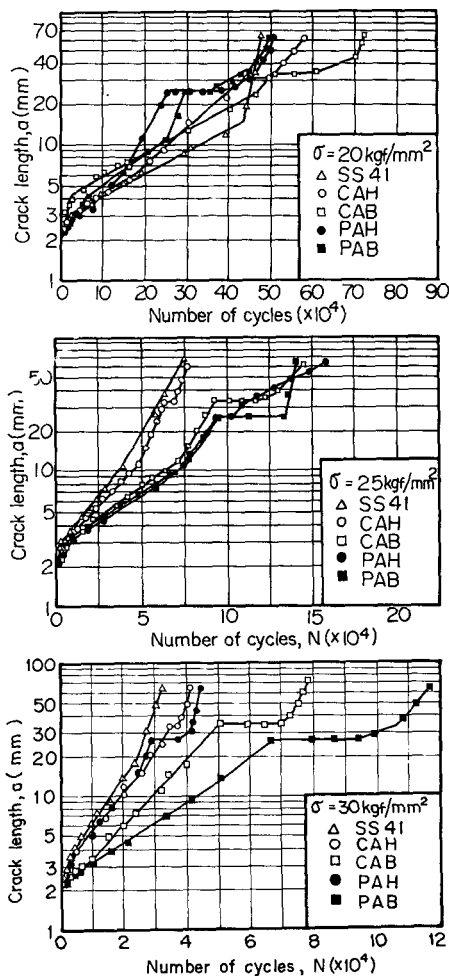


Fig. 3 Crack length versus cycle curves

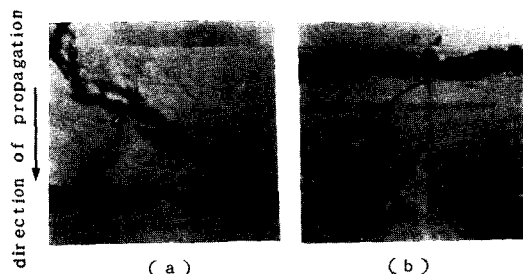


Fig. 4 Crack propagation mode

上에서 생긴 龜裂과 急激히 連結되면서 傳播됨을 確認하였다. 이때 생기는 層分離와 새 龜裂發生에 所要되는 追加에너지 때문에 層狀複合板材의 疲勞壽命이 單一材보다 커졌다고 生覺된다.

3.2 龜裂傳播速度와 應力擴大係數와의 關係

龜裂傳播速度 da/dN 은 一定期間동안 增加한 龜裂길이 $da = a_2 - a_1$ 을 그 동안의 反復作用應力回數, $dN = N_2 - N_1$ 으로 나눈 값이며, Arrester型 편노치를 가지고 있는 層狀複合板材의 應力擴大係數 K 의 式은 아직 定立돼 있지 않으므로 便宜上 O.L. Bowie⁽⁹⁾가 平面굽힘應力을 받는 片노치 單一材에 提示한 式 $K = 1.005 \sigma \sqrt{a}$ 를 使用하였다.

龜裂傳播速度 da/dN 을 應力擴大係數 K 의 函數라 假定하여 da/dN 를 橫軸, K 를 縱軸으로 한 兩對數 座標上의 Fig. 5~9와 같이 나타내었다. 여기서 Cu境界層內에서 層이 分離되는 동안의 龜裂傳播의 停滯現象을 無視하고 實驗結果를 標定하면 層狀複合板材에 있어서도 單一板材에서와 같이 P. Paris等⁽¹¹⁾이 提示한 式 $da/dN = CK^m$ 으로 表現이 可能하다는 것을 보여주고 있다.

여기서 C 는 材料常數, m 는 K 의 指數로서 常數이다. 各 材料에 對하여 C 와 m 의 값을 求하면 아래와 같다.

- SS 41, $da/dN = 4.7 \times 10^{-10} K^{3.20}$
- CAH, $da/dN = 7.8 \times 10^{-9} K^{2.43}$
- CAB, $da/dN = 3.6 \times 10^{-9} K^{2.54}$
- PAH, $da/dN = 1.58 \times 10^{-9} K^{2.94}$
- PAB, $da/dN = 1.23 \times 10^{-9} K^{2.60}$

위의 式을 考察해 보면 Cu境界層內에서의 層分離龜裂傳播 現象을 無視하고도 一般적으로 K 의 指數 m 의 값이 SS41板材보다 層狀複合板材에서 더 적음으로서 龜裂傳播速度가 늦어짐을 알 수 있다.

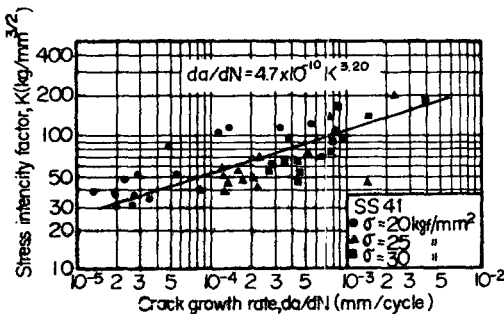


Fig. 5 Crack growth rate as a function of K for SS41

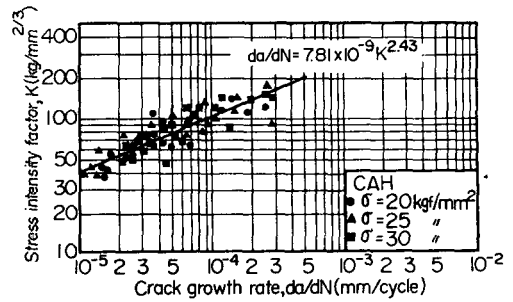


Fig. 6 Crack growth rate as a function of K for CAH

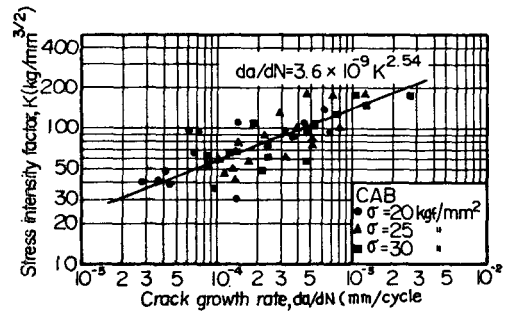


Fig. 7 Crack growth rate as a function of K for CAB

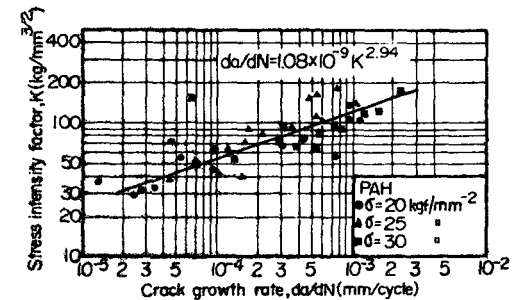


Fig. 8 Crack growth rate as a function of K for PAH

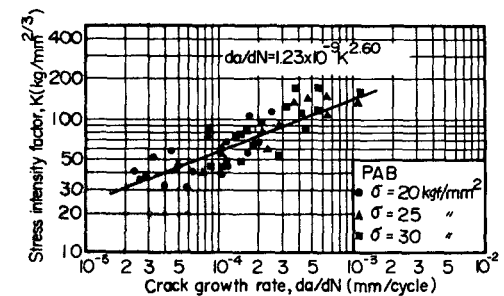


Fig. 9 Crack growth rate as a function of K for PAB

한다고 生覺된다.

4. 結 論

SS41-Cu-SS41 層狀複合板材와 SS41板材를 가지 고 平面구힘 疲勞龜裂傳播舉動에 관한 實驗을 實施 하여 아래와 같은 結果를 얻었다.

(1) 作用應力이 $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 에서 $\sigma=30\text{kgf/mm}^2$ 로 增加함에 따라 Cu를 境界層으로 하는 層狀複合板材는 SS41材보다 疲勞壽命增加幅이 훨씬 커 졌으며, 層狀複合板材 相互間에 製作方法과 形狀에 따라 比較해 보면 PAB材와 CAB材가 PAH材와 CAH材보다 더 커졌다.

(2) Arrestor型 片노치를 가진 層狀複合板材의 疲勞龜裂傳播狀態는 一般的으로 Cu境界層까지는 SS41材와 類似한 2~3段階의 傳播모드를 보이고 있으나 Cu境界層에 到達하면 層이 分離되면서 일 시停滯를 하다가 다시 SS41材의 2段階 以後와 類似한 傳播段階를 거쳐 破壞되었다.

(3) 層狀複合板材의 疲勞龜裂傳播速度 da/dN 과 應力擴大係數 K 값을 Cu境界層內의 層分離現象을 無視하고 兩對數座標上에 標定하면 SS41材와 類似 하게 直線式 $da/dN = CK^m$ 으로 表現이 可能하며 層狀複合板材의 龜裂傳播率은 SS41板材보다 적었다.

(4) 光學顯微鏡에 依한 疲勞龜裂傳播狀態를 觀察 하면 龜裂先端이 Cu境界層에 到達하면 Cu層內에서 一定期間동안 層分離現象이 생기고 SS41材 表面上 의 任意位置에서 새 龜裂이 發生하고 分離된 層과 急激히 連結되면서 龜裂傳播가 繼續됨을 알았으며, 이때 생기는 層分離와 새 龜裂發生에 所要되는 追 加에너지 때문에 層狀複合板材의 疲勞壽命이 增加

參 考 文 獻

- (1) Paris P. and Erdogan F., 1963, "Critical Analysis on Crack Propagation Laws", Trans. ASME. Series D. pp. 528~534.
- (2) Embury J.D., Petch N.J., Wraith A.E. and Wrigth E. S., 1967, "The Fracture of Mild Steel Laminates", Trans. of the Metallurgical Society of AIME, Vol. 239, pp. 114~118.
- (3) Kitagawa H., 1972, "疲勞龜裂의 破壞力學的 適用", JSME. M. Vol. 75, pp. 1068~1074.
- (4) Erdogan F. and Cook T.S., 1973, "Stress in Bonded Materials with a Crack Perpendicular to the Interface", Int. J. Engineering Science, Vol. 2, pp. 745~766.
- (5) Devine T.M., Floreen S., 1974, "Fracture Mechanics in Maraging Steel-Iron Laminates", Eng. Fracture Mechanics, Vol. 6, pp. 315~323.
- (6) 座右勝, 井太一, 1978, "複合材料의 破壞力學", 實數出版.
- (7) Alic J.A., Danesh A., 1978, "Fracture of Laminates Combining 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum Alloys", Eng. Fracture Mechanics, Vol. 10, pp. 177~186.
- (8) 申昌均, 廉永夏, 1983, "層狀複合鋼材의 低溫 破壞舉動에 관한 研究", 大韓機械學會論文集, 第7卷, 第2號, pp. 130~137.
- (9) Kaw A. K. et al., 1985, "Shear-Lag Analysis of Notched Laminates with Interlaminar Debonding", Eng. Fract. Mech, Vol. 22, pp. 997~1012.
- (10) Delale F., 1987, "Fracture Analysis of Notched Composites", Trans. ASME J. Eng. Mater. technol, vol. 109, pp. 27~35.