

高分子 複合材料의 光彈性學의 研究 (第二報)
(NOTCH 附 EPOXY 板의 應力集中係數에 미치는 補强材의 效果)

金源澤, 盧時台, 頓枕承

漢陽大學校 工科大學 工業化學科

(1981년 2월 23일 접수)

Photoelastic Studies on Polymer Composites (II)
(Effect of Reinforcement on Stress concentration
Factor of Notched Epoxy Plate)

Won Taik Kim, Si Tae Noh and Youn Seung Don

*Department of Industrial chemistry, College of Engineering,
Hanyang University, Seoul 133, KOREA.*

(Received Feb. 23, 1981)

要約: 複合系내 充填補强材의 위치에 따라 crack 선단부에서의 應力集中現象을 고찰하기 위해, notch 를 갖는 光彈性용 Epoxy 板에 板狀과 纖維狀 充填材를 夾持硬化시켜 模型試片을 제작하고 이때 notch 선단과 夾持 充填材와의 거리, 충전재의 길이를 변화시키고, 充填材 중심에서 末端으로 notch의 위치를 이동시키며 應力集中係數를 引張荷重과 굽힘荷重 下에서 측정하였다.

引張荷重을 가했을 경우, notch 선단과 充填材사이의 거리가 가까울수록, 充填材 길이가 길어질수록 應力集中係數는 감소하였으며, notch가 充填材 末端部分에 위치할 때 급격히 증가하였다. 한편 굽힘 荷重을 가했을 경우에는 notch 선단과 充填材 사이의 거리가 가까와 질수록 應力集中係數는 거의 직선적으로 감소하였으며, 充填材가 중립점을 중심으로 notch에 가까이 있으면 그 길이가 길어질수록 應力集中係數는 감소하지만, 멀리 있으면 오히려 증가한다. 반면 notch가 充填材 末端部에 존재할 때 應力集中係數는 약간 증가할 뿐 전체적으로 일정한 값을 갖는다.

ABSTRACT: To study the stress concentration phenomenon at a crack tip by changing the filler site in polymer composite materials, model specimens for photoelastic test were prepared with notched epoxy resin plate in which a small copper plate or a metal fiber was embedded as a filler. The stress concentration factor was measured under tension and bending by changing the distance between the notch and filler, the filler length, and the notch position of filler from the center to the end.

Under tension, the stress concentration factor reduced as the distance between the notch and filler decreased, or as the length of filler increased. When the notch was located at the end of filler, the stress concentration factor reached to maximum. On the other hand, the stress concentration factor reduced as the distance between the notch and filler decreased

under bending. If the filler was located between the notch and the neutral point, the stress concentration factor decreased as the length of filler increased. However, when the filler wasn't located between the notch and the neutral point, the stress concentration factor increased reversely as the length of filler increased. Finally when the notch was located at the end of filler, the stress concentration factor increased only slightly and maintained constant as a whole.

Notation		
α : stress-optical coefficient	d ; depth of notch	l_{cp} ; length of copper plate
σ_0 ; princial stress	d_{nf} ; distance between notch and filler	l_{mf} ; length of metal fiber
σ_{max} ; maximum stress	K ; stress concentration factor	M ; bending moment
B ; width of epoxy plate	L ; length of epoxy plate	n ; fringe order
b ; $b=B-d$	l ; span	P ; load
		t ; thinkness of epoxy plate.

1. 序 論

高分子 複合材料의 기계적 성질은 補强材의 성질 및 형태에 따라 지배됨^{1~3}은 주지의 사실이지만 구조재로 많이 사용되고 있는 複合材料에서는 그 補强材의 위치에 따라 應力分布가 다르게 된다⁴. 應力分布에 관한 실험적인 解析方法으로는 光彈性法이 주로 사용되는데, 이 方法은 應力과 變形에 대한 실험적인 方法으로, 수학적 方法으로는 해석이 불가능한 복잡한 形象, 복잡한 荷重 조건에서의 應力해석에 편리하고 물체 표면이나 내부의 應力分布를 연속적으로 측정할 수 있는 장점이 있기 때문이다^{5~6}.

光彈性法으로 행하여진 考察은 주로 一軸應力下에서 notch, 원공등 여러 모양을 갖는 단순재료에 대한 것으로 複合系에 대해서는 적은 편이다. 複合系에 대한 考察로는 Thibodeau와 Wood⁷의 硬質 원형充塡材를 갖는 軟質고무 sheet의 應力分布에 대한 研究, 硬質 Polyester에 軟質 Polyurethane을 사각형 充塡材로 사용하여 그 充塡材의 크기와 배향에 대한 應力集中 영향을 고찰한 Mirza와 Ansari⁸의 研究, 밀집 배치된 纖維에서 matrix와 섬유와의 應力集中 영향과 불연속 纖維 末端에서의 應力集中과 전달에 관한 고찰⁹, composite에 있는 원형 구멍 주위의 應力分布 고찰에 대한 Rowland¹⁰, Daniel¹¹의 研究, Graphite/Epoxy Laminate에서 사각형 slit의 aspect ratio에서의 파괴거동을 고찰한 Yeow¹²의 研究

등이 있다.

本 研究는 前報에서 充塡材가 모형시편 중심 선상에 삽입 접착했을 때 굽힘荷重 下에서는 充塡材를 挿入시키지 않았을 때보다 應力集中係數가 증가하였다⁴는 것을 토대로 複合系내의 充塡 補强材의 위치에 따른 應力集中現象을 고찰하였다. 充塡材를 함침 경화시켜, notch와 充塡材 사이의 거리에 따른 應力集中係數를 彈性영역¹³에서 측정하였으며 notch를 充塡材 중심에서 末端으로 이동시키며 그때 notch部位에서의 應力集中係數도 구하였다.

2. 實 驗

2-1. 材料 및 試片模型

本 實驗에서 사용한 光彈性 實驗用 Epoxy 平板은, Epoxy 당량 200인 YD-115CA와 硬化劑로 Triethylenetetramine을 중량비 10 : 1로 혼합하여 常溫(25°C)에서 24時間 硬化시킨 後 7日間 熟成시켜 사용하였으며 充塡材로 板狀인 copper plate와 纖維狀인 鋼鐵線의 metal fiber를 사용하였다. 이들의 Tensile modulus와 Flexural modulus는 Table I과 같다.

Table 1. Mechanical Properties of Materials

Materials	Tensile Modulus (kg/mm ²)	Flexural Modulus (kg/mm ²)
Epoxyresin	330	357
Copperplate	11200	9300
Metalfiber	19500	14300

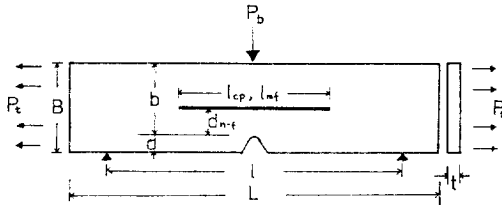


Figure 1. Dimensions of epoxy plate.

Notch : angle (60°)
 depth (10mm)
 root radius (1mm)
 Copper plate : thickness (1mm)
 width (4mm)
 Metal fiber : diameter (1mm)
 L : Length of epoxy plate (200mm)
 t : Thickness of epoxy plate (4mm)
 B : Width of epoxy plate (50mm)
 l : Span (160mm)
 l_c : Length of copper plate (10~80mm)
 l_{mf} : Length of metal fiber (10~80mm)
 d_{n-f} : Distance of notch-filler (0~15mm)

한편, 實驗에서 사용한 模型試片의 諸元은 Fig. 1과 같다.

2-2 實驗裝置

Fig. 2는 實驗에서 사용한 光彈性 偏光裝置로, L_s 는 光源(波長=5461Å)이고, P_1 과 P_2 는 偏光板으로 여러 방향으로 진동하는 光波를 偏光軸 방향으로만 진동시키는 역할을 한다. Q는 1/4波長板으로 主應力 方向에 생기는 무늬인 等傾線을 없애기 위한 板이다. 그리고 L은 荷重裝置로 試片에 荷重을 가하는 裝置이다.

2-3 實驗方法

模型試片은 充填材를 含침시켜 成型한 Epoxy 平板을 $200 \times 50 \times 4$ mm의 크기로 절단하고, notch는 무한 평판과 같은 條件¹⁴으로 깊이는 10mm, 각도는 60° , 선단반경은 1mm로 고정시켜 가공하였다. 이때 加工應力이 생기지 않도록 주의하였고, 절단면은 sand paper (300~1200C₆₀)로 面處理한 후에 乾燥劑(염화칼슘)를 넣은 desiccator

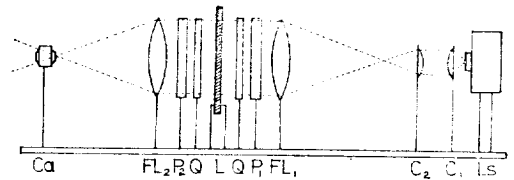


Figure 2. Circular polariscope.

L_s : light source
 C_1, C_2 : focus lens.
 FL_1, FL_2 : lens.
 P_1, P_2 : polarizer.
 Q : 1/4 polarizer.
 L : loading apparatus.
 Ca : camera

내에 보관하였다.

Notch 선단과 充填材 사이의 거리는 充填材를 notch 선단인 0mm에서 模型試片 中心軸인 15mm까지 이동시켰으며, 充填材의 길이는 10, 20, 40 및 80mm로 變化시켜 實驗하였다. 또한 充填材에 대한 notch의 位置變化는 40mm와 80mm의 充填材를 사용하여, 그 中心을 "0"이라 하고 末端을 "1"이라 하여 0, 1/4, 1/2, 3/4 및 1로 變化시키며 實驗하였다. 測定荷重은 Epoxy 板의 彈性變形 範圍와 fringe 數를 고려하여 引張荷重時에는 65kg을 加하였고 굽힘荷重時에는 Fig. 1과 같이 兩端을 單純支持하여 notch 中央이 22kg의 荷重을 받게 하였다. Fringe 數 測定은 creep 現象에 따른 誤差를 피하기 위해 荷重을 가한 3分 後에 확대경을 사용하여 notch 部位의 무늬 次數를 세고 寫眞撮影을 하여 應力集中係數를 구하였다.

2-4 光彈性感度係數 測定

實驗에 사용된 Epoxy 平板의 感度は 斷面이 균일한 平板試片을 양단을 單純支持하여 중앙에 굽힘하중을 가한 뒤 무늬次數를 세어 (1)式에 代入하여 얻었다.

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

이 式에 의해 얻어진 光彈性 感度係數, α 는 0.737~0.854 이었다.

3. 結果 및 考察

應力集中係數란 荷重이 가해졌을 경우 應力이 고르게 分布하지 못하고 특수部位(notch, crack, 圓孔等)에 국부적으로 증대하여 應力이 集中되는 現象을 수치적으로 나타내는 것을 말하며 (2) 式과 같이 表現된다¹⁵.

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

즉, 應力集中係數, K는 最大應力の 基準應力에 대한 比를 말한다.

여기서, 最大應力은 實驗에서 나타난 무늬次數에 의해 (3)式으로 구해지고, 基準應力은 (4) 式과 (5)式으로 주어진다.

$$\sigma_{max} = n_{max} / \alpha t \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$(\sigma_0)_t = P / bt \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$(\sigma_0)_b = 6M / tB^2 \times (B/2 - d) / (B/2) \quad \dots\dots (5)$$

단, $M = Pl/4$

3-1 Notch-充填材거리 변화에 대한 應力集中

Fig. 3은 引張荷重 下에서 充填材로 copper plate를 10mm, 20mm, 40mm 및 80mm로 했을 때의 notch-copper plate 사이의 거리에 대한 應力集中係數의 變化를 표시한 것이고, Fig. 4는

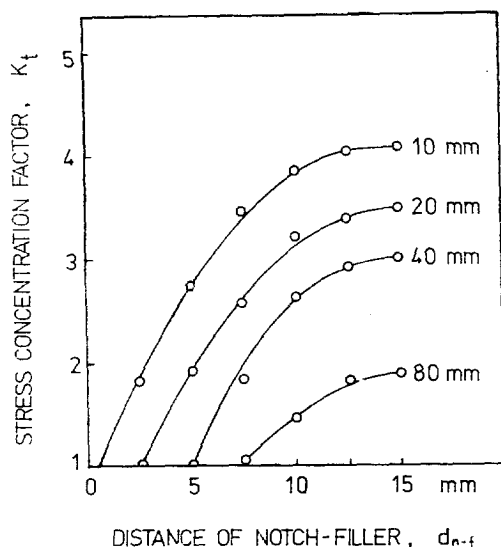


Figure 3. Stress concentration factor, K_t , vs. distance of notch-copper plate under tension.

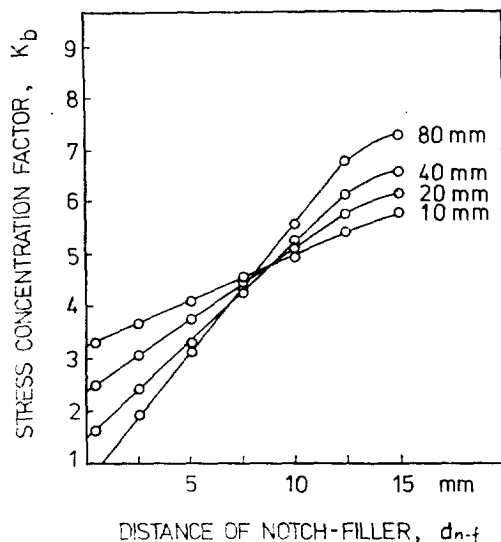


Figure 4. Stress concentration factor, K_b , vs. distance of notch-copper plate under bending.

굽힘荷重 下에서의 應力集中係數를 圖示한 것이다.

引張荷重을 가했을 경우, copper plate가 함침되지 않았을 때의 應力集中係數 5.9보다 낮은 값을 나타내었고 充填材의 길이가 길어질수록 應力集中係數는 감소하였다. 또 copper plate가 notch에 가까이 함침되어 있을수록 應力集中係數는 현저하게 감소하고 있다. copper plate의 길이가 길어질수록 應力集中係數가 감소하는 것은 copper plate와 matrix의 彈性率 差異에 따라 軸 方向으로 引張力을 받게 되기 때문으로 길이가 길어짐에 따라 집중되는 應力の 완화가 增大되고 있음을 알 수 있다. 또한 copper plate가 notch에 가까이 올수록 應力集中係數가 감소하는 것은 notch部位에 집중되는 應力이 notch가 가까이 있는 copper plate에 의해 分散되어 완화되기 때문이다. 이러한 分散效果는 copper plate 길이가 80mm일 때는 그 거리가 7.5mm일 때까지, 40mm일 때는 5mm일 때까지, 20mm일 때는 2.5mm일 때까지는 상당히 커서 最大應力이 基準應力과 같은 값을 가져 應力集中係數는 1이 된다. 이것은 photo. 1-(a)에서 보듯

이, 7.5mm 까지의 무늬次數는 거의 없고 15mm 에서 약간 나타나는 것으로도 알 수 있다.

굽힘荷重을 가했을 경우, notch에서 copper plate가 멀리 떨어질수록 應力集中係數는 거의 직선적으로 增加하고 copper plate를 함침시키지 않았을 때의 應力集中係數 4.8 부근에서 교차하고 있다. 이런 교차점은 중립점이라고 하며 이런 중립점에서는 充填材의 有無, 장단에 관계없이 應力集中係數는 일정하게 되며, 이 중립점을 중심으로 copper plate가 notch 가까이 있으면 充填材 길이가 길어질수록 應力集中係數는 감소하지만, 반대편에 있으면 分散效果가 없어 길이가 길어짐에 따라 應力集中係數도 증가하게 된다. 이것은 充填材가 집중되는 應力을 완화시키려면 notch와 중립점 사이에 存在해야 하는 것을 나타낸다. 굽힘荷重 下에서의 fringe pattern은 photo. 1—(b)에 잘 나타나 있듯이 거리가 增加함에 따라 무늬次數가 뚜렷이 增加하고 있다.

充填材로 copper plate 대신에 纖維狀인 metal fiber를 사용했을 때 引張과 굽힘荷重 下에서의 notch-metal fiber 거리 변화에 대한 應力集中係

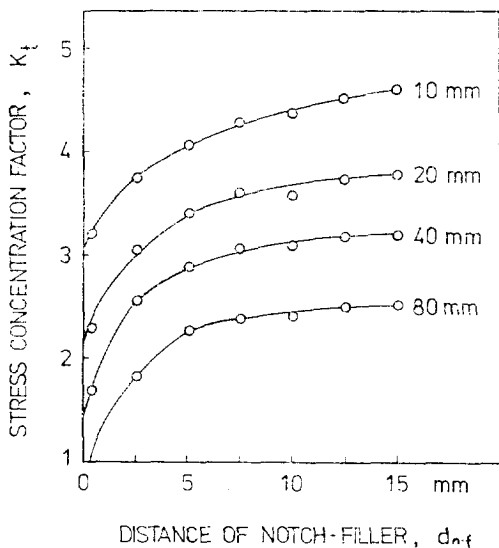


Figure 5. Stress concentration factor, K_t , vs. distance of notch-metal fiber under tension.

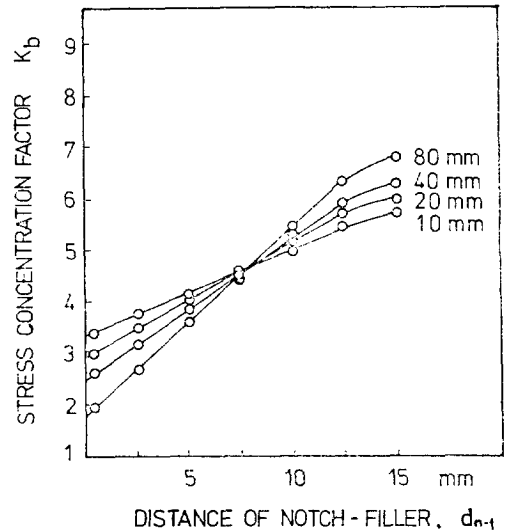


Figure 6. Stress concentration factor, K_b , vs. distance of notch-metal fiber under bending.

數의 변화는 Fig. 5, Fig. 6에 잘 나타나 있다.

引張荷重에서의 應力集中係數는 copper plate를 사용했을 때와 마찬가지로 길이가 길어질수록, metal fiber가 notch에 가까이 갈수록 감소하였으나 전체적으로 copper plate를 사용했을 때보다 應力集中係數가 크다. 이것은 metal fiber의 體積分率이 copper plate의 1/5 밖에 되지 않는 것에 起因한다.

굽힘荷重에서의 應力集中係數도 Fig. 4와 마찬가지로 중립점을 갖고 중립점을 중심으로 notch쪽에 metal fiber가 存在하면 길이가 길어질수록 감소하지만 반대쪽에서는 증가하게 된다. 이 중립점은 metal fiber를 사용했을 경우 약간 위치의 변동이 생기는데 이는 充填材의 彈性率에 差異가 있기 때문이다.

3-2 充填材에서 notch 위치에 대한 應力集中

充填材로 copper plate를 사용하였을 때 引張荷重에서의 notch 위치에 대한 應力集中係數는 Fig. 7에, 굽힘荷重에서의 notch 위치에 대한 應力集中係數는 Fig. 8에 도시하였다.

引張荷重의 경우, 80mm에서의 應力集中係數

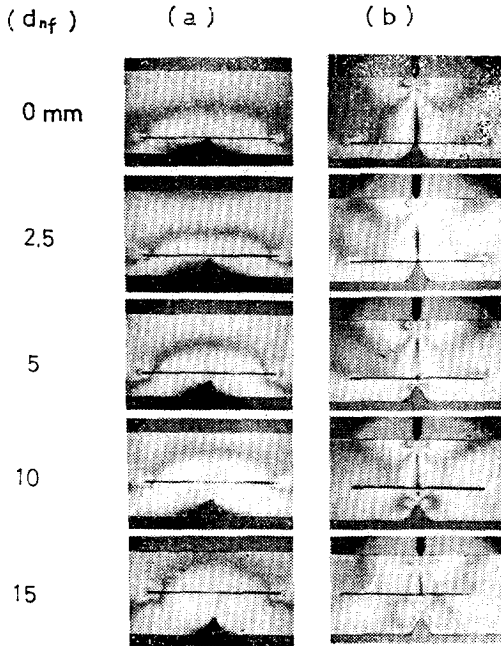


Photo 1. Isochromatic fringe patterns for notch-copper plate distance ($l_{cp}=80\text{mm}$)
(a) : under tension, (b) : under bending

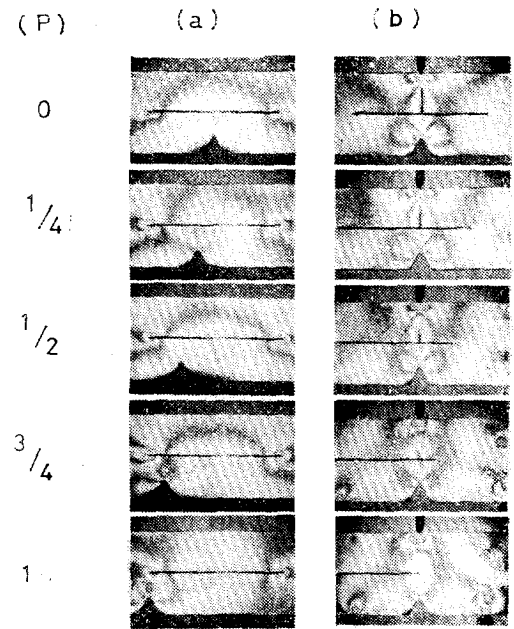


Photo 2. Isochromatic fringe patterns for notch position ($l_{cp}=80\text{mm}$)
(a) : under tension, (b) : under bending.

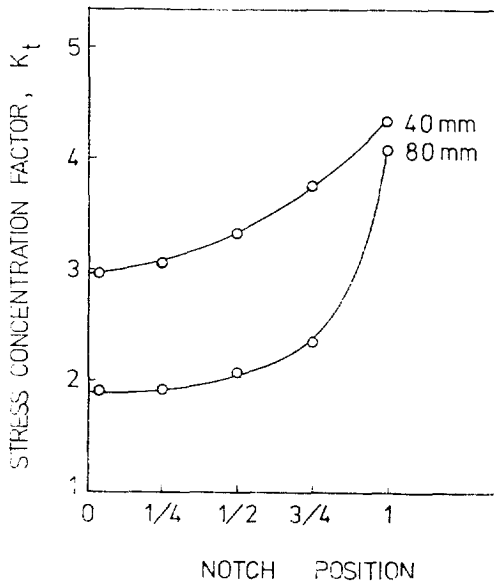


Figure 7. Stress concentration factor of copper plate embedded, K_t , vs. notch position under tension.

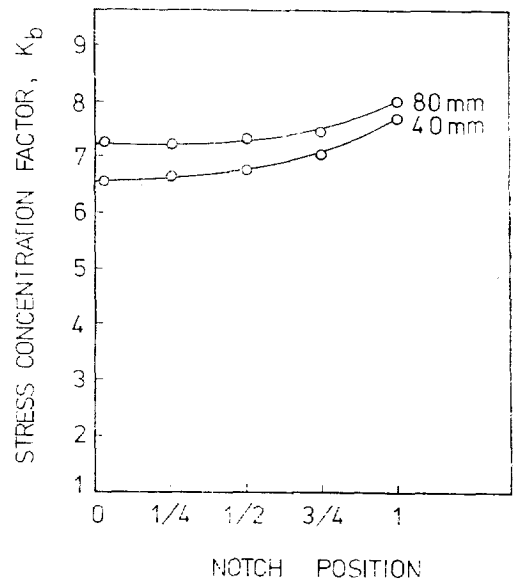


Figure 8. Stress concentration factor of copper plate embedded, K_b , vs. notch position under bending.

는 3/4 위치까지는 1.9~2.3 정도로 별 차이가 없지만 末端部分인 1에서는 급격히 증가하여 2배 정도인 4.1을 나타내고 있다. 反面, 40mm 일때는 1/4 위치까지는 3.0 정도로 일정하다가 1/2부터 증가하여 末端部分인 1에서 4.3으로 증가하고 있다. 이것은 copper plate 길이가 다른데서 起因한 현상으로 길이가 길어지면 界面에서 받는 應力이 copper plate 末端에서 더 급격히 증가하며 臨界길이 내에서는 완만하게 증가하게 된다. 80mm의 copper plate에서 notch 위치에 따른 fringe pattern은 photo. 2-(a)에 잘 나타나 있다. 0~3/4 위치까지는 무늬次數가 거의 변하지 않으나 ($n=2.3 \sim 2.7$), 末端인 1에서는 급격히 증가하고 있다($n=5.0$).

굽힘荷重의 경우에는, 80mm의 copper plate에서의 應力集中係數는 7.3 정도였다가 末端部에서 8.1로 약간 증가추세를 보이고 있고, 40mm에서도 3/4 위치까지 6.6~7.0으로 서서히 증가하다가 末端部인 1에서 7.8로 약간 증가하지만 引張荷重에서처럼 좋은 效果를 얻을 수 없었다. 이것은 充填材가 模型試片 中心軸 上에 含침되어 증립점보다 편 곳에 위치했다는 점과, 굽힘

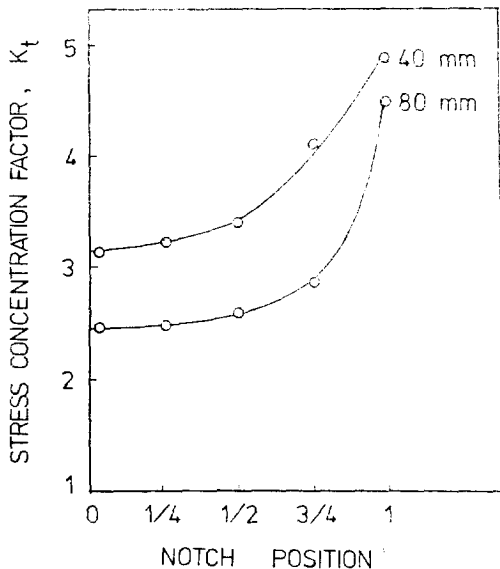


Figure 9. Stress concentration factor of metal fiber embedded, K_t , vs. notch position under tension.

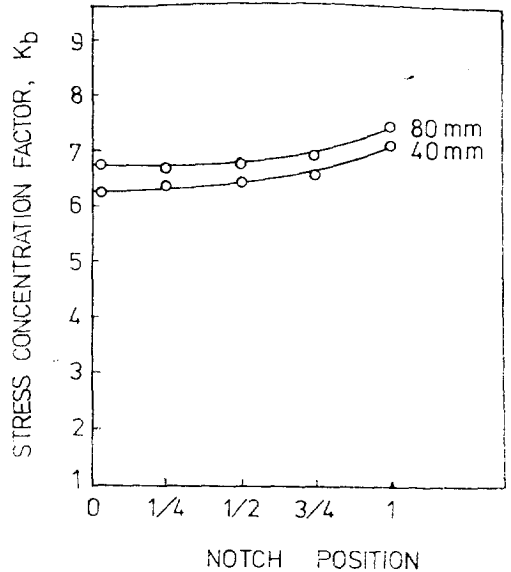


Figure 10. Stress concentration factor of metal fiber embedded, K_b , vs. notch position under bending.

荷重時 純粹荷重 이외에 引張, 전단력을 複合적으로 받기 때문인 것으로 推定된다. 굽힘荷重에서의 fringe pattern은 photo 2. -(b)에 나타나 있다. 이 fringe pattern에서 充填材 中心보다 末端에서 무늬次數가 減少하는 것은, 支持點 거리가 감소되기 때문이다.

板狀인 copper plate 대신에 纖維狀인 metal fiber를 充填材로 사용했을 때의 集中되는 應力の 변화는 Fig. 9와 Fig. 10에 나타나 있다. 이것도 充填材로 copper plate를 사용했을 때와 마찬가지로 引張荷重時에는 纖維 中心部에서는 일정하다가 末端에서 급격히 增加하지만, 굽힘荷重時에는 그 效果가 적다.

5. 結 論

Notch를 갖는 Epoxy板에 板狀과 纖維狀 充填材가 含침될 때의 應力集中係數의 변화에 대한 結論을 要約하면 다음과 같다.

1) 引張荷重時, 充填材는 그 길이가 길고, notch部位에 가깝게 存在할수록 應力集中係數는

현저하게 감소한다.

2) 굽힘荷重時, 充填材가 중립점 이내에 存在하면 應力集中係數는 거의 직선적으로 감소하지만, 중립점 또는 그보다 멀리 存在하면 그 効果는 기대할 수 없다.

3) 板狀 充填材와 纖維狀 充填材의 거동은 비슷하지만 그 자체의 體積分率에 따라 應力集中係數는 差異가 있다.

4) Notch 位置에 따라 應力集中係數는 充填材 末端에서 급격히 증가하여 최대가 되고, 中心部에서는 일정한 값을 갖는다.

이상에서 본 바와 같이, sandwich 나 laminate 구조를 갖는 複合材料의 補强材는 中心部보다는 表面에 가깝게, 또 깊게 挿入될수록 crack 에 集中되는 應力이 현저하게 완화될 것으로 기대되고, 纖維狀이나 板狀 補强材의 aspect ratio 를 크게하여 末端에서 集中되는 應力을 감소시켜 줄 필요가 있다고 본다.

引用 文 獻

1. G. S. Holister, "Fiber Reinforced Materials" Elsevier (1966)
2. 高柳素夫, 梶山千里, "複合材料" 日本化學會 (1975)
3. J. A. Manson and L. H. Sperling, "Polymer Blends and Composites" Plenum press (1976)
4. W. T. Kim, S. T. Noh and W. S. Hong, *Polymer (Korea)*, **23**, 110, (1980)
5. D. Post, *Experimental Mechanics*, **36**, 176, (1979)
6. R. E. Peterson, "Stress Concentration Factor", Wiley, p. 20, (1973)
7. W. E. Thibodeau and L. A. Wood, *Natl. Bureau of standard J. of Reserch*, **20**, (3), 1083, (1938)
8. S. Mirza and K. Ansari, *Experimental Mechanics*, **31**, 412, (1974)
9. 河田, 橋本, 本堂, 東京大學宇宙航空研究所報告, **4**, 435, (1968)
10. R. E. Rewlands, I. M. Danial and J. B. whiteside, *Experimental Mechanics*, **30**, 31 (1973)
11. I. M. Daniel, R. E. Rowlands and J. B. whiteside, *Experimental Mechanics*, **31**, 1 (1974)
12. Y. T. Yeow, D. H. Morris and H. F. Brinson, *Experimental Mechanics*, **36**, 1 (1979)
13. 辻三郎, 河田, "光彈性實驗法", 日刊工業新聞社, p. 9 (1965)
14. S. P. Timoschenko and J. N. Goodier, "Theory of Elasticity" McGraw-Hill Kogakusa, p. 39 (1970)
15. P. E. van Riesen and R. M. E. J. Spiering, *Experimental Mechanics*, **32**, 111, (1975)