

순수 굽힘 모멘트 장치와 순수 전단력 장치에 관한 고찰



황재석

영남대학교 기계공학과 교수

● 1950년생.
● 응력해석 및 복합체 역학을 전공하였으며, 광학을 이용한 응력해석, 복합체역학, 생체역학 및 파괴역학 등에 관심이 있다.

1. 머리말

구조물에 순수 굽힘 모멘트나 순수 전단력이 작용하는 경우는 허다하다. 뿐만 아니라 그 하중은 역학에 있어서는 아주 기본이 되는 힘의 종류 중의 하나이다. 그러나 순수 굽힘 모멘트가 작용하는 경우에 있어서 곡선보나 변형이 큰 보에서는 기존의 순수 굽힘 모멘트 장치로서 순수 굽힘 모멘트가 발생하도록 하는 것은 어렵고 정확하지 않다. 또 순수 전단력을 발생시키는 기존의 장치는 복잡하고 제작비가 고가이며, 뿐만 아니라 연성인재료(ductile materials), 시멘트 복합체(cement composite), 모타르(mortar), 접착 부분(bonded joints) 그리고 일반적인 복합체 등의 전단 물성치(shear properties), 인터라미나(interlaminar)와 각플라이(ply) 사이의 전단 물성치(shear properties), 모드-II의 파괴 인성치(mode II fracture toughness) 등을 측정하는 데는 많은 오차를 발생시킨다. 그래서 이 글에서는 하중은 작용하기 쉬운 인장하중이고 보의 길이가 짧은 보에서도 순수 굽힘 모멘트를 발생시킬 수 있는 순수 굽힘 모멘트의 개념⁽¹⁾을 소개하고, 또 순수 전단력이 발생되는 면적이 넓고, 정확한 순수 전단력을 발생시키며, 장치가 간단한 순수 전단력 장치⁽¹⁾와 지금까지 사용되어 온 순수전단력 장치를 소개하고, 그 것의 장·

단점을 서술하는 데 이 글의 목적을 둔다.

2. 순수 전단력 장치와 순수 굽힘모멘트 장치의 연구동향

2.1 순수 전단력 장치

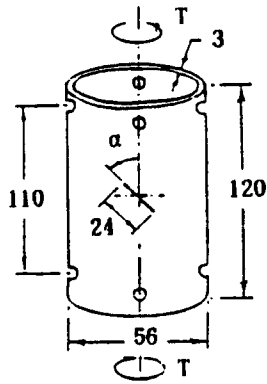
등방성체나 이방성체 경우의 순수 전단력을 발생시키는 하중장치는 크게 편축 인장시험(off-axis tension test)의 개념을 이용한 장치^(2~12), 아이오시페스크(Iosipescu)의 개념을 이용한 전단장치^(13~19), 아르칸 원판(A.C.D: arcan circular disk)의 개념을 이용한 전단장치^(20~26) 그리고 일반적인 순수 전단장치 등으로 나눌 수 있다. 그리고 순수전단 장치는 아래와 같이 연구되어 왔다. 복합체나 등방성체에 있어서 그림 1(a)처럼 얇은 원통^(27~29)이나 실축⁽³⁰⁾에 비틀림 모멘트를 가하면 가장 균일한 전단응력 상태를 얻을 수 있고 물성치도 측정할 수 있지만, 복합체 시편의 가공상 문제로 순수 전단력 장치는 그림 1, 그림 2, 그림 3 그리고 그림 4처럼 매우 다양하게 발전되어 왔다.

그림 1(b-1)은 중심 수평 크랙을 가진 발사나무판(balsa wood)에 측면 고정 장치로 전단력을 작용시키는 개략도를 나타낸 것이다. 이것은 Wu에 의하여 고안된 것이다.⁽³¹⁾ 그림 1(b-2)은 Richard⁽³²⁾가 고안한 시험편과 하중장치를 나타낸다. 이장치는 순수 전단력(mode

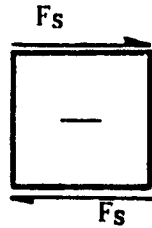
II, $\alpha=90^\circ$), 혹은 순수인장력(mode I, $\alpha=0^\circ$), 혼합력(혼합 모드, $0^\circ < \alpha < 90^\circ$) 등을 발생시킬 수 있는 다양한 장치이다. 그러나 시편 고정, 장치의 가공이 어렵고 비싸다.

William과 Birch⁽³³⁾ 그리고 Bergner⁽³⁴⁾ 등은 각각 그림 1(c-1)과 (c-2)와 같은 시편의 형상을 제작하여 두 크랙 사이에 전단력이 발생하도록 하였다. 그리고 이와 같은 원리를 이용한 그림 1(c-3)과 같은 시편도 고안되었다.⁽³⁵⁾ 그림 1(d)는 보로서 순수 전단력을 발생시키는 장치들을 나타낸 것이다. 보의 전단장치^(36,37)는 3점 굽힘과 외팔보의 경우가 있다. 이 중에서도 3점 굽힘 보는 한 방향 파이버를 가진 FRC(fiber reinforced composite)의 모드-II 상태의 인터페이스(interface)의 전단 응력과 전단 변위 등을 연구하는데 사용될 수 있다.⁽³⁷⁾ 그리고 짧은보 전단장치(short beam shear test)⁽⁴⁶⁾는 단지 전단 강도를 측정하는데 사용된다. 그림 1(d-1)과 (d-2)는 틀 내부에 순수 전단력을 발생시키고, 그림 1(d-3)⁽³⁸⁾과 (d-4)⁽³⁷⁾는 한 방향 파이버 복합체의 모드 II (mode II)의 파단강도(fracture toughness), 인터라미나(interlamina)와 각 플라이(play) 사이의 전단 물성치 등을 측정하는데 주로 사용된다. 그러나 크랙 면에 따라 발생하는 마찰력 때문에 정확한 파단강도를 측정하는데 어려운 점이 있고 크랙의 다른 점에서 법선력(mode I 하중)에 의한 파단이 발생한다. 그림 1(d-5)는 주로 등분포 하중을 받는 나무의 순수 전단력(mode II 하중)의 전단강도를 측정하는데 사용되는 장치⁽³⁹⁾이고 (d-3)⁽³⁸⁾과 (d-4)⁽³⁷⁾와 같은 결점을 갖고 있다. 그림 1(e)는 Pellicane⁽⁴⁰⁾과 DeBase⁽⁴¹⁾가 목재용 표준 ASTM 전단 시편을 근거로 하여 고안한 전단 시편을 나타낸 것이다. 그러나 크랙첨단 앞의 미소 부분에만 순수전단력이 발생하고 상당히 큰 법선력(mode I 하중)이 발생한다. 그림 1(f-1)은 Jones과 Chisholm⁽⁴²⁾이 고안한 컴팩트 전단 시편(compact shear specimen)이며 이 장치의 유효성은 광탄성 실험과 경계선점법(boundary-

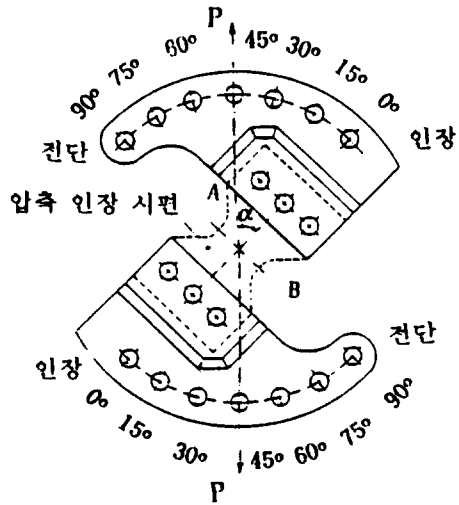
collocation solution)으로 확인되었다. 그러나 이 경우에서도 크랙 첨단 부근에 모드 I (mode I)의 응력 확대계수가 존재한다. 그림 1(f-2)는 압축하중을 받는 Jones과 Chisholm 형식의 컴팩트 전단시편을 인장하중이 작용하는 컴팩트 전단시편^(43,44)으로 단순화된 것을 나타낸다. 그림 1(f-3)은 모드 II의 피로균열 시험에 사용될 수 있는 시편을 나타낸 것이다.⁽⁴⁵⁾ 그러나 시편의 고정장치에 사용되는 부속 장치가 정밀하여야 한다. Cramer와 Pugel은 컴팩트 전단시편을 근거로 하여 나무의 전단 파단강도 측정용 컴팩트 시편의 형상을 그림 1(f-4)와 같이 결정하고 그 유효성을 실험과 이론으로 확인하였다.⁽⁴⁶⁾ 그림 1(g-1)은 Wakins⁽⁴⁷⁾가 고안한 시멘트 접착물 (cement paste), 모타르, 콘크리트 그리고 시멘트 복합체들의 전단 파단강도 측정용 표준 100mm 정육면체 시편(100mm×100mm×100mm)을 나타낸다 (실제로 콘크리트류의 표준시편은 200mm×200mm×200mm이다. 그러나 표준 100mm 정육면체 시편은 이것을 단순화한 것이고 또 이것을 주로 사용한다.). 그리고 Davies⁽⁴⁸⁾ 등에 의하여 Wakins의 시편이 그림 1(g-2)처럼 변경되고 이것은 또 Davies⁽⁴⁹⁾ 등에 의하여 그림 1(g-3)처럼 변경되었다. 그리고 Davies 등은 이중에서 그림 1(g-3)의 시편이 시멘트 접착물이나 콘크리트 등의 전단 파단강도를 측정하는데 가장 적합한 시편이라고 주장하였다. 그림 1(h)는 레일 전단(rail shear) 시편과 장치의 변형을 나타낸 것이다. 이 장치는 시편에 순수 전단력을 발생시키기에 어려울 뿐만 아니라 시편 고정장치가 시편에 큰 응력집중을 발생시키는 단점을 가지고 있다. 그러나 레일 전단시편과 장치는 보편적으로 복합체의 전단성질을 측정하는 데에 다양하게 사용되고 있다. 그리고 그림 1(h-1)은 Whitney^(50,51) 등이 고안한 레일전단 시편과 장치를 나타낸 것이고, Two Rail Shear Test라고도 한다. 이것은 O'Brien과 Reifsnider⁽⁵²⁾ 등에 의하여 그림 1(h-2)처럼 개조되었고 또 이 장치는 180° 회전하



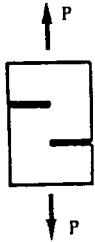
(a) Srinath와 Murthy 등⁽²⁹⁾



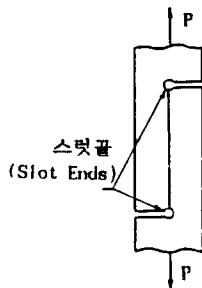
(b-1) Wu⁽³¹⁾



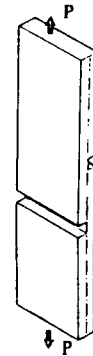
(b-2) Richard⁽³²⁾



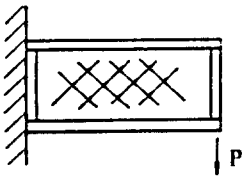
(c-1) Williams와 Birch⁽³³⁾



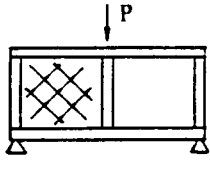
(c-2) Bergner와 Davis⁽³⁴⁾ 등



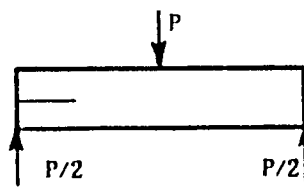
(c-3) Zhang과 Leech⁽³⁵⁾



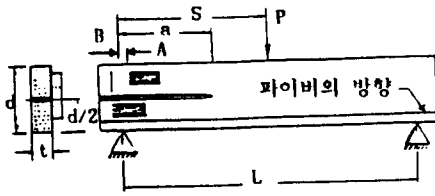
(d-1) 외팔보⁽³⁶⁾



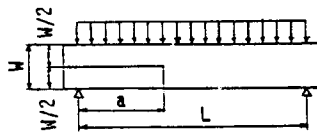
(d-2) 3점 굽힘 모멘트⁽³⁶⁾



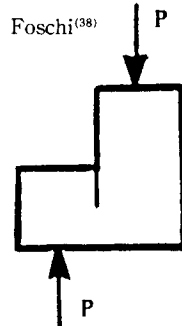
(d-3) Barrett와 Foschi⁽³⁸⁾



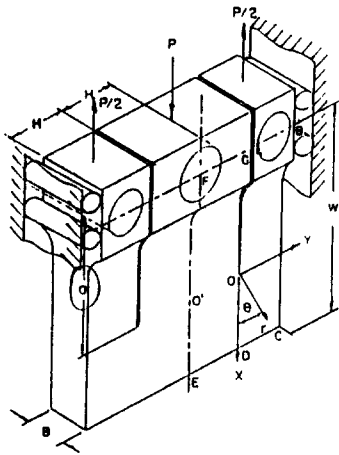
(d-4) Giare⁽³⁷⁾



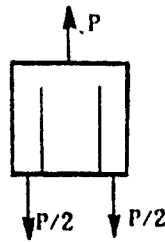
(d-5) Barrett와 Foschi⁽³⁹⁾



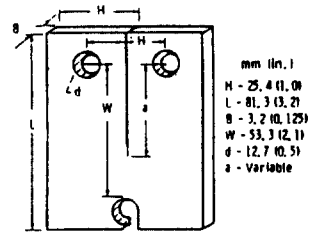
(e) Pellicane⁽⁴⁰⁾과 Debaise⁽⁴¹⁾



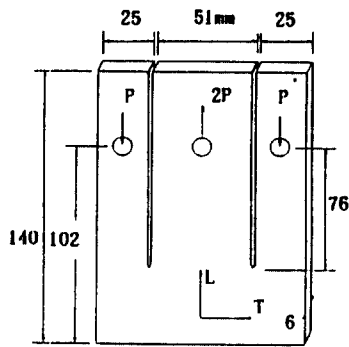
(f-1) Jones와 Chishohm



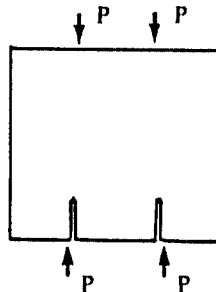
(f-2) Boontanjai와 Mall 등^(43,44)



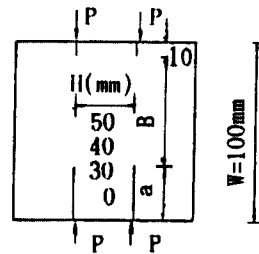
(f-3) Gross, Buzzard 등⁽⁴⁵⁾



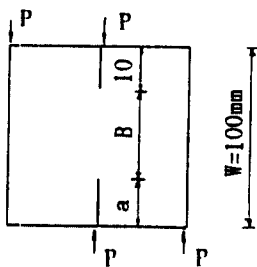
(f-4) Cramer와 Pugel⁽⁴⁶⁾



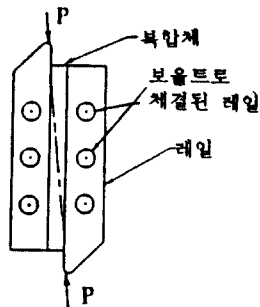
(g-1) Wakins⁽⁴⁷⁾



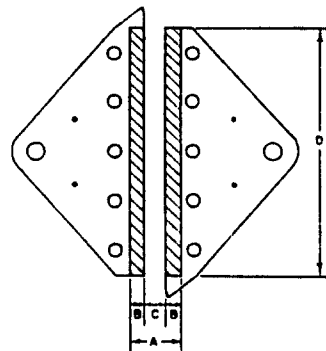
(g-2) Davies와 Margan⁽⁴⁸⁾



(g-3) Davies와 So⁽⁴⁹⁾

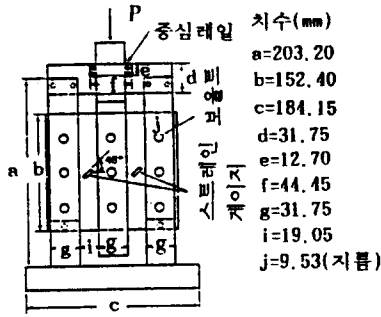


(h-1) Whitney⁽⁵⁰⁾와 Weisshaar⁽⁵¹⁾

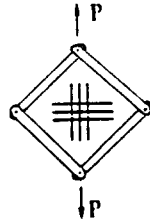


	in	mm
A	2.000	50.80
B	0.625	15.88
C	0.750	19.05
D	10.0	254

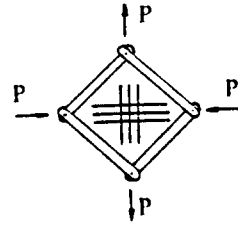
(h-2) O'Brien과 Reifsnider⁽⁵²⁾



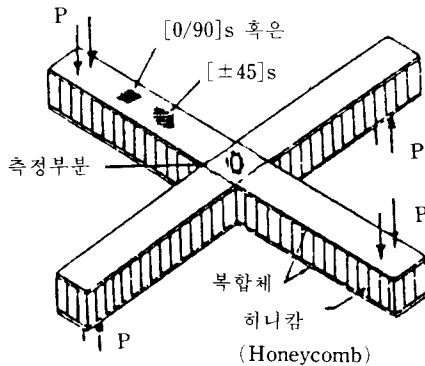
(h-3) Kim⁽⁵³⁾



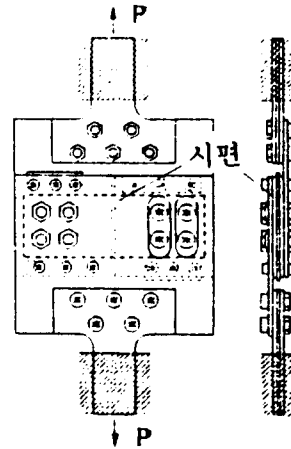
(i-1) Kuhn과 Peterson 등⁽⁵⁴⁾



(i-2) Bush와 Weller⁽⁵⁵⁾



(i-3) Petit⁽⁵⁶⁾와 Lenoe⁽⁵⁷⁾ 등



(j) Ichikawa와 Takamatsu

그림 1 순수 전단시편과 장치

여 하중을 가하면 인장 장치로서도 사용될 수 있다. 그림 1(h-3)과 같은 레일 전단 장치(three rail shear test)가 고안되었다.⁽⁵³⁾ 그림 1(i-1)과 (i-2)는 그림틀 전단장치(picture frame shear fixture)이며,^(54,55) 순수 전단력을 발생시키는 것이 어렵고 또 순수 전단력을 발생시키기 위해서는 시편과 틀을 연결시키는데 정밀한 보조장치가 필요하다. 그림 1(i-1)은 크기가 같은 인장력과 압축력에 의하여 시편내부에 순수전단력을 발생시키는 경우이고 그림 1(i-2)는 대각선 방향으로 인장력을 가하므로 그림틀에는 같은 크기의 전단력을 유발하여, 시편 내부에 순수 전단력이 발생하도록 한 것

이다. 그림 1(i-3)은 횡 샌드위치보 전단장치(cross-sandwich beam test)^(56,57)이며, 그림 1(i-3)과 같은 외력 조건에서는 그림 1(i-2)의 원리처럼 보의 교차지점에 같은 크기의 인장응력과 압축응력이 발생하므로 45° 방향으로는 순수 전단응력이 발생한다. 이 장치에 있어서 시편의 재료비는 많이 들고 시편을 가공하는 것이 어렵고 또 특수한 보조 하중장치가 필요하다. 고온 실험용 시편으로도 적합하지 않다. 그림 1(j)는 박판재의 파괴 인성치를 측정하거나 박판재에 순수전단력을 부가시킬 수 있는 하중 장치와 시편을 나타내고 있다.⁽⁵⁸⁾ 그림에서 보듯이 보조장치가 매우 복잡하다.

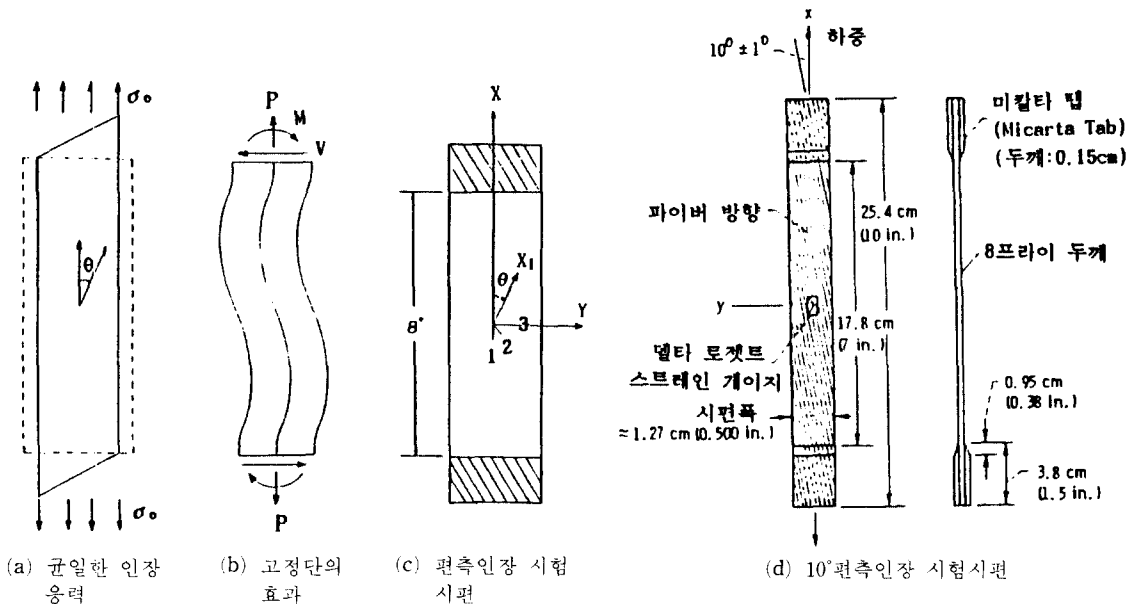


그림 2 편축인장시험

그림 2는 한 방향 복합체(unidirectional composite)의 전단성질(shear properties)을 측정하는 데에 사용되는 편축 인장시험(off-axis tension test)의 개념을 나타낸 것이다. 이 시험편은 이상적이고 가공하기 쉽고 특별한 장치가 필요없는 것처럼 보이지만, 실제로는 아무런 보조 장치를 사용하지 않고, 또 시험편 끝 부분에 구속장치가 없이, 한 방향 복합체에 단순인장을 가하면, 그림 2(a)처럼 변형이 된다. 그래서 응력은 일정하나 변형률은 일정하지 않다. 그리고 만약에 강체 클램프를 사용하여, 하중을 받는 복합체의 시험편 끝이 수평으로 유지되도록 구속한다면, 그림 2(b)처럼 전단력(shearing force= V)과 굽힘 모멘트(= M)가 발생하여 변형률 분포가 균일하지 않고, 시험편 그림(grip) 가까이 응력집중이 발생하므로, 편축인장 시험편을 사용하여 한 방향 복합체의 기본 물성치를 측정하는 것은 적당하지 않으므로, 아태와 같이 다양하게 발전되어 왔다.

편축 인장시험편(off-axis tension specimen)이 인장하중을 받을 때 인장과 전단의 상호관계

(extension-shear coupling)가 일반적으로 인장 시험편의 파이버(fiber) 방향과 하중 방향이 이루는 각도가 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 사이에서 가장 뚜렷하게 나타난다.⁽¹²⁾ 그러므로 복합체의 물성치를 측정하는데 10° 편축인장시험편⁽⁹⁾(ten-deg off-axis tension specimen)과 일반적인 편축인장시험편(off-axis tension specimen) 등을 사용하여 왔다. 그리고 응력집중과 불균일한 응력발생을 감소하기 위하여 시험편의 폭에 대한 길이 비를 12~15로 하여 사용하였다.⁽²⁾ 또 긴 테이퍼(taper)를 가진 보조 장치(tab)를 시험편 양쪽에 부착하는 것이 좋다고 제의하였다.^(59,60) 이러한 긴 테이퍼(taper)를 가진 보조 장치는 고정단 부분의 응력집중을 많이 감소시킨다. 그러나 제작하는데 시간이 많이 걸리고 비경제적이다. 그래서 Chang 등은 핀 고정 장치(pinned-end test frame)⁽⁶¹⁾를 제의하였다. 이 장치는 인장 시험편에 더 균일한 응력 상태를 발생시키고 또 응력집중을 감소시킨다. 그러므로 이 장치로써 더 정확한 재료의 성질을 얻을 수 있지만 특수한 하중장치와 시험편을 조정하는데 많은 주의가

필요하다. 그리고 Rizzo는, 핀 고정 장치가 시편의 파괴와 응력집중을 더 크게 발생시키는 원인이 된다고 유한요소법으로 확인하였다.⁽⁴⁾ 그리고 편축시편의 단(端) 구속조건(end-constraints)때문에 응력이 균일하게 작용하지 않으므로 45° 편축 인장 시험편(45° off-axis tension specimen)이 제의되었다.⁽¹⁰⁾ 그리고 최근에는 실리콘 고무 母材(silicon-rubber matrix)에 유리섬유(fiber-glass fabrics)를 박아 만든 보조장치(tab)를 각 시편에 접착하고 강체 그리프(rigid grips)를 각 편축 복합체 시험편(off-axis composite specimen)에 고정하여 인장력을 작용시키면 응력상태가 균일하고 응력집중이 거의 없는 상태를 만들 수 있다고 주장하였다.⁽¹²⁾ 그러나 이 경우에도 보조장치(tab) 재료 제작과 가공 문제에서 어려울 뿐만 아니라 인장 하중을 받는 시편에는 인터라미나(interlaminar)의 전단응력,⁽⁶²⁾ 가장자리효과(edge-effect)⁽⁶³⁾ 그리고 각 프라이(ply) 사이의 인터라미나의 전단변형⁽⁶⁴⁾ 등이 존재하므로 정확한 물성치와 균일한 응력분포를 얻는다는 것은 매우 어렵다. 특히 편축 인장장치는 임의의 방향을 가진 프라이(ply)를 많이 가진 복합체나 불규칙한 방향성을 가진 짧은 파이버를 가진 복합체 등에는 거의 적용될 수가 없다. 그리고 그림 2(c)는 편축인장 시험기로서 변형률을 측정할 때 사용되는 스트레인 게이지 위치(1, 2, 3), 재료의 주축 방향 x_1 과 x_2 등을 나타낸 것이다. 그림 2(c)에서 보듯이 재료의 주축 x_1 에서 θ 만큼 회전한 방향에서 단순 인장 응력 σ_{xx} 가 작용할 때 재료의 주축 평면에 있어서 τ_{12} 와 γ_{12} 는 식 (1)과 (2)로써 나낼 수 있다.

$$\tau_{12} = -\frac{1}{2}\sigma_{xx}\sin 2\theta \quad (1)$$

$$\gamma_{12} = (\epsilon_{yy} - \epsilon_{xx})\sin \theta + \gamma_{xy}\cos \theta \quad (2)$$

각 스트레인 게이지 (1, 2, 3)에서 측정되어지는 변형률을 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 이라 하면, $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \tau_{xy}$ 는 식 (3)으로써 구할 수 있다.

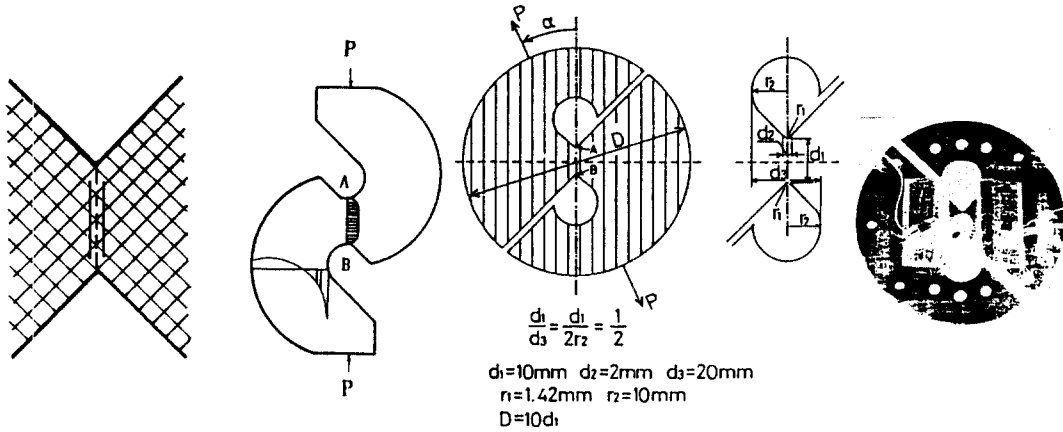
$$\epsilon_{xx} = \epsilon_1, \quad \epsilon_{yy} = \epsilon_3, \quad \gamma_{xy} = 2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3 \quad (3)$$

그림 2(c)처럼 스트레인 게이지가 접착된 상태에서 x 방향으로 단순 인장응력 σ_{xx} 가 작용할 때, 구하여지는 τ_{12} 와 이때 스트레인 게이지 (1, 2, 3)에서 측정되어지는 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 과 식 (3)을 이용하여 식 (2)에서 구한 γ_{12} 로, 식 (4)처럼 복합체의 G_{12} 를 간접적으로 구할 수 있다.

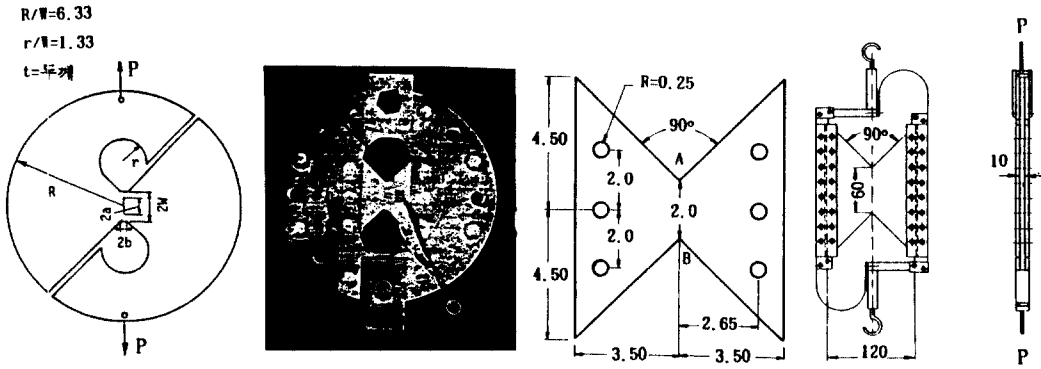
$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} \quad (4)$$

이러한 관계식은 등방성체나 직교이방성체의 가로 탄성계수 G 나 G_{12} 를 구할 때 사용될 수 있다. 그림 2(d)는 10° 편축시편의 크기와 보조 장치(tab)의 형상 등을 한 예로서 나타낸 것이다. 이것을 참조하여 15° 편축시편, 45° 편축시편 등의 시편구조를 알 수 있다. 편축 인장시편의 경우에서도 서론에 제시한대로 단점이 매우 많다.

그림 3은 Arcan이 고안한 순수 전단력 시편 그리고 Arcan의 순수 전단력 시편의 개념을 이용한 시편과 하중장치를 각각 나타내고 있다. 그림 3(a)와 (b)는 Arcan과 Goldenberg가 고안한 Arcan 개념의 최초 순수전단력 시편이며 주로 프라스틱의 전단 강성을 측정하는데 사용되었다. 그리고 그림 3(a)와 (b)는 Arcan의 순수전단 개념이 최초로 적용된 시편이고⁽⁶⁵⁾ 그림 3(b)의 S형 시편이라고도 한다.⁽⁶⁶⁾ 이것을 시초로 하여 Arcan의 순수전단시편의 기하학적 형상이 구체적으로 규명된 것이 그림 3(c)와 같다.⁽²⁰⁾ 그리고 그림 3(c)와 같은 Arcan의 원형 전단시편(Arcan circular disk)은 그림 3(d)처럼 시편 중심부와 외부 원형 고정장치로 구분되어 발전되었다.⁽²¹⁾ 또 Arcan 등이^(22~25) 법선력(mode I 하중), 전단력(mode II 하중) 그리고 혼합 모드 상태의 하중을 발생시킬 수 있는 Arcan 원형 전단시편을 그림 3(c)처럼 개조하고, Banks-Sills⁽²⁵⁾ 등은 Arcan 원형전단 시편을 개조한 그림 3(e)를 유한요소법으로 모드 II (mode II) 상태의 응력 확대계수를 구하는 데에 모델로 사용하였다.



(a) Arcan과 Goldenberg⁽⁶⁵⁾ (b) Arcan과 Nicolau 등⁽⁶⁶⁾ (c) Arcan과 Hasin 등⁽²⁰⁾ (d) Arcan⁽²⁰⁾



(e) Banks-Sills와 Arcan 등⁽²⁵⁾ (f) Yen과 Craddock 등⁽²⁰⁾ (g) Herbert Weber⁽⁶⁷⁾

그림 3 아르칸 원판 전단시험 (Arcan circular disk shear test : A,B,C)

Yen⁽²⁶⁾ 등은 Arcan원형 전단 시험을 그림 3(f)처럼 완전 분리형으로 개조하였다. 또 Herbert Weber⁽⁶⁷⁾는 Arcan의 그림 3(a)와 같은 시험과 하중장치를 조립하여 그림 3(g)와 같은 순수 전단장치를 고안하였다.

그림 3(f)와 그림 3(g)와 같은 순수 전단장치에 있어서는 시험 가공은 용이하나 하중장치와 시험을 조립하는 데에 쓸데없는 시간이 허비된다. 그리고 하중장치를 가공하는 데도 상당한 정도가 필요하다. 또 Arcan 원형 전단 시험을 가공하는 데에 너무 많은 시간이 허비되고 전단력이 발생하는 영역은 보편적으로 어

느 시험보다도 좁다.

아이오시페스크(Iosipescu)의 개념을 이용한 시험은 보편적으로 단순하고 가공하기 쉽고 그리고 전단강도(shear strength)와 전단강성(shear stiffness) 등을 동시에 측정하는 것이 가능하므로 1960년 초반 Rumania인 Nicoale Iosipescu⁽¹²⁾가 그림 4(a)와 같은 순수 전단장치를 고안한 이래 이 장치는 순수 전단장치로서 유용하게 사용되어 왔다. 이 장치(Iosipescu shear test)는 등방성체와 이방성체 등의 여러 가지 재료의 전단 성질을 측정하는 데도 사용되었다. Iosipescu는 시험 내부의 전단 응력

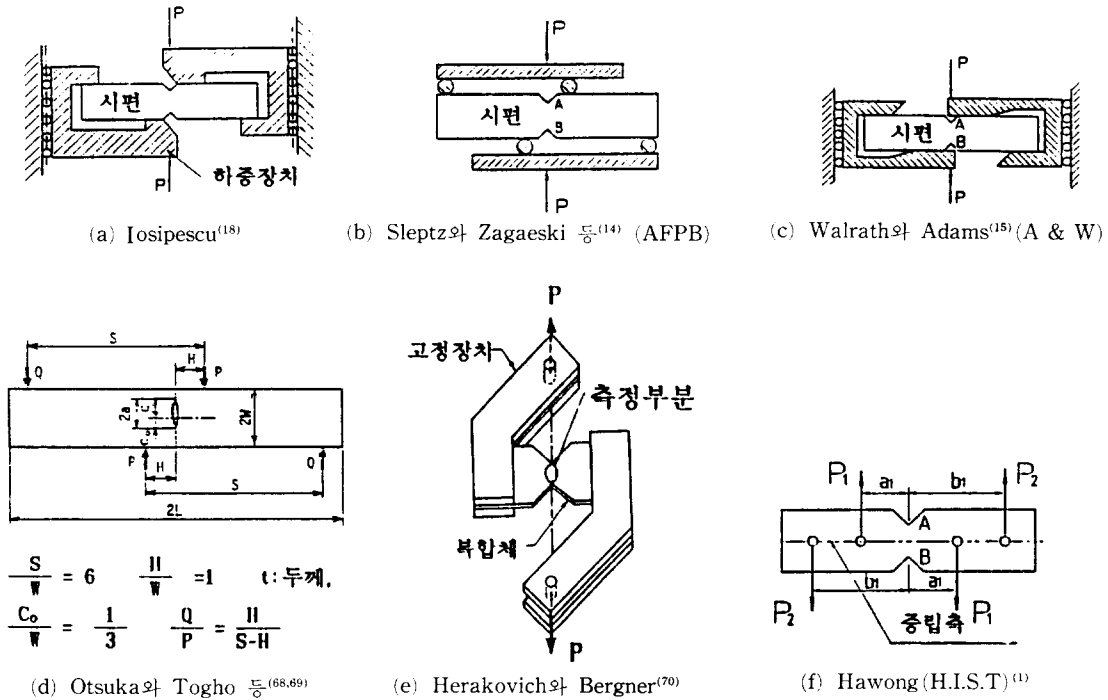


그림 4 아이오시페스크의 순수 전단 시편 및 장치

분포(포물선)가 등분포가 되도록 하기 위하여 노치의 각도를 90°로 하고 노치면의 방향을 최대 및 최소 법선응력이 생기는 방향으로 하였다. 이것은 법선응력에 의한 응력집중을 제거하고, 노치 뿌리축(notch root axis) 방향으로 전단응력 분포가 균일하도록 하기 위한 것이다. 그리고 또 이러한 사실은 시편의 전단강도 실험으로도 확인되었다. 그리고 Slepetz⁽¹⁴⁾ 등은 Iosipescu의 전단장치의 하중장치(loading fixture)만 그림 4(b)처럼 개조하였다 그리고 Adams와 Walrath⁽¹⁵⁾도 Iosipescu의 전단장치인 그림 4(a)의 하중 장치만 조금 개조하여 그림 4(c)처럼 개조하였다(A & W 장치). 이 방성체에서 파이버 방향이 Iosipescu의 전단시편의 축 방향과 일치하거나 수직인 경우에도 등방성체처럼 노치뿌리축 사이의 전단 응력분포가 균일하다는 것이 확인되었다.⁽¹⁸⁾ 그리고 Slepetz⁽¹⁴⁾와 Adams⁽¹⁵⁾ 등에 의하여 변천된

Iosipescu의 전단장치는 Iosipescu의 시편 자체에 대한 변화는 없고 단지 하중을 가하는 보조장치만 변화되어 왔다. 그림 4(b)에서 보듯이 AFPB 장치에서는 하중을 가하기에 어렵고 또 거리 a_1 와 b_1 를 조정하기가 어렵다. 또 A & W 장치에서는 a_1 과 b_1 를 조정할 필요는 없지만, 시편과 하중을 주는 보조장치의 접촉면적이 커서 노치의 코너 부분과 하중 장치가 접촉하므로 국부 응력집중이 발생한다. 그림 4(d)는 Iosipescu 전단 시편의 개념을 모드-II(mode II) 상태의 파괴역학을 수치해석으로 연구하는데 이용한 경우의 시편의 형태와 크랙관계를 나타낸 것이다.⁽⁶⁸⁾ 크랙이 내부크랙 이외에도 편축(edge)크랙⁽⁶⁹⁾, 양편축 크랙⁽⁶⁸⁾, 내부 크랙⁽⁶⁸⁾ 등에도 이용되었다. 이 경우의 모든 경우에서 시편의 가장자리 중앙에 90° 노치가 없다. 그림 4(e)는 Iosipescu 전단시편의 개념을 이용한 이중 V-노치(double V-

notched) 시편을 나타내고 있다. 이중 V-노치 시편과 고정 장치는 그림 4(e)처럼 볼트나 클램프로 고정되거나 접착되어 있다.⁽⁷⁰⁾ 그리고 Kumosa와 Hull⁽⁷¹⁾은, Iosipescu시편의 전단영역 응력분포는 복합체의 물성치와 기하학적 조건에 영향을 많이 받고, 응력확대계수 K_I 과 K_{II} 도 이방성비의 크기에 따라 변화된다고 연구하였다. 또 수치해석과 실험으로 혼합 모드 강성 계수(mixed mode toughness)를 임계 응력확대계수와 임계에너지 해방률로 측정하였다. 그리고 Iosipescu는 노치 깊이는 그 비가 22.5%가 가장 적당하다고 주장하였다.⁽¹⁸⁾ 그래서 본 저자는 Iosipescu의 시편과 거의 같게 하고 그 비는 20%로 하였다. 그리고 하중을 주는 보조장치와 하중을 주는 방법을 변화하였다. 지금까지는 Iosipescu의 개념을 이용한 전단장치에 하중을 가하는 방법은 시편의 테두리에 압축하중을 가하였지만 본 연구자는 중립축에 인장하중을 가하였다. 중립축의 길이변화가 없도록, 즉 중립축이 중립축 역할을 하도록 하기 위한 것이다. 또 하중을 주기가 쉽고 거리 a_1 과 b_1 을 조절할 필요가 없도록, 또 될 수 있는 한 노치 코너 부분과 그리고 하중 지점 등에 가능한 한 응력 집중이 적도록, 기존 Iosipescu시편을 그림 4(f)처럼 개조하고 또 하중 작용 지점의 핀 구멍의 직경도 응력 집중이 발생하지 않도록 적게 하였다. 본 저자가 고안한 그림 4(f)를 황 아이오시페스크 전단시험 장치(H.I.S.T : hawong iosipescu shear test)라 하였다. 그리고 그림 4(b), (d) 그리고 (f)의 장치에서 A-B부분에 발생하는 평균 전단응력은 식 (5)와 같고 그림 4(a), (c), (e)의 장치에서 발생하는 평균 전단응력은 식 (6)과 같다. ($P_1 + P_2 = P$)

$$\tau_{AB} = \frac{P(b_1 - a_1)}{A_o(a_1 + b_1)} = \frac{P_{AB}}{A_o} \quad (5)$$

$$\tau_{AB} = \frac{P}{A_o} = \frac{P_{AB}}{A_o} \quad (6)$$

여기서, A_o 는 A-B 사이의 단면적이다. 그림 3(c)와 같은 A,C,D. 시편의 A-B에 대하여 하

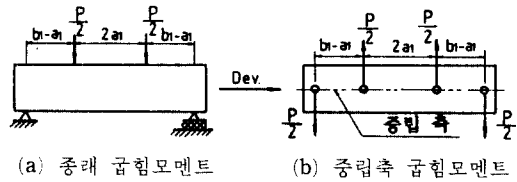


그림 5 순수굽힘모멘트

중이 α 만큼 경사져 작용할 때 A-B면에 발생하는 법선응력과 전단응력은 각각 식 (7)과 식 (8)과 같다.

$$\sigma_{AB} = \frac{P}{A} \sin \alpha \quad (7)$$

$$\tau_{AB} = \frac{P}{A} \cos \alpha \quad (8)$$

그리고 A.C.D. 시편은 하중 각도가 $|\alpha| < 45^\circ$ 범위에서만 유효하다고 한다.⁽¹⁹⁾ 그리고 H.I.S.T와 A.C.D. 등은 등방성체나 이방성체의 응력프린지치(f, f_{12})와 물성치(G, G_{12})등을 측정하는데도 사용될 수 있다.

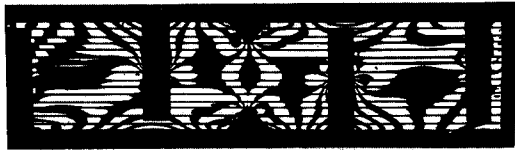
2.2 순수 굽힘 모멘트 장치

순수 굽힘 모멘트의 장치도 I.S.T가 H.I.S.T로 개조된 이유와 같은 이유로서 그림 5(a)에서 그림 5(b)로 개조하였다. 즉 순수 굽힘 모멘트를 받는 보의 중립축은 하중을 받기전이나 후에도 길이 변화가 없다는 조건을 만족하도록 하기 위하여 그림 5(b)처럼 하중 작용점의 위치만 변경하였다. 그리고 원래 사용되어 왔다는 굽힘 모멘트 시편에서 하중은 가장자리(edge)에 작용하기 때문에 본 연구에서는 가장자리 굽힘 모멘트(E.B.M : edge bending moment)라고 부른다.

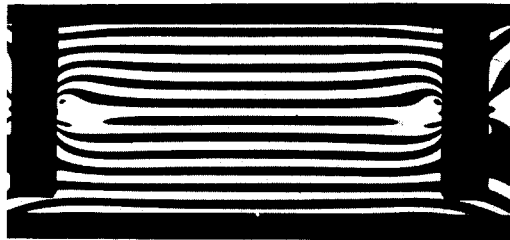
본 연구에서 개조된 굽힘모멘트 시편의 하중이 중립축 선상에 작용하므로 중립축 굽힘모멘트(neutral bending moment)라 칭하고 N.B.M.이라 약칭한다.

3. H.I.S.T와 N.B.M 등의 유효성 확인

본 연구자가 고안한 순수 전단력 시편과 순



(a) 황 아이오시세스크 전단력 시편(H.I.S.T.)



(b) 중립축 굽힘 모멘트(N.B.M.)

그림 6 황 아이오시세스크 전단시편 장치와 중립축굽힘 모멘트 장치

수 굽힘모멘트 시편과 각 하중장치들 그리고 각 시편과 각 장치를 사용하여 얻은 등색선 사진 등을 각각 그림 6에 나타내었다.

그림 6의 등색선 무늬에서 보듯이 본 연구자가 고안한 장치들이 순수 전단력 장치와 순수 굽힘 모멘트장치로서 충분한 기능을 발휘한다는 것을 알 수 있다.

3.1 H.I.S.T. 장치의 유효성

H.I.S.T의 노치뿌리 사이에 전단 응력분포가 균일한가를 확인하기 위하여 노치뿌리 사이에

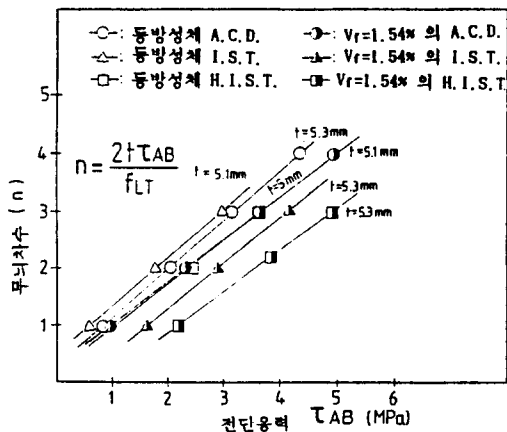


그림 7 하중과 무늬차수와와의 관계

서 발생하는 무늬차수와 하중관계 그리고 노치 뿌리 사이의 도심에 접착된 스트레인 게이지에서 얻은 변형률 상태, 노치 뿌리 사이 부분 (AB부분)의 광탄성 분포, 그리고 유한요소법에 의하여 얻은 주응력차의 등고선 등이 각각 그림 7, 8 등에 표시되었다.

그림 7에서 보면 등방성체나 이방성체의 H. I.S.T.에서 얻은 τ_{AB} 와 n_{AB} 의 관계는 A.C.D., I.

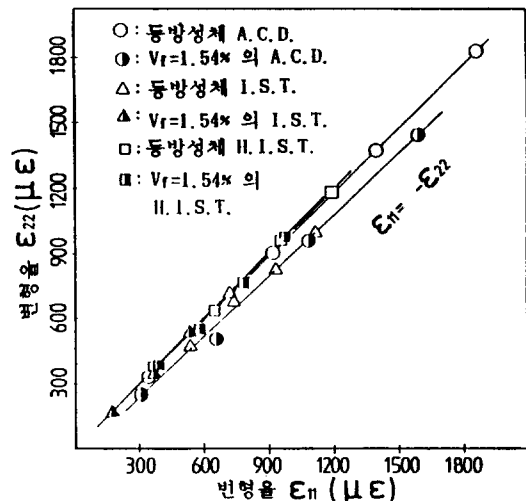


그림 8 등방성체와 직교 이방성체에 있어 주변형률 ϵ_{11} 과 ϵ_{22} 와의 관계

S.T. 등에서 얻은 τ_{AB} 와 n_{AB} 의 관계보다도 직선적인 관계를 나타낸다. 그림 8에서 보듯이 하중을 받는 A.C.D., I.S.T. 그리고 H.I.S.T.에서 발생하는 전단 변형률에서도 등방성체나 이방성체(P_f : 파이버피치, d_f : 파이버 직경)에 관계없이 H.I.S.T.에서 얻은 실험치가 A.C.D.와 I.S.T. 등에서 얻은 실험치보다도 더 직선적인 관계를 나타낸다. 즉 ϵ_{11} 과 ϵ_{22} 의 절대치는 거의 서로 같다. 그러므로 물성치 G와 G_{12} 를 측정할 때도 어느 것보다도 H.I.S.T.를 쓰는 것이 유용하다.

그림 9에서 보듯이 그림 9(a), (b)와 (c)의 무늬형태는 I.S.T.시편에 유한요소법을 적용하여 얻은 전단응력의 등고선(그림 9(d)) 모양과 비슷하다. 전단 응력분포가 바로 등색선 무늬 분포와 같기 때문에 그림 9의 등색선 무늬와 유한요소법으로 무한 등고선과 비교될 수 있다. 그 중에서도 H.I.S.T.에서 얻은 무늬 형태(그림 9(c))가 유한요소법에 의하여 얻어진 전단응력 등고선과 거의 같다.

그림 10은 파이버의 직경이 0.5인 직교 이방성체(C.F.E.C : copper fiber epoxy composite)로 된 I.S.T.와 H.I.S.T.시편이 순수 전단력을 받을 때 I.S.T.와 H.I.S.T.의 AB선상에 존재하는 원공주위에 발생하는 실험적 무늬차수와 이론적 무늬차수를 나타낸 것이다. H.I.S.T.에서 얻은 실험치 대부분은 무한판의 이론치보다도 크고 무한판의 이론치와 아주 유사한 경향을 나타내고 있다. 그리고 I.S.T.에서 얻은 실험치는 무한판의 이론치보다도 큰 경우도 있고 적은 경우도 있다. 그리고 이론치와 유사한 점은 H.I.S.T.에서 얻은 실험치보다는 못하다. 그림 10을 통하여 보건데 응력집중이 발생하는 경우에도 H.I.S.T.의 실험장치가 I.S.T.의 실험장치보다 더 유효하다. 그리고 H.I.S.T.나 I.S.T. 시편에서 파이버 방향은 노치뿌리 사이인 AB와 수직이다. 이론적으로는 AB 방향이 섬유(fiber) 방향에 수직이거나 평행한 경우에도 서로 같아야 한다. 그러나 어떤 연구자는 섬유(fiber) 방향이 AB에 수직인 경우의 전단 응



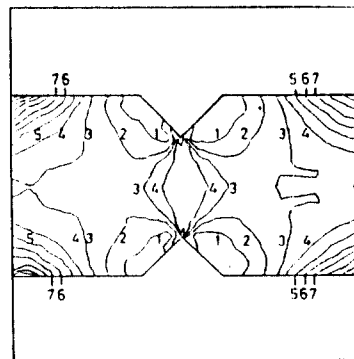
(a) A.C.D.의 등색선 무늬($P_{AB}=411.6N$)



(b) I.S.T.의 등색선 무늬($P_{AB}=507.2N$)



(c) H.I.S.T.의 등색선 무늬($P_{AB}=513N$)



(d) I.S.T.의 전단응력 등고선
(깊이에 대한 노치 길이비: 22.5%)

그림 9 등색선과 유한요소법에 의한 전단응력의 등고선과의 비교

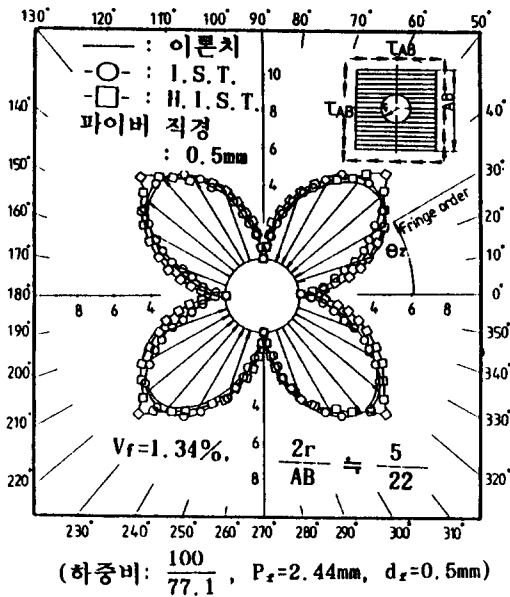


그림 10 순수 전단력을 받는 직교 이방성체의 원공 주위의 응력분포 (하중비: $\frac{100}{77.1}$ $P_r=2.44\text{mm}$, $d_r=0.5\text{mm}$)

력분포는 섬유 (fiber) 방향이 AB에 평행한 경우보다도 약 20% 증가한다고 주장하였다.⁽¹⁸⁾ 일반적으로 순수전단력이 작용하는 경우의 응력집중을 구하려면 A.C.D.시편보다도 H.I.S.T.나 I.S.T. 등의 시편을 사용하는 것이 좋고 I.S.T.시편보다도 H.I.S.T.시편을 사용하는 것이 좋다. 물성치와 응력프린치기를 측정할 때는 A.C.D.시편이나 H.I.S.T.시편이 좋다. 그리고 적은 하중에서도 A.C.D.시편이 유효하고, 하중이 큰 경우에는 H.I.S.T.시편이 유효하다. 그리고 A.C.D.시편의 기하학적 조건은 서로 관련이 되어 있으므로, AB 길이를 길게 하면 원판의 직경이 크게 되므로, A.C.D.시편이 하중을 받을 때는 A.C.D.시편에 비틀림이 발생하고, 시편을 제작하는 데는 너무 많은 시간이 걸리고 재료의 손실이 크다. 그리고 최근에는 이러한 것을 보완하기 위하여 A.C.D. 전단 시험장치는 분리형으로 발전되었다.⁽²⁶⁾ 그러나 이러한 장치도 각각 그들의 결점을 갖고 있다. 그리고 I.S.T. 전단장치 경우에는 하중 지지점

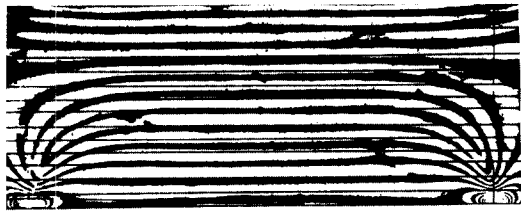
이 보의 가장자리 이므로 하중을 가하기가 어려운 뿐만 아니라 시편을 고정하기가 어렵고 정확한 하중점에 하중을 가하기가 어렵다. 또 하중 작용점이 전단응력 분포에 영향을 준다. 그러나 H.I.S.T. 전단 시험장치 경우에는 하중을 가하기가 쉽고 또 시편을 고정하기도 쉽다. 그리고 하중 작용점이 전단 응력 분포에 영향을 거의 주지 않는다. A.C.D. 시편의 경우에는 전단 응력분포가 균일하게 발생하는 면적이 적는데 비하여, H.I.S.T.의 경우에는 전단 응력 분포가 균일하게 발생하는 면적은 대체로 크다. H.I.S.T. 전단 시험장치는 어떠한 전단 시험장치보다도 우수하다.

3.2 N.B.M. 장치의 유효성 확인

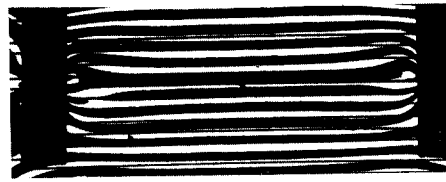
종래의 순수 굽힘모멘트의 하중장치인 그림 5(a)의 E.B.M.을 사용하여 얻은 광탄성 무늬와 본 연구자가 개조한 순수 굽힘모멘트의 하중장치인 그림 5(b)의 N.B.M.을 사용하여 얻은 광탄성 무늬 등은 그림 11에 나타내었다.

그림 11(a)와 (b)는 각각 이방성체가 종래의 순수 굽힘모멘트와 본 연구자가 고안한 순수 굽힘모멘트 장치를 사용하여 얻은 등색선들을 나타내고, (c)와 (d)는 고온 상태($T=130^{\circ}\text{C}$)에서 각각의 실험장치에서 얻은 등색선을 나타낸다. 이러한 등색선을 통하여 보전대, 즉, 중립축을 기준으로 하고 상하 무늬차수의 대칭성을 기준으로 하여 판단 하건대, 그림 11에서 보듯이 등방성체나 이방성체에 관계없이, 그리고 고온이나 상온에 관계없이 종래의 순수 굽힘모멘트 장치보다도 본 연구자가 고안한 장치가 순수 굽힘 모멘트 장치로서 유효하다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 굽힘응력은 중립축을 기준으로 상하 대칭이며 또 순수굽힘 모멘트를 받는 경우의 굽힘응력이 바로 주응력이고, 다른 하나의 주응력은 영(0)이 된다. 그리고 무늬 차수가 바로 주응력차와 직접적인 관계가 있기 때문이다.

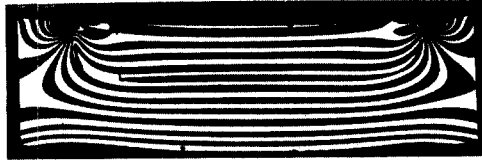
그림 12는 각각 등방성체와 이방성체가 순수 굽힘모멘트를 받을 때 각 보의 중립축선상에



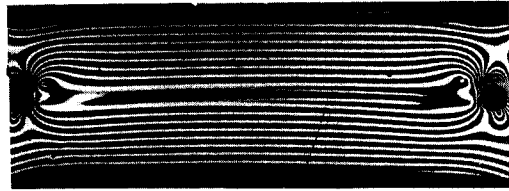
(a) E.B.M.의 등색선(직교 이방성체: C.F.E. C.)



(b) N.B.M.의 등색선(직교이방성체: C.F.E. C.)



(c) E.B.M.의 등색선 무늬(에폭시, $T = 130^{\circ}\text{C}$)



(d) N.B.M.의 등색선 무늬(에폭시, $T = 130^{\circ}\text{C}$)

그림 11 순수굽힘 모멘트를 받는 보의 등색선 무늬

존재하는 원주상의 응력분포를 나타낸 것이다. 이러한 그림에서 보듯이 N.B.M.시편이나 E.B.M.시편에서 얻어지는 실험치는 어느 것이나 무한판의 이론치와 유사한 경향을 가지며 비슷하다. 그러나 N.B.M.시편에서 얻은 실험치가 E.B.M.시편에서 얻어지는 실험치보다도 무한판의 이론치와 아주 유사한 경향을 나타내고 있다. 그림 11과 그림 12 등을 통하여 보건데 무늬의 대칭성면 그리고 무한판의 이론치와 실험치의 비교면에서도 등방성체나 이방성체의 재료에 관계없이 N.B.M.장치가 E.B.M.장치보다도 순수굽힘 모멘트 장치로서 우수하다는 것을 알 수 있다. N.B.M.장치를 사용하면 E.B.M.장치보다도 하중을 가하기가 쉽고 또 시편을 고정시키기도 쉽다. 그리고 곡선보에 순수굽힘 모멘트를 균일하게 가하고자 할 때는 N.B.M.의 시편을 쓰면 가능하리라고 추론할 수도 있다. 또 H.I.S.T.장치와 N.B.M.장치들을 더욱더 보강하면 순수 전단력이나 순수 굽힘모멘트의 피로하중을 받는 경우의 파괴역학이나 정하중의 파괴역학을 실험적으로 연구하는데 H.I.S.T.장치와 N.B.M.장치들의 개념이 유효하게 사용될 수 있다.

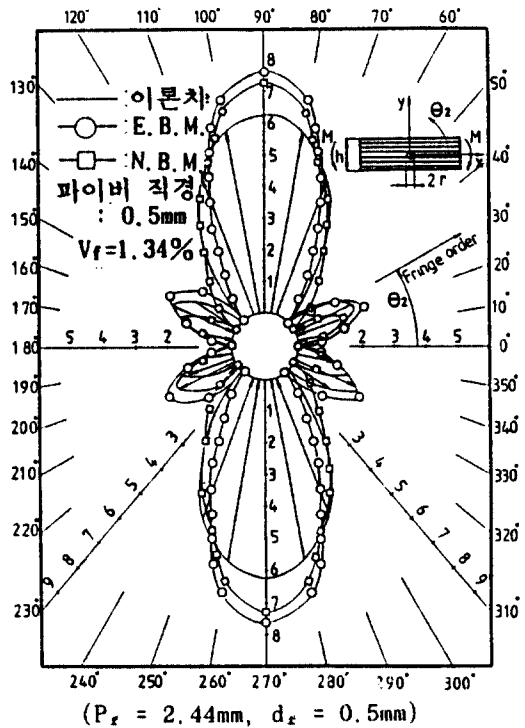


그림 12 순수굽힘 모멘트를 받는 직교 이방성체의 원공 주위의 응력분포($P_r = 2.44\text{mm}$, $d_r = 0.5\text{mm}$)

4. 맺음말

하중 종류 중에서 가장 기본적인 하중 중의 하나인 순수 전단력과 순수 굽힘 모멘트를 발생시키고자 할 때는 아래와 같은 장치를 사용하는 것이 좋다.

1) 등방성체나 이방성체의 횡 전단계수 (G_{12})와 횡 응력 프린지치 (f_{12}) 등을 측정하고자 할 때, 또는 모드 II (mode II) 상태의 파괴역학을 연구하고자 할 때는 그림 1, 그림 2, 그림 3 그리고 그림 4 등에 제시된 것 중에서 적당한 것을 사용할 수 있다. 그러나 순수 전단력이 발생하는 면적이 크고, 순수 전단력을 정확하고 균일하게 발생시키고자 할 때, 각 재료의 전단 물성치 (shear properties) 측정, 모드 II (mode II) 상태의 파괴역학을 연구하고자 할 때는 본 연구자가 고안한 H.I.S.T. 장치를 이용하면 편리하다.

2) 직선 보에 순수 굽힘 모멘트를 균일하고 정확하게 가하고자 할 때는 N.B.M. 장치를 사용하는 것이 좋다. 또 N.B.M. 장치는 어느 보의 장치보다도 곡선보나 변형이 큰 보에도 더 정확하고 균일하게 순수 굽힘 모멘트를 발생시킬 수 있다.

참고문헌

- (1) Hawong, J.S., 1990, "The Basic Study on the Composite Material for Orthotropic Photoelastic Experiment," Ph. D. Dissertation, Kanto-Gakuin Univ., Yokohama, Japan, pp. 81~130.
- (2) Pagano, N.J. and Halpin, J.G., 1968, "Influence of and Constraint in the Testing of Anisotropic Bodies," J. Composite Materials, Vol. 2, No. 1, pp. 18~31.
- (3) Edward, M. W. and Rodney, L. T., 1968, "Off-Axis Test of a Composite," J. Composite Materials, Vol. 2, No.4, pp.523~526.
- (4) Rizzo, R.R., 1969, "More on the Influence of End Constraints on Off-Axis Tensile Tests," J. Composite Materials, Vol. 3, pp. 202~219.
- (5) Rechards, G.L., Airhmart, T.P. and Ashton, J.E., 1969, "Off-Axis Tensile Coupon Testing," J. Composite Materials, Vol. 3, pp. 586~589.
- (6) Rosen, B.W., 1972, "A Simple Procedure for Experimental Determination of the Logitudinal Shear Modulus of Unidirectional Composite," J. Composite Materials, pp. 552~554.
- (7) Sims, D.F., 1973, "On-Plane Shear Stress-Strain Response of Unidirectional Composite Materials," J. Composite Materials, Vol. 7, pp. 124~128.
- (8) Hahn, H.T., 1973, "A Note on Determination of the Shear Stress Strain Response of Unidirectional Composites," J. Comp. Materials, Vol. 7, pp. 383~386.
- (9) Chamics, C.C. and Sinclair, J.H., 1976 (1977), "Ten-deg. Off-Axis Test for Shear Properties in Fiber Composites," NASA Tech. Note, No. NASA TND-8215 (Experimental Mechanics, Vol. 17, No. 9, pp. 339~346.
- (10) Pindera, M.J. and Herakovich, C.T., 1986, "Shear Characterization of Unidirectional Composites with the Off-Axis Tension Test," Exp. Mech., pp. 103~112.
- (11) Cron, S.M., Palazotto, A.N. and Sandhu, R.S., 1988, "The Improvement of End-Boundary Conditions for Off-Axis Tension Specimen Use," Exp. Mech. pp. 14~19.
- (12) Sun, C.T. and Berreth, S.P., 1988, "A New End Tab Design for Off-Axis Tension Test of Composite Materials," J. of Comp. Materials, Vol. 22, pp. 766~779.
- (13) Iosipescu, N., 1967, "New Accurate Procedure for Single Shear Testing of Metals," J. Materials, 2(3) pp. 537~566.

- (14) Sleptz, J. M., Zagaeski, T.F. and Novello, R.F., 1978, "In-Plane Shear Test for Composite Materials," Report No. AMMRC TR 78-30, Army Materials and Mechanics Research Center, Watertown, MA.
- (15) Walrath, D.E. and Adams, D.F., 1983, "The Iosipescu Shear as Applied to Composite Materials," *Exp. Mech.* pp. 105~110.
- (16) Otsuka, A., Tohgo, K., Kiba, T. and Yamada, S., 1984, "Mode II Fatigue Crack Growth Characteristics and Mechanism in Aluminum Alloy 7ND-T4 Weldments under Mode II Loading," *Advances in Fracture Research, Proc. ICF6, Vol.3, S.R. Valluri et al, Eds., Pergamon, pp. 1671~1678.*
- (17) Mircea, A., 1984, "The Iosipescu Shear Test as Applied to Composite Materials," *Discussion, Exp. Mech., pp. 66~67.*
- (18) Sullivan, J.L., Kao, B.G. and Oene, H. V., 1984, "Shear Properties and a Stress Analysis Obtained from Vinyl-Ester Iosipescu Specimens," *Exp. Mech., pp. 2223~2232.*
- (19) John, L. S., 1988, "The Use of Iosipescu Specimens," *Exp. Mech., pp. 326~328.*
- (20) Arcan, M., Hashin, Z. and Voloshin, A., 1978, "A Method to Produce Uniform Plane Stress State with Applications to Fiber-Reinforced Materials," *Exp. Mech., pp. 141~146.*
- (21) Arcan, M., 1973, "A New Method for the Analysis of Mechanical Properties of Composite Materials," 3rd Int. Congr. Exp. Mech., Los Angeles.
- (22) Banks-Sills, L., Arcan, M. and Bui, H.D., 1983, "Toward a Pure Shear Specimen for K_{IIc} Determination," *Int. J. Fract. 22(1), R9-R14.*
- (23) Arcan, M. and Banks-Sills, L., 1982, "Mode II Fracture Specimen-Photoelastic Analysis," *Proc. 7th Int. Conf. Exper. Stress Anal., Haifu Israel pp. 187~201.*
- (24) Banks-Sills, L., Arcan, M. and Bortman, Y., 1984, "A Mixed Mode Fracture Specimen for Mode II Dominant Deformation," *Eng. Fract. Mech., Vol. 20, No.1, pp. 145~157.*
- (25) Banks-Sills, L., Arcan, M. and Gabay, H., 1984, "A Mode II Fracture Specimen Finite Element Analysis," *Eng. Frac. Mech., Vol. 19, No. 4, pp. 739~750.*
- (26) Yen, S.C., Craddock, J.N. and Teh, K.T., 1988, "Evaluation of a Modified Arcan Fixture for the In-Plane Shear Test of Materials," *Experimental Techniques, pp. 22~25.*
- (27) Feldman, A., Tasi, J. and Stany, D. A., 1966, "Experimental Determination of Stiffness Properties of Thin-Shell Composite Cylinders," *Experimental Mechanics, Vol.8, pp. 385~394.*
- (28) Pagana, N.J. and Whitney, J.M., 1970, "Geometric Design of Composite Cylindrical Characterization Specimens," *J. Comp. Materials, 4, pp. 538~548.*
- (29) Srinath, L.S., Murthy, S. N. and Hareesh, T.V., 1983, "Determination of Stress-Intensity Factors for Cracks in Tubes Under Torsion," *Exp. Mech., pp. 262~267.*
- (30) Adams, D.F. and Thomas, R.L., 1969, "The Solid-Rod Torsion Test for the Determination of Unidirectional Composite Shear Properties," *Textile Res. J., 39(4), pp. 339~345.*
- (31) Wu, E.M., 1967, *Journal of Applied Mechanics, 12, pp. 967~974.*
- (32) Richard, A.H., 1983, *Bruchvorgänge bei Mixed Mode Beanspruchung Von Rissen, VDI Reports No.480, pp.69~72.*
- (33) Williams, J.G. and Birch, M. W., 1976, "In Cracks and Fracture ASTM STP 601, American Society of Testing and Materials,

- pp. 125~137.
- (34) Bergner, H.W., Davis, J.G. and Herakovich, C.T., 1977, "Analysis of Shear Test Methods for Composite Laminates," VPI-E-77-14, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va ; also NASA CR152704.
- (35) Zhang, S. and Leech, C.M., 1986, "FEM Analysis of Mixed Mode Fracture of CSM-GRP," Engineering Fracture Mechanics, Vol.23, No.3.
- (36) Raju, K. K., 1981, "On the Sliding Mode Stress Intensity Factor for a Three-Point Bend K_{II} Specimen and Mode II Fracture Toughness," International Journal Fracture, Vol.17,R193-R197.
- (37) Giare, G.S., 1984, "Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Composite in Mode II," Eng. Frac. Mech., Vol. 20, No. 1, pp. 11~21.
- (38) Barrett, J.D. and Foschi, R.O., 1977, Canadian Journal of Civil Engineering 4(1) pp. 86~95.
- (39) Barrett, J.D. and Foschi R.O., 1977, "Mode II Stress Intensity Factors for Cracked Wood Beams," Engineering Fracture Mechanics Vol. 9, pp. 371~378.
- (40) Pellicane, P.J., 1980, "Ultimate Tensile Strength Analysis of Wood," Ph.D. Dissertation, Department of Forest and Wood Sciences, Colorado State University. Fort Collins. Colorado, USA.
- (41) DeBaise, G.R., 1972, Journal of Materials 7(4), pp. 568~572.
- (42) Chisholm, D.B. and Jones, D.L., 1977, "An Analytical and Experimental Stress Analysis of a Practical Mode II Fracture Test Specimen, Exp.Mech., pp. 7~13.
- (43) Boontanjai, C., 1979, "The Fracture Toughness Properties of Pinus Radiata," Master's Thesis, University of Auckland, New Zealand.
- (44) Mall, S., Murphy, J.F. and Shottafer, J. E., 1983, Journal of Engineering Mechanics, American Society of Civil Engineers 109 (3), pp. 680~690.
- (45) Bernard, G., Buzzard, R.J., and Brown, W.F., Jr, 1986, "Elastic Analysis of Mode II Fatigue Crack Test Specimen," International J. of Fracture Vol.31, pp. 151~157.
- (46) Cramer, S.M. and Pugel, A.D., 1987, "Compact Shear Specimen for Wood Mode II Fracture Investigation," International Journal of Fracture, Vol.35, pp. 163~174.
- (47) Watkins, J., 1983, "Fracture Toughness Test for Soil-Cement Samples in Mode II," Int. Journ. Fracture, Vol.23, pp. 235~238.
- (48) Davies, H., Morgan, T.G. and Yim, A.Y., 1985, "International Journal of Fractures," Vol. 28, R3-R10.
- (49) Davies, J. and So, K.W., 1986, "Further Development of Fracture Test in Mode II," International Journal of Fracture Vol.31, R19-R21.
- (50) Whitney, J. M., Stansbarger, D.L. and Howell, H.B., 1971, "Analysis of the Rail Shear Test Application and Limitations," J. Comp. Material, 5, pp. 24~34.
- (51) Weisshaar, T.A. and Garcia,R., 1979, "Analysis of Graphite/Polyimide Rail Shear Specimens Subjected to Mechanical and Thermal Loading," NASA CR 3106, National Aeronautics and Space Administration.
- (52) O'Brien, T.K. and Reifsnider, K.L., 1980, "A Complete Mechanical-Property Characterization of a Single Composite Specimen," Experimental Mechanicals, pp. 145~152.
- (53) Stephen, W. T., 1985, "Composite De-

- sign." Fourth Edition, Think Composites pp. 21-1 ~ 21-10.
- (54) Kuhn, P., Perterson, J.P. and Levin, L.R., 1952, "A Summary of Diagonal Tension Part 1-Method of Anslysis," NACA TN-2661.
- (55) Bush, H.G. and Weller, T., 1982, "A Biaxial Method for Inplane Shear Testing," NASA TM-74070.
- (56) Petit, P.H., 1968, "A Simplified Method of Determining In-Plane Shear Stress - Strain Response of Unidirectional Composites. Composite Materials, Testing and Design, ASTM STP 460, pp. 83~93.
- (57) Lenoë, E.M., 1969, "Testing and Design of Advanced Composite Materials, J. Engr. Mech.Div. A.S.C.E., 96, pp. 809~823.
- (58) 市川昌弘, 高松徹, 1985, モドⅡ "負荷條件における薄板材の破壊じん性試験," 日本機械學會論文集(A編) 51券, 464號, p. 1115.
- (59) Richards, G.L., Airhart, T.P. and Ashton, J.R., 1969, "Off-Axis Tensile Coupon Testing, J. Composite Materials, 3, p. 586.
- (60) Pipe, R. B. and Cole, B.W., 1973, "On the Off-Axis Strength Test for Anisotropic Materials, J. Composite Materials, 7, p. 246.
- (61) Chang, B.W., Huang, P.H. and Smith, D. G., 1984, "A Pinned-End Figure for Off-Axis. Testing," Experimental Technidiques, p. 28.
- (62) Puppo, A.H. and Evensen, H.A., 1970, "Interlaminar Shear in Laminated Composites Under Generalized Plane Stress," J. Composite Materials, Vol.4, pp. 204~220.
- (63) Oplinger, D.W., Parker B.S. and Chiang, F.P., 1984, "Edge-Effect Studies in Fiber-Reinforced Laminates," Exp. Mech., pp. 347 ~ 354.
- (64) Stalnaker, D.O., Kennedy, R.H. and Ford, J.L., 1980, "Interlaminar-Shear Strain in a Two-Ply Balanced Cord-Rubber Composites," Exp. Mech., pp. 87~94.
- (65) Arcan, M. and Goldenberg, N., 1957, "On a Basic Criterion for Selecting a Shear Testing Standard for Plastic Materials," ISO/TC 61-WG 2 SP. Burgenstock Switzerland, p. 171.
- (66) Goldenberg, N., Arcan, M. and Nicolau, E., 1958, "On the Most Suitable Specimen Shape for Testing Shear Strength of Plastics," Int. Symp. Plastic Test and Stand., Philadelphia, ASTM STP 247, pp. 115~121.
- (67) Herber, W., 1987, "Characterization of Photoviscoelastic Material by a Non-Linear Constitute Equation," Experimental Mechanics, Vol.27, No 4, pp. 390~397.
- (68) Otsuka, A., Miyata, T., Tohgo, K., Yamada, S. and Kiba, T., 1982 "Investigation of Mode II Fatigue Characteristics of Aluminum Alloy Weldments Using Four Point-Shear Loading Test Technique," Preprint of the 16th Fatigue Symposium, Soc. Mater. Sci., Japan, pp.26~30.
- (69) Otsuka, A., Tohgo, K., Kiba, T. and Yamada, S., 1984, "Mode II Fatigue Crack Growth Characteristics and Mechanism in Aluminum Alloy 7 No1-T4 Weldments Under Mode II Aluminum Alloy 7 No1-T4 Weldments Under Mode II Loading," Advances in Fracture Research, Proc. ICF 6, Vol.3, S.R.Valluri et al., Eds., Pergamon, pp. 1671~1678.
- (70) Herakovich, C.T., Bergner, H. W. and Bowler, D.E., 1979, "Test and A Comparative Study of Composite Shear Specimens Using the Finite Element Method, (Design Allowables for Fibrous Composites)," STP 734, ASTM, pp. 129~151.
- (71) Kumosa, M. and Hull, D., 1987, "Mixed-Mode Fracture of Composite Using Iosipescu Shear Test," International Journal of Fracture, Vol 35, pp. 83~102. 