

혼합모우드 굽힘시편을 이용한 탄소/에폭시 복합재료의 층간분리해석*

염영진, 주영우, 유희

공과대학 기계공학부

<요약>

탄소/에폭시 복합재료의 혼합 모우드 층간분리 연구를 위하여 혼합 모우드 굽힘시험이 수행되었다. 레버를 이용하여 시편에 하중을 가함으로써 모우드 I과 II 굽힘 하중이 동시에 작용하도록 하였다. 하중레버의 하중부과점 위치와 시편에 작용하는 굽힘하중점 위치를 변화시킴으로써 다양한 혼합 모우드 비를 얻을 수 있었다. 총변형에너지방출율을 모우드 분리하기 위하여 단순보 이론과 커플라이언스법 그리고 수정된 단순보 이론을 병행적용하였고 그 결과 유한요소 해석 결과와 잘 일치하였다.

Analysis of Delamination in Carbon/Epoxy Composite Material Using Mixed Mode Bending Specimen

Young-Jin Yum, Young-Woo Chu and Hee You

Department of Mechanical Engineering

<Abstract>

A mixed mode bending test was performed to investigate the mixed mode delamination for carbon/epoxy composite material. By loading the specimen with a lever, a single applied load could produce mode I and mode II bending loads on the

* 이 논문은 1998학년도 울산대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음

specimen simultaneously. Various mixed mode ratios could be produced by changing the applied load position on the loading lever and the bending load position on the specimen. This test was analyzed using beam theory, compliance method and modified beam theory to decompose total strain energy release rate into the mode I and mode II components. The results agreed well with those of finite element analysis.

1. 서 론

충간분리는 적층판에 충간 수직응력 혹은 전단응력 그리고 이들의 조합으로 인해 적층판의 층과 층 사이에 생긴 결함이 진전함으로써 나타난다. 특히 실제 구조물에서는 개별적인 순수모우드 I, II 상태보다는 혼합 모우드 상태 아래에서 충간분리가 주로 발생한다. 따라서 복합재료 적층판의 정확한 파괴 해석을 위해서는 혼합 모우드 상태를 유발할 수 있는 방법이 제안되어야 한다. 이에 대한 다양한 방법들이 최근에 많이 보고되고 있다. 그러나 이들은 시험에서나 해석 방법에 있어 일반적으로 사용하기에는 제한점이 따른다. MMF, CLS, Variable Mixed Mode 시편 등[1-8]을 이용한 혼합 모우드 시험은 두께비가 일정할 경우 혼합 모우드 비가 고정되어 있는 단점이 있고 또한 두께비를 달리하여 시험을 할 경우 해석에 있어서 비선형을 고려하여야 하는 단점이 있다. Hashemi 등[9]이 제안한 New Variable Mixed Mode 시편은 하중 부과점과 균열길이를 변화시켜 다양한 혼합 모우드 비를 구할 수 있는 장점은 있으나 균열길이가 변함에 따라 혼합 모우드 비가 변하기 때문에 시험으로부터 습득한 데이터의 신뢰성이 떨어지고 하중 부과점 근처에서의 응력집중 등으로 인한 복잡한 영향을 단순 보이론으로 해석하기에는 무리가 있다. Crews 등[10]은 loading lever의 길이를 변화시킴으로써 혼합 모우드 비를 변화시킬 수 있는 새로운 시험방법 즉 MMB (Mixed Mode Bending) 시험을 제안하였다. 이 시험을 이용하면 두께비가 일정한 시편으로부터 다양한 혼합 모우드 비를 구할 수 있는 장점이 있다. 그러나 혼합 모우드 비를 변화시키기 위해 loading lever의 길이만을 변화시키기 때문에 파괴기준식을 구하기 위한 다양한 혼합 모우드 비를 얻기에는 구조상 문제점이 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위한 연구들이 필요하다.

본 연구에서는 모우드 I과 모우드 II 상태가 혼합된 MMB시편을 이용하여 하중 부과점 위치와 굽힘 하중점 위치를 변화시킴으로써 다양한 혼합 모우드 비를 구할 수 있는 시험 방법과 이론을 제안하고 이를 유한요소 해석을 통하여 검증하려고 한다.

2. 이 론

2-1. 변형에너지방출율

혼합 모우드 굽힘 시험장치와 시편 형상이 Fig.1에 나와있다. 시편에 작용하는 각 하중을 분리한 후 단순 보이론(beam theory)을 적용하여 변형에너지방출율을 구하면 다음과

같이 유도된다.

$$G_I = \frac{P^2 a^2}{16BE_{11}IL^2} \cdot \alpha^2 \quad (1)$$

$$G_{II} = \frac{3P^2 a^2}{64BE_{11}IL^2} \cdot \beta^2 \quad (2)$$

$$G_C = G_I + G_{II} = \frac{P^2 a^2}{16BE_{11}IL^2} (\alpha^2 + \frac{3}{4} \beta^2) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{S(2L+l)-4Ll}{l} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{S(2L-l)}{l} \quad (5)$$

여기서 B 는 시편의 폭이고 I 는 단면2차모멘트이다.

컴플라이언스법(compliance method)을 이용하여 변형에너지방출율을 구하면 다음과 같다.

$$G_I = \frac{36P\delta a^2}{B(24a^3\alpha^2 + 18a^3\beta^2 + 12L(2L-l)^2S^2)} \cdot \alpha^2 \quad (6)$$

$$G_{II} = \frac{27P\delta a^2}{B(24a^3\alpha^2 + 18a^3\beta^2 + 12L(2L-l)^2S^2)} \cdot \beta^2 \quad (7)$$

$$G_C = \frac{9P\delta a^2}{B(24a^3\alpha^2 + 18a^3\beta^2 + 12L(2L-l)^2S^2)} \cdot (4\alpha^2 + 3\beta^2) \quad (8)$$

단순보 이론과 컴플라이언스를 이용한 혼합 모우드 비 즉 G_I/G_{II} 는 아래와 같다.

$$\frac{G_I}{G_{II}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\alpha^2}{\beta^2} \quad (9)$$

한편 Kanninen[11]은 탄성기초(elastic foundation) 개념을 적용한 수정된 보이론(modified beam theory)을 제안하였는데 횡탄성계수 E_{22} 의 영향을 고려하여 다음과 같이 표현하였다.

$$G_I = \frac{P^2}{16BE_{11}IL^2} \cdot \alpha^2 \cdot \left[\alpha^2 + \frac{2a}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} \right] \quad (10)$$

$$G_C = \frac{P^2}{16BE_{11}IL^2} \left[\alpha^2 \cdot \left(\alpha^2 + \frac{2a}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} \right) + \frac{3}{4} \alpha^2 \cdot \beta^2 \right] \quad (11)$$

여기서 $\lambda = \left[\frac{6E_{22}}{h^4 E_{11}} \right]^{1/4}$, E_{11} 은 종탄성계수 h 는 시편 총두께의 반이다.

2-2. 유한요소해석

G_I 과 G_{II} 는 유한요소 해석 결과로부터 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$G_I = \lim_{\delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2\delta a} F_{ay}(v_c - v_d) \quad (12)$$

$$G_{II} = \lim_{\delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2\delta a} F_{ax}(u_c - u_d) \quad (13)$$

여기서 F_{ax} 와 F_{ay} 는 균열선단에서의 x , y 방향의 internal force이고 u_c , v_c 와 u_d , v_d 는 각각 균열선단 앞 node 즉 c node와 d node에서의 x 와 y 방향의 변위이다. 또한 δa 는 균열선단 node에서 균열선단 앞 node 까지의 거리이다.

2-3. 균열진전의 안정성장 조건

변형에너지 방출율은 다음과 같이 정의되고

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{da} = \frac{\delta^2}{2BC^2} \cdot \frac{dC}{da} \quad (14)$$

균열진전의 안정성장은 아래와 같은 조건식을 만족하여야 한다.

$$\frac{dG}{da} \leq 0 \quad (15)$$

균열진전의 안정성장 평가 기준인 dG/da 를 정리하면 아래와 같고

$$\frac{dG}{da} = \frac{\delta^2}{2} \left(\frac{C'}{BC^2} - \frac{2C^2}{BC^3} - \frac{B'C}{B^2 C^2} \right) \quad (16)$$

변위가 일정한 경우 안정성장 조건식은 다음과 같이 정리된다.

$$\Gamma = \frac{1}{2} \frac{C}{C'} \left(\frac{C'}{C} - \frac{B'}{B} \right) \leq 1 \quad (17)$$

여기서 프라임 기호는 균열길이에 대한 미분을 뜻하고 C 는 캠플라이언스이다. 위의 식을 혼합 모우드 굽힘 시편에 대하여 적용하면 다음과 같은 균열진전 안정성장 조건식이 나온다.

$$\Gamma = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \frac{(2L-D)^2 S^2 L}{(4a^2+3\beta^2)a^3} \leq 1 \quad (18)$$

3. 시험

선경인더스트리사의 탄소/에폭시 프리프레그를 재단한 후 일방향으로 32겹으로 적층하고 중앙에 인위적인 초기 균열을 만들기 위해서 테프론 필름을 삽입하였다. 그리고 적층한

프리프레그의 상하면으로 수지 흡수제(Bleeder), 구멍이 있는 필름(Porous Film)을 덮었다. 그 위에 복합재료의 표면을 평평하게 하면서, 윗면의 온도분포를 균일하게 하기 위한 알루미늄 플레이트를 놓았다. 그리고 수지의 수평 방향으로의 흐름을 방지하고, 또한 프리프레그의 움직임을 막기 위하여 댐(Dam)을 쌓았다. 알루미늄 플레이트 위에는 진공펌프로 공기를 뽑아낼 때 공기의 통로가 되는 브리더(Breather)를 놓고 전체를 진공백을 이용하여 덮은 후 진공 실런트 (Vacuum Sealant)를 이용하여 진공 포장하였다(Fig.2). 진공백에 쌓여진 프리프레그는 오토클레이브(Autoclave) 밖에서 진공이 잘 되는지 확인한 후 예열이 된 오토클레이브 내에 넣어 경화하였다. 경화된 적층판은 다이아몬드 커터로 길이 140 mm, 폭 20 mm로 절단하여 시편을 제작하였다. 시편에 하중을 가하기 위하여 시편 상하면에 굽힘 모멘트가 발생하지 않도록 헌지 텁크를 볼트로 체결하였다.

시험은 만능재료시험기를 이용하여 변위 제어 모우드로 크로스헤드 속도를 1 mm/min으로 하면서 하중을 가하였다. 다양한 혼합 모우드비를 구하기 위하여 하중 레버의 하중 부과점 위치와 굽힘 하중 부과점의 위치를 변화시키면서 수행하였다. 균열길이는 5 mm 간격으로 이동 현미경을 이용하여 측정하였다. 하중과 변위는 A/D 변환기와 상용 프로그램인 GLOBAL LAB을 이용하여 수집하였다.

4. 결과 및 토론

유한요소해석은 상용프로그램인 NISA II를 사용하였으며 절점수는 4733개, 요소수는 3910개이고 총 자유도는 9064개이다. 폭 방향으로는 변형이 거의 없으므로 평면 변형으로 가정하였다.

이론들과 유한요소 해석으로 구한 혼합 모우드 비가 Table 1에 나와 있다. 혼합 모우드 비가 0.07인 경우는 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으나 혼합 모우드 비가 커질수록 차이가 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 단순 보이론과 컴플라이언스법은 전단 효과가 고려되지 않았기 때문이다. 그러나 Kanninen이 제안한 수정된 보이론은 유한요소 해석의 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 혼합 모우드 비가 큰 경우는 전단 효과를 감안하거나 수정된 보이론을 사용하여야 한다. 균열 안정 성장점을 찾기 위하여 Fig.3과 같이 균열길이에 대한 G/δ^2 의 변화량을 구하였다. 균열길이가 짧을 때는 기울기가 양수이다가 균열길이가 점차 증가함에 따라 음수로 바뀜을 알 수 있다. 이는 기울기가 음수일 때 균열이 안정 성장한다는 균열안정 성장 조건에 따라 기울기가 양수에서 음수로 바뀌는 부분부터 균열이 안정 성장함을 알 수 있다. 이 결과는 본 논문에서 제시한 이론에 따른 균열안정 성장 위치와 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 탄소/에폭시 혼합모우드 굽힘시편에 대한 층간분리 시험결과를 각 이론에 적용하여 하중의 제곱에 대한 총변형에너지방출율의 변화를 구하고 이것을 유한요소해석 결과와 비교한 것이 Fig.4에 나와있다. 혼합 모우드 비가 0.07을 제외하고는 거의 일치함을 알 수 있었고 0.07일 때는 유한요소 해석결과와 컴플라이언스법을 이용하여 구한 결과가 잘 일치함을 파악하였다. 혼합 모우드 비에 대한

G_I 의 변화량이 Fig.5에 나와 있다. 혼합 모우드 비가 0.07인 경우는 거의 일치함을 알 수 있고 혼합 모우드 비가 증가함에 따라 다소 차이점을 보여 준다. 이는 혼합 모우드 비가 증가할수록 전단 효과가 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 혼합 모우드 비에 대한 G_{II} 의 변화량은 Fig.6에 나와 있다. 혼합 모우드 비에 대한 G_C 의 변화량이 Table 2와 Fig.7에 나와 있는데 유한요소 해석 결과와 큰 차이를 보여주고 있지 않으며 수정된 보이론이 좀 더 정확함을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

일방향으로 적층된 탄소/에폭시 복합재료의 층간분리 연구를 위하여 혼합 모우드 굽힘 시험을 수행하였다. 혼합 모우드 비는 1.33, 0.56, 0.29, 0.07의 4가지 경우에 대해서 실험하였다. 시험을 하기 전에 균열 안정성장점을 이론으로 구하고 유한요소 해석으로 검증한 결과 매우 잘 일치하였다. 총변형에너지방출율로부터 모우드 I 변형에너지방출율과 모우드 II 변형에너지방출율을 이론과 유한요소 해석으로 구하였으며 이들은 거의 일치함을 알 수 있었다.

6. 참 고 문 헌

1. Hashemi, S., Kinloch, A.J. and Williams, J.G., "The Effects of Geometry, Rate and Temperature on the Mode I, Mode II and Mixed-Mode I/II Interlaminar Fracture of Carbon-Fibre /Poly(ether-ether ketone) Composites", *J. of Composite Materials*, Vol. 24, pp.918-955, 1990.
2. Russell, A. J. and Street, K. K., "Moisture and Temperature Effects on the Mixed-Mode Delamination Fracture of Unidirectional Graphite/Epoxy", *Delamination and Debonding of Materials*, ASTM STP 876, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.349-370, 1985.
3. Williams, J.G., "On the Calculation of Energy Release Rates for Cracked Laminates", *International Journal of Fracture*, Vol.36, pp.101-119, 1988.
4. Wilkins, D.J., Eisenmann, J.R., Camin, R.A., Margolis, W.S. and Benson, R.A., "Characterizing Delamination Growth in Graphite/Epoxy", *ASTM STP 775*, pp.168-183, 1982.
5. Rankumar, R.L. and Whitcomb, J.D., "Characterization of Mode I and Mixed-Mode Delamination Growth in T300/5208 Graphite/Epoxy", *ASTM STP 876*, pp.315-335, 1985.
6. Rybicki, E.F., Hernandez, T.D., Deibler, J.E., Knight, R.C. and Vinson, S.S., "Mode I and Mixed Mode Energy Release Rate Values for Delamination of Graphite/Epoxy

- Test Specimens", J. of Composite Materials, Vol. 21, pp.105-123, 1987.
- 7. Dattaguru, B., Everett, R.A., Jr., Whitcomb, J.D. and Johnson, W.S. "Geometrically Nonlinear Analysis of Adhesively Bonded Joints", J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 106, pp.59-65, 1984.
 - 8. Johnson, W. S., "Stress Analysis of the Cracked Lap Shear Specimen: An ASTM Round Robin", Journal of Testing and Evaluation, JTEVE, pp.303-324, 1987.
 - 9. Hashemi, S., Kinloch, A.J. and Williams, J.G., "Interlaminar Fracture of Composite Materials", Proc.VI Int.Conference on Composite Materials, ICCM-VI, London, pp. 254-264, 1987.
 - 10. Crews, J.H., Jr., Reeder, and J.R., "A Mixed Mode Bending Apparatus for Delamination Testing", NASA Technical-Memorandum 100662, NASA-Langley Research Center, Hampton, VA, 1988.
 - 11. Kanninen, M.F, International Journal of Fracture, Vol.9, 1973.

Table 1. G_I/G_{II} ratio variation of mixed mode bending specimen

B.T	C.M	M.B.T	F.E.M
1.33	1.33	1.44	1.46
0.56	0.56	0.61	0.61
0.29	0.29	0.32	0.32
0.07	0.07	0.07	0.07

B.T = Beam Theory, M.B.T = Modified Beam Theory

C.M = Compliance Method, F.E.M = Finite Element Method

Table 2. G_C of mixed mode bending specimen

G_I/G_{II}	G_C (J/m^2)			
	B.T	C.M	M.B.T	F.E.M
1.33	389	415	408	437
0.56	511	522	528	541
0.29	586	600	601	620
0.07	737	801	741	809

B.T = Beam Theory, M.B.T = Modified Beam Theory

C.M = Compliance Method, F.E.M = Finite Element Method

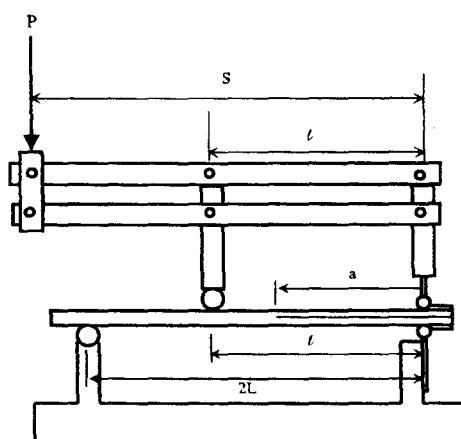


Fig.1 Test apparatus for mixed mode bending specimen

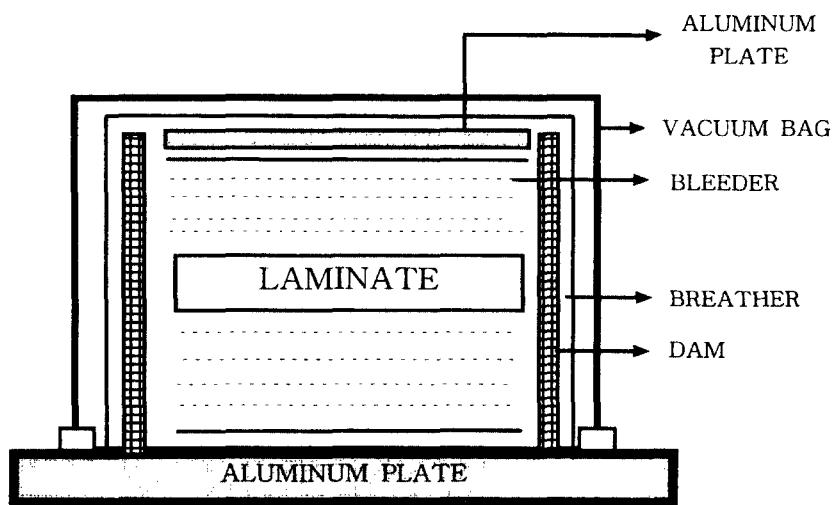
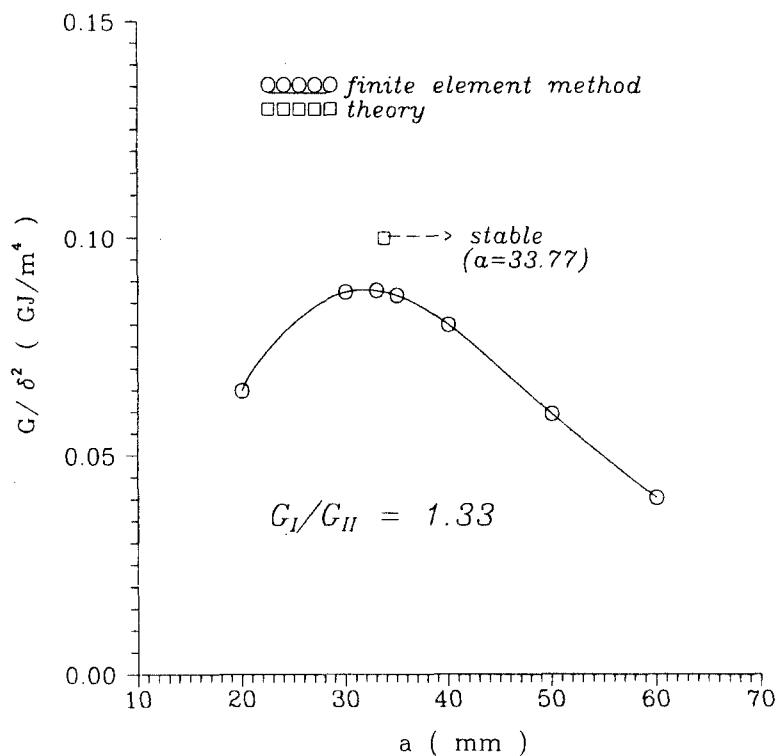
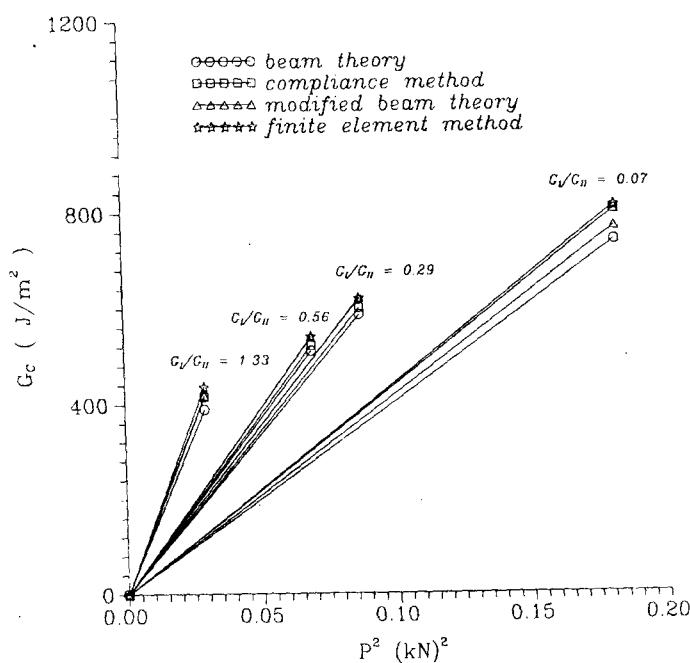
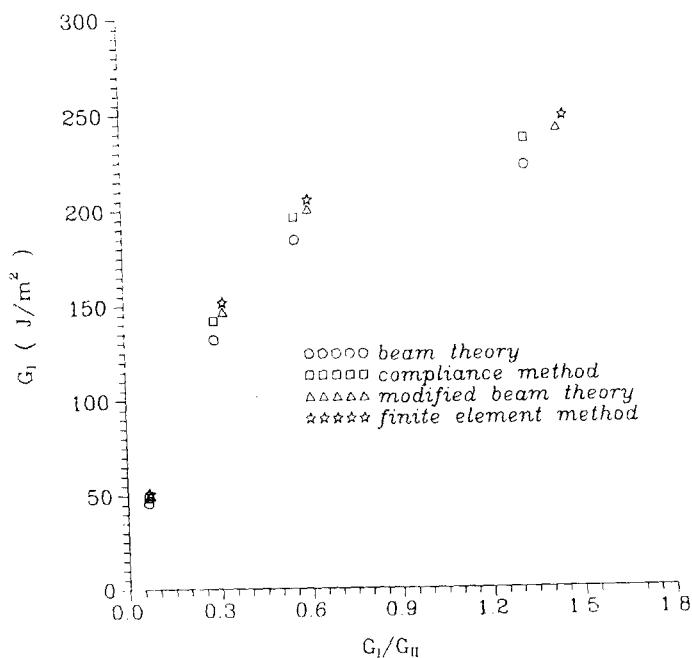
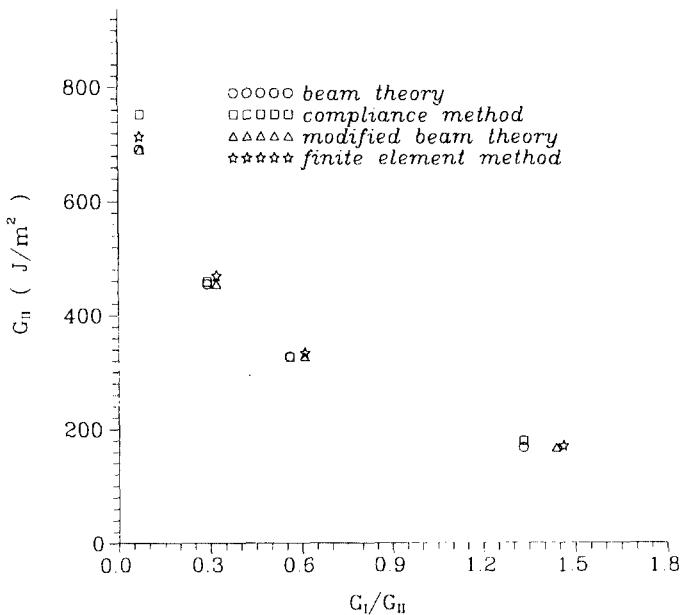
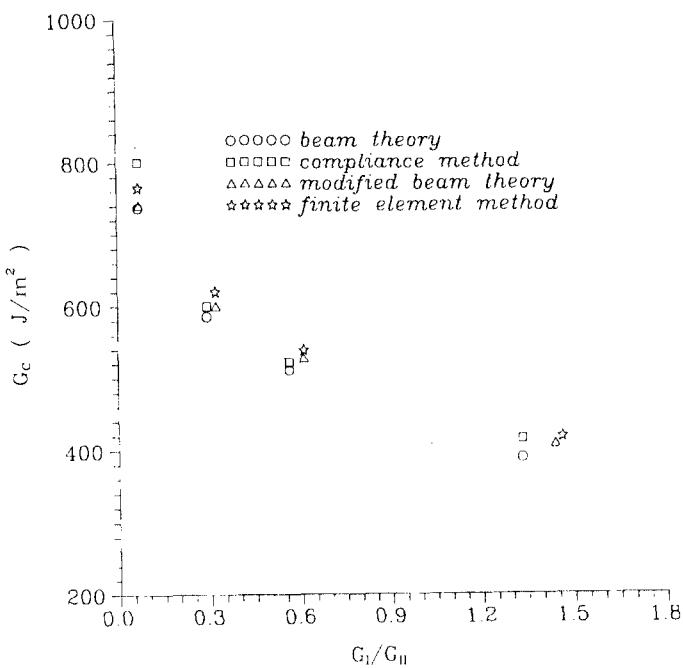


Fig.2 Typically laminated carbon/epoxy prepreg and materials for curing

Fig. 3 G/δ^2 variation for crack length of mixed mode bending specimen

Fig.4 G_c for mixed mode loading caseFig.5 G_t variation for G_V/G_H ratio of mixed mode bending specimen

Fig.6 G_H variation for G_I/G_H ratio of mixed mode bending specimenFig.7 G_C variation for G_I/G_H ratio of mixed mode bending specimen