

## GLASS/UP系 複合材料의 破壞에 미치는 NOTCH半徑의 影響

김귀식\*, 오맹종\*\*, 박경석\*\*\*, 김주봉\*\*\*

### Effect of Notch Root Radius on Fracture of Glass/Polyester Composite Materials

Gui-Sik Kim\*, Maeng-Jong Oh\*\*, Gyeong-Seog Park\*\*\*,  
and Ju-Bong Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

This study is investigated by experimental method and FEM about the effect of notch root radius ( $\rho$ ) on the fracture of GFRP. The smaller  $\rho$  showed the fracture behavior which was mainly caused by the propagation of the stable crack, but the fracture behavior in the larger  $\rho$  was mainly caused by the spread of damage. The experimental value of the nominal stress could be estimated by FEM simulation and the load-displacement curve could also be drawn. According to the results simulated damage zone by FEM, as the  $\rho$  is smaller, the damage begin at low stress.

#### 序 論

纖維強化 複合材料는 物理, 化學的으로 特性이 다른 數種의 材料를 組合하여 만든 것으로 單一材보다 強度特性이 뛰어나며, 強化用 纖維와 母材인 樹脂로 構成된다. 이 纖維強化 複合材料는 機械, 構造物의 高効率化 및 에너지 節約에 있어서 중요한 因子인 輕量性, 比彈

性(縱彈性率/比重量), 比強度(強度/比重量)가 金屬材料에 비해 우수하고, 材料設計가 가능하므로 國內外的으로 많은 研究가 이루어져, 여러 産業分野에 使用이 확대되고 있다.

纖維強化複合材料는 1950년대 中반에 유리纖維(GF)와 불포화폴리에스텔(UP)樹脂를 사용한 유리纖維強化複合材料(GFRP)를 최초로 보른

\* 공과대학 기계공학과

\*\* 대학원 기계공학과

\*\*\* 제주지방공업기술원

纖維, 탄소纖維, 아라미드纖維를 이용한 先進 複合材料(ACM)가 개발되어 尖端産業分野에 일부 사용되고 있다.

現在 GFRP는 原價/性能이 우수하고 作業性, 加工性이 양호하므로 建築, 機械, 電機部 品 등의 일반적인 용도와 海洋, 極地産業에 필요한 低溫用 貯藏탱크 등의 靜的 構造部材 構造物에 이용되고 있다. 靜的 構造部材에의 이용시 構成部材 사이의 接合部 및 部材 自體에 應力集中이 반드시 존재하므로 龜裂이나 圓孔 등의 應力集中원을 가진 複合材料의 破壞樣相과 이들이 強度에 미치는 영향에 대한 研究가 필요하다.

金屬材料의 노치의 영향에 대해서는 많이 연구되어 있으며, 노치에 의한 強度의 低下를 노치感度係數로서 整理하고 있다. GFRP에서 노치가 強度에 미치는 영향에 대하여는 川田 등 [1], 關根 등 [2], 김 등 [3]의 報告가 있으나, 특히 노치半徑이 破壞에 미치는 영향에 대한 研究는 그다지 많지 않은 實情이다 [4].

따라서, 본 研究에서는 引張負荷시 兩側 노치를 가진 GFRP의 노치半徑에 따른 荷重-變

位の 關係와 破壞樣相을 實驗의 方法과 有限 要素法에 의해 比較하였고, 破壞樣相의 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 再現可能性을 檢討하였다.

## 材料 및 方法

### 1. 試驗片 및 實驗方法

實驗材料는 母材로서 불포화폴리에스테르(UP) 樹脂, 強化材로서 유리纖維(GF)를 사용한 纖維分散相의 GFRP이며, 유리纖維와 UP樹脂의 物理的 性質은 Table 1과 같다. 實驗材料는 적층Ply를 4 ply로 하여 東洋FRP(株)에서 製作하였으며 두께는 3.9mm였다. 이 材料의 機械的 性質을 Table 2에 나타낸다.

試驗片의 形狀은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 길이 200mm, 폭 40mm의 막대형이며, 노치半徑( $\rho$ )을 5, 10, 20mm로 하고, 시험편 폭에 대한 리가멘트의 비가 일정하도록 加工하였다. 이 兩側 노치試驗片의 표점거리를 100mm로 하고, 만능재료시험기(容量 15Ton : Instron社, 美)를 이용하여 引張速度 0.5mm/min로 하여 試驗하였다.

Table 1. Physical properties of glass fiber and UP matrix

	Gravity	Tensile strength $\sigma_t$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus E (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
Glass fiber	2.55	345	7,500	3
UP matrix	1.28	6.9	345	3

Table 2. Mechanical properties of specimen

Ply number	Thickness (mm)	$\sigma_t$ (kg/mm <sup>2</sup> )	E (kg/mm <sup>2</sup> )
4	3.9	8.1-9.1	250-368

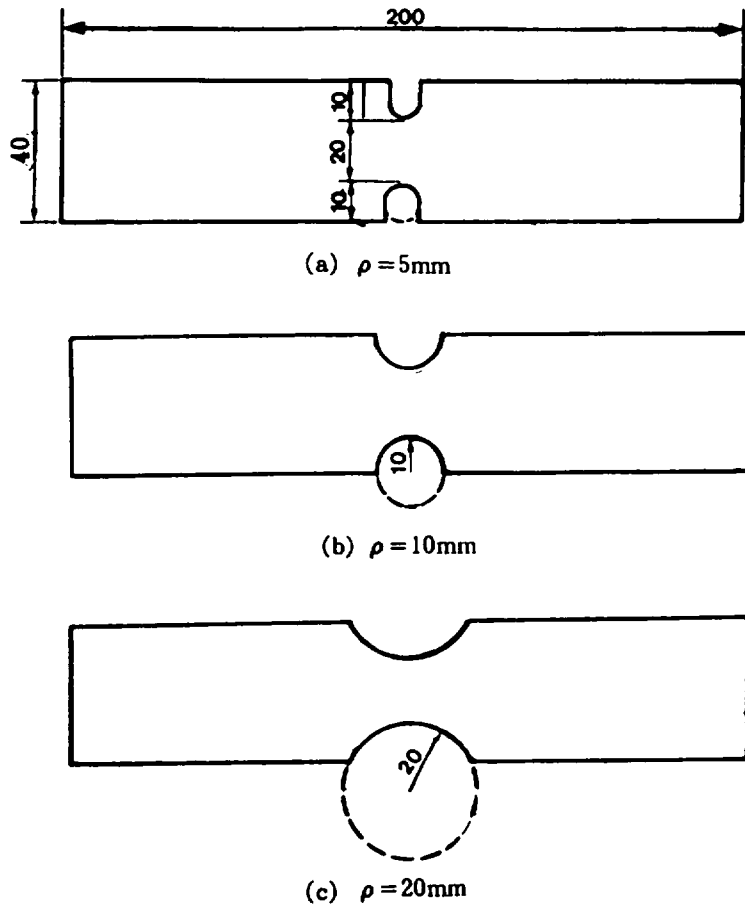


Fig. 1. Configuration of test specimen (unit : mm).

## 2. 有限要素法의 入力데이터

본 研究에 사용한 有限要素法 프로그램은 異方性, 積層層의 複合材料 特性值를 計算할 수 있는 座古(5)가 개발한 프로그램 SACOM (Stress analysis of composite materials)이며, Fig. 2에 나타난 順序圖에 따라 應力 및 變位의 計算을 行하였다. 解析對象은 Fig. 1에서

나타낸 notch半徑이 5, 10, 20mm의 平板에 대하여 作用荷重狀態를 等分布荷重을 받는 경우의 彈塑性 平面應力狀態로 간주하며, 對稱性을 고려하여 1/4斷面에 대해서 解析을 行하였다. 여기서 X軸上的 節點은 Y방향 拘束, Y軸上的 節點은 X방향의 拘束이다. 拘束節點은 <표시로 나타내고, 作用荷重은 ↑표시에 의해 나타내었다.

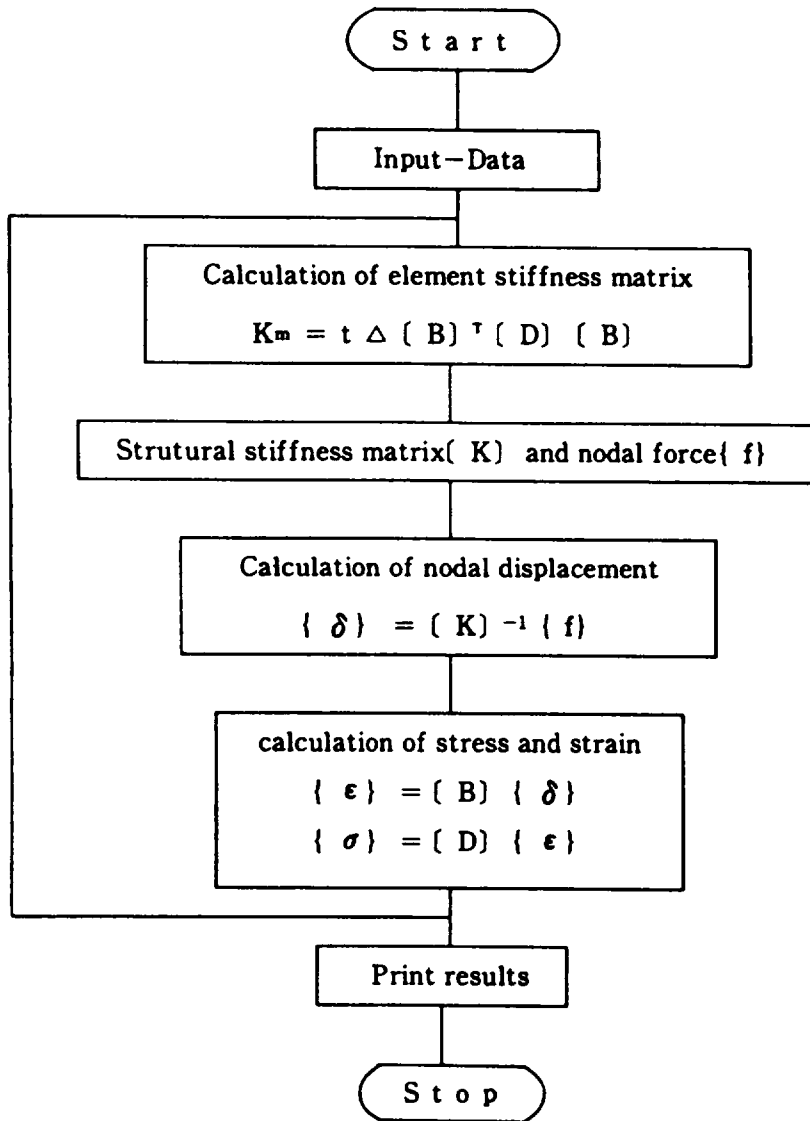


Fig. 2. Flow-chart FEM program.

모델의 상변은 荷重條件 때문에 等間隔으로 分割하고, 노치部는 應力集中이 豫상되므로 세 밀하게 分割한 다음, Y방향에 作用하는 等分布 引張力을 等價節点力으로 치환하므로써 要素分割, 境界條件, 節点荷重을 결정하고, 이들은 入力資料로 하여 要素別 應力과 變位를 계산하였다. 프로그램 實行에 필요한 入力資料는

Table 3에 나타냈으며, Table 3의 각 條件들은 Fig. 3에 표시하였다. 荷重-變位曲線은 컴퓨터에 入力되는 荷重에 따른 節点變位들을 더하여 平均한 값을 荷重에 대한 變位로 決定하고, 이 과정을 破壞荷重에 이를 때까지 反復하여 구하였다.

Table 3. Input data for FEM program (SACOM)

$\rho$ (mm)	Sum of elements	Sum of nodes	Load condition	Boundary condition
			Node number	Node number
5	59	43	39, 40, 41, 42, 43	-1, -2, -3, -4, 4, 7, 18, 23, 28 33, 38, 43
10	55	40	36, 37, 38, 39, 40	-1, -2, -3, -4, 4, 8, 12, 20, 25 30, 35, 40
20	63	45	41, 42, 43, 44, 45	-1, -2, -3, -4, 4, 8, 12, 17, 25 30, 35, 40, 45

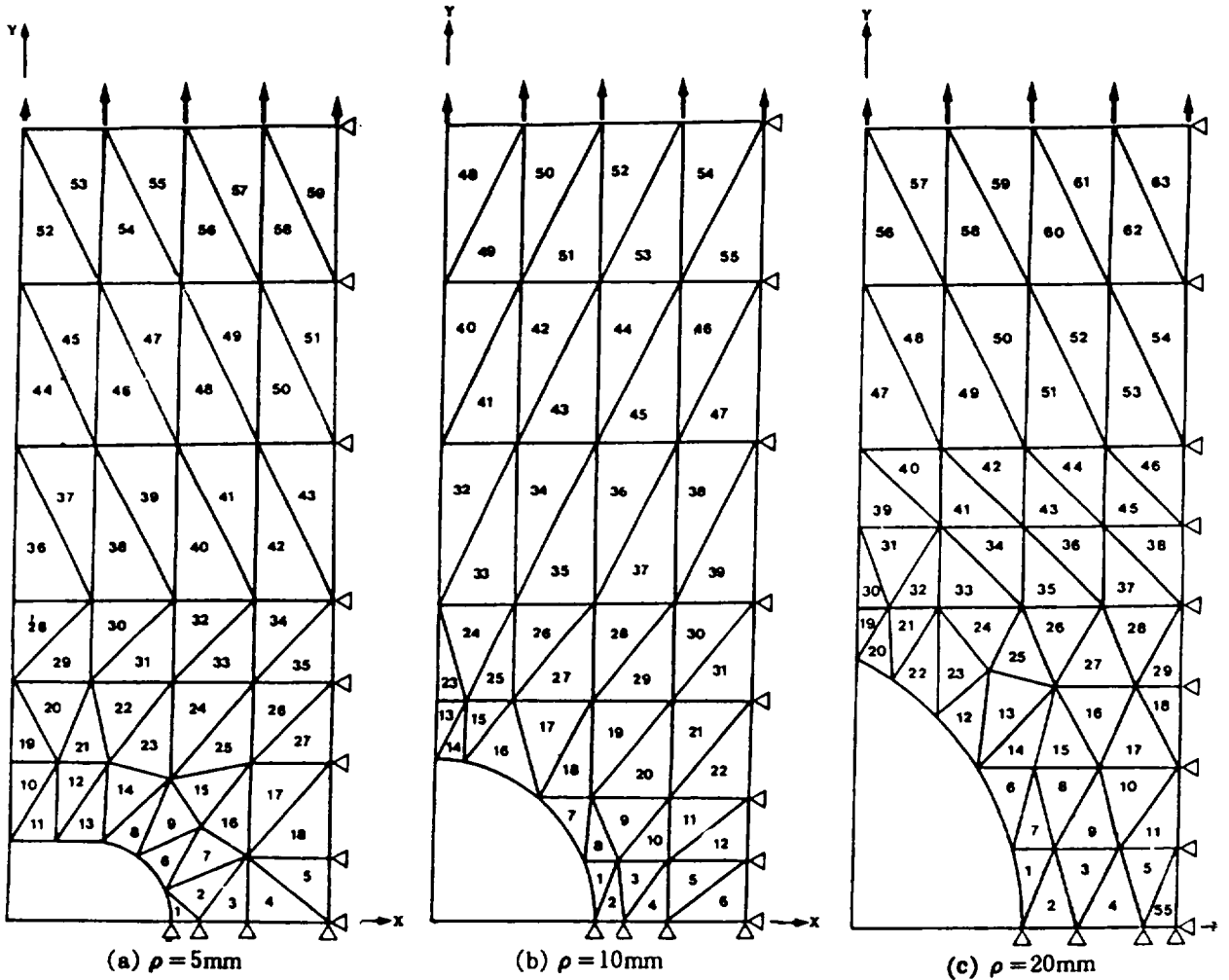


Fig. 3. Mesh generation of test specimen.

## 結果 및 考察

### 1. 荷重-變位曲線

노치半徑이 破壞에 미치는 영향을 비교하기 위하여 平滑試驗片의 荷重-變位曲線을 Fig. 4에, 그리고 노치半徑( $\rho$ )을 5, 10, 20mm로 變化시킨 兩側노치試驗片의 荷重-變位曲線과 FEM 시뮬레이션에 의해 얻은 曲線의 경우 각 경우에 대하여 Fig. 5 (a), (b), (c)에 나타냈다. FEM 시뮬레이션에 의해 荷重-變位線圖를 그릴 때는 荷重을 最高荷重까지 等間隔으로 12等分하고 각 等分에서의 變位를 계산하여 完成하였다.

Fig. 4의 平滑試驗片의 하중-변위곡선은 線形성이 양호하나 380kg의 위치에서 折点(knee점)이 나타난다. 이는 직선형으로 나타나는 CFRP의 하중-변위곡선과는 다르지만(6), Glass/Epoxy계 GFRP에서도 나타난다(1). knee점은 變形率로 환산하면 0.7% $\epsilon$ 이 된다. 그리고 破斷荷重은 1,350kg이었다. 한편, Fig. 5의 노치試驗片의 曲線(實線)에서는  $\rho$ 가 작을수록 굽어진 정도가 심하며 knee점 荷重도 저하한다. 變形率로 환산하면  $\rho=5mm$ 의 경우는 약 0.25% $\epsilon$ 에서 knee점이 나타나고 있다. 노치半徑이 작을수록 낮은  $\epsilon$ 의 값에서 knee점이 나타나는 이유는 川田등(1)의 고찰과 같이 노치가 安定균열의 發生 및 傳播를 도와 리가멘트가 減少하고 컴프라이언스가 증가하기 때문이다.

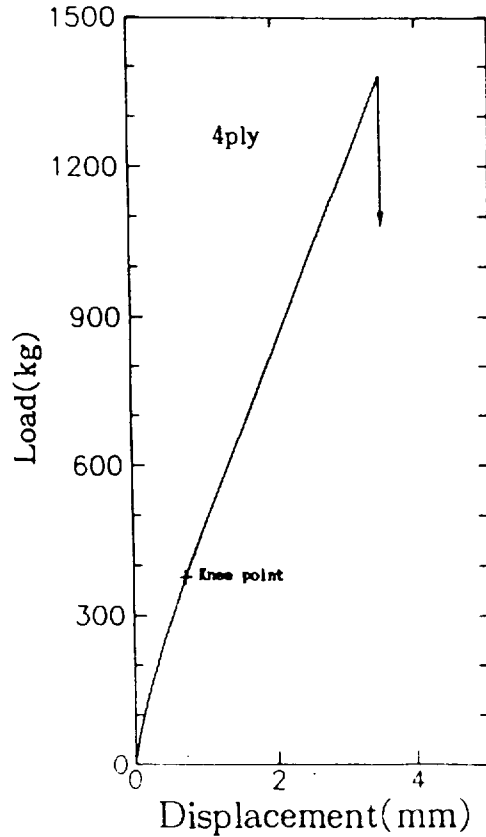


Fig. 4. Load displacement curve for unnotched specimen.

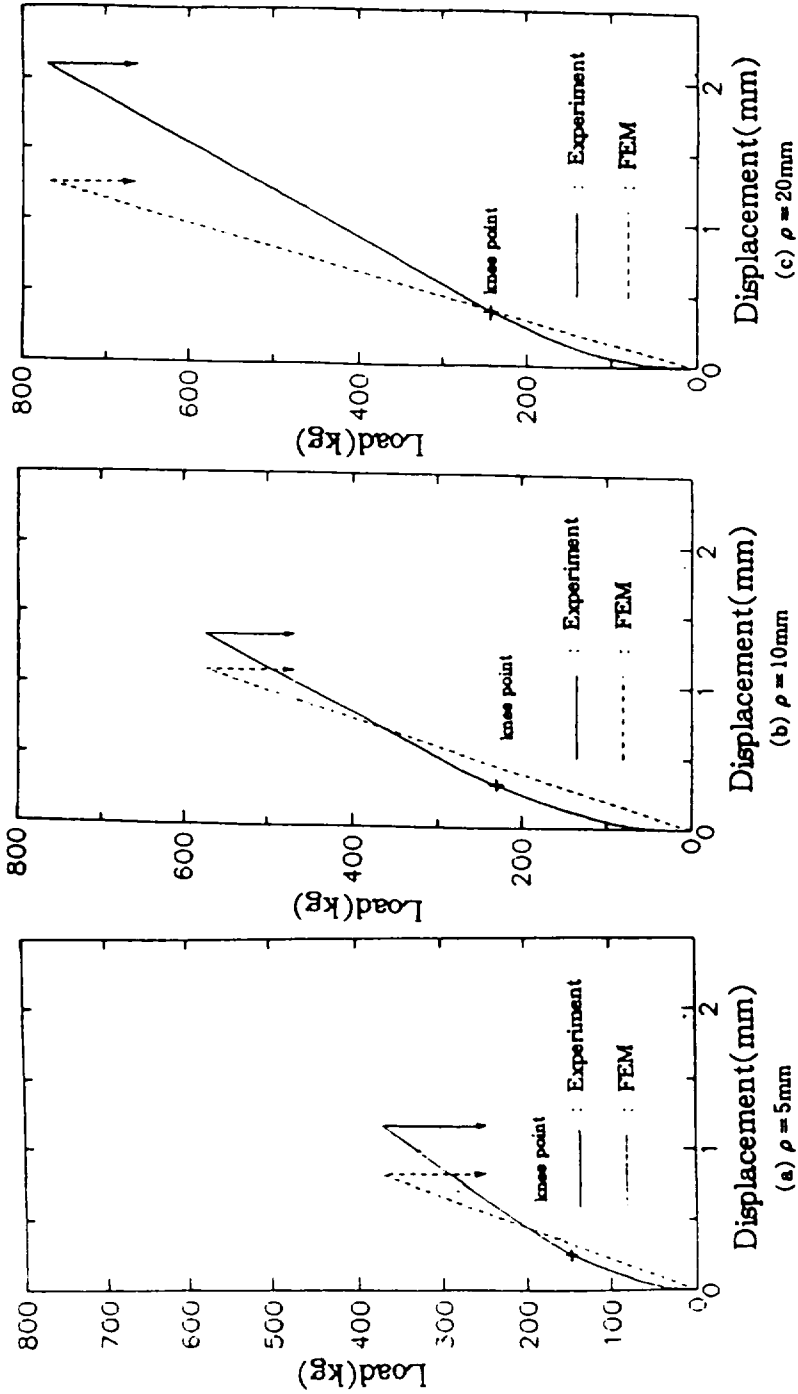


Fig. 5. Load-displacement curve.

實驗과 FEM에 의한 荷重-變位曲線을 비교하여 보면, 引張荷重 및 變位는 두 경우 모두  $\rho$ 가 커짐에 따라서 증가한다. 한편, 實驗에 의한 荷重-變位曲線은 knee점이 나타나지만 FEM에 의한 曲線에서는 나타나지 않는다. 이는 FEM프로그램에서 龜裂의 發生, 또는 龜裂의 成長을 해석할 수 없기 때문이며 이점에 관하여는 더 진보된 검토가 필요하다.

### 2. 公稱應力

實驗과 FEM에 의해 얻어진 公稱引張應力과 變位를 Table 4에 나타내었다. 여기에서, 實驗 公稱引張應力은 다음 식에 의해 얻어진다.

$$\sigma = P_{max} / (w - 2a) t$$

$P_{max}$  : 破斷하중       $w$  : 시험편 폭(40mm)

$a$  : 노치깊이 ( $a = \rho$ )

$t$  : 시험편 두께(3.9mm)

그리고, FEM에 의한 公稱引張應力은 각 要素應力의 平均值이다. Table 4에서 살펴보면 FEM에 의한 公稱引張應力의 차이는 13%-14%이다. 이들 誤差는 實驗值 산정에서 材料에 내재된 氣泡 등의 결함 및 시험의 手加工에 따른 誤差때문으로 생각되며 (FEM에서는 材料 自體의 결함은 계산되지 않음), 材料製作方法 및 試驗片 加工精度에 따라서 改善될 것으로 보인다. 그러므로, 設計에는 우려할 數値는 아니라고 볼 수 있다. 따라서 복잡한 형상의 複合材料에 대해서 FEM에 의한 應力解析을 하므로써 計算 精度를 높일 수 있으며, 時間 및 材料의 節約을 기할 수 있을 것으로 보인다.

Table 4. Nominal stress by experiment and FEM

$\rho$ (mm)	Experiment		FEM		$P_{max}$ (kg)	$w-2a$ (mm)
	$\sigma$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	$\sigma$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)		
5	4.60	1.32	5.29	0.82	372.8	19.5
10	7.22	1.36	8.63	1.14	573.6	20.2
20	10.28	2.10	11.59	1.81	770.4	19.6

### 3. 損傷의 擴大方向

荷重의 증가에 따른 리가멘트부의 損傷의 擴大 範圍와 方向을  $\rho = 5, 10, 20$ mm의 세 가지의 경우에 대하여 有限要素法에 의한 시뮬레이션을 행하였다.

Table 4에 나타낸 公稱應力을 破壞基準으로 하여, 노치선단의 應力集中이 公稱應力보다 큰 경우의 要素를 損傷된 要素로 간주하여 形象화 하므로써 損傷의 擴大 方向을 구하였다. 그 예인 노치선단의 局部應力과 公稱應力과의 關係를 Table 5에 나타낸다.



Table 5. Local stress of notch tip (by FEM)

$\rho$ (mm)	Nominal stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Element stress (kg/mm <sup>2</sup> )				
		1	2	3	4	5
5	5.29	16.82	11.25	7.65	7.46	7.18
10	8.63	20.82	15.28	15.48	12.52	12.51
20	11.59	24.84	20.44	18.93	17.24	16.75

노치부의 局部應力은 應力集中으로 인하여 公稱應力보다 높은 應力이 발생하게 되며, 本實驗에 사용한 有限要素 프로그램으로서 應力集中값의 크기와 應力集中이 생기는 部分의 位置를 實驗에 의하지 않고 豫測할 수 있다.

引張應力負荷時 損傷의 開始부터 破斷까지의 損傷擴大樣相을 FEM에 의해 시뮬레이션하여 Fig. 6( $\rho=5\text{mm}$ ), Fig. 7( $\rho=10\text{mm}$ ), Fig. 8( $\rho=20\text{mm}$ )에 나타내었다. Fig. 6, 7, 8에서 나타낸 바와 같이 파단하중에 대한 손상개시하중의 비 ( $P/P_{\max}$ )는  $\rho=5\text{mm}$ 인 경우 0.32,  $\rho=10\text{mm}$ 인 경우 0.41,  $\rho=20\text{mm}$ 인 경우 0.52이다. 따라서,  $\rho$ 가 작을수록 損傷開始의 荷重比가 작음을 알 수 있다. 이는  $\rho$ 가 작을수록 龜裂發生 및 應力集中이 크고 龜裂成長型의 破壞를 의미한다.

한편,  $\rho$ 에 따른 損傷의 擴大 樣相을 살펴 보면, 노치반경이 큰 경우( $\rho=20\text{mm}$ )는 노치 前方으로만 進展되는 경향을 볼 수 있다. 그러나 最高荷重시에는  $\rho$ 의 크기에 관계없이 리가멘트 전체에 損傷이 擴大되어 破斷된다.

## 結 論

Glass/UP系 複合材料의 노치가 破壞에 미치는 影響을 조사하기 위해 引張試驗과 有限要素法에 의한 컴퓨터 시뮬레이션은 행한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 曲率半徑 $\rho$ 가 작은 試驗片에서는 應力集中이 크게되어 그 破壞 樣相은 安定 龜裂 主導型이고,  $\rho$ 가 큰 경우는 損傷主導型의 破壞이다.

2) 노치半徑에 따른 公稱應力의 實驗値를 有限要素法에 의해 예측할 수 있고, 荷重-變位曲線도 有限要素法에 의해 作成할 수 있으나, 龜裂發生의 分岐點으로 看做되는 knee점의 豫測은 檢討가 필요하다.

3) 有限要素法에 의해 損傷의 擴大方向을 시뮬레이션한 결과, 破斷應力에 대한 損傷開始應力의 比는  $\rho$ 가 작을수록 낮아지고, 應力比가 1인 경우는  $\rho$ 의 크기에 관계없이 리가멘트 전체에 損傷이 擴大되어 破斷한다.

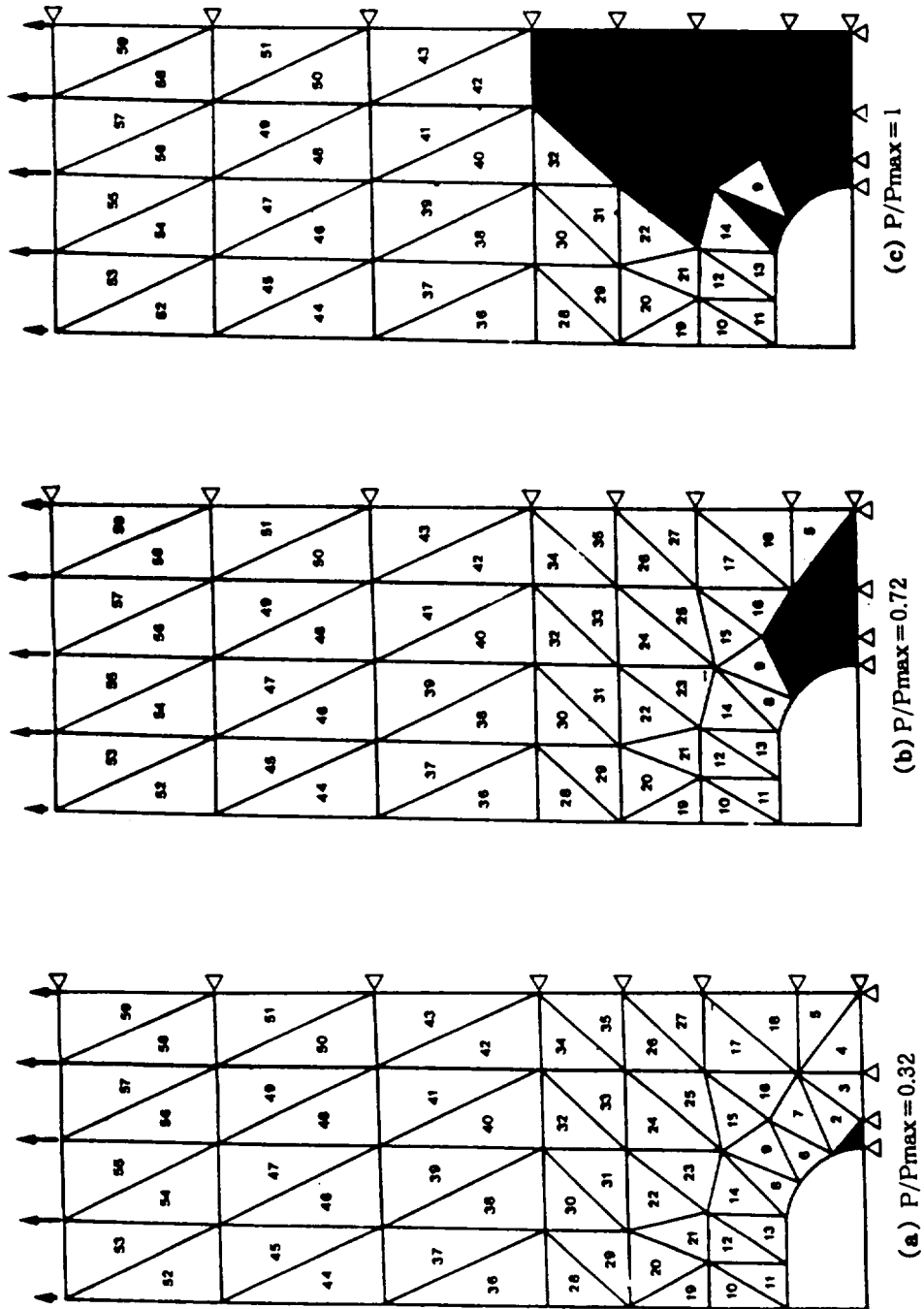


Fig. 6. Spread of damage zone ( $\rho = 5\text{mm}$ ).

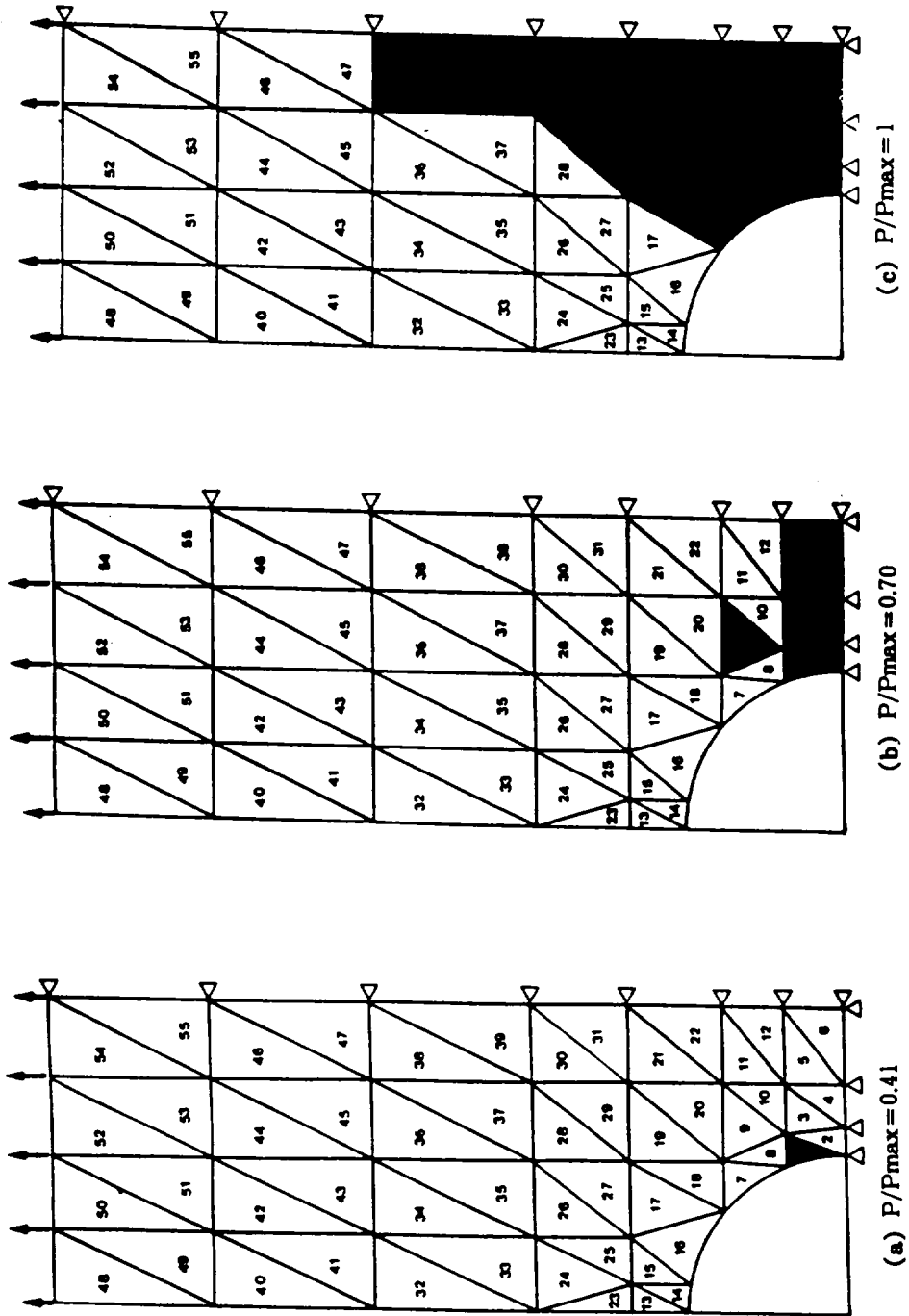


Fig. 7. Spread of damage zone ( $\rho = 10mm$ ).

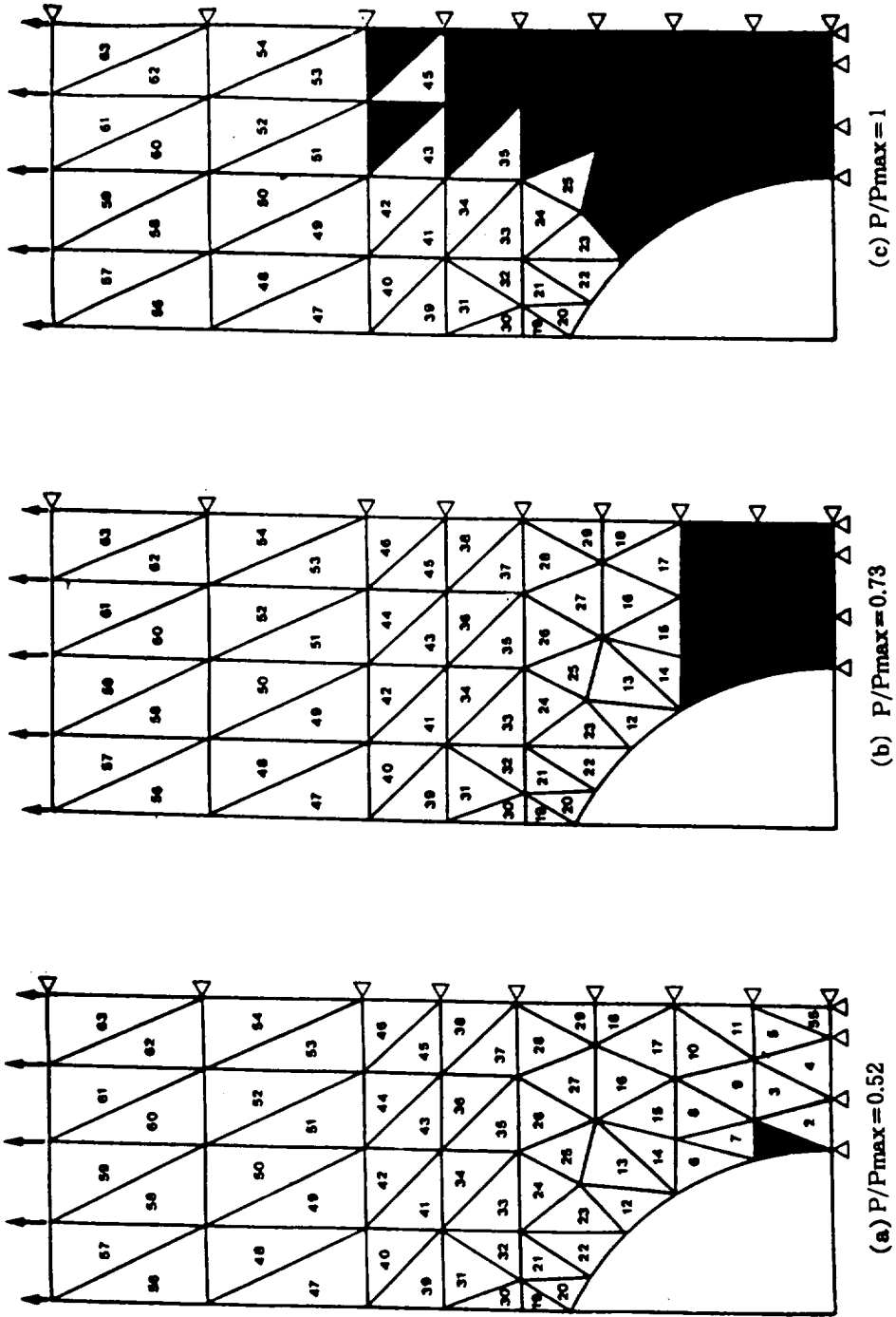


Fig. 8. Spread of damage zone ( $\rho = 20 \text{ mm}$ ).

### 參 考 文 獻

- [1] 川田宏之, 細井健彦, 平本治郎, 林郁彦, 1986, 카라스/에폭시積層板의 破壞에 及ぼす切欠き半徑의 影響について, 日本材料學會誌, Vol. 36, No. 403, 78-84.
- [2] 關根英樹, 宮永俊明, 1989, GFRP의 應力腐食によるき裂進展速度に關する潛在微小き裂を考慮した微視力學的研究, 日本材料學會誌, Vol. 39, No. 446, 1545-1548.
- [3] 김정규, 김도식, 변승영, 1991, 원공을 가진 Glass/Epoxy 복합재료의 Notch강도및 파괴조건, 대학기계학회 '91추계학술대회 논문집, 36-39.
- [4] 石川降司, 1987, 複合材料의 破損強度則と強度設計に關する最近の研究動向と重点課題, 日本複合材料學會誌, Vol. 13, No. 1, 2-8.
- [5] 座古勝, 1989, 數値複合材料力學, 東京, 養賢堂.
- [6] 金貴植, 朴景錫, 炭素纖維強化形 複合材料의 機械的 性質에 미치는 水環境影響, 한국 박용기관학회 투고중.