

<論 文>

2相接合材의 接合境界面 局所領域에서의 3次元 變形率分布

朴 貞 道* · 島田平八** · 崔 善 浩***

(1988年 6月 4日 接受)

3-Dimensional Strain Distribution in a Local Area of Jointed Boundary of Composite Materials

Jung Do Park, Heihachi Shimada and Sun Ho Choi

Key Words : 3-Dimension(3次元), Strain(變形率), Local Area(局所領域), Jointed Boundary(接合境界面), Embedded Dyed Grids(埋込染色格子), Composite Material(複合材料), Softer Phase(軟材), Harder Phase(硬材)

Abstract

The most 3-Dimensional problems of composite materials, especially three-dimensional stress or strain distribution on jointed boundary in composite materials remains unsolved due to the limitations of analytic techniques. The purpose of this paper is to apply the Embedded Grid Method to model development to measure the three-dimensional strain distribution along the jointed boundary of composite materials which consist of two different materials. It was confirmed that the Embedded Grid Method was very useful in model development and measuring the three-dimensional strain distribution in a local region near the jointed boundary.

1. 序 論

최근 省에너지 省資源의 요청에 따라 材料의 사용조건이 複雜多樣化되어지고 있다. 예를 들면 強度, 剛性, 輕量性 등이 그것이다. 그러나 이러한 요구들은 單一材料로서는 전부 만족시킬 수 없기 때문에 個個의 요구에 적합한 材料를 複合시켜 單獨材로서는 발휘할 수 없는 각종 성질을 향상시킨 複合材를 開發하게 되었다. 이러한 複合材를 광범위한 分野에 걸쳐 有效하고 安全하게 사용하기 위해서는 그의 機械的 性質을 보다 精度높이 評價해야만 한다.

그런데, 複合材는 力學的 舉動이 서로 다른 것이

境界를 하고 있으므로 그의 接合境界에 따라 應力이나 變形率分布가 대단히 複雜하며 또한 그 變形舉動이 3次元的 舉動을 하고 있으므로 그에 대한 精確한 평가는 매우 어렵다.

複合材의 境界에서의 應力이나 變形率에 대한 理論的 研究는 Sundra 등⁽¹⁾의 結果가 있으나 이들의 理論解는 모두 2次元的인 것으로 판두계에 의한 영향, 즉 3次元的 影響은 알 수 없었다. 또한 實驗的 研究는 Mylonas⁽²⁾와 Shimizu 등⁽³⁾의 여러 結果가 있으나⁽⁴⁻⁶⁾, 이들 역시 판두계의 影響을 고려치 않고 境界面에 대해서 考察하였다.

複合材의 境界面에 대한 3次元的이고도 局所的인 變形을 實驗的으로 관찰하기 위해서는 다음의 條件이 具備되어야 할 것으로 생각한다.

- (1) 全視野的인 變形測定이 可能할 것
- (2) 게이지길이(gage length)가 짧을 것(수10 μ m)
- (3) 實時間的인 測定이 可能할 것

*正會員, 慶南專門大學 機械設計學科

**日本 東北大學 工學部

***正會員, 嶺南大學校 工科大學 機械設計學科

(4) 특히, 3次元的인 測定이 可能할 것

그런데, 위의 條件들은 從來의 實驗的 方法으로는 모두 만족시킬 수 없다. 한편, Fujimoto 등^(7,8)은 스트레인 게이지(strain gage) 등을 에폭시 레진(epoxy resin) 속에 埋込시켜 物體內部的 變形을 測定한 바가 있으나, 이는 測定用 媒體와 母材가 서로 다른 異物質이므로 순수한 母材自體의 內部變形을 측정할 수가 없었다.

그러나 최근, Shimada 등⁽⁹⁾은 피치(pitch)가 작은 格子를 母材樹脂表面에 形成, 이를 母材內部에 埋込시켜 그 격자의 변형을 직접 擴大觀察하여 3次元的이고 또한 局所領域에서의 變形解析이 可能한 Embedded Grid Method(格子의 製作性格上 이하 染色格子法으로 칭하기로 함)를 開發하였다. 이 染色格子法은 모재에 脫染色部를 만든 후 同一樹脂를 이용하여 격자를 母材內部에 埋込시켜 單一體(모재)의 내부에 있는 피치가 작은 격자를 관찰하여 물체의 內部變形을 解析하는 방법으로, 進술과 같은 測定媒體와 母材가 서로 다른데서 수반되는 諸問題가 전혀없이 위의 條件들을 모두 滿足시켜 주게 되었다.

본 論文은 이 染色格子法을 이용하여 가장 기본적인 複合材인 彈性係數가 서로 다른 두 물체로 구성된 2相接合材를 製作할 수 있는가를 檢討하였고, 또한 제작완성된 接合材를 이용하여 接合境界面 附近의 局所領域에서의 3次元的인 變形舉動을 觀察한 것이다.

2. 實 驗

2.1 試片製作

본 實驗에 製作使用된 試驗片의 形狀 및 크기는 Fig. 1에 나타내었다. 試片은 Fig. 2(a)에 제시한 에폭시(epoxy) 材料를 사용하여 彈性係數가 서로 다른 두 彈性體를 버트(butt) 結合시킨 것으로, 彈性係數의 大小에 따라 두 부분을 각각 軟材(soft phase)와 硬材(harder phase)로 부르기로 하였다. 그리고 A, B 두 부분의 彈性係數는 Fig. 2(a)의 材料中 치오콜(chiocoal)의 含有量을 조절함으로써 任意로 바꿀 수가 있었다.

그리고 染色格子를 제작하는 데 사용된 染色液은 Fig. 2(b)에 제시되어 있다.

Fig. 3은 內部染色格子의 製作順序를 나타낸 것이다. Fig. 3의 過程中, 過程(2)의 染色過程에서 過

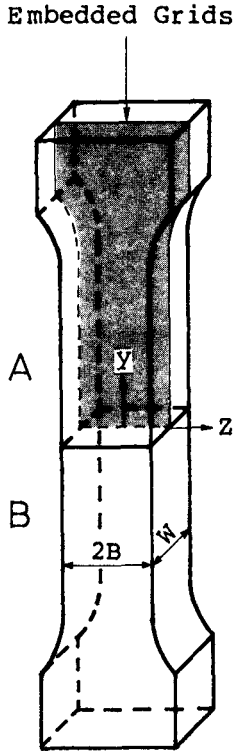
程(1)에서 얻은 에폭시판에 함유된 치오콜의 含有量이 10Wt%보다 적으면 에폭시판의 表面이 染色이 되지 않아 染色格子를 제작할 수가 없었다. 그래서, 우선 染色格子의 제작에 사용된 에폭시판에는 치오콜의 含有量을 10Wt% 以上으로 하기로 하였다. 그리고 에폭시판의 염색깊이는 약 10~20 μ m 정도이며 이 염색된 樹脂表面에 포토레지스트(photoresist) 感光液을 塗布시켜 紫外線을 이용하여 樹脂表面에 피치 50.8 μ m의 격자를 만든다. 그런 다음 試料全體를 濃硝酸에 담근다. 그러면 포토레지스트가 없는 곳의 染色面은 濃硝酸에 의해 脫色되고 포토레지스트가 있는 곳은 탈색되지 않아, 포토레지스트를 제거하면 染色部와 脫色部로 構成된 피치 50.8 μ m의 微小格子가 에폭시수지 表面에 形成된다. 이 染色格子를 가진 에폭시수지 위에 同一成分의 에폭시수지를 接合시키면 材料內部에 染色格子를 가진 試片이 完成된다.

이 에폭시樹脂 內部에 埋込된 染色格子는 종래의 解析法에서와 같이 母材와 다른 종류의 물체가 아닌 母材自體의 脫·染色部에 의하여 형성된 變形測定用媒體이므로 母材自體의 變形舉動을 觀察할 수 있다.

그런데 에폭시樹脂板 속에 들어있는 치오콜의 含有量이 45Wt% 以上인 경우는 위의 過程 (5)까지는 格子가 수지판의 表面에 形成되나, 過程 (6)에 이르러 母材樹脂板 위에 形成되었던 格子가 鑄物接合 후에는 각 격자사이의 境界가 不確實하게 되어 變形測定用으로서의 不適當하다는 것을 알았다. 이는 에폭시수지 속의 치오콜의 含有量이 增加하면 彈性係數가 작아지며, 그에 따라 過程 (5)에서 형성된 格子의 染色層에 있던 染色液의 일부가 (6)過程에서 그 위에 새로 주입된 樹脂面으로 移動하여 染色格子의 境界가 분명치 않게 되는 것으로 생각된다. 그래서 現 段階에서는 內部染色格子를 가진 에폭시판은 치오콜의 含有量을 10Wt%~40Wt%로 하기로 하였다.

그래서 본 實驗에서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 內部染色格子를 가진 A部分의 치오콜의 含有量을 10Wt%~40Wt%로 하고, 상대부분인 B部分의 수지판에 含有되는 치오콜의 量을 變化시킴으로써 A部分이 B部分보다 相對的으로 軟材나 硬材가 되게 하여 複合材의 軟材나 硬材의 變形舉動을 觀察 하기로 하였다.

그리고 同一試片에 대한 表面에서의 接合境界面



	Young's modurie (MPa)	E_a/E_b	Poisson's ratio	Thickness and width (mm)	
T1	$E_a=807.52$ $E_b=2595.04$	0.311	$\nu_a=0.41$ $\nu_b=0.364$	$2B=15.1$ $W=10.2$	SOFTER PHASE
T2	$E_a=807.52$ $E_b=2595.04$	0.311	$\nu_a=0.41$ $\nu_b=0.364$	$2B=10.24$ $W=10.2$	
T3	$E_a=807.52$ $E_b=2595.04$	0.311	$\nu_a=0.41$ $\nu_b=0.364$	$2B=5.68$ $W=10.15$	
T4	$E_a=807.52$ $E_b=1702.0$	0.474	$\nu_a=0.413$ $\nu_b=0.393$	$2B=15.08$ $W=10.01$	
T5	$E_a=807.52$ $E_b=1702.0$	0.474	$\nu_a=0.413$ $\nu_b=0.39$	$2B=5.92$ $W=9.95$	
T6	$E_a=807.52$ $E_b=1205.1$	0.67	$\nu_a=0.413$ $\nu_b=0.402$	$2B=15.2$ $W=8.11$	
T7	$E_a=807.52$ $E_b=534.1$	1.512	$\nu_a=0.41$ $\nu_b=0.39$	$2B=8.4$ $W=10.01$	HARDER PHASE
T8	$E_a=1702.0$ $E_b=807.52$	2.107	$\nu_a=0.393$ $\nu_b=0.413$	$2B=15.4$ $W=9.92$	
T9	$E_a=807.52$ $E_b=335.16$	2.41	$\nu_a=0.41$ $\nu_b=0.432$	$2B=15.4$ $W=9.52$	
T10	$E_a=807.52$ $E_b=335.16$	2.41	$\nu_a=0.41$ $\nu_b=0.432$	$2B=10.02$ $W=9.81$	
T11	$E_a=807.52$ $E_b=335.16$	2.41	$\nu_a=0.41$ $\nu_b=0.432$	$2B=6.24$ $W=10.05$	

Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

Araldite(CY 230)	100Wt%
Chiocoal(LP3)	X Wt%
Hardner(951)	8 Wt%

(a) Epoxy poly sulfide copolymer

Soldont black 3	100Vol%
Trichloroethylene	50Vol%

(b) Dyeing solution

Fig. 2 Epoxy resin and dyeing solution

1		Preparation of Epoxy plate
2		Dyeing 1-3
3		Reproduction of Fine Grids with photoresist
4		Bleaching by Conc. Hno
5		Removing photoresist
6		Embedding (molding)

Fig. 3 Preparation and embedding of grids

부근의 變形은 表面에 포토레지스트格子를 形成시켜 測定하였다.

2.2 實驗裝置 및 實驗順序

본 實驗에서 사용된 試片은 內部에 微小 格子 間격을 가진 染色格子를 가지고 있다. 따라서 내부의 染色格子를 觀察하기 위해서는 試片의 表面을 鏡面으로 해야 하나, 시편의 表面을 다이아몬드연마를 하게 되면 研磨時에 표면이 熱應力을 받게 된다.

그래서 본 實驗에서는 試片全體를 시편과 同一 摺率을 가진 浸漬液 속에 넣어서 內部格子를 擴大 觀察하였다.

Fig. 4는 본 실험에 사용된 實驗裝置의 模式圖를 나타낸 것이다. 光源 (1)로 조명된 試片內部的 格子의 空間像을 릴레이렌즈 (4)로 光學顯微鏡 (5)의 前面에 結像하여 그 상을 擴大攝影하는 방식이다. 그리고, 시편의 表面附近에서 시편의 모서리로 인하여 格子寫眞에 亂反射現狀이 일어나므로 透過光源과 試片사이에 핀홀을 넣어 改善하였다.

實驗順序는 試片을 시험기에 裝置시킨 후, 먼저 接合境界面 부근의 染色格子와 境界面에서 충분히

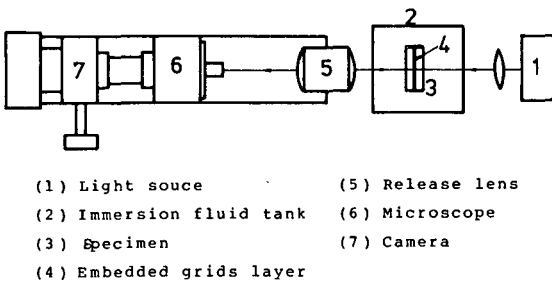


Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up

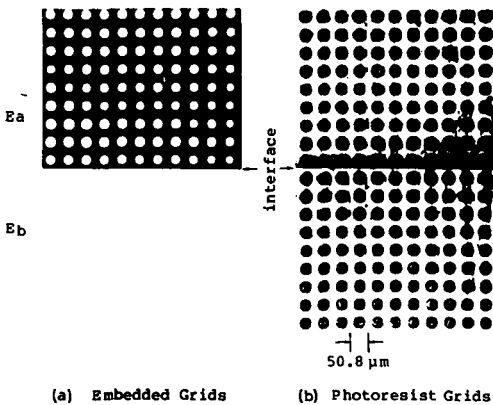


Fig. 5 Microphotograph of grids

떨어진 곳(약 25mm)에서의 格子를 撮影한다. 그리고 소정의 荷重을 가한 뒤 同一場所의 變形後의 格子를 撮影하여 變形前後의 格子가 담긴 네가필름(nega-film)을 이용하여 變形率을 測定하였다.

Fig. 5는 接合境界面 附近에서의 內部染色格子와 表面의 포토레지스트格子를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 內部와 表面 두 곳에서의 격자들은 모두 그 間격이 50.8μm로서 이를 利用하여 變形率을 측정하면 測定精度를 10⁻³오더(order)까지 높일 수 있음은 물론 3次元의인 觀察도 可能함을 알 수 있다.

2.3 接着面の 強度檢討

본 實驗을 통하여 구성, 使用된 試片은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 染色格子가 있는 母材들 사이의 接合面과 또한 相對材와의 接合面 등 2個의 接合面을 가지고 있다. 따라서 接合境界面에서의 接着強度에 대한 檢討가 필요하다. 그래서 Fig. 6에서와 같이 A, B 두 部分 모두 同一한 成分을 가진 시편에서 A部分에만 染色格子를 形成, 埋込시키고 表面에 포토레지스트格子를 입혀서 接合面에서의 強度의 이상여부를 檢討하였다.

Fig. 6은 그 結果를 나타낸 것이다. 동 그림에서 보는 바와 같이 染色層에서의 變形率 ϵ_y, ϵ_z 는 인접한 非染色層 및 染色層과 충분히 떨어진 곳(약 25mm)에서의 變形率과 一致하고 있어, 染色層의 存在와 관계없이 모든 곳에서의 變形率이 같음을 알 수 있다.

또한, A材와 B材의 接合面에서의 接着強度를 알아보기 위하여 試片이 破斷될 때까지 荷重을 가

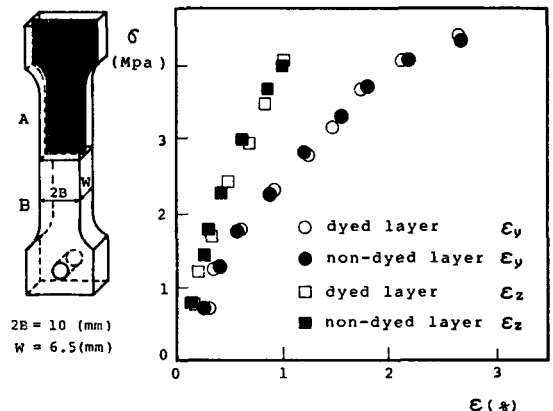


Fig. 6 Strain uniformity on jointed boundary

했으나 시편은 接合面에서 破斷되지 않고 荷重의 핀(pin) 部에서 破斷되었다. 따라서, 接合境界面에서의 強度도 아무 이상이 없음을 알았다.

그런데, 内部接合面に 있어서 A材에 B材를 接合시킬 때 B材의 응고시 수반되는 收縮에 의하여 A材의 接合境界面 부근의 格子의 피치가 작아지는 것을 알았다.

Fig. 7(a)는 B材의 收縮에 의한 接合境界面 近傍의 染色格子의 變形狀態를 나타낸 것이다. 동 Fig. 7로부터 B材의 응고수축에 의해 A材의 境界面 附近의 格子는 z方向으로는 그 피치가 거의 변화가 없으나, 길이방향 즉 y方向으로는 상당히 그 피치가 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 앞의 變形

된 格子를 基準格子間隔으로 하여, 一定荷重을 가한 뒤의 境界面 附近의 變形率을 나타낸 것이다. Fig. 7(b)의 ϵ_{∞} 는 境界面の 影響을 받지 않는 것으로 간주되는 $y=25\text{mm}$ 에서의 變形率이다.

Fig. 7로부터 境界面 附近의 變形率 ϵ_y 는 ϵ_{∞} 와 같은 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 이는 A材의 境界面 附近은 B材의 凝固收縮에 의해 收縮하지만 機械的性質에는 아무런 이상이 없음을 말해준다. 따라서 본 實驗에서는 收縮後의 格子間隔을 基準 格子間隔으로 하여 變形後의 格子間隔을 測定, 變形率을 算出하여 收縮에 의한 影響을 배제하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 軟材側의 變形特性

Fig. 8(a)는 試驗片 T1에서의 内部中心과 表面에서의 接合境界面 附近의 하중방향에 따른 變形率 曲線을 나타낸 것이며, Fig. 8(b)는 그 變形率 曲線에서 얻은 시편의 두께방향에 따른 $\epsilon_y/\epsilon_{\infty}$ 의 等變形率 分布 曲線을 나타낸 것이다.

Fig. 8(b)에서 ϵ_{∞} 는 境界面の 影響을 받지 않는 것으로 생각되는 境界面으로부터 $y=25\text{mm}$ 떨어진 곳에서의 變形率이다.

Fig. 8(a)에서 變形率 ϵ_y 는 接合境界面에서 충분히 떨어진 곳에서는 表面, 内部中心 모두 陽(+)
의 값을 나타내고 있으나, 接合面に 가까와짐에 따라 점차 減少하여 境界面附近에서는 급격히 작아져서 境界面附近의 局所領域에서는 負(-)의 값이 된다는 것을 알 수 있다. 그리고 境界面附近에서의 變형률의 激減現象은 表面보다는 内部中心이 더 작다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 軟材의 接合境界面 附近에서의 $\epsilon_y/\epsilon_{\infty}$ 의 激減現象은 상대재인 硬材에 의해 그 變形이 拘束되었기 때문으로 생각된다.

또한 Fig. 8에서 보면 境界面附近에서 變形率은 減少一邊度로 進行되는 것이 아니라, 接合境界面附近의 局所領域에서 變形率이 負(-)에서 陽(+)
으로 되며 그 領域은 接合境界面으로부터 $y=150\sim 200\mu\text{m}$ 떨어진 곳이라는 것을 알 수 있다.

그런데, 變形率의 變化率이 局所領域에서 負(-)에서 陽(+)
으로 변하지만 接合面に 이르러도 0이 되지 않고 負(-)인 것을 알 수 있으며, 이는 硬材側의 變形率이 負(-)가 되지 않을 경우에는 接合

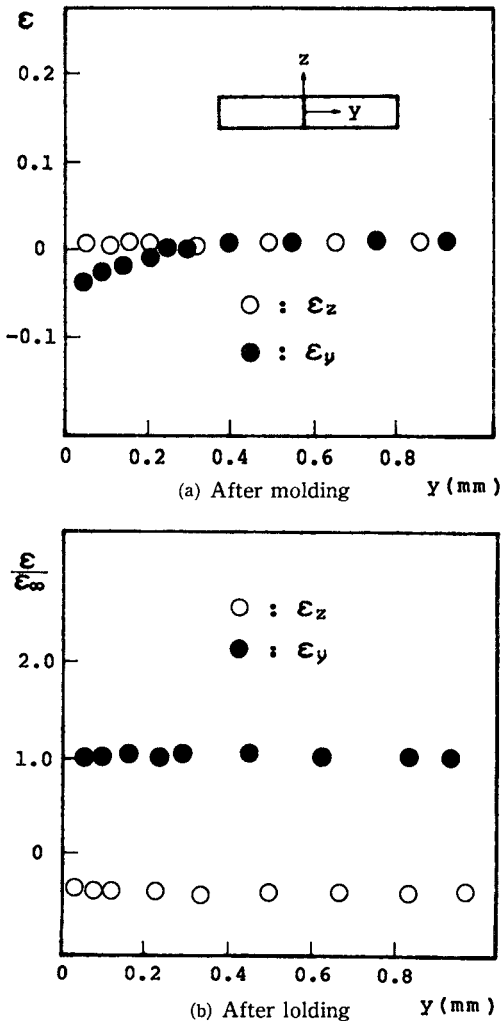


Fig. 7 Influence by shrinkage of phase B

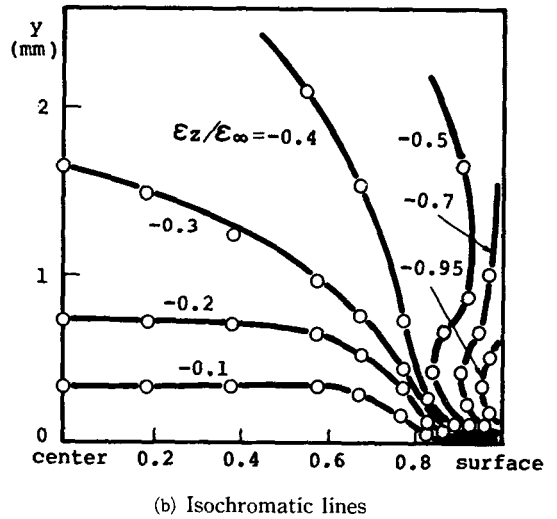
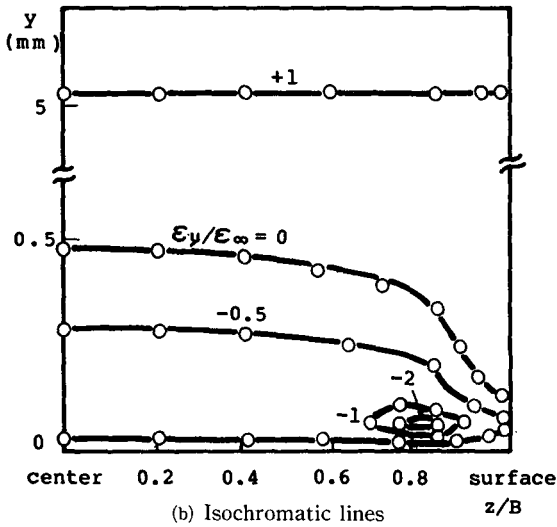
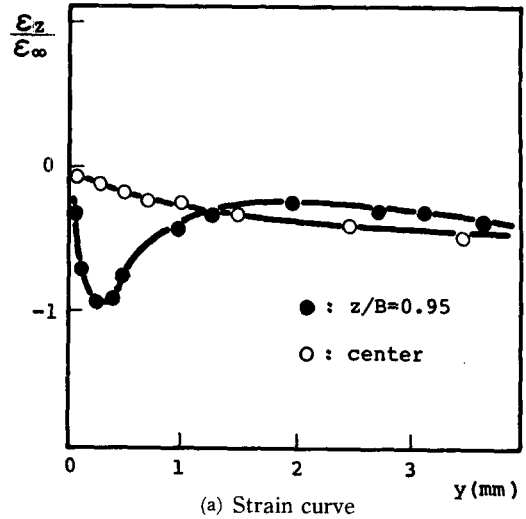
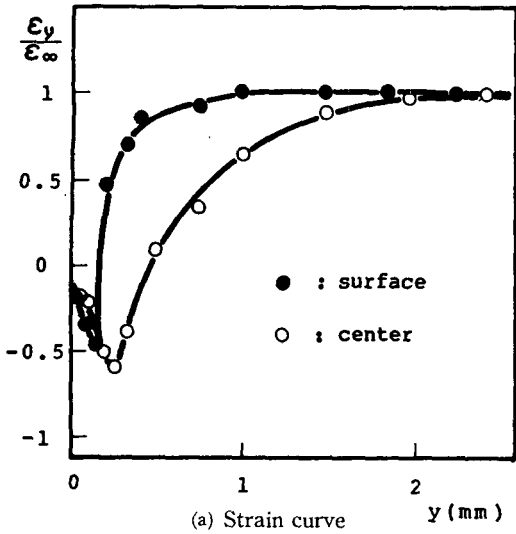


Fig. 8 Strain distribution($\epsilon_y/\epsilon_\infty$) for softer phase (specimen T1)

Fig. 9 Strain distribution($\epsilon_z/\epsilon_\infty$) for softer phase(specimen T1)

境界面에서 變形率이 서로 일치하지 않는 것을 의미하나 이는 후술의 硬材에서의 傾向과 같이 考察해 보기로 한다.

이와 같이 접합재의 軟材에 있어서 變形率은 接合境界面 付近에서 激變하며, 또한 境界면부근의 局所領域에서 그 변화율이 激變하고 있으나, 이에 대한 從來의 實驗解析은 게이지 길이의 문제 등으로 局所領域에서의 變形率測定은 물론 그에 따른 測定精度도 10^{-3} 오더까지 높일 수가 없었다. 그러나, 본 實驗結果에서 보면 接合材의 接合境界면의 變形舉動은 接合境界면 부근의 局所領域 範圍內에

서 測定해야 할 것으로 생각된다. 그래서 본 實驗은 接合面附近의 局所領域 範圍에서의 變形率分布에 주목하여 研究를 하기로 하였다.

한편, Fig. 8(b)의 ϵ_y 의 等變形率 分布曲線으로부터 $\epsilon_y/\epsilon_\infty$ 의 시편 두께방향에 따른 分布傾向을 보면 $\epsilon_y/\epsilon_\infty$ 는 시편 内部中心에서 表面쪽으로 $z/B \approx 0.75$ 까지는 거의 一定한 傾向을 나타내고 있어 큰 변화는 보이지 않으나, $z/B \approx 0.75$ 付近에서부터 그 變化가 심하게 되어 $z/B \approx 0.85$ 付近에서 接合境界面에서 $y=100 \sim 150 \mu\text{m}$ 떨어진 곳에서 最小值가 된다는 것을 알 수 있다.

다시 말하면, 引張을 받는 複合接合材軟材部에서의 變形率은 상대재인 硬材의 變形拘束으로 인하여 接合境界面 부근에서 그 變形率이 激減하며 그 最小値는 材料表面에서 $z/B \approx 0.15$ 内部, 그리고 接合境界面으로부터 $y = 100 \sim 150 \mu\text{m}$ 인 곳에서 생긴다고 할 수 있다.

Fig. 9(a)는 試驗片 T1에 대한 内部中心과 表面附近($z/B = 0.95$)에서 측정된 境界面 附近의 $\epsilon_z/\epsilon_\infty$ 의 分布를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 9(b)는 그 變形率曲線에서 얻은 시편 두께방향에 따른 $\epsilon_z/\epsilon_\infty$ 의 等變形率 分布曲線을 나타낸 것이다.

Fig. 9로부터 $\epsilon_z/\epsilon_\infty$ 는 内部中心에서는 y 방향으로 接合境界面 附近에서 큰 변화가 없으나, 試片의 表面으로 감에 따라 점점 그 변화가 심하게 변화하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고, $\epsilon_z/\epsilon_\infty$ 가 激變하는 範圍는 境界面으로부터 $y \approx 250 \mu\text{m}$ 인 것을 알 수 있다.

3.2 硬材側의 變形特性

Fig. 10(a)는 内部染色格子가 A축에 매입된, $E_a/E_b = 2.41$ 인 試驗片 T9에서 試片 内部 中心과 表面에서의 y 방향에 따른 變形率 分布를 나타낸 것이며, Fig. 10(b)는 그 變形率 曲線으로부터 얻은 시편 두께방향에 따른 等變形率 分布曲線을 나타낸 것이다.

Fig. 8(b)로부터 接合材의 硬材側의 變形率 $\epsilon_y/\epsilon_\infty$ 는 前述의 軟材側의 경우와는 반대로, 接合境界面에서 충분히 떨어진 곳에서는 一定한 값($\epsilon_y/\epsilon_\infty = 1$)을 나타내고 있지만, 境界面에 접근함에 따라 점점 그 값이 커지다가 境界面 附近에서 急增하여, 境界面에서 $y \approx 200 \mu\text{m}$ 인 곳에서 최대가 되었다가 그 후 부터는 境界面에 이르기까지 激減하는 것을 알 수 있다.

이와 같은 接合境界面 附近에서 硬材側의 變形率이 급증하는 것은 상대재인 軟材의 影響으로 그 變形이 촉진되었기 때문으로 생각된다.

그리고 전술의 軟材에서와 같이 接合境界面 附近에서 變形率의 增加率은 陽(+)에서 負(-)로 급변하지만 變形率은 接合境界面에서 陽(+)의 값이 되어 前술의 軟材側에서와 같은 傾向을 띠고 있으나, 試片 T1과 T9의 彈性係數比 E_a/E_b 가 다른 同一試片이 아니기 때문에 단언할 수 없으므로, 同一成分으로 構成된 試片 T4와 T8을 이용하여 後술에 不連續 關係를 고찰하기로 한다.

한편, 變形率 $\epsilon_y/\epsilon_\infty$ 의 재료 두께방향에 따른 變化를 보면 内部中心에서 表面에 이르기까지 $z/B = 0.7$ 까지는 큰 變化가 없으나, 그 이후 부터는 그 變化가 심하게 되어 $z/B = 0.85$ 부근에서 接合境界面으로부터 $y \approx 200 \mu\text{m}$ 떨어진 곳에서 最大가 되었다가, 그 후 부터 表面에 이르기까지는 그 값이 多少 떨어진다 하는 것을 알 수 있다.

다시 말하면, 接合材의 硬材側의 變形率은 軟材와는 반대傾向으로, 境界面 附近에서 急增하여 그 최대값은 表面으로부터 $z/B \approx 0.15$ 内部에서 境界面으로부터 $y \approx 200 \mu\text{m}$ 떨어진 곳에서 생긴다고 할 수 있다.

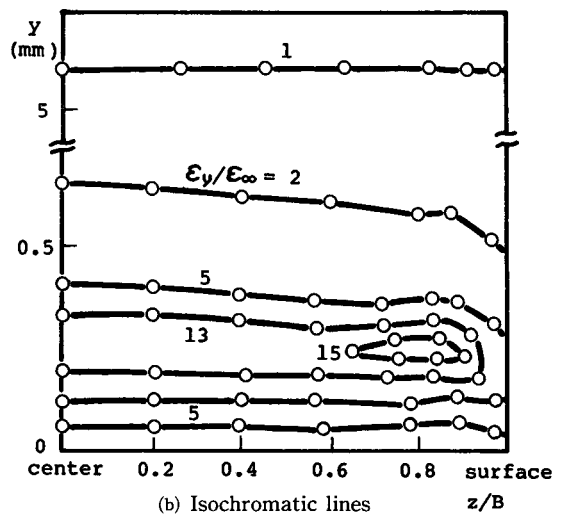
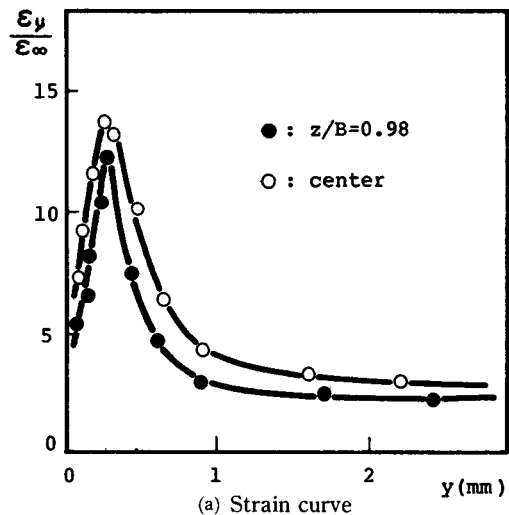
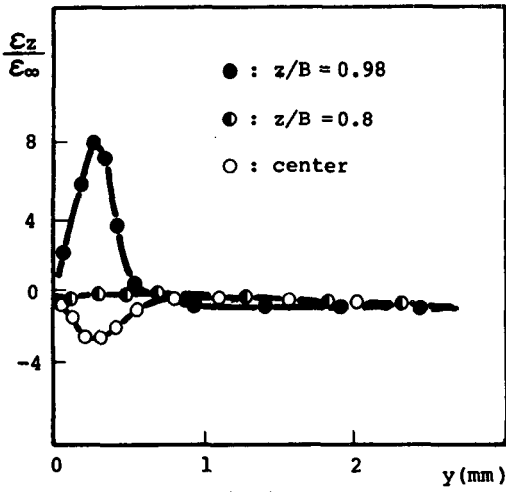
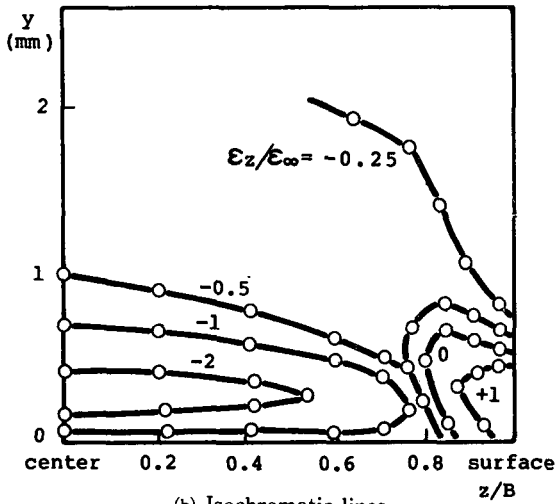


Fig. 10 Strain distribution($\epsilon_y/\epsilon_\infty$) for harder phase(specimen T9)



(a) Strain curve



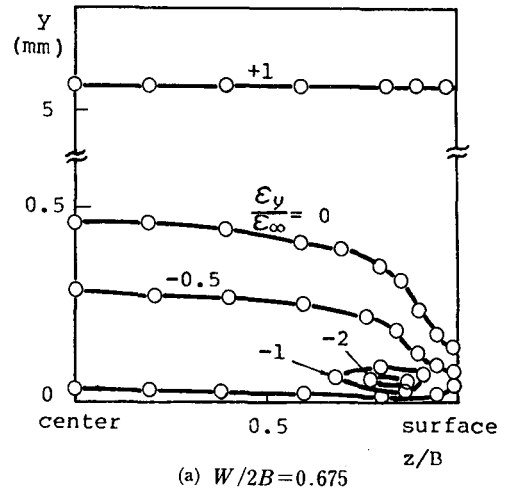
(b) Isochromatic lines

Fig. 11 Strain distribution($\epsilon_z/\epsilon_\infty$) for harder phase(specimen T9)

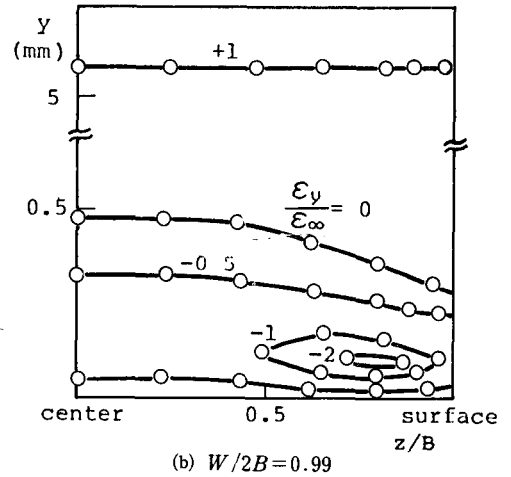
Fig. 11은 試片 T9에 대한 $\epsilon_z/\epsilon_\infty$ 의 變形率分布를 나타낸 것이다. Fig. 11에서 硬材에서의 變形率 $\epsilon_z/\epsilon_\infty$ 는 軟材와 달리, 試片의 內部中心 付近에서도 급격한 變化를 하여 負(-)의 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 이 變化는 中心에서 表面으로 감에 따라 점점 작게 되었다가 $z/B = 0.75$ 付近부터는 陽(+)의 값이 되며, 그 후부터는 表面에 이르기까지 점점 더 크게 된다는 것을 알 수 있다.

3.3 試片두께나 彈性係數比의 影響

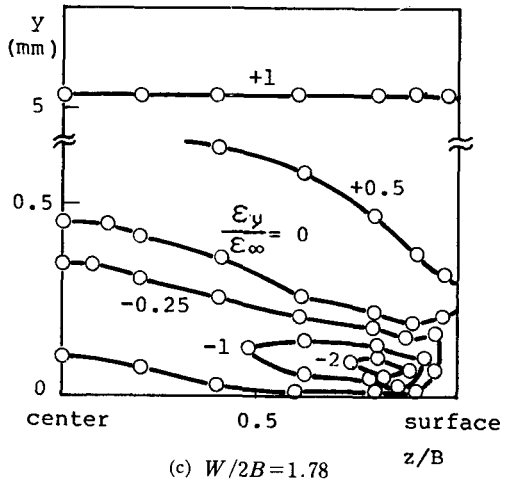
Fig. 12는 試片의 두께의 變化에 따른 變形率의



(a) $W/2B = 0.675$



(b) $W/2B = 0.99$



(c) $W/2B = 1.78$

Fig. 12 Strain distribution for softer phase according to various thickness

分布傾向을 알아보기 위하여 彈性係數의 比는 $E_a/E_b=0.311$ 로 같으나 $W/2B$ 가 서로 다른 試片 T1, T2 및 T3에 대한 等變形率分布를 나타낸 것이다.

Fig. 12로부터 試片 T1, T2 그리고 T3 모두 接合境界面 附近의 ϵ_{ymin} 의 위치가 表面으로부터 $z/B \approx 0.15$ 内部, 그리고 境界面으로부터 一定한 거리($E_a/E_b=0.311$ 인 경우는 $y \approx 150\mu m$)에서 생긴다는 것으로 보아, 軟材에서의 ϵ_{ymin} 의 發生位置가 試片의 두께에 관계없이 一定함을 알 수 있다. 그리고, 그림에는 제시되어 있지 않으나, 硬材인 試片 T9, T10 및 T11에서 도 試片 두께에 관계없이 表面에서 $z/B \approx 0.15$ 内部에 ϵ_{ymax} 이 發生, 軟材와 같은 傾向을 나타내고 있었다.

Fig. 13은 各 試片의 變形曲線으로부터 試片 두께에 따른 ϵ_{ymin} , ϵ_{ymax} 의 發生位置를 材料表面으로부터 的 거리로 나타낸 것이다. Fig. 13으로부터, 同一한 彈性係數의 比를 가진 接合材의 軟材나 硬材에 生기는 變形率 ϵ_{ymin} , ϵ_{ymax} 의 位置는 材料의 두께에 관계없이 表面으로부터 $z/B \approx 0.15$ 内部이 라는 것을 알 수 있다.

그런데, 變形率 ϵ_{ymin} , ϵ_{ymax} 의 境界面으로부터의 位置가 彈性係數比 E_a/E_b 의 값에 따라 변하는 것을 알았다. Fig. 14는 彈性係數比 E_a/E_b 의 변화에 따른 ϵ_{ymin} , ϵ_{ymax} 의 境界面으로부터의 位置를 나타낸 것이다. Fig. 14의 $E_a/E_b=1$ 의 경우는 전술의 接着面의 强度檢討時에 사용된 試片에서 얻은 결과이다.

Fig. 14에서, 複合接合材의 軟材에 生기는 ϵ_{ymin} 의 위치는 彈性係數의 比가 $0.5 < E_a/E_b < 1$ 에서는 그 比가 작아질수록 境界面으로부터 멀어지나, $E_a/E_b < 0.5$ 부터는 그 比가 작아져도 一定한 것 ($y \approx 150\mu m$)을 알 수 있다. 한편, 硬材에서의 ϵ_{ymax} 의 位置는, $1 < E_a/E_b < 2$ 부터는 거의 一定한 것 ($y \approx 250\mu m$)을 알 수 있다.

또한 同一試片인 試片 T4와 T8의 결과에서 보면, 試片 T4의 경우는 ϵ_{ymin} 이 境界面으로부터 $y \approx 200\mu m$ 에서 生기는 것으로 보아 硬材側이 軟材側보다 더 멀다는 것을 알 수 있다.

3.4 境界面에서의 變形率의 不連續性

전술에서 軟材나 硬材 모두 變形率이 接合境界面에서 一致하지 않는 것으로 생각 되었으나 그들이 同一 試片에서의 結果가 아니므로, 同一 試片에서

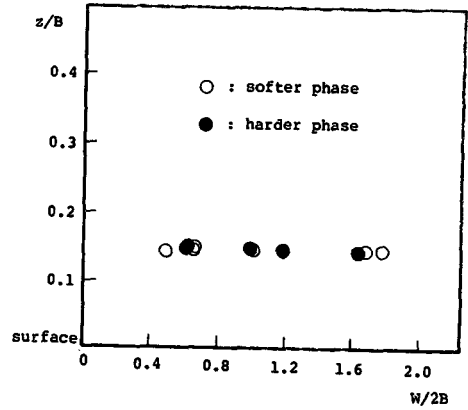


Fig. 13 distance of ϵ_{ymin} , ϵ_{ymax} from surface according to various thickness

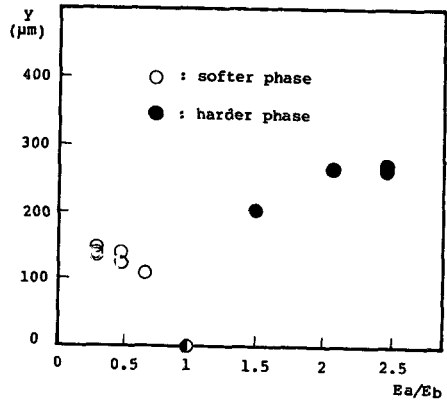


Fig. 14 distance of ϵ_{ymin} , ϵ_{ymax} from interface according to E_a/E_b

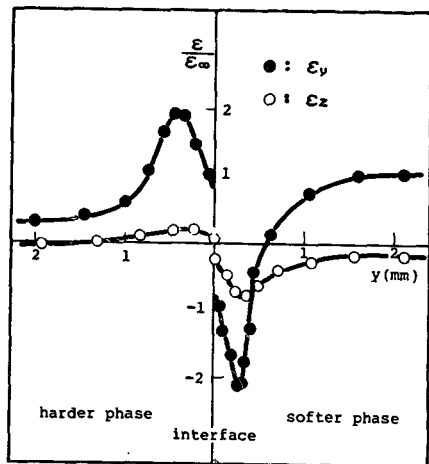


Fig. 15 Discontinuity of strain at the jointed boundary

의 不一致與否를 알아보기 위하여 試片 T4와 試片 T8의 결과를 이용, 考察해 보았다. Fig. 14는 試片 T4와 T8에 대하여 $z/B=0.85$ 에서의 境界面 附近의 變形率 ϵ_y , ϵ_z 를 나타낸 것이다.

Fig. 15로부터 變形率 ϵ_y , ϵ_z 모두 接合境界面에서 不連續인 것으로 보인다. 그러나, 본 實驗에서 사용한 變形測定用 格子의 피치가 $50.8\mu\text{m}$ 이므로 接合境界面으로부터 약 $30\sim 40\mu\text{m}$ 거리까지의 變形舉動은 파악할 수가 없었다. 이는 앞으로 수 micro 단위의 格子를 形成시킬 수 있으면 不連續與否에 대한 精密한 결과를 검토할 수 있으리라 생각된다.

4. 結 論

複合材의 接合境界面 附近의 3次元的인 變形舉動을 觀察하기 위한 모델용 2相接合材 제작에 染色格子法의 이용가능성 여부를 검토하였으며, 製作完成된 모델 接合材를 이용하여 接合境界面의 3次元的인 變形舉動을 觀察하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 2個의 彈性係數가 서로 다른 材料로 구성된 複合材의 3次元的인 變形舉動 해석에 染色格子法을 이용하면 境界面의 局所領域에서의 3次元的인 變形舉動을 파악할 수 있으며 이를 발전응용하면 실지 복합재의 섬유와 모재 사이의 슬립이나 박리 등에 대한 3次元的인 舉動解析이 가능할 것으로 생각한다.

(2) 引張을 받는 複合材의 경우, 境界面 附近 局所領域에서 變形率은 급변하며 軟材側에는 壓縮의 變形率 ϵ_{ymin} 이 또 硬材側에는 引張의 ϵ_{ymax} 이 생긴다.

(3) 兩 부재에 생기는 變形率 ϵ_{ymin} , ϵ_{ymax} 의 위치는 材料두께에 관계없이 表面에서 $z/B \approx 0.15$ 内部에 생긴다.

(4) 兩 부재간의 彈性係數比가 변하면 ϵ_{ymin} , ϵ_{ymax} 의 위치도 변하지만, 軟材에서는 $E_a/E_b < 0.5$ 부터 그 비에 관계없이 ϵ_{ymin} 이 $y=150\mu\text{m}$ 부근에서 생기며, 硬材에서는 $E_a/E_b < 2$ 부터 ϵ_{ymax} 이 $y=250\mu\text{m}$ 附近에서 생긴다.

참 고 문 헌

- (1) K.T. Sundara Raja Lyenger, R.S. Alwar, 1963, "Stress Analysis of a Long Compound Bar", ZAMP, Vol. 14, pp. 344~352.
- (2) C. Mylonas, 1955, "Experiments on Composites Models with Applications to Cemented Joints", Proc. Exp. Stress Analysis, Vol. 12, pp. 129~142.
- (3) 清水, 島田, 1971, "接合材境界の實驗的研究", 日本機械學會論文集, 第37卷, 第293號, pp. 33~37.
- (4) K. Kawata, 1962, "Elasto-Plastic Analysis of Coarse Grain Metals by Means of Photoelastic Coating Method", Proc. 12th Japan Nat. Cong. Appl. Mech., pp. 59~62.
- (5) 清水, 1972, "円弧形境界を有する接合材境界の實驗的研究", 日本機械學會論文集, 第38卷, 第315號, pp. 2763~2770.
- (6) A.J. Durelli, I.M. Daniel, 1961, "A. Nondestructive Three-Dimensional Strain-Analysis Method", Trans. ASME. Ser. E, Vol. 83, pp. 83~86.
- (7) N. Fujimoto, 1976, "Study on Internal Strain Distribution Measurement with Embedded Foil Strain Gages", J. Japan NDI. Vol. 25-12, pp. 808~816.
- (8) V.J. Park, 1970-9, "Stress Distribution Around a Circular Bar, with Flat and Spherical Ends, Embedded in a Matrix in a Triaxial Stress Field", ASME. Ser. E, Vol. 37-3, pp. 578~584.
- (9) H. Shimada, M. Obata, 1979, "Measurement the Three-Dimensional Deformation by Embedded Find Dyeing Grating", J. Japan NDI. Vol. 28-8, pp. 478~484.