

<論 文>

貫通노치를 가진 二相接合材의 龜裂發生에 대한 研究

朴 貞 道* · 島田平八** · 崔 善 浩***

(1989년 1월 18일 접수)

A Study on Crack Initiation of 2-Phase Composite with Through Notch

Jung Do Park, Heihachi Shimada and Sun Ho Choi

Key Words : Through Notch(貫通노치), 2-Phase Composite(二相接合材), Embedded Grid(埋込格子), Local Area(局所領域); Plane Strain(平面變形率), Plane Stress(平面應力), Singularity(特異性)

Abstract

In this paper, 3-dimensional fracture phenomena in the local area near the notch tip between the surface and the center of a composite bar which is consisted of two different materials were investigated by using embedded dyeing grids with the pitch of $50.8\mu\text{m}$. It was confirmed that the maximum strain near the notch tip occurred not at the notch front but at the curvature beginning point of the notch which is in the interior of $z/W = 0.3 \sim 0.35$ from the surface and a notch was initiated from that point. And that the strain near the notch front between the center and $z/W = 0.65 \sim 0.7$ toward the surface was in a state of compression.

1. 序 論

최근 複合材에 대한 研究가 활발히 進行되고 있으나 그들의 대부분은 재료의 表面에 대한 現象, 즉 2次元的인 考察에 의한 것이 많으며 3次元的인 高찰은 연구자에 따라 서로 다른 結果가 제시되는 등 아직 확립되지 않은 실정이다.

특히, 龜裂先端에 대해서도 해석상의 어려움으로 인하여 巨視的인 방식에 의해서 고찰되어 왔기 때문에 材料의 破壞에 큰 영향을 미치는 龜裂先端 近傍의 局所領域에서의 破壞舉動 現象에 대해서는 아직 未知의 상태이다.

최근 島田⁽¹⁾ 등은 피치가 작은($50.8\mu\text{m}$) 格子를 에폭시樹脂 表面의 染色, 脫色을 통하여 樹脂表面

에 形成시킨 후 이를 同一樹脂로 内部에 埋込시켜 그 格子를 擴大觀察하여 재료의 3次元的인 破壞舉動의 해석이 가능한 Embedded Grids法(이하 埋込格子法이라 함)을 開發하였다. 그리고, 島田^(2,3) 등은 이 埋込格子法을 이용하여 貫通노치를 가진 厚板에 대하여 두께방향에 따른 노치先端에서의 應力擴大係數 K_I 의 3次元的인 分布를 구한 바 있다.

著자들은⁽⁴⁾ 이 埋込格子法을 이용하여 彈性係數가 서로 다른 物體로 구성된 二相接合材의 接合境界面 부근의 局所領域에서의 3次元的인 變形率 分布를 구한 바 있다.

본 論文은 複合材의 3次元 破壞舉動에 대한 기초 연구의 하나로, 彈性係數가 서로 다른 物體로 구성된 二相接合材에서 龜裂先端의 局所領域에서의 3次元的인 破壞舉動을 위의 埋込格子法을 適用하여, 龜裂先端의 3次元的인 變形率 分布狀態를 구했으며, 이 초기의 變形率 分布狀態와 노치로부터의 龜裂發生點 및 그 進行 方向과의 相關 關係를 살펴보

*정회원, 慶南專門大學 機械設計科

**日本 東北大學 工學部

***정회원, 嶺南大學校 工科大學 機械設計科

았다.

2. 實 驗

2.1 試 驗 片

본 實驗에 사용된 試片중의 대표적인 形상 및 크기를 Fig. 1에 提示하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 試驗片은 두 彈性體가 서로 接合된 形상을 하고 있으며 彈性係數가 E_a 인 부분을 A材로 그리고 E_b 인 부분을 B材로 부르기로 하며 또한 탄성계수가 작은 부분을 軟材라 하고 큰 부분을 硬材로 부르기로 한다.

試片内部에 埋込도나 染色格子는 A部分에만 形成시키고 그 부분의 彈性係數를 一定하게 하고 相對材인 B部分의 彈性係數를 變化시킴으로서 A부분이 B부분에 비하여 相對적으로 軟材나 硬材가 되게 하여, 變形測定은 A부분만 하지만 결과적으로는 複合接合材의 軟材와 硬材의 두 부분의 破壞 舉動을 모두 관찰할 수 있게 하였다.

그리고, B部分의 彈性係數의 變化는 시편에 함유되는 치오콜의 含有量을 變化시킴으로서 가능하였다. 또한 龜裂先端의 3次元의 破壞 舉動은 Fig. 1에 제시한 시편과 같은 形상이나 内部에 埋込된 染色格子의 위치를 시편 内部中心에서 表面쪽으로 1mm씩 移動시킨 試片을 軟材와 硬材에 대하여 각각 5개씩 만들어 觀察하였다.

또, 表面에서의 變形 舉動은 表面에 포토레지스트 격자를 形成시켜 變形率을 구하여 考察하였다. 그리고, 龜裂先端에서의 굽힘모멘트의 影響을 排除하기 위하여 試片 中央에 荷重用 핀(pin) 구멍을 노치와 平행한 방향으로 加工하여 Fig. 1에 제시한 바와 같이 A, B 두 부분의 境界面을 貫通하도록 하여 實驗시 A, B 두 부분이 同一하게 變위하도록 하였다.

2.2 實驗方法

먼저, 軟材에서의 破壞 舉動을 알아보기 위하여 연재축의 内部中心에 染色格子를 形成시킨 시편에 길이 $a=2\text{mm}$ 의 노치를 넣어서 試驗機에 装着시켜 하중을 가하기 전에 表面의 試片内部의 染色格子의 노치부근의 격자를 撮影한 後, 소정의 引張荷重을 가한 뒤 同一場所의 變形 後의 격자를 촬영하여 그 變形前後의 사진이 담긴 필름을 이용하여 變形率을 구한다. 그리고 노치를 넣을 때 노치선단과 노치先

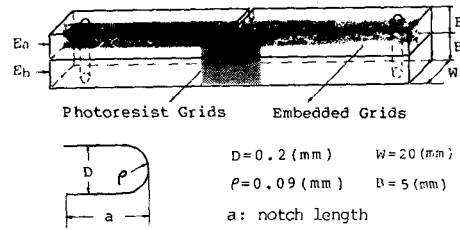


Fig. 1 Shape of specimen

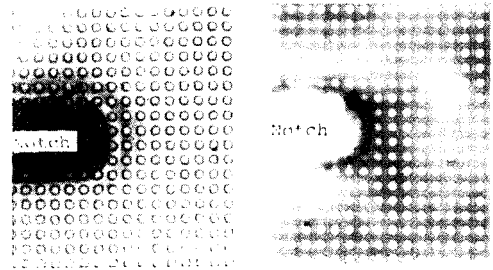


Fig. 2 Photograph of grids

端 前方의 첫 格子와의 거리는 $x=10\sim 25\mu\text{m}$ 정도가 되게 하였다.

노치깊이에 따른 研究는 同一試片에 노치의 깊이를 더 깊게 넣어 實驗을 계속한다. 硬材에 대해서나 혹은 3次元의 現象은 다른 시편에 대하여 같은 방법으로 實驗을 하여 考察한다.

初期變形率曲線과 재료의 實在破斷 및 龜裂發生과의 相關關係를 알아보기 위한 破斷 實驗은 Fig. 1의 시편과 같은 형태의 시편을 만들어 引張試驗機에 装着시켜서 變位 1mm/min의 속도로 하중을 가하면서 試片이 破斷될 때까지 노치先端에서의 龜裂發生 상태를 觀察하였다. 본 實驗에 사용한 引張試驗機는 自作한 것으로 荷重裝置部와 變位測定部로 構成되어 있다.

Fig. 2는 實驗裝置系에서 擴大撮影한 表面의 포토레지스트 격자와 試片内部에 매입시킨 染色格子를 나타낸 것으로 두 격자 모두 피치는 $50.8\mu\text{m}$ 로서 이를 이용하면 材料變形의 마이크로적인 測定이 가능한 것을 알 수 있다.

3. 結果 및 考察

3.1 노치先端 近傍의 變形率分布

Fig. 3는 軟材에 길이 $a=2\text{mm}$ 의 노치가 존재할 때 시편의 表面과 内部中心에서의 노치先端 近傍의

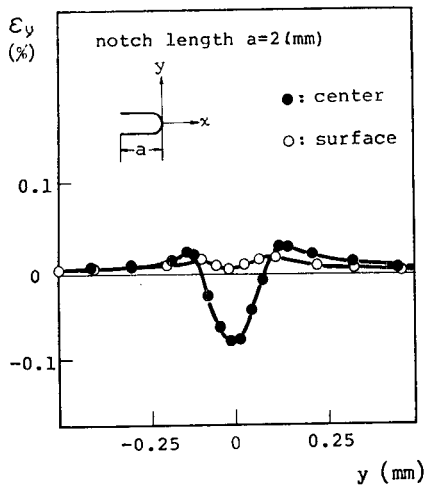


Fig. 3 Strain vs distance y from notch tip

변형률을 나타낸 것이다. Fig. 3에서, 試片 表面에서의 변형률은 노치先端에서 먼 곳에서 노치先端으로 接近할수록 增加하지만 노치先端 近傍의 局所領域(local area)에서는 減少한다는 것을 알 수 있다.

한편, 内部中心에서는 노치선단에서 멀리 떨어진 곳에서는 表面과 같이 노치선단에 접근할수록 변형률은 增加하지만 노치선단 近방의 局所領域에서는 표면보다 더 큰 폭으로 減少하여 壓縮狀態의 변형률이 된다는 것을 알 수 있다.

線型破壞力學에서 龜裂先端의 應力場은

$$EV = K(1-\nu)\sqrt{y}/\sqrt{\pi} \tag{1}$$

$$V = \{[\nu]_0^y + \int_0^y \epsilon_x \cdot dy\}$$

로 표시되어 龜裂先端을 중심으로 하여 상하의 變位曲線 V와의 거리 \sqrt{y} 사이에는 直線關係에 있고 거리의 $r^{-1/2}$ 의 特異性이 성립하여 이들 V와 \sqrt{y} 사이의 기울기에 의해서 應力擴大係數 K를 구할 수 있다.

Fig. 4는 위의 시편에서 얻은 노치先端 近傍에서의 V와 거리 \sqrt{y} 의 關係를 나타낸 것으로, 試片의 表面에서는 노치로부터 $0.3\text{mm}^{1/2} < \sqrt{y} < 0.5\text{mm}^{1/2}$ 에서는 V와 \sqrt{y} 사이에 直線關係가 성립하지만 노치선단을 중심으로 $\sqrt{y} < 0.3\text{mm}^{1/2}$ 範圍에서는 노치先端 中心에서 두 曲線이 서로 만나지 않고 不連續인 것을 알 수 있다.

이 不連續性은 内部中心에서도 같은 경향으로 노치선단 局所領域에서 $V - \sqrt{y}$ 사이에 直線關係가 성립하지 않고 不連續이며 그 범위는 표면보다 커

서 $\sqrt{|y|} < 0.35\text{mm}^{1/2}$ 정도인 것을 알 수 있다.

Fig. 4에서, 노치先端 近傍의 局所領域에서 V와 거리 \sqrt{y} 는 서로 直線關係에 있지 않으므로 $r^{-1/2}$ 의 特異性이 성립하지 않는다는 것을 알 수 있으며 이는 변형률의 측정거리가 노치先端에서 전방으로 $(r/a)^{1/2} = 0.08 \sim 0.15$ 로서 이 領域이 龜裂先端에 존재하는 소성영역 안에 있기 때문으로 생각한다.

龜裂先端의 소성영역에 관해서는 再結晶法⁽⁶⁾, X線回折法⁽⁷⁾ 등에 의한 結果가 있으며, 그 중 X線回折法에 의한 結果는 龜裂先端에서의 變形率의 분포가 内部, 表面 모두 본 실험의 表面에서의 結果와 같은 傾向을 하고 있지만 그 경우는 内部中心에서도 변형률은 陽(+)의 값을 가진다. 그것은 X線回折法에서의 변형률이 塑性變形에 의한 값이기 때문으로 생각된다.

전술한 사항들을 고려해 보면, 지금까지 알려진 龜裂先端 近방의 塑性領域과 본 실험에서의 變形率 不連續領域이 一致하는 것으로 생각이 되나 현재의 단계로서는 確言할 수 없다.

Fig. 4는 軟材에 노치가 존재하는 경우이나 硬材에 같은 깊이의 노치(a=2mm)가 존재할 때에도 같은 結果를 얻었다.

위에서 본 바와 같이 노치先端에서 V와 \sqrt{y} 사이에 直線關係가 성립하지 않으면 지금까지 破壞의 考察基準으로 사용되어 왔던 應力擴大係數 K_I 을

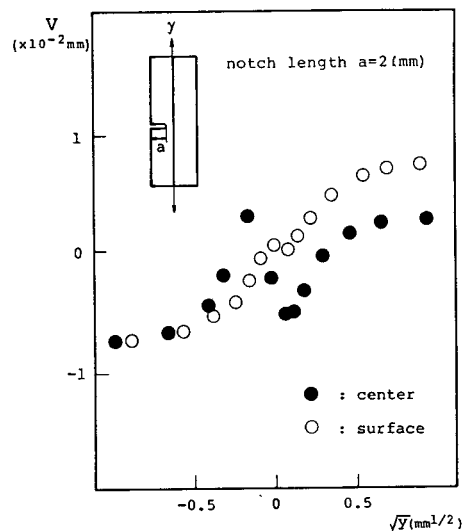


Fig. 4 Variation of V with distance \sqrt{y} from notch tip

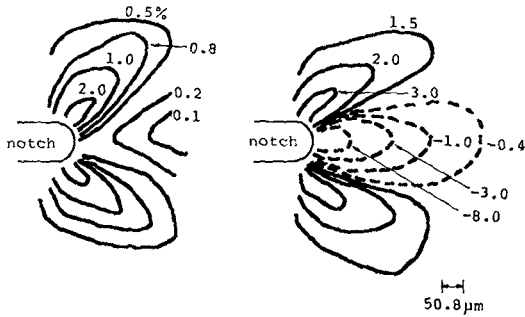


Fig. 5 Strain distribution in the local area near notch tip

이용할 수 없기 때문에 본 실험에서는 노치선단 근방에서의 最大變形率을 이용하여 考察하기로 하였다.

Fig. 5는 軟材에 깊이 $a=2\text{mm}$ 의 노치가 존재할 때 노치先端 근방의 試片表面과 內部中心에서의 等變形率 分布를 나타낸 것이다. Fig. 5로부터, 표면에서의 最大變形率은 노치선단이 아니라 선단으로부터 $y=150\sim 180\mu\text{m}$ 떨어진 노치曲率 始作點附近이고, 內部中心에서는 表面보다 더 큰 $y=250\mu\text{m}$ 떨어진 곳에서 變形率이 最大가 되며, 특히, 노치선단이 壓縮의 變形率狀態이고 최대변형률 $\epsilon_{y\text{max}}$ 의 分布角度도 x 軸과 $\theta=45^\circ$ 의 각도를 이루고 있다.

그리고 同一한 外部變位에 대한 노치선단의 最大變形率 $\epsilon_{y\text{max}}$ 도 表面보다는 內部쪽이 더 크다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 硬材의 경우도 내부중심에서의 노치선단 局所領域에서 변형률은 負(-)의 값이었다.

3.2 두께에 따른 變形率의 變化

위에서, 軟材, 硬材 모두 同一變位에 대한 試片表面과 內部中心에서의 노치선단 局所領域에서의 最大變形率은 노치前方이 아니라 노치曲率 始作點 부근이며 변형률도 表面보다는 內部中心이 더 크다는 것을 알았다.

Fig. 6은 이와 같은 傾向이 재료의 內部中心에서 表面으로 이동함에 따른 變化를 알아보기 위하여 染色格子의 位置가 內部中心에서 表面으로 1mm 씩 이동한 位置에 있는 試片들을 이용하여 같은 노치 깊이에 대하여 조사한 結果이다.

Fig. 6에서, 表面과 內部中心은 前述한 Fig. 4의 結果이며, $z/W=0.65$ 에서의 結果는 노치선단의 最大變形率 $\epsilon_{y\text{max}}$ 의 두께방향에 따른 變化 中에서의 最大인 곳에서의 結果이다.

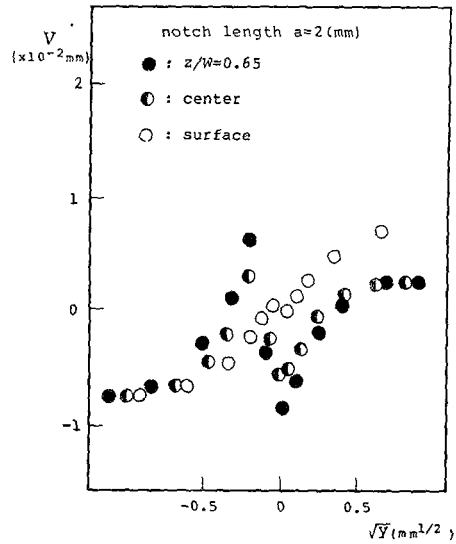


Fig. 6 V vs \sqrt{y} in the thickness direction along a notch front

Fig. 6으로부터, 시편중 最大變形率을 일으키는 $z/W=0.65$ 에서도 노치선단에서 $0.4\text{mm}^{1/2} < \sqrt{y} < 0.7\text{mm}^{1/2}$ 範圍에서는 V 와 \sqrt{y} 는 직선관계에 있지만 $\sqrt{|y|} < 0.35\text{mm}^{1/2}$ 에서는 V 와 \sqrt{y} 는 直線關係가 아니며 變形率도 不連續인 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 提示되어 있지 않으나 다른 시편에서는 結果와 綜合해 보면, 노치先端의 局所領域에서의 변형률 不連續領域은 表面에서는 $\sqrt{|y|} < 0.3\text{mm}^{1/2}$ 정도이며 表面에서 內部로 갈수록 그 範圍는 커져서 表面에서 $z/W=0.35$ 內部에서 最大로 $\sqrt{|y|} < 0.5\text{mm}^{1/2}$ 로 되었다가 그 이후부터 內部中心에 이르기까지 完만히 減少하여 內部中心에서는 $\sqrt{|y|} < 0.35\text{mm}^{1/2}$ 로 된다는 것을 알았다.

Fig. 7은 軟材에 龜裂이 존재할 경우 두께방향에 따른 等變形率 分布曲線의 變化를 알아보기 위하여 $z/W=0.4$, $z/W=0.65$ 그리고 $z/W=0.8$ 부근에서의 結果를 나타낸 것이다. Fig. 7(b)에서, $z/W=0.65$ 의 경우 노치선단이 變形率 $\epsilon_y=0$ 인 中立域(neutral area)이 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 7을 종합해 보면, 시편 內部中心의 노치先端 局所領域에서 변형률은 陰(-)인 壓縮狀態이나 그 범위는 內部中心에서 表面에 이르는 동안 점점 커지다가 $z/W=0.65$ 부근에 이르면 노치선단은 $\epsilon_y=0$ 인 中立域이 되며 그 이후부터는 表面에 이르기까지 노치先端은 陽(+)의 變形率狀態가

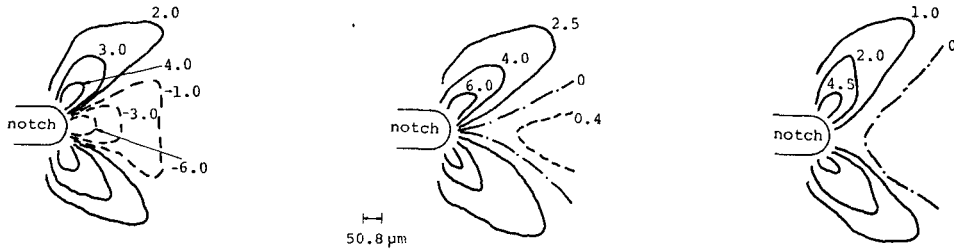


Fig. 7 Strain distribution in the thickness direction along a notch

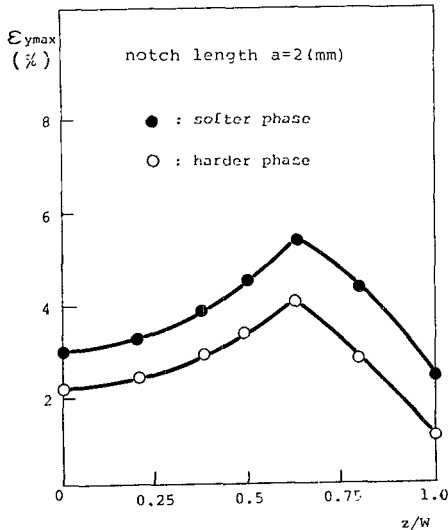


Fig. 8 Maximum strain vs z/W

된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 軟材에 노치가 있을 경우이나 硬材에 노치가 있는 시편에서도 같은 傾向의 結果를 얻었다.

Fig. 8은 노치先端 근방에서의 最大變形率인 $\epsilon_{y\max}$ 의 시편의 두께에 따른 變化를 나타낸 것으로, 龜裂이 연재에 존재하거나 경재에 존재하거나 두께방향에 따른 最大變形率은 $z/W=0.65$ 인 材料內部에서 발생하며 最小變形率은 材料表面에서 발생한다는 것을 알 수 있다.

3.3 노치길이 변화에 따른 變形率의 變化

Fig. 9는 노치가 硬材에 존재할 때에 그 깊이가 $a=2\text{mm}$ 에서 境界面에 이르기까지 노치先端 近傍에서의 V 와 \sqrt{y} 의 變化를 알아보기 위하여 龜裂의 깊이를 $a=2\text{mm}, 4\text{mm}, 6\text{mm}, 8.5\text{mm}, 9.6\text{mm}$ 로 하여 실험한 結果를 나타낸 것이다.

Fig. 9로부터, 前述한 노치깊이 $a=2\text{mm}$ 인 軟材의 경우와 같이 노치先端 근방에서의 變形率의 不連續性과 V 와 \sqrt{y} 사이의 直線關係의 不成立은 노치가 깊어져도 변하지 않으며 그 範圍도 거의 一定함을 알 수 있다. 이런 傾向은 龜裂이 軟材에 존재할 때에도 관찰되었다.

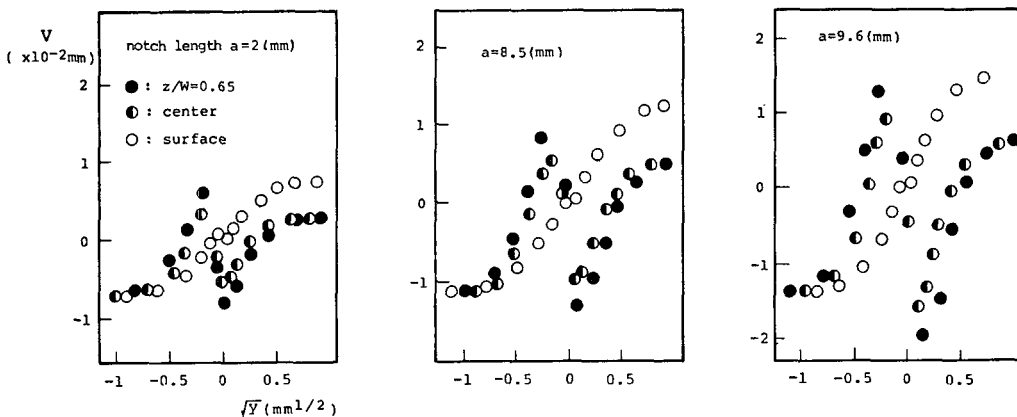


Fig. 9 V vs \sqrt{y} according to notch length

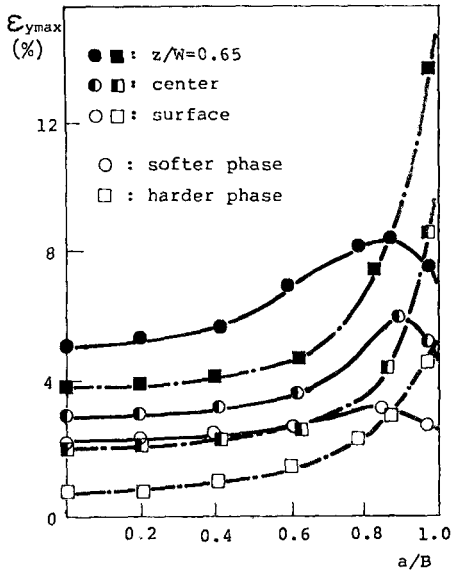


Fig. 10 Change of $\epsilon_{y\max}$ according to notch length

Fig. 10은 노치의 進展에 따른 시편의 內部中心, $z/W=0.65$ 그리고 表面에서의 노치先端 近傍의 $\epsilon_{y\max}$ 의 變化를 나타낸 것이다. Fig. 10에서, 노치가 軟材에 존재할 때는 노치가 境界面에 接近함에 따라 $\epsilon_{y\max}$ 은 점점 增加하다가 $a/B=0.8$ 부근부터는 노치가 進展해도 $\epsilon_{y\max}$ 은 相對材의 變形拘束으로 오히려 減少한다는 것을 알 수 있다. 한편, 硬材에 노치가 있을 때는 노치가 境界面에 接近함에 따라 $\epsilon_{y\max}$ 은 增加하다가 $a/B=0.8$ 부근부터는 軟材의 變形促進으로 인하여 그 값이 심하게 커진다는 것을 알 수 있다.

3.4 龜裂의 發生位置 및 進展經路

앞에서 본 바와 같이 노치先端 局所領域에서의 變形率의 不連續現象과 材料內部에서의 壓縮變形率 狀態下에서는 中進의 線型破壞力學의 이론식에 의한 應力擴大係數 K_I 을 구할 수가 없다. 따라서 본 論文에서는 노치先端 近傍의 最大變形率 $\epsilon_{y\max}$ 을 考察의 基準으로 삼았다.

이와 같은 상태에서 실제로 노치선단에서의 龜裂의 發生位置와 그 龜裂의 進展經路가 變形率分布와 어떠한 相關關係가 있는가를 알아내기 위하여 破壞用 시편을 제작 破斷시켜 살펴보았다. 이 때 시편에 넣은 豫備노치는 相對材의 影響을 거의 받지 않을 것으로 생각되는 $a=2\text{mm}$ 와 相對材의 影響을

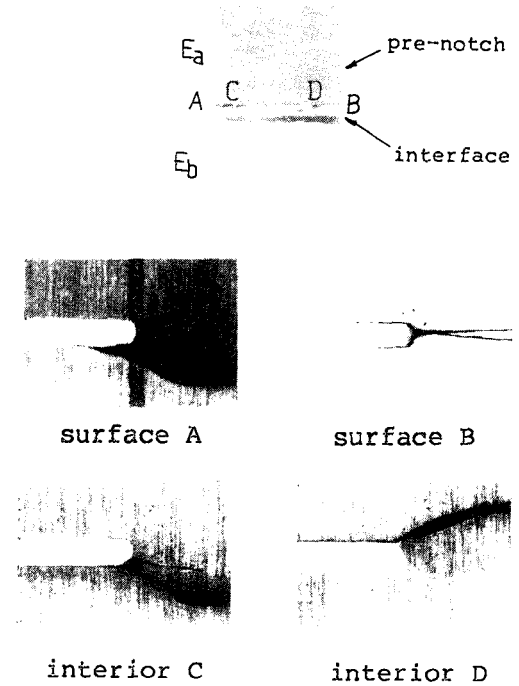


Fig. 11 Example of fracture surface ($E_a/E_b=0.31$)

받기 시작하는 $a=8\text{mm}$ 의 두 가지로 하여 實驗을 하였다.

Fig. 11은 軟材側에 豫備노치의 깊이가 $a=8\text{mm}$ 인 경우는 試片의 破面을 나타낸 것이다. 시편의 破斷過程을 말하면, 노치로부터 龜裂의 初期發生點은 시편의 內部中心이 아니라 $z/W=0.65$ 부근인 C點과 D點에서 始作했으며 그 중 C點에서의 龜裂이 시편 두께방향으로 擴散되어 노치全線의 全面에 進展되어 시편이 破斷되었다. Fig. 11에서 龜裂의 進展角度를 보면, 龜裂의 初生點인 C點과 D點에서는 x 軸과 $\theta=45^\circ\sim 50^\circ$ 의 角度를 이루고 있다는 것을 알 수 있다.

위의 龜裂의 發生點은 前술의 Fig. 8에서 언급한 바와 같이 等變形率 分布曲線에서 $\epsilon_{y\max}$ 의 시편두께에 따른 變化중에서 最大가 되는 곳이라는 것과 또한 균열의 進展角度도 等變形率 分布曲線에서의 $\epsilon_{y\max}$ 의 尾根의 方向과 거의 一致한다는 것을 알 수 있다. 시편의 兩表面인 A點과 B點에서의 龜裂發生 상태를 보면, 龜裂의 發生位置와 進展角度가 等變形率 分布曲線에서의 $\epsilon_{y\max}$ 의 尾根의 方向과 一致하고 있지 않으나 이는 龜裂이 試片內部에서 發生하여 表面으로 傳播되어서 表面에서 龜裂이

發生하여 進展했기 때문에 생각된다.

위의 경우는 軟材에 노치가 존재할 경우이나, 硬材에 노치가 존재하는 경우에 대한 破斷實驗에서도 龜裂은 $z/W=0.65$ 부근에서 發生하여 硬材의 경우와 같은 傾向을 띄고 있는 것을 알았으며, 豫備 노치의 깊이가 $a=2\text{mm}$ 인 경우에도 역시 위와 같은 경향의 結果를 얻었다.

위의 結果들을 종합해 보면, 同一變位를 받는 2 相接合材의 경우, 微小彈性變形을 일으키는 동안에 얻어진 變形率分布曲線으로부터 龜裂의 初期發生點과 그 進展方向 등을 豫測할 수 있음을 알 수 있다.

4. 結 論

彈性係數가 서로 다른 물체로 구성된 二相接合材에 龜裂이 존재할 때 龜裂先端 局所領域에서의 변형거동을 피치 $50.8\mu\text{m}$ 의 染色格子를 재료 내부에 埋込시켜 관찰하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 變位一定下에서 貫通노치를 가진 二相接合材의 노치先端의 局所領域에서는 V 와 \sqrt{y} 사이에 直線關係가 성립하지 않으며, 특히 內部中心에서 表面으로 $z/W=0.65$ 까지의 노치先端 近傍은 壓縮의 變形率狀態이다.

(2) 變位一定下에서 貫通노치를 가진 二相接合材는 表面에서 內部로 $z/W=0.35$ 의 위치에서 最大變形을 일으키며 龜裂도 그곳에서 시작한다.

(3) 노치로부터의 龜裂發生은 노치선단 前方이

아니라 노치曲率 始作點 付近이며 이는 等變形率 分布曲線에서 $\epsilon_{y\text{max}}$ 의 위치와 一致한다.

(4) 龜裂의 初期進展角度는 等變形率 分布曲線의 尾根의 방향과 一致하며 x 軸과 $\theta=45^\circ\sim 50^\circ$ 의 角度를 가진다.

參 考 文 獻

- (1) 島田, 小幡, 尾谷, “染め込み格子による三次元變形測定法”, 日本非破壊検査協會論文集, Vol. 28, No. 8, pp. 478~484.
- (2) 小幡, 島田, 尾谷, 1980, “染め込み格子による貫通片切缺きのK値分布の測定”, 日本非破壊検査協會論文集, Vol. 29, No. 8, pp. 525~531.
- (3) Obata, M., and Shimada, H., 1985, “Embedded Fine-Grid Method Applied to 3-Dimensional S.I.F. Analysis”, Experimental Mechanics, Vol. 25, No. 1, p. 6.
- (4) 朴貞道, 島田, 崔善浩., 1988, “2相接合材의 接合境界面 局所領域에서의 3次元變形率分布”, 大韓機械學會論文集, 第12卷, 第5號, pp. 1207~1216.
- (5) McClintock, E. A., 1971, Fracture, H. Liebowitz edited, Vol. II, p. 47.
- (6) Shoji, T., 1975, “Crack Tip Blunting and Crack-Opening Displacement under Large-Scale Yielding”, Metal Science, May, pp. 165~169.
- (7) 北川, 1974, “アルミニウムの疲勞き裂先端の塑性ひずみ分布”, 日本材料學會誌, 第22卷, 第244號, pp. 64~68.