

FRP 복합재료의 파괴특성평가

염영진

울산대학교 기계·자동차공학부

<요 약>

탄소/에폭시 복합재료 적층판의 혼합 모우드 층간분리 연구를 위하여 혼합 모우드 굽힘 시험이 수행되었다. 하중 레버의 하중 부과점 위치와 시편에 작용하는 굽힘 하중점 위치를 변화시킴으로써 다양한 혼합 모우드 비를 구할 수 있었다. 이론과 시험 및 유한요소 해석을 병행한 결과 이들은 잘 일치하여 일반적으로 사용될 수 있는 시험 방법으로 정립될 수 있음을 확인하였다

Characterization of Fracture in FRP Composite Material

Young-Jin Yum

School of Mechanical and Automotive Engineering

<Abstract>

A mixed mode bending test was performed to investigate the mixed mode delamination for carbon/epoxy composite material. 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. A mixed mode bending test was analyzed using beam theory, compliance method and finite element method and the results agreed well with test result which confirmed the validity of this test.

1. 서론

섬유강화 적층복합재료가 갖는 특이한 현상 중 하나는 층간분리이다. 층간분리는 적층판에 층간 수직응력 혹은 전단응력 그리고 이들의 조합으로 인해 적층판의 층과 층 사이에 생긴 결함이 진전함으로써 나타난다. 층간분리시 층간 파괴인성은 매우 낮기 때문에 복합재료 구조물의 안정성에 지대한 영향을 미친다. 따라서 층간분리 현상에 대한 연구가 심도 있게 수행되어야 한다. 일반적으로 층간분리는 모우드 I[1-3], III[4-6] 그리고 이들의 조합[7-14] 아래에서 발생한다. 특히 실제 구조물에서는 개별적인 순수모우드 I, II 상태보다는 혼합 모우드 상태 아래에서 층간분리가 주로 발생한다. 따라서 복합재료 적층판의 정확한 파괴 해석을 위해서는 혼합 모우드 상태를 유발할 수 있는 방법이 제안되어야 한다. 이 시험을 위해서는 혼합 모우드 ELS(mixed mode End Loaded Split) 시편, MMF(Mixed Mode Flexural) 시편, CLS(Cracked Lap Shear) 시편, Variable Mixed Mode 시편 등이 사용되어 지고 있다. 그러나 이 시편들을 이용한 시험은 두께비가 일정할 경우 혼합 모우드 비가 고정되어 있는 단점이 있고 또한 두께비를 달리하여 시험을 할 경우 해석에 있어서 비선형을 고려하여야 하는 단점이 있다 이러한 단점을 보완하기 위하여 Hashemi 등[15]은 하중 부과점과 균열길이를 변화시켜 혼합 모우드 비를 다양하게 구할 수 있는 새로운 Variable Mixed Mode 시편을 제안하였다. 그러나 이 시편을 이용한 시험은 하중 부과점과 균열길이를 변화시켜 다양한 혼합 모우드 비를 구할 수 있는 장점은 있으나 균열길이 변화에 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[16]은 하중 레버의 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 하중 레버의 길이를 변화시키기 때문에 파괴기준식을 구하기 위한 다양한 혼합 모우드 비를 얻기에는 구조상 문제점이 있다.

따라서 이러한 단점들을 보완하기 위하여 본 연구에서는 상하 두께가 같은 시편에서 하중 부과점 위치와 굽힘 하중점 위치를 변화시킴으로써 다양한 혼합 모우드 비를 구할 수 있는 혼합 모우드 굽힘시편을 제안한다. 또한 이 시편에 대하여 이론으로 해석하여 타당성을 확인하고 유한요소해석으로 검증한다. 혼합 모우드 시험으로부터 얻어지는 총변형에너지방출율을 모우드 I, II 성분으로 분리하고 순수 모우드 I, II 파괴인성과 조합하여 적절한 파괴조건식을 제시함으로써 섬유강화 적층복합재료의 혼합 모우드 층간분리에 대한 체계적인 규명을 하려고 한다.

2. 이론

2-1. 변형에너지방출율

혼합 모우드 굽힘 시험 장치의 형상이 Fig.1(a)에 나와 있다. 이 그림에서 하중 레버가

이중으로 구성되어 있는데 이는 하중이 시편에 항상 수직으로 작용하도록 하기 위한 것이다. 또한 하중 레버에는 10 mm 간격으로 구멍을 뚫어 하중 부과점 위치(S)와 시편이 받는 굽힘 하중점 위치(l)를 변화시킬 수 있도록 하였다. 오른쪽 부분에는 힌지 탭을 장착하여 시편 끝단에 굽힘 모우멘트가 발생하지 않도록 하였고 왼쪽 끝부분은 롤러를 장착하여 시편의 처짐을 자유롭게 하였다. 이 시험 장치에 의해 시편이 받는 각 지점에서의 하중은 다음과 같다(Fig.1(b)).

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{(S-l)}{l} P, & P_2 &= \frac{S}{l} P \\ P_3 &= \frac{(S-2L)}{2L} P, & P_4 &= \frac{S}{2L} P \end{aligned} \quad (1)$$

이 시편은 모우드 I과 모우드 II 하중을 동시에 받게 된다. 이들 하중을 균열길이(a)가 시편이 받는 굽힘 하중점 위치보다 작은 경우에 대하여 각 모우드에 따라 분리하여 균열 선단 부위에서의 모우멘트를 구하면 다음과 같이 정리된다(Fig.2(a)).

$$M_I = \left(\frac{S(2L+l)-4Ll}{4Ll} \right) Pa \quad (2)$$

$$M_{II} = \frac{S(2L-l)}{4Ll} Pa \quad (3)$$

이 식들을 이용하여 각 모우드에 대한 변형에너지방출율을 단순보이론으로 구하면 다음과 같다.

$$G_I = \frac{P^2 a^2}{16BEIL^2} \cdot a^2 \quad (4)$$

$$G_{II} = \frac{3P^2 a^2}{64BEIL^2} \cdot \beta^2 \quad (5)$$

$$G_C = G_I + G_{II} = \frac{P^2 a^2}{16BEIL^2} \left(a^2 + \frac{3}{4} \beta^2 \right) \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{S(2L+l)-4Ll}{l} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{S(2L-l)}{l} \quad (8)$$

여기서 B 는 시편의 폭, I 는 단면2차모멘트, E 는 종탄성계수이다. 혼합 모우드 비는 다음과 같다.

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

위의 식으로부터 하중 레버의 하중 부과점 위치를 변화시키거나 시편이 받는 굽힘 하중 점 위치를 변화시킴으로써 다양한 혼합 모우드 비를 구할 수 있음을 알 수 있고 균열길이와는 무관함을 보여 준다.

한편 균열길이가 굽힘 하중점 위치보다 큰 경우 하중을 각 모우드에 따라 분리하여 균열선단 부위에서의 모우멘트를 구하면 다음과 같이 정리된다(Fig.2(b)).

$$M_I = \left(\left(\frac{S}{4L} + \frac{S}{2l} \right) - 1 \right) Pa - \frac{S}{2l} P(a-l) \quad (10)$$

$$M_{II} = \left(\frac{S}{2l} - \frac{S}{4L} \right) Pa - \frac{S}{2l} P(a-l) \quad (11)$$

이 모우멘트를 이용하여 각 모우드에 대한 변형에너지방출율을 구하면 다음과 같다.

$$G_I = \frac{P^2}{16BEIL^2} ((S-4L)a + 2LS)^2 \quad (12)$$

$$G_{II} = \frac{3P^2}{64BEIL^2} (2LS - Sa)^2 \quad (13)$$

또한 혼합 모우드 비는 아래와 같이 정리된다.

$$\frac{G_I}{G_{II}} = \frac{4}{3} \frac{(S(2L+a) - 4La)^2}{(S(2L-a))^2} \quad (14)$$

식(14)로부터 혼합 모우드 비는 식(9)와는 다르게 균열이 진전함에 따라 한 시편으로부터 다양한 혼합 모우드 비를 구할 수 있음을 보여주주고 굽힘 하중점의 위치에 따라서는 변하지 않음을 알 수 있다.

한편 총변형에너지방출율은 각 모우드의 변형에너지방출율의 합이 되어 아래와 같이 나온다. 식(15)는 균열길이가 굽힘 하중점 위치보다 작은 경우이고 식(16)은 균열길이가 굽힘 하중점 위치보다 큰 경우이다.

$$\begin{aligned} G_C &= \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \\ &= \frac{P^2 a^2}{16BEIL^2} \left(\frac{S(2L+l) - 4Ll}{l} \right)^2 + \frac{3P^2 a^2}{64BEIL^2} \left(\frac{S(2L-l)}{l} \right)^2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$G_C = \frac{P^2}{16BEIL^2} ((S-4L)a + 2LS)^2 + \frac{3P^2}{64BEIL^2} (2LS - Sa)^2 \quad (16)$$

식(15)에서 컴플라이언스를 구하면 다음과 같이 정리된다.

$$C = \frac{a^3}{24EIL^2} \left(\frac{S(2L+l) - 4Ll}{l} \right)^2 + \frac{a^3}{32EIL^2} \left(\frac{S(2L-l)}{l} \right)^2 + C_0 \quad (17)$$

여기서 C_0 는 균열이 없을 때의 하중 레버의 하중 부과점에서 얻어지는 컴플라이언스이며 다음과 같이 표현된다.

$$C_0 = \frac{(2L-l)^2 S^2}{48EIL} \quad (18)$$

식(15)와 식(17)을 조합하여 정리하면 다음과 같이 새로운 식이 나온다. 이 방법을 컴플라이언스법(compliance method)이라 한다.

$$G_I = \frac{36P\delta a^2}{B(24a^3\alpha^2 + 18a^3\beta^2 + 12L(2L-l)^2S^2)} \cdot \alpha^2 \quad (19)$$

$$G_{II} = \frac{27P\delta a^2}{B(24a^3\alpha^2 + 18a^3\beta^2 + 12L(2L-l)^2S^2)} \cdot \beta^2 \quad (20)$$

$$G_C = \frac{9P\delta a^2}{B(24a^3\alpha^2 + 18a^3\beta^2 + 12L(2L-l)^2S^2)} \cdot (4\alpha^2 + 3\beta^2) \quad (21)$$

균열길이가 굽힘 하중점 위치보다 큰 경우인 식(16)에 대해서도 위와 같은 과정을 반복하면 다음과 같은 최종 식이 나온다.

$$G_I = \frac{P\delta}{16BL^2} ((S-4L)a + 2LS)^2 \frac{1}{B_1 + B_2 + B_3} \quad (22)$$

$$G_{II} = \frac{3P\delta}{64BL^2} (2LS - Sa)^2 \frac{1}{B_1 + B_2 + B_3} \quad (23)$$

$$B_1 = \frac{1}{8L^2} \left(\frac{(S-4L)^2 a^3}{3} + 4L^2 S^2 a + 2LS(S-4L)a^2 \right) \quad (24)$$

$$B_2 = \frac{3}{32L^2} \left(\frac{S^2 a^3}{3} + 4L^2 S^2 a - 2LS^2 a^2 \right) \quad (25)$$

$$B_3 = \frac{(2L-l)^2}{48L} S^2 \quad (26)$$

2-2. 균열진전의 안정성장 조건

변형에너지방출율은 다음과 같이 정의되고

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{da} = \frac{\delta^2}{2BC^2} \cdot \frac{dC}{da} \quad (27)$$

균열진전의 안정성장은 아래와 같은 조건식을 만족하여야 한다.

$$\frac{dG}{da} \leq 0 \quad (28)$$

균열진전의 안정성장 평가 기준인 dG/da 를 정리하면 아래와 같고

$$\frac{dG}{da} = \frac{\delta^2}{2} \left(\frac{C'}{BC^2} - \frac{2C^2}{BC^3} - \frac{B'C}{B^2C^2} \right) \quad (29)$$

변위가 일정한 경우 안정성장 조건식은 다음과 같이 정리된다.

$$\Gamma = \frac{1}{2} \frac{C}{C'} \left(\frac{C'}{C} - \frac{B'}{B} \right) \leq 1 \quad (30)$$

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

$$\Gamma = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \frac{(2L-l)^2 S^2 L}{(4a^2 + 3\beta^2)a^3} \leq 1 \quad (31)$$

식(31)은 굽힘 하중점의 위치가 균열길이보다 큰 경우이며 작은 경우의 균열 안정성장 조건식은 다음과 같다.

$$\Gamma = \frac{F_1}{2F_2} \frac{F_3}{F_2} \leq 1 \quad (32)$$

$$F_1 = 24 \left(\frac{(S-4l)^2 a^3}{3} + 2LS(S-4L)a^2 + 4L^2 S^2 a \right) + 18 \left(\frac{S^2 a^3}{3} - 2LS^2 a^2 + 4L^2 S^2 a \right) + 4(2L-l)^2 S^2 L \quad (33)$$

$$F_2 = 2A((S-4L)^2 a^2 + 4LS(S-4L)a + 4L^2 S^2) + 18(S^2 a^2 - 4LS^2 a + 4L^2 S^2) \quad (34)$$

$$F_3 = 2A(2(S-4L)^2 a + 4LS(S-4L)) + 18(2S^2 a - 4LS^2) \quad (35)$$

2-3. 유한요소해석

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

$$G_I = \lim_{\delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2\delta a} F_{ay}(v_c - v_d) \quad (36)$$

$$G_{II} = \lim_{\delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2\delta a} F_{ax}(u_c - u_d) \quad (37)$$

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 미소 거리이다.

3. 시험

선경인더스트리사의 흑연/에폭시 프리프레그를 재단한 후 일방향으로 16겹 적층한 후 50 mm 깊이까지 인위적인 초기균열을 만들기 위하여 테프론 필름을 삽입하고 다시 16겹을 적층하였다. 총 32겹으로 적층된 프리프레그를 오토클레이브에서 경화하였다. 경화된 적층판을 다이아몬드 커터로 길이 140 mm, 폭 20 mm로 절단하여 시편을 제작하였다. 시편에 하중을 가하기 위하여 시편 상하면에 굽힘 모멘트가 발생하지 않도록 힌지 탭을 볼트로 체결하여 쌍외팔보 시편의 형상과 같도록 하였다. 본 시편은 다른 시편에 비해 하중이 크게 작용하기 때문에 힌지 탭을 본드로 접착한 경우 시험 도중 이탈이 되었다. 따라서 본 시험에서는 시편에 탭을 내어 힌지 탭을 볼트로 체결하였다. 하중 증가에 따른 균열 진전길이를 측정하기 위하여 시편 옆면에 흰색 수정액으로 코팅을 하고 눈금을 표시하여 20 배 배율의 현미경으로 5 mm 간격으로 균열 진전길이를 측정할 수 있도록 하였다. 테프론 필름이 삽입된 끝부분은 수지과다 지역이므로 완전히 날카로운 균열로 볼 수 없다. 따라서 피로하중을 가하여 테프론 필름 끝에서부터 10 mm 이상 되는 초기균열을 생성시켰다.

시험은 만능재료시험기를 이용하여 변위 제어 모우드로 크로스헤드 속도를 1 mm/min으로 하면서 하중을 가하였고 다양한 혼합 모우드비를 구하기 위하여 하중 레버의 하중 부과점 위치와 굽힘 하중점 위치를 변화시키면서 수행하였다. 균열 길이가 굽힘 하중점 위치와 너무 많이 차이가 나면 식(31)에서 알 수 있듯이 불안정한 균열 진전을 나타낸다. 식(31)을 이용하여 구한 안정한 균열진전 범위가 Fig.3에 나와 있다. 이 그림은 하중 부과점

위치가 각각 90 mm와 110 mm인 경우를 예를 들었다. 본 시험에 들어가기 전에 예비시험을 통하여 위의 결과를 확인한 결과 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 시험에서는 식(31)을 이용하여 하중 레버의 하중 부과점 위치와 굽힘 하중점 위치에 따른 균열 안정성장 범위를 계산하여 균열 안정성장 범위내에서 시험을 수행하였다. 한편 하중 레버의 무게를 보상하기 위하여 하중 레버 끝단에 추를 달아 시편을 장착하기 전에 평형을 유지하도록 하였다. 하중과 변위는 A/D 변환기와 상용 프로그램인 GLOBAL LAB을 이용하여 수집하였다.

4. 결과 및 토론

하중 레버의 하중 부과점 위치에 대한 굽힘 하중점 위치와 균열길이에 따른 혼합 모우드 비의 변화량이 Fig.4에 나와 있다. 여기서 굽힘 하중점 위치에 대한 혼합 모우드 비는 균열길이가 굽힘 하중점 위치보다 작은 경우이며 균열길이에 대한 혼합 모우드 비는 균열길이가 굽힘 하중점 위치보다 큰 경우이다. 하중 레버의 하중 부과점 위치가 시편의 길이와 일치할 때는 굽힘 하중점 위치와 균열길이에 무관하게 혼합 모우드 비가 4/3으로 MMF 시험의 형상과 일치함을 알 수 있다. 한편 하중 레버의 하중 부과점이 시편의 길이보다 작은 경우 굽힘 하중점 위치 혹은 균열길이가 증가함에 따라 혼합 모우드 비가 감소하다가 모우드 I 성분이 음수가 되는데 이는 물리적으로 균열이 진전될 수 없기 때문에 파괴 시험이 불가능함을 알 수 있다.

균열 안정 성장점을 찾기 위하여 Fig.5와 같이 균열길이에 대한 G/δ^2 의 변화량을 유한요소해석으로 구하였다. 유한요소해석은 상용프로그램인 NISA II를 사용하였으며 절점수는 4733개, 요소수는 3910개이고 총 자유도는 9064개이다. 폭 방향으로 변형이 거의 없으므로 평면 변형으로 가정하였다. 이 그림에서 균열길이가 짧을 때는 기울기가 양수이다가 균열길이가 점차 증가함에 따라 음수로 바뀌음을 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 이론식 즉 식(31)에 따른 균열안정 성장 위치와 차이점이 없음을 확인할 수 있었다. Fig.6은 식(17)과 실험 그리고 유한요소해석으로 구한 컴플라이언스이다. 이들은 거의 일치함을 알 수 있어 위의 이론식의 전개가 정확함을 파악할 수 있다. 혼합 모우드 비는 0.07인 경우는 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으나 혼합 모우드 비가 커질수록 차이가 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 단순보이론과 컴플라이언스법은 진단 효과를 고려하지 않았고 유한요소해석에서는 진단효과를 고려하였기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

탄소/에폭시 혼합모우드 굽힘시편에 대한 층간분리 시험결과를 각 이론에 적용하여 하중의 제곱에 대한 총변형에너지방출율의 변화를 구하고 이것을 유한요소해석 결과와 비교한 것이 Fig.7에 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 Table 1과 Fig.8에 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 진단 효과가 많은 영향을 미침

을 알 수 있다. 혼합 모우드 비에 대한 G_{II} 의 변화량은 Fig.9에 나와 있다.

혼합 모우드 비에 대한 총변형에너지방출율이 Table 2에 나와 있다. 이들은 식에 따라서 거의 일치함을 알 수 있고 혼합 모우드 비가 증가할수록 감소하였다. 이 데이터를 쌍의 팔보 시험으로부터 구한 순수 모우드 I 파괴인성(333 J/m^2)과 ELS 시험으로부터 구한 순수 모우드 II 파괴인성(1105 J/m^2)으로 나누어 무차원화하면 Fig.10과 같이 기존의 파괴조건식들과 비교할 수 있다. 이 그림으로부터 본 복합재료 적층판은 $m = 2, n = 1$ 일 때와 Hahn이 제안한 식[17] 사이에 놓임을 알 수 있어 해석과 시험 결과의 타당성을 확인할 수 있었다.

5. 결론

일방향으로 적층된 탄소/에폭시 복합재료의 혼합 모우드 층간분리 연구를 위하여 혼합 모우드 굽힘시험을 수행하였다. 혼합 모우드 굽힘시험은 상하 두께가 같은 상태에서 다양한 혼합 모우드 비를 구하기 위하여 사용하였다. 혼합 모우드 비는 하중 레버의 하중 부과점 위치와 시험편에 작용하는 굽힘 하중점 위치를 변화시킴으로써 다양하게 구할 수 있었다. 균열 안정성장점을 이론으로 구하고 이를 유한요소해석으로 검증한 결과 매우 잘 일치하였다. 총변형에너지방출율로부터 모우드 I 변형에너지방출율과 모우드 II 변형에너지방출율을 이론과 유한요소해석으로 구하였으며 이들은 거의 일치함을 알 수 있었다. 이들 결과는 기존의 파괴조건식 내에 존재하여 해석과 시험 결과의 타당성을 확인할 수 있었다.

<감 사>

본 연구는 “과학기술부-한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가 연구센터”의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Whitney, J.M., "Stress Analysis of the Double Cantilever Beam Specimen", Composites Science and Technology, Vol.23, pp.201-219, 1985.
2. Williams, J.G., "Large Displacement and End Block Effects in the 'DCB' Interlaminar Test in Modes I and II", J. of Composite Materials, Vol. 21, pp.330-347, 1987.
3. Devitt, D.F., Schapery, R.A. and Bradley, W.L., "A Method for Determining the Mode I Delamination Fracture Toughness of Elastic and Viscoelastic Composite Materials", J. of Composite Materials, Vol. 14, pp.270-285, 1980.
4. Carlsson, L.A., Gillespie, J.W., Pipes, Jr. and R.B., "On the Analysis and Design of the End Notched Flexure (ENF) Specimen for Mode II Testing", J. of Composite Materials, Vol. 20, pp.594-605, 1986.
5. Mall, S. and Kochhar, N.K., "Finite Element Analysis of End Notch Flexure Specimens", J. of Composites Technology & Research, Vol.8, No.2, pp. 54-57, 1986.
6. Wang, Y. and Williams, J. G., "Correction Factors for Mode II Interlaminar Toughness Tests(ELS and ELF)", Proc.8 Int.Conference on Composite Materials, ICCM-8, Honolulu, 1991.
7. 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.
8. 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.
9. Williams, J.G., "On the Calculation of Energy Release Rates for Cracked Laminates", International Journal of Fracture, Vol.36, pp.101-119, 1988.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
 16. 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.
 17. Hahn, H.T., "A Mixed Mode Fracture Criteria for Composite Materials", Composite Technology Review, Vol. 5, pp. 26-29, 1983.

Table 1. G_I and G_{II} of mixed mode bending specimen

G_I/G_{II}		$G_I (J/m^2)$			$G_{II} (J/m^2)$		
B.T C.M	F.E.M	B.T	C.M	F.E.M	B.T	C.M	F.E.M
1.33	1.45	222	239	245	167	179	169
0.56	0.61	184	184	201	327	326	328
0.29	0.32	132	133	147	454	458	463
0.07	0.07	46	50	51	691	752	705

B.T : Beam Theory, C.M : Compliance Method

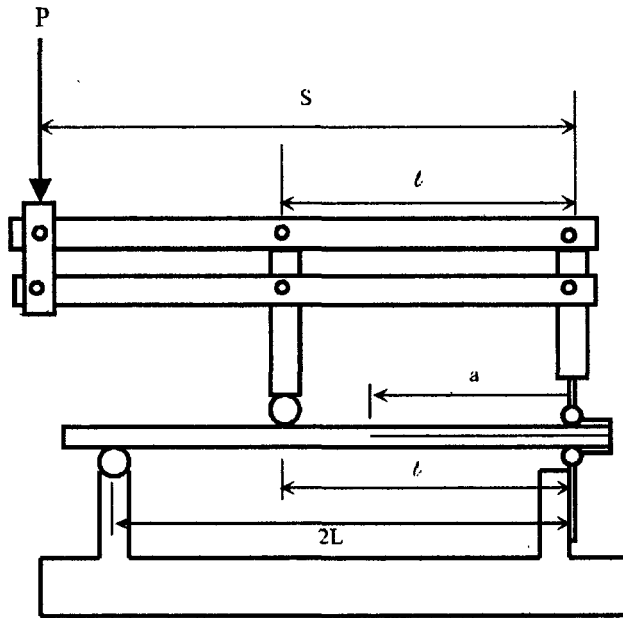
F.E.M : Finite Element Method

Table 2. G_C of mixed mode bending specimen

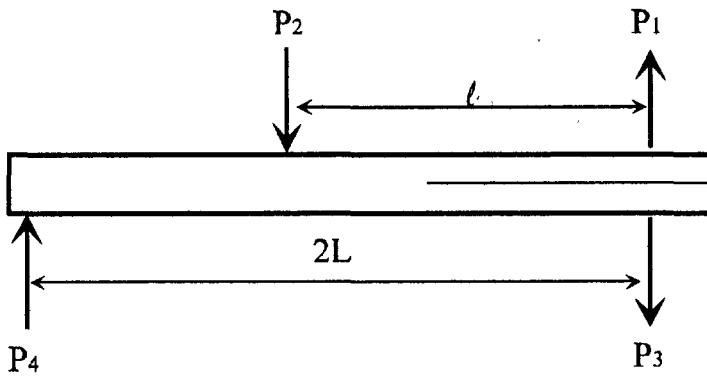
G_I/G_{II}		$G_C (J/m^2)$		
B.T C.M	F.E.M	B.T	C.M	F.E.M
1.33	1.45	389	418	414
0.56	0.61	511	509	529
0.29	0.32	586	591	610
0.07	0.07	737	801	756

B.T : Beam Theory, C.M : Compliance Method

F.E.M : Finite Element Method



(a) schematic diagram of apparatus



(b) test specimen and loading

Fig.1 Mixed mode bending specimen and test apparatus

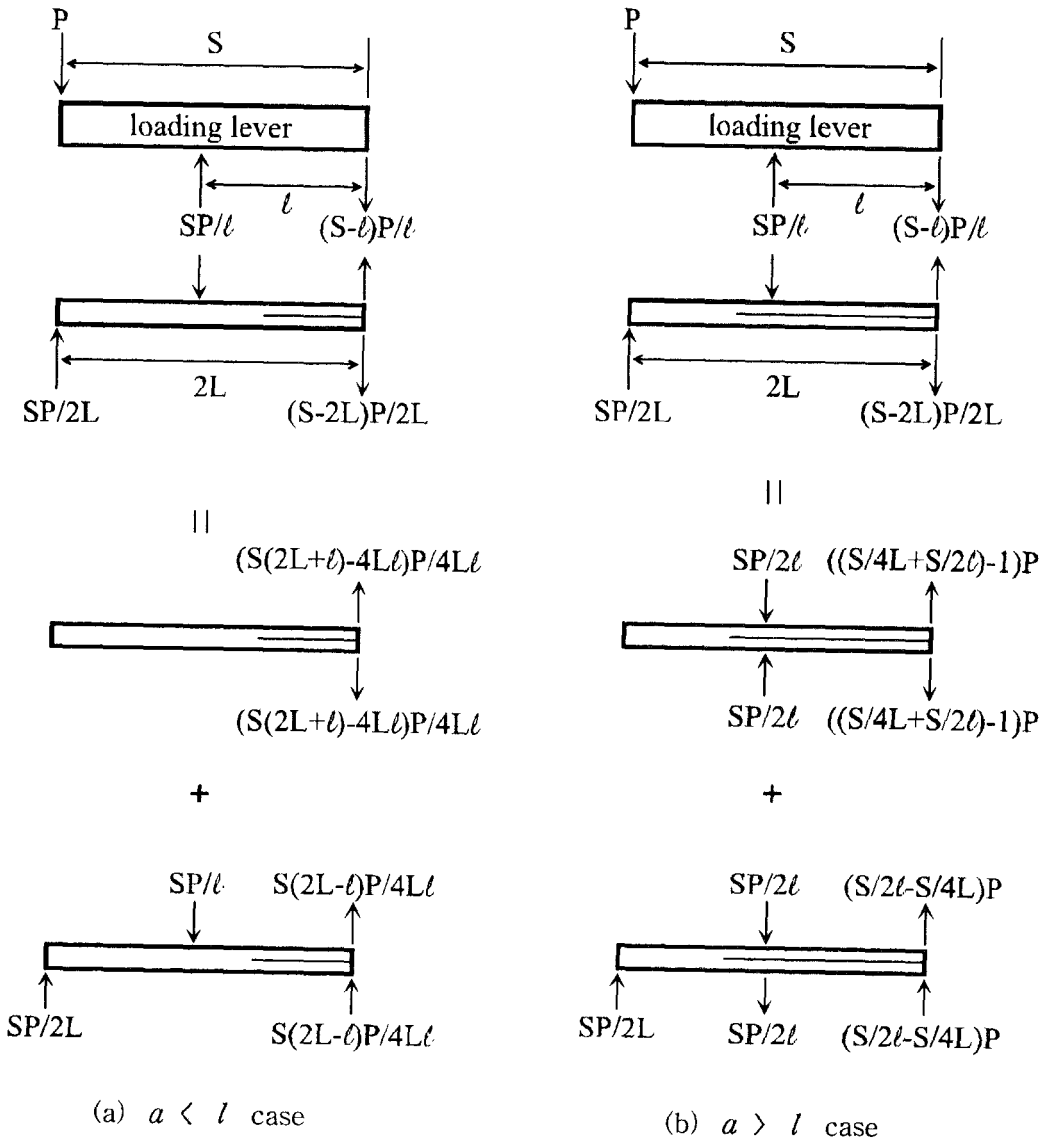
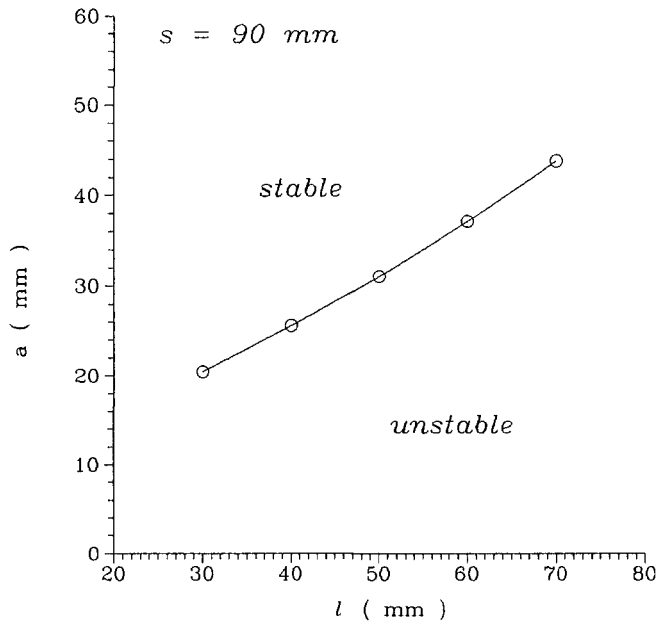
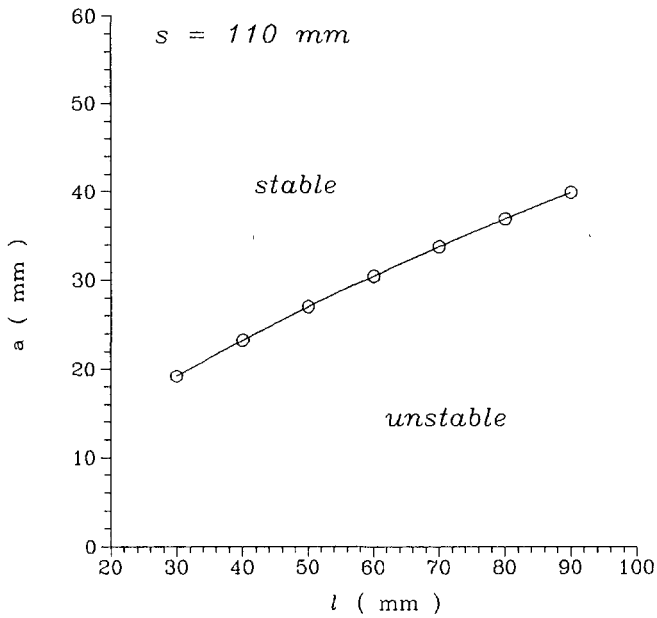


Fig.2 Mode decomposition for mixed mode bending specimen



(a) applied load position(S) : 90 mm



(b) applied load position(S) : 110 mm

Fig.3 Stability of mixed mode bending specimen

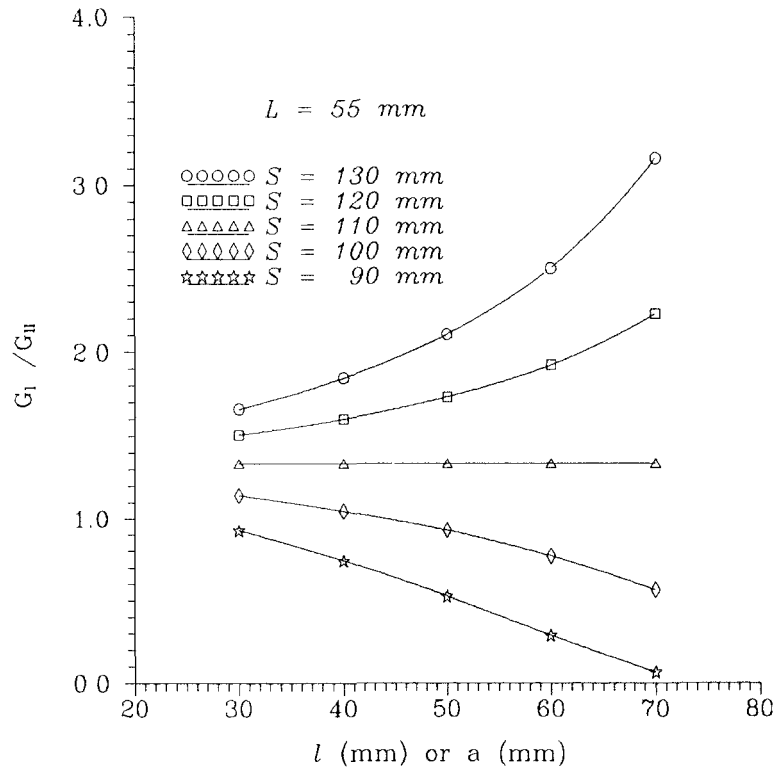
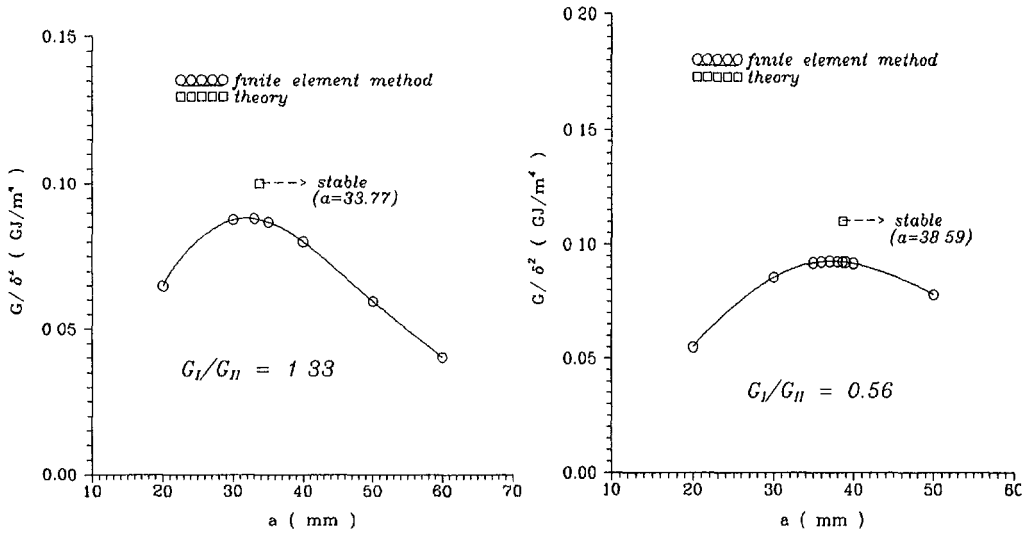
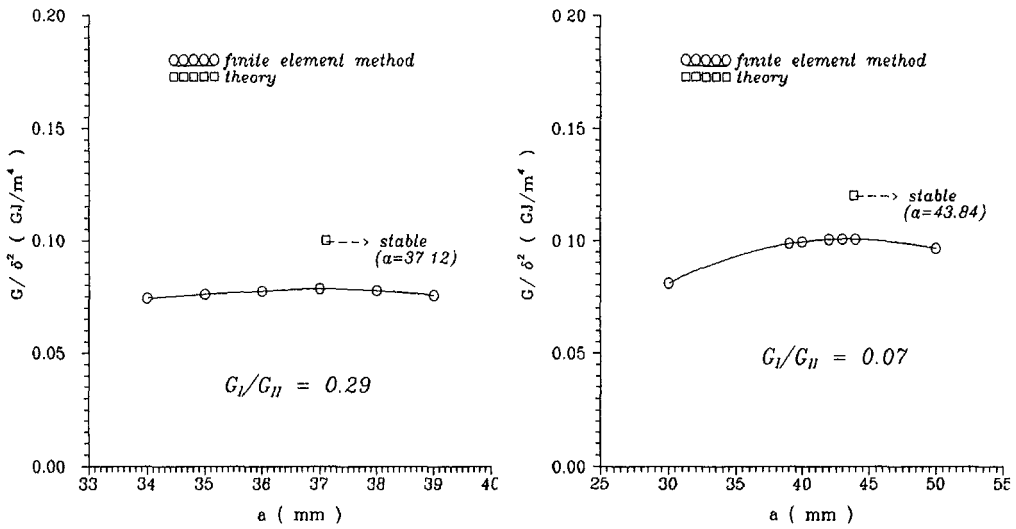


Fig.4 G_I/G_{II} variation for l or a of mixed mode bending specimen



(a) mixed mode ratio(G_I/G_{II}) : 1.33

(b) mixed mode ratio(G_I/G_{II}) : 0.56



(c) mixed mode ratio(G_I/G_{II}) : 0.29

(d) mixed mode ratio(G_I/G_{II}) : 0.07

Fig.5 G/δ^2 variation for crack length of mixed mode bending specimen

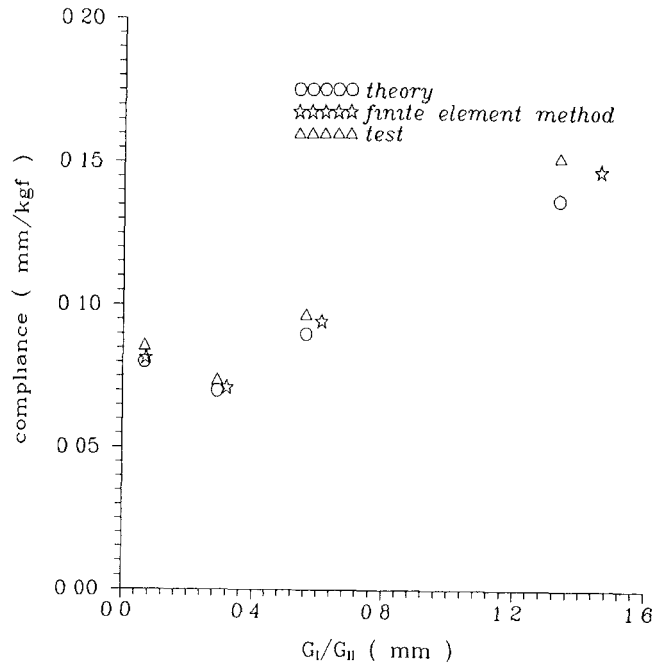


Fig.6 Compliance for G_I/G_{II} of mixed mode bending specimen

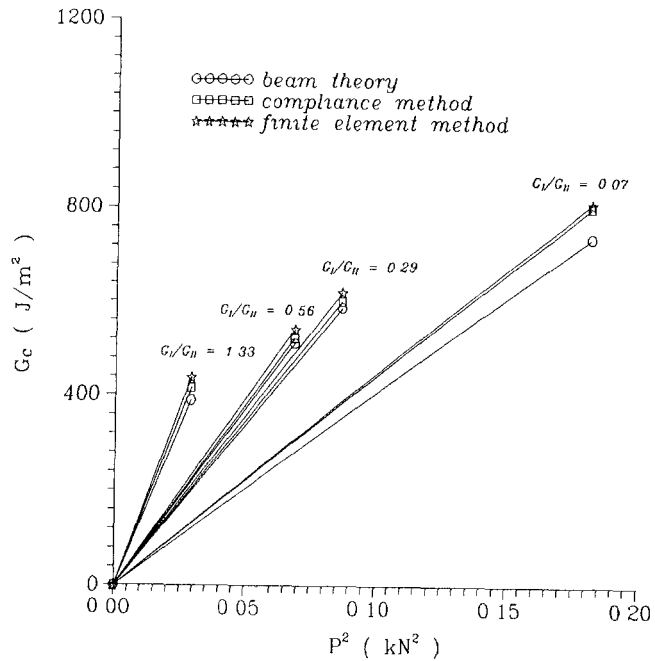


Fig.7 G_C for mixed mode loading case

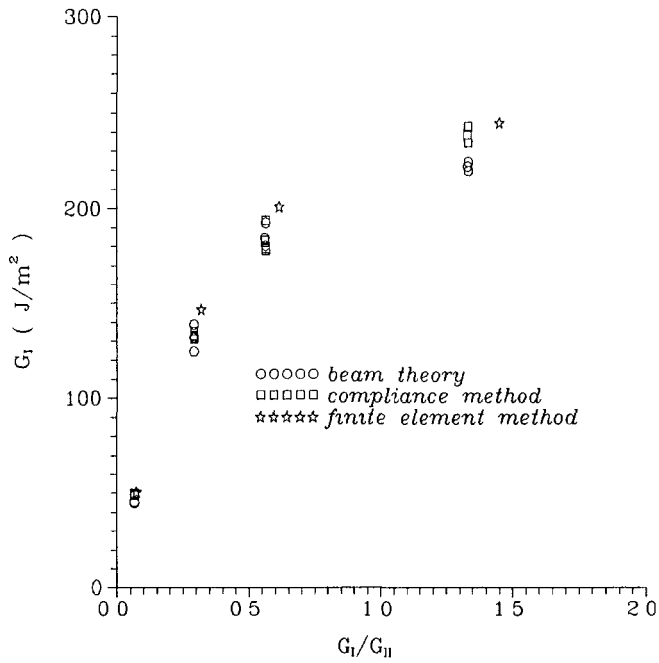


Fig.8 G_I variation for G_I/G_{II} ratio of mixed mode bending specimen

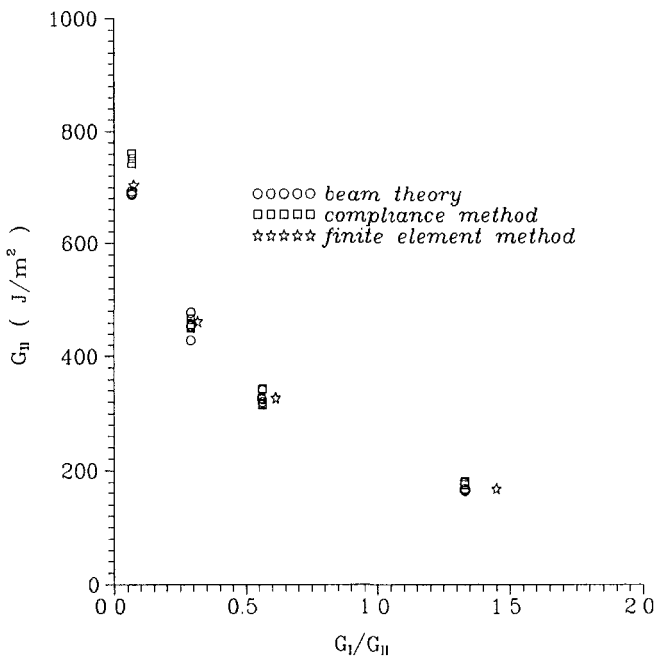


Fig.9 G_{II} variation for G_I/G_{II} ratio of mixed mode bending specimen

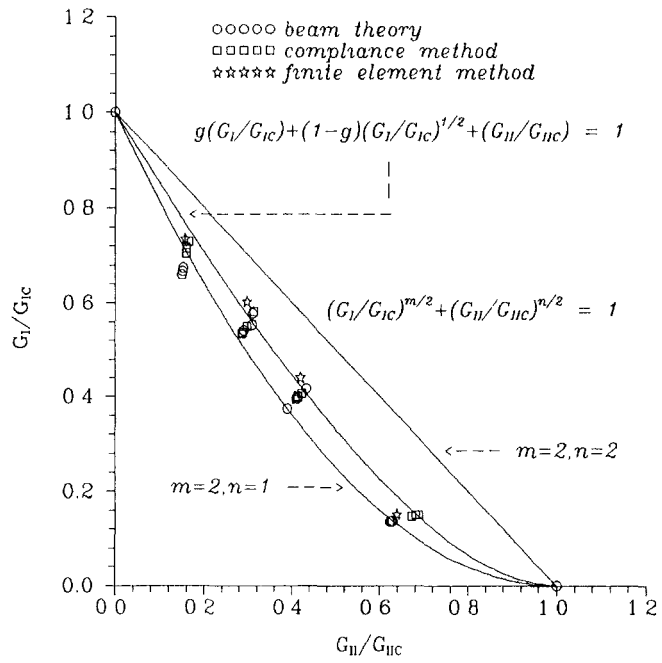


Fig.10 Fracture criterion for mixed mode bending specimen