

高分子 複合材料의 光彈性學的 研究(第一報)

(Notch 附 Epoxy 樹脂板의 應力集中)

金源澤 · 盧時台 · 洪宇聲

漢陽大學校 工科學 工業化學科

(1980년 9월 4일 접수)

Photoelastic Studies on Polymer Composites (I) Stress Concentration in Epoxy-Resin Plate with Notch.

Won Taik Kim, Si Tae Noh and Woo Sung Hong.

*Department of Industrial Chemistry, College of Engineering,
Hanyang University, Seoul 133, Korea.*

(Received September 4, 1980)

要旨: 荷重을 받고 있는 複合材에서 crack에 對한 充填材의 影響을 光彈性學的 方法으로 考察하였다. 中心軸上에 充填材로서 銅板을 插入한 epoxy 樹脂 試驗片을 製作하고, 銅板의 길이 變化, notch의 깊이 變化 및 notch의 선단半徑 變化에 따른 notch 부위의 應力集中係數의 變化를 測定하였다.

引張荷重을 加했을 때 應力集中係數는 充填材의 影響으로 낮은 값을 나타냈으며, 充填材의 길이가 길어짐에 따라 현저하게 감소하였으나, 굽힘荷重下에서는 插入위치에 의해 오히려 增加하였다. 引張과 굽힘荷重을 동시에 加한 二軸荷重下에서는 引張荷重에 의한 應力狀態와 굽힘荷重에 의한 應力狀態가 重疊되어 나타나는 것을 알 수 있었다.

Abstract: This paper is concerned with the effect of filler to a crack which, has occurred in the polymer composite materials under loading.

Model specimens for photoelastic test were made with epoxy resin plate in which a small copper plate was inserted as a filler into central transverse axis, and varied the length of copper plate from 0 to 80mm. Measurement of stress concentration factor of simple epoxy plate was carried out under tension, bending and bi-axial loading respectively, according to the variation of depth, angle and root radius of notch. And it was then compared to stress concentration factor of a specimen notched in the same way in which a copper plate was inserted.

The results showed that under tension the values of stress concentration factor of copper plate inserted specimen were lower than un-inserted epoxy plate, but under bending the values were represented reversely owing to the position of copper plate in specimen. In bi-axial loading the values were observed to be between the values under tension and under bending.

Notation

σ ; stress	σ_0 ; principal stress	$\sigma_{\max}$; maximum stress
P ; load applied	α ; stress-optical coefficient	K ; stress concentration factor
n ; fringe order	M ; bending moment	Z ; section modulus
l ; length	β ; modulus ratio of the laminate	t ; thickness of test piece
d ; depth of notch		

1. 序 論

實驗的應力解析法¹은 크게 抵抗 gauge 法과 光彈 · 塑性法으로 나뉘지며 이 중에서 模型實驗을 하는 光彈性法은 抵抗 gauge 法으로 測定 곤란한 notch 部位의 應力解析이나 彈性學的 計算이 不可能한 복잡한 形狀部位의 應力解析에 편리하며, 特히 物體表面 및 內部的 應力分布를 연속적으로 測定할 수 있는 장점을 가지고 있어 여러 工學分野에서 많이 利用되고 있다².

2次元 彈性狀態에 있는 試驗片에 수직방향으로 偏光을 통과시키면 複屈折에 의해 생긴 두 光波의 位相差는 平板試片의 主應力差에 비례하며 이 때의 應力狀態는 fringe pattern 으로서 나타난다. 光彈性 應力解析의 척도로서 應力集中係數와 應力分布線圖를 利用하는데, 應力集中이란 構造物의 形狀이 굴곡을 가지거나 불연속성 등 그 形狀의 일관성이 없을 때 일어나는 것으로 notch 의 경우에는 notch 部位에 局部的으로 主應力線이 밀집되어 應力集中現像이 일어난게 된다^{1,3}.

機械工學分野에서는 光彈性 模型實驗에 의하여 notch^{4,5}, 圓孔^{6,7} 등 여러 모양에 따른 一軸應力下에서의 單순材料에 對한 고찰이 많이 행하여지고 있다.

이와같은 光彈性解析法은 高分子複合材料와 같은 彈性係數가 서로 다른 物質로써 이뤄지는 複合系의 微視力學的 應力解析에 있어서도 semi-micro 的 模型實驗이 可能하므로 극히 편리한 수단이 된다⁸.

光彈性應力解析法을 複合材料에 도입시켜 행한 研究로서는 matrix 와 充填材와의 接着有無에 따른 應力集中을 고찰한 Nielsen^{9,10}의 研究, 圓孔에 대한 應力解析을 板狀積層系에 도입시킨

Goodier 의 고찰과 山口章三郎의 充填材의 coupling agent 處理에 의한 영향 고찰¹¹, 纖維의 직경, 길이 및 纖維의 겹침(overlap)에 따른 剪斷應力實驗^{12,13}과 材料의 極限設計를 위해 塑性域에서 파단까지의 光塑性 實驗 및 피로, creep 現像에 관한 고찰¹⁴ 등이 있다.

本 研究에서는 高分子複合材料에서 crack 에 對한 充填材의 영향을 고찰하기 위한 제 1 報로 彈性領域下에서 光彈性試驗片으로 epoxy plate 를 使用하여 notch 의 깊이, 각도 및 선단半徑變化에 따른 應力集中係數를 實驗으로 구하고 充填材로써 copper plate 를 여러 길이의 板狀形態로 試片의 中心部에 插入하였을 때 notch 部位의 應力集中係數變化를 고찰하였다.

2. 實 驗

2-1. 材料 및 試片模型

本 實驗에서 使用한 光彈性 實驗用 Epoxy 平板으로서는 日本 理研計器社 製品(規格 220×160×6mm)를 사용했고 copper plate 는 두께 1mm 의 一般시판用 製品을 使用하였다. Table I 에 機械的 性質의 測定值를 表示했다.

Table I. Mechanical Properties of Materials.

Properties	Tensile Modulus (kg/mm ²)	Flexural Modulus (kg/mm ²)
Epoxy resin	163.4	358.5
Copper plate	11237.0	9284.0

또한 實驗에서 使用한 試驗片의 諸元은 Fig. 1 과 같다.

2-2. 實驗方法

實驗에서 使用한 光彈性 偏光裝置는 Fig. 2와

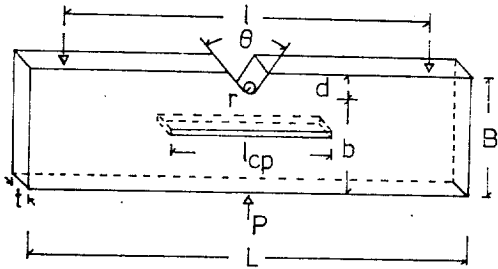


Figure 1. Dimensions of test piece.

- L : Length of epoxy plate (200mm)
- t : Thickness of epoxy plate (6mm)
- B : Width of epoxy plate (50mm)
- t_{cp} : Width of copper plate (6mm)
- l : Span distance (160mm)
- l_{cp} : Length of copper plate (10, 20, 40, 80mm)
- θ : Angle of notch (45° , 60° , 90°)
- r : Root radius of notch (1, 2, 3, 5mm)
- d : Depth of notch (5, 7, 10, 12mm)
- p : Load applied.

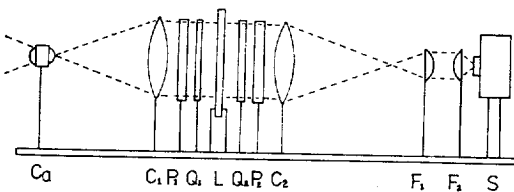


Figure 2. Circulal polariscope

- S ; light source
- F_1, F_2 ; forcus lens
- C_1, C_2 ; lens
- P_1, P_2 ; polarizer
- θ_1, θ_2 ; 1/4-polarizer
- L ; loading appratus
- C_s ; camera

같으며 光源으로서는 波長이 $5461\text{\AA}$ 인 單色光 (mercury lamp)을 使用했다.

規定試片($200 \times 50 \times 6\text{mm}$)은 原板($220 \times 160 \times 6\text{mm}$)을 절단하여 使用했으며 이때 加工應力이 생기지 않도록 주의하였다.

절단면은 sand paper($100 \sim 1000C_w$)로 面處理

를 하였고, 吸濕에 의한 영향을 방지하기 위하여 乾燥劑(CaCl_2)를 넣은 desiccator 內에 보관하였다. Notch 加工은 줄을 使用하였으며 notch 의 깊이는 無限平板과 같은 조건¹⁵으로 하기 위해서 全體試驗片의 3분의 1 이내에서 5, 7, 10, 및 12mm 의 4 종류로 變化시켜 實驗하였으며, notch 의 각도는 45° , 60° 및 90° 의 3 종류로, notch 의 선단半徑은 1, 2, 3 및 5mm 의 4 가지로 變化시켰다. Copper plate 는 Fig. 1과 같이 epoxy 平板의 中心軸에 copper plate 의 두께와 같은 폭 1mm 의 홈을 각각 10, 20, 40 및 80 mm 의 길이별로 精密하게 판다음 插入하였다. 이때 copper plate 가 平板應力 狀態에서 纖維狀充填材와 같은 역할을 할 수 있게 하기 위하여 試驗片面에 수직으로 插入하고 試驗片의 홈 copper plate 접측면을 epoxy 樹脂로 接着시켰다. 測定荷重은 epoxy 板의 彈性變形 範圍와 fringe 수를 考慮하여 加할 때에는 Fig. 1과 같이 試片兩端을 單純支持하고 中央의 notch 反對側에 集中荷重 9kg 을 加했으며 引張時에는 48.5kg 을 加했고, 二軸荷重에서는 이들 荷重을 同時에 作用시켰다.

또한 fringe 수 測定은 creep 現象에 따른 誤차를 피하기 위하여 fringe 效果가 가장 좋은 조건으로 荷重을 加한 후 3 分후에 測定하였다. 이와 같이 epoxy 試片에 引張, 加할 및 二軸荷重을 각각 加했을 때 Fig. 2의 偏光裝置를 통해 나타난 等色線(Isochromatic fringe pattern)을 寫眞撮影하고 notch 部位에서의 무늬次數를 확대鏡을 使用해 세고, 모양을 스캐치하여 應力集中係數와 應力分布의 變化³를 구하였다.

2-3. 光彈性感度係數 測定

光彈性 感度係數 관계식^{1,4}은

$$\sigma = \frac{n}{at} = \frac{3pl}{2tB^2}$$

$$\therefore \alpha = \frac{2nB^2}{3pl} \quad \dots\dots\dots (1)$$

로 表示되며 本 實驗에서 使用한 epoxy 平板의 光彈性 感度係數, α 는 均一한 斷面을 갖는 平板試片을 여러 加할荷重下에서 무늬次數를 測定하고 (1)式에 代入하여 平均값 0.645를 얻었다.

3. 結果 및 考察

3-1. 材料力學的 解析

Notch 가 있는 平板試片에 引張, 굽힘 및 二軸 荷重을 作用시키면 應力은 均一하게 分布되지 않고 notch 部位에 局部的으로 增大하게 되어 應力이 集中되는 現象을 나타낸다. 이때의 應力集中係數는 最大應力과 基準應力の 比로 表示된다^{1,3}.

$$K = \sigma_{\max} / \sigma_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서 最大應力은 實驗에서 나타난 무늬次數에 의해

$$\sigma_{\max} = \frac{n}{\alpha t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

과 같이 구해진다. 基準應力은 notch 가 없는 平板에 대해

$$\text{引張時; } (\sigma_0)_t = \frac{P}{Bt} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{굽힘時; } (\sigma_0)_b = \frac{6M}{(tB^2)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{다만, } M = \frac{Pl}{4}$$

$$\text{二軸時; } (\sigma_0)_x = (\sigma_0)_b + (\sigma_0)_t \quad \dots\dots\dots (6)$$

로 주어진다.

그런데 notch 를 갖는 경우에는 基準應力이 變化되므로 (4), (5) 및 (6)式을 notch 의 깊이에 따라 수정하면

$$\text{引張時; } (\sigma_0)_t = \frac{P}{bt} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{굽힘時; } (\sigma_0)_b = \frac{6M}{tB^2} \times \frac{B/2-d}{B/2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{二軸時; } (\sigma_0)_x = (\sigma_0)_b + (\sigma_0)_t \quad \dots\dots\dots (9)$$

로 表示할 수 있다.

3-2. 實驗結果 및 考察

3-2-1. 引張荷重下에서의 應力集中

Fig. 3에 notch 의 각도가 各各 45°, 60° 및 90°일 때 notch 의 깊이에 따른 應力集中係數의 變化를 表示했고, notch 의 깊이가 10mm 일 때 各各의 각도에서 先端半徑에 따른 應力集中係數의 變化를 Fig. 4에 表示했다.

Fig. 3에서 應力集中係數가 notch 의 깊이가

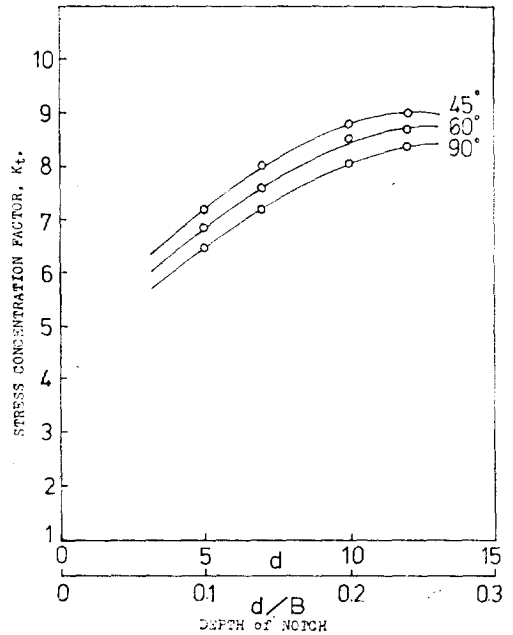


Figure 3. Stress concentration factor, K_t , vs. depth of notch in tension.

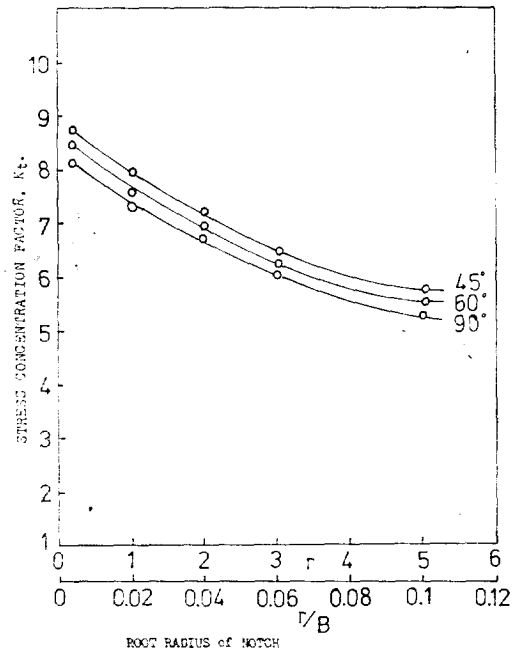


Figure 4. Stress concentration factor, K_t , vs. root radius of notch in tension.

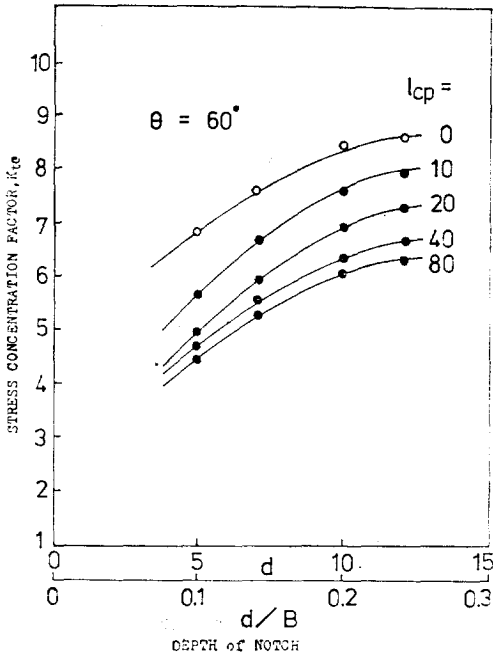


Figure 5. Stress concentration factor of copper plate inserted specimen, K_{tc} , vs. depth of notch in tension. (l_{cp} : length of copper plate inserted. ●: Copper plate inserted, ○: un-inserted)

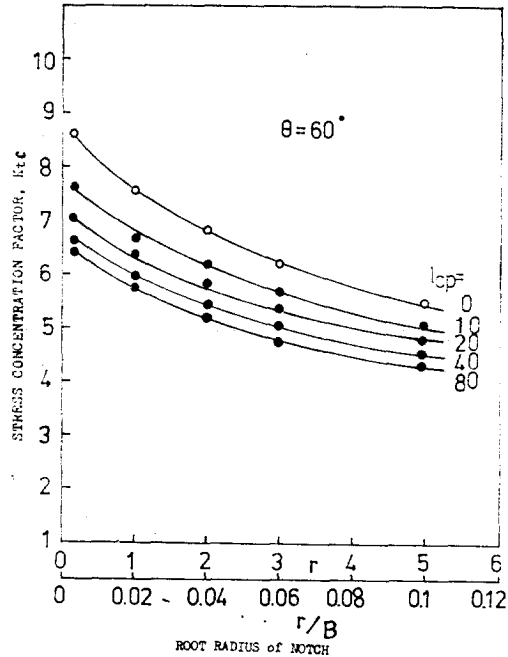


Figure 6. Stress concentration factor of copper plate inserted specimen K_{tc} , vs. root radius of notch in tension. (l_{cp} : length of copper plate inserted. ●: copper plate inserted, ○: un-inserted).

커짐에 따라 增加하고 Fig. 4에서 notch의先端半徑이 커짐에 따라서 減少하는 것을, 또한 notch의 각도가 커짐에 따라서 거의 一定한 비율로 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 notch의 깊이가 깊어짐에 따라서 應力集中係數가 增加하는 것은 斷面係數의 減少에 의해 主應力이 notch部位에 集中하게 되는 것에 기인되며 一定한 깊이의 notch에서先端半徑이 커짐에 따라 應力集中係數가 減少하는 것은 曲率屈曲이 緩慢해짐에 따라 應力이 notch部位에 넓게 分布되기 때문이다. Fig. 5와 Fig. 6은 notch의 각도가 60° 이고 引張荷重方向과 平行하게 copper plate를 각각의 길이별로 試片中心軸에 插入接着시켰을 때 notch의 깊이와先端半徑의變化에 따른 應力集中係數의變化를 copper plate가 없는 경우와 비교 表示한 것이다. Fig. 5 및 6

에서 全體의인 傾向은 Fig. 3 및 4때와 마찬가지로 notch의 깊이가 增加함에 따라 斷面係數의 減少에 따른 應力集中係數의 增加와先端半徑이 커짐에 따라 應力이 notch의 넓은部位로 分布되어 應力集中係數가 減少하는 것을 表示하고 있다. 그러나 copper plate를 插入한 경우에 應力集中係數가 插入치 않은 때보다 모두 낮은 값을 表示하며 copper plate의 길이가 깊어짐에 따라 보다 현저하게 減少하는 것을 알 수 있다. 이는 Photo. 1-(1)의 (a) 및 (b)에서도 나타난 바와 같이 引張荷重下에서 copper plate를 插入시킴에 따라 插入시키지 않은 것보다 notch先端部位에서 等色線의 分布가 작아지고 있어 應力集中이 緩化됨을 確認할 수 있다. 또 Fig. 7-(1)의 (a) 및 (b)의 應力分布圖에 나타난 바와 같이 notch의 깊이先端半徑 및 각도를 一定하

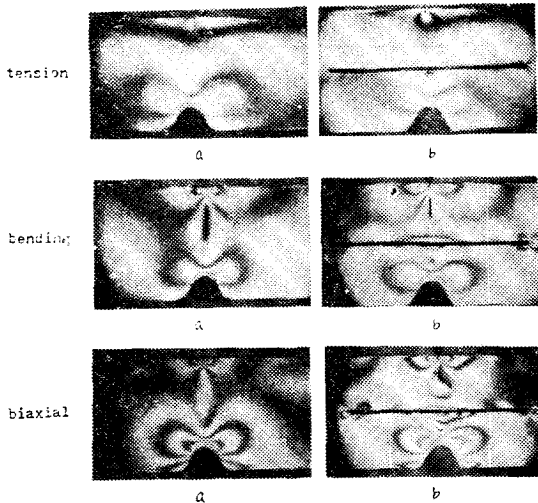


Photo. 1. Isochromatic fringe patterns

(a) series are cases of copper plate uninserted and (b) series are inserted ($l_{cp}=80$ mm). $d(=10$ mm), $r(=5$ mm), $\theta(=60^\circ)$ are constant.

제 하고 copper plate 를插入시킨 것과·插入하지 않은 것을 比較할 수 있는데, notch 의 깊이가 10mm,先端半徑이 5mm, 각도가 60° 일 때 (a) 는 copper plate 가插入되지 않은 경우 ($l_{cp}=0$) 에 있어서의 應力分布圖로서 應力集中係數가 5.7 을 나타내지만 (b) 에서 copper plate 가插入 ($l_{cp}=80$ mm) 됨에 따라 應力集中係數가 4.3 으로 減少하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 應力集

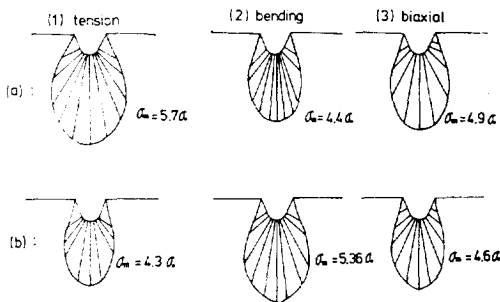


Figure 7. Diagram of stress distribution

(a) series are cases of copper plate uninserted and (b) series are inserted ($l_{cp}=80$ mm). $d(=10$ mm), $r(=5$ mm), $\theta(=60^\circ)$ are constant.

中係數가 減少하는 것은 (2) 및 (3)式에서 最大應力 σ_{max} 의 값이 copper plate 의 影響으로 減少하는 것을 의미하며 그 影響은 copper plate 의 길이에 비례적으로 增大함을 뜻한다.

纖維狀 充填 高分子 複合材에서 充填材의 補強效果는 充填材와 polymer matrix 의 彈性率差 異에 따라 軸方向으로 引張力을 받게 됨으로서 나타나며 充填纖維의 길이가 커짐에 따라 그 效果는 增大하고 이 때의 界面에서 받는 應力은 纖維末端에서 最大가 되며 纖維의 中心部에서 最少가 되므로 그 應力에 의한 polymer matrix 의 變形도 纖維中心部에서 最少가 된다¹⁶. 한편 光彈性實驗에서 fringe pattern 은 應力에 의한 試片두께의 變化에 의한 位相差로 나타나게 되므로 (3)式에서 copper plate 의 길이가 各 10, 20, 40 및 80mm 일 때 同一 荷重下에서 notch 部位의 두께 變化를 各 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_4$ 및 Δt_8 로 表示하면 그 크기는 $\Delta t_0 > \Delta t_1 > \Delta t_2 > \Delta t_4 > \Delta t_8$ 순이 된다. 따라서 最大應力(σ_{max})이 copper plate 의 影響으로 應力集中係數가 減少하는 것은 平面應力狀態에서 一定하게 加해진 荷重이 充填材, 즉 copper plate 로 傳達되기 때문에 copper plate 中心軸상에 위치한 notch 部位의 變形이 억제되기 때문이다.

3-2-2. 굽힘荷重下에서의 應力集中

Fig. 8에 notch 의 깊이와 각도를 變化시켰을 때를, Fig. 9에서는 notch 의先端半徑과 각도를 變化시켰을 때 굽힘荷重下에서의 應力集中係數의 變化를 나타낸 것이고 Fig. 10은 notch 의 각도를 60° 로 고정하였을 때 notch 의 깊이變化에 따라 試片中心部에 插入된 copper plate 의 길이별로 比較 表示한 것이고, Fig. 11은 notch 의先端半徑의 變化에 따른 應力集中係數를 各各의 copper plate 길이별로 比較한 것이다. Fig. 8과 Fig. 9로부터 應力集中係數의 變化는 引張荷重시와 같은 傾向을 나타내나 notch 의 깊이가 깊어짐에 따라 직선적으로 급격히 增加하며先端半徑에 의한 影響은 引張荷重時보다 緩慢함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 10 및 Fig. 11에서는 Fig. 5 및 Fig. 6과 比較해 볼 때 비록 copper plate 의 影響이 적은 편이지만 引張荷重시와 달

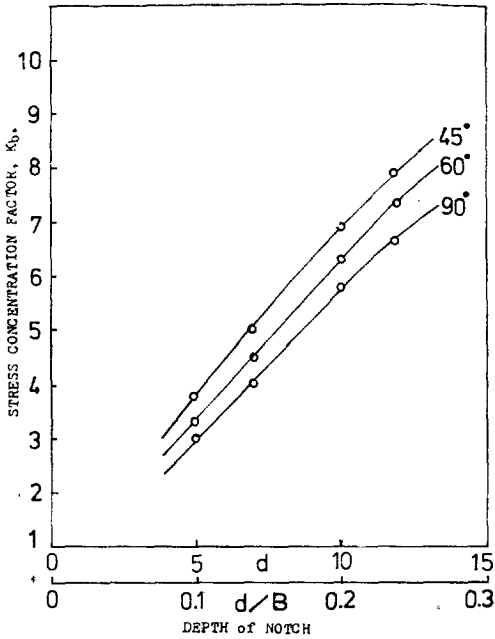


Figure 8. Stress concentration factor, K_b , vs. depth of notch in bending

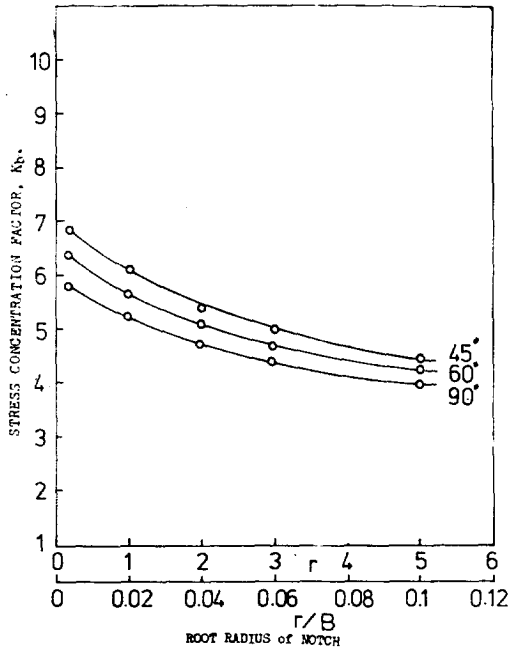


Figure 9. Stress concentration factor, K_b , vs. root radius of notch in bending.

리 copper plate 를 넣은 모든 경우에 있어서 應力集中係數가 copper plate 가 없는 때 보다도 큰 값을 表示하고 있다. 이것은 Fig. 12와 같은 積層 構造物에서 굽힘荷重에 의한 表層에서의 應力¹⁷ σ_1 은

$$\sigma_1 = \frac{(1-2\alpha)^3}{(1+2\alpha)^3 + (\beta-1)} \cdot \frac{M}{Z} \dots\dots (10)$$

다만, 여기서 $Z = \frac{bt^2}{6}$, $\alpha = \frac{t_1}{t_2}$, $\beta = \frac{E_1}{E_2}$ 로 表示되며 彈性率差 β 가 큰 경우(本 實驗의 경우는 약 26), 또 notch의 깊이가 깊어짐에 따라 σ_1 은 (8)式의 $(\sigma_0)_b$ 보다 작아지게 되어 (2)式에서 應力集中係數가 오히려 증대되며, 또한 Fig. 1과 같이 局部的으로 積層되어 있는 單純보의 中央에 集重荷重을 加함으로써 中央斷面에는 複雜한 二軸應力狀態로 되어 있는 데에 起因한 것으로 最大剪斷應力이 發生하여야 할 中心部에서 插入 充填材의 영향으로 이것이 거의 除去되어 插入 充填材로부터 약간 먼곳에 있는 notch 部位에 대

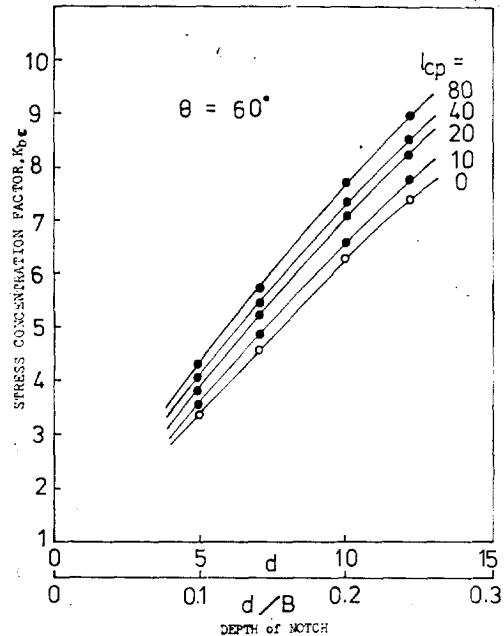


Figure 10. Stress concentration factor of copper plate inserted specimen, K_{bc} , vs. depth of notch in bending. (l_{cp} : length of copper plate inserted. ●; copper plate inserted, ○; un-inserted).

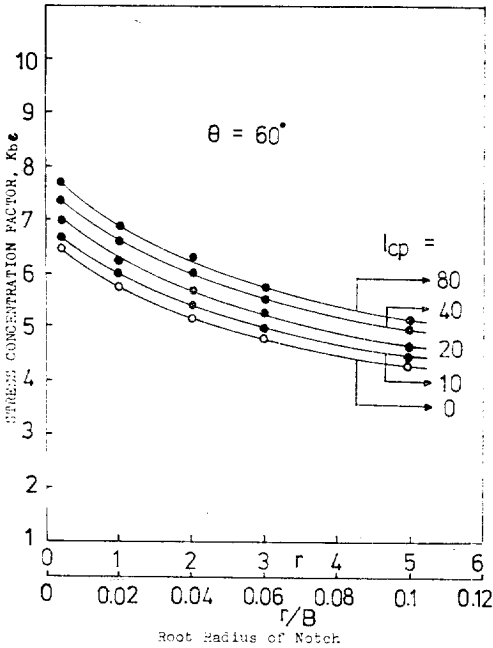


Figure 11. Stress concentration factor of copper plate inserted specimen, K_{σ} , vs. root radius of notch in bending. (l_{cp} : length of copper plate inserted, $\bullet$: copper plate inserted, $\circ$: un-inserted)

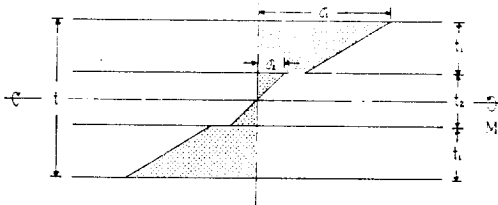


Figure 12. Stress distribution of laminate under bending.
1; outer layer
2; inner layer

한 굽힘應力은 더 커진 것으로 판단된다. Photo 1 (2)의 (a) 및 (b)는 굽힘荷重下에서 copper plate를 挿入치 않은 경우($l_{cp}=0$)와 (a)와 挿入시킨($l_{cp}=80\text{mm}$) 경우의 (b)를 表示한 것이다. 또 Fig. 7 (2)의 應力分布圖에서도 應力集中係數가 (a)의 경우($l_{cp}=0$) 4.4이지만 copper plate가 挿入($l_{cp}=80\text{mm}$)된 (b)에서는 5.36으로 增加함을 알 수 있다.

3-2-3. 二軸荷重下에서의 應力集中

引張과 굽힘荷重을 동시에 가했을 때 notch先端에서의 基準應力은 (9)式과 같이 表示되고 (3)式에서 $\sigma_{\max}$ 를 표시하는 무늬 次數, n 도 各 各 荷重下에서 무늬數의 疊으로 表示되므로 應力集中係數는 平均값으로 表示된다. 二軸荷重을 가했을 때 notch의 깊이와 角度에 따른 應力集中係數의 變化를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타냈고, Fig. 15, Fig. 16에 이들의 結果를 copper plate를 挿入한 경우와 比較하여 나타냈다. copper plate를 挿入하지 않은 경우 (Fig. 13및 Fig. 14)의 應力集中係數는 引張 및 굽힘荷重의 影響이 重疊되어 引張荷重下에서의 값과 굽힘荷重下에서의 값의 平均값으로 나타났으며 copper plate를 挿入한 경우 (Fig. 15및 Fig. 16)에서도 같은 結果를 表示하고 있음을 알 수 있다. 또한 photo. 1 (3)의 (a) 및 (b)의 fringe pattern이 引張 및 굽힘 各各의 單純荷重의 中間形態를 보여주고, Fig. 7 (3)의 (a) 및 (b)의 應力分布圖에서도 $l_{cp}=0$ 의 경우에 應力集中係數가 4.9로부터 $l_{cp}=80\text{mm}$ 의 경우 4.6으로 減少하여 (9)

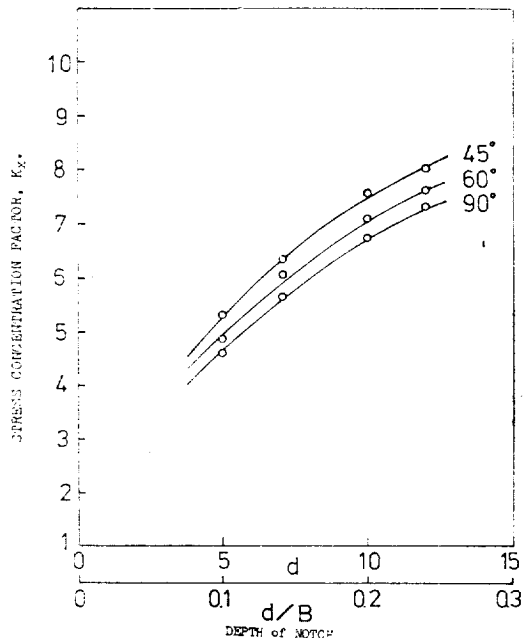


Figure 13. Stress concentration factor, K_{σ} , vs. depth of notch in biaxial loading.

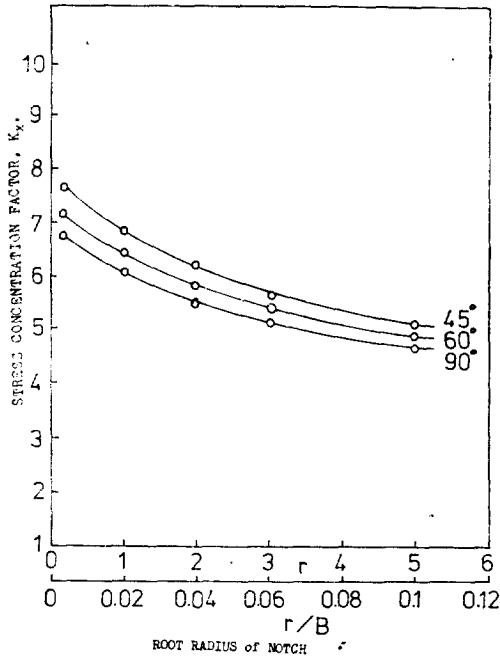


Figure 14. Stress concentration factor, K_x , vs. root radius of notch in biaxial loading.

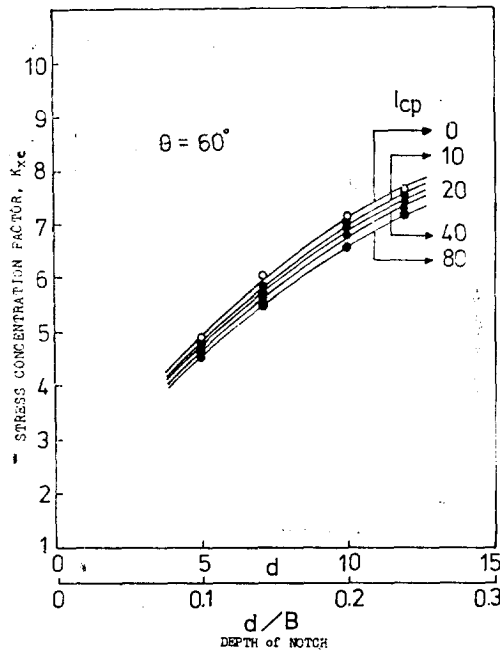


Figure 15. Stress concentration factor of copper plate inserted specimen, K_{xc} , vs. depth of notch in biaxial loading. (l_{cp} : length of copper plate inserted. ●: copper plate inserted, ○; un-inserted.)

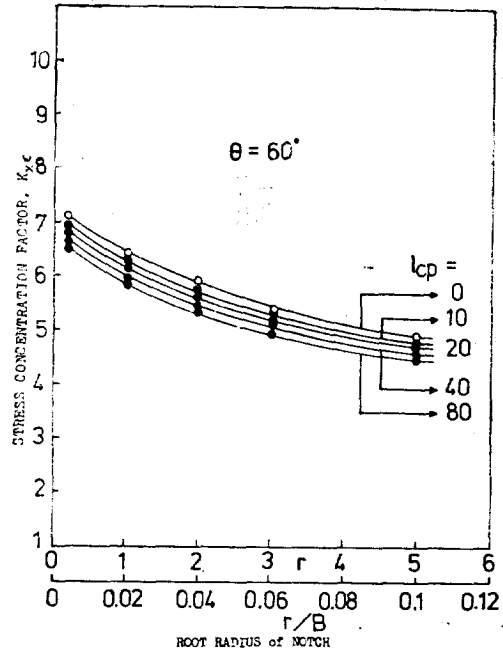


Figure 16. Stress concentration factor of copper plate inserted specimen, K_{xc} , vs. root radius of notch in biaxial loading. (l_{cp} : length of copper plate inserted. ●: copper plate inserted, ○; un-inserted.)

式과 (3)式이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 3-2-1의 引張荷重下에서 應力集中係數가 減少하는 것은 加해준 荷重이 matrix와 充填材의 彈性率差에 의해서 充填材로 전달되기 때문에 notch部位의 變形이 감소되는데 反하여 3-2-2의 굽힘荷重下에서는 (10)式으로부터 彈性率差가 클수록 오히려 增加하였다. 따라서 各各의 單純荷重을 동시에 加한 二軸荷重下에서의 應力集中率은 삽입 充填材와 polymer matrix間的 引張彈性率差와 굽힘彈性率差의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

4. 結 論

V形 notch를 갖는 平板에 充填材를 notch部位의 中心線上에 平行으로 挿入接着하여 引張荷重을 加하는 경우 應力集中係數는 充填材 中心部位의 變形이 matrix와 充填材의 引張彈性率差

의 影響으로 抑制되어 減少하며 充填材의 길이
가 길어질수록 그 影響은 커진다. 그러나 充填
材가 積層構造物에서와 같이 插入되어 中立軸
근처가 最大剪斷應力 部位로 되어 있을 때 集中
굽힘荷重에 의해서는 그 剪斷應力을 減少 내지
除去해 주는 效果와 matrix-充填材間의 集中
應力差에 따라 應力集中係數는 오히려 增加된다.
二軸荷重에서 應力集中係數는 引張荷重에 의한
應力狀態와 集中荷重에 의한 應力狀態가 서로
重疊되어 平均값으로 나타나며, 插入充填材의
集中應力率과 引張應力率의 影響을 받고 있음을
알 수 있다.

따라서 notch 또는 crack 에 대한 高分子複合
系의 應力集中을 減少시키기 위해서는 引張應力
率이 크고 集中應力率이 적은 充填材를 複合시
켜야 하며, 充填材를 polymer matrix 에 積層시
킬 때는 連續充填材의 形態로 積層系의 表皮層
쪽으로 積層시키는 것이 最大의 充填效果를 나
타낼 것으로 생각된다.

引 用 文 獻

1. 辻二郎, 河田, “光彈性實驗法”, 日刊工業新
聞社, p. 37, (1965).
2. D. Post, *Experimental Mechanics*, **36**, 176
(1979).
3. 四田正孝, “應力集中”, 森北出版 (1967).
4. R. E. Peterson, “Stress Concentration Fac-
tor,” Wiley, (1973).
5. P. D. Flynn, *Experimental Mechanics*, **32**,
386(1975).
6. A. J. Bush, *Experimental Mechanics*, **33**,
249(1976).
7. H. Fuehring, *Experimental Mechanics*, **30**,
255(1973).
8. 山口章三郎, 工業材料, **23**, 87(1975).
9. L. E. Nielsen, *J. Appl. Polymer, Sci.*, **10**
97(1966).
10. 山口章三郎, 複合材料, **8**, 201(1975).
11. R. T. Schwartz, H. S. Schwartz, “Funda-
mental Aspects of Fiber Reinforced Plastic
Composites,” Interscience, p. 45, (1968).
12. 河田, 橋本, 本堂, “東京大學宇宙航空研究
所報告”, **4**, 435(1968).
13. Yoshio. Ohashi, *Experimental Mechanics*,
38, 287(1973).
14. C. A. Rau, A. S. Tetelman, *Experimental
Mechanics*, **27**, 362(1970).
15. S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, “Theory
of Elasticity,” McGraw-Hill International
Student Edition, p. 39(1970).
16. G. S. Holister, “Fibre Reinforced Materi-
als,” Elsevier, p. 34, (1966).
17. 島村昭治, 宮人裕夫, 強化プラスチック,
24, 364(1978).