

탄소/에폭시 복합재료의 모드 II와 혼합모우드 층간분리해석*

염영진 · 주영우 · 유희
공과대학 기계공학부

<요 약>

탄소/에폭시 복합재료의 층간분리 연구를 위하여 순수 모드 II ELS 시험과 혼합 모드 I/II mixed mode bending 시험이 수행되었다. 순수 모드 II 임계변형에너지방출율은 1105 J/m^2 로 측정되었다. 혼합 모드 비는 loading lever의 하중 부과점 위치와 시편에 작용하는 굽힘 하중점 위치를 변화시킴으로써 다양하게 구할 수 있었다. 이론과 시험을 병행한 결과 이들은 잘 일치하여 일반적으로 사용될 수 있는 시험 방법으로 정립될 수 있음을 확인하였다.

Analysis of Mode II and Mixed Mode Delamination in Carbon/Epoxy Composite Material

Young-Jin Yum · Young-Woo Chu · Hee You
Department of Mechanical Engineering

<Abstract>

ELS test and mixed mode bending test were performed to investigate the mode II and mixed mode delamination respectively for carbon/epoxy composite material. Mode II critical strain energy release rate was 1105 J/m^2 . 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. Mixed mode delamination was analyzed using beam theory and the result agreed well with test result which confirmed the validity of this analysis.

* 이 논문은 1997학년도 울산대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

1. 서 론

복합재료 적층판의 주 파괴요인은 층과 층 사이의 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(opening), 모우드 II(shearing), 모우드 III(tearing) 그리고 이들의 조합 아래에서 발생한다. 모우드 I 층간파괴시험을 위해서는 쌍외팔보(Double Cantilever Beam) 시편이 주로 사용되고 있으며 모우드 II 층간파괴시험은 End Notched Flexure (ENF) 시편과 End Loaded Split(ELS) 시편 등이 주로 사용되어 지고 있다[1-5]. 그러나 실제 구조물의 파괴가 혼합 모우드 파괴임을 감안하면 순수 모우드 I, II 뿐만 아니라 혼합 모우드 층간분리 해석이 병행되어야 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 일정한 경우만을 고려하여 혼합 모우드 비가 고정되어 있는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 Hashemi 등[6]은 하중 부과점과 균열길이를 변화시켜 혼합 모우드 비를 다양하게 구할 수 있는 새로운 Variable Mixed Mode 시편을 제안하였다. 그러나 이 방법은 균열길이가 변함에 따라 혼합 모우드 비가 변하기 때문에 시험으로부터 습득한 데이터의 신뢰성이 떨어지고 하중 부과점 근처에서의 응력집중 등으로 인한 복잡한 영향을 단순 보이론으로 해석하기에는 어려움이 있다. Crews 등[7]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 단점들을 보완하기 위한 연구들이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 탄소/에폭시 ELS 시편을 제작하여 순수 모우드 II 시험을 하고 두께비가 일정한 시편에서 혼합 모우드 비를 변화시킬 수 있는 MMB 시편을 사용하여 파괴시험을 수행한다. 또한 혼합 모우드 시험으로부터 얻어지는 변형에너지방출율을 모우드 I, II 성분으로 분리하고 DCB 시편으로부터 구한 모우드 I 파괴인성과 ELS 시편으로부터 얻어지는 모우드 II 파괴인성을 조합하여 적절한 파괴조건식을 제시하여 복합재료의 혼합 모우드 층간분리에 대한 체계적인 규명을 하려고 한다.

2. 이 론

혼합 모우드 굽힘 시험 장치의 형상이 Fig.1(a)에 나와 있다. 이 그림에서 loading lever가 이중으로 구성되어 있는데 이는 하중이 시편에 항상 수직으로 작용하도록 하기 위한 것이다. 또한 loading lever에는 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 모멘트가 발생하지 않도록 하였고 왼쪽 끝부분은 roller를 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 모멘트를 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 구하면 다음과 같다.

$$G_I = \frac{P^2 a^2}{16BEIL^2} \left(\frac{S(2L+l)-4Ll}{l} \right)^2 \quad (4)$$

$$G_{II} = \frac{3P^2 a^2}{64BEIL^2} \left(\frac{S(2L-l)}{l} \right)^2 \quad (5)$$

한편 혼합 모우드 비 즉 G_I/G_{II} 는 식(6)과 같이 나타난다.

$$\frac{G_I}{G_{II}} = \frac{4}{3} \frac{(S(2L+l)-4Ll)^2}{(S(2L-l))^2} \quad (6)$$

식(6)으로부터 loading lever의 하중 부과점 위치를 변화시키거나 시편이 받는 굽힘 하중점 위치를 변화시킴으로써 다양한 혼합 모우드 비를 구할 수 있음을 알 수 있고 균열길이와는 무관함을 보여 준다.

한편 균열길이가 하중 부과점보다 큰 경우 하중을 각 모우드에 따라 분리하여 균열 선단 부위에서의 모멘트를 구하면 다음과 같이 정리된다(Fig.2(b)).

$$M_I = \left(\left(\frac{S}{4L} + \frac{S}{2l} \right) - 1 \right) Pa - \frac{S}{2l} P(a-l) \quad (7)$$

$$M_{II} = \left(\frac{S}{2l} - \frac{S}{4L} \right) Pa - \frac{S}{2l} P(a-l) \quad (8)$$

이 모멘트를 이용하여 각 모우드에 대한 변형에너지방출율을 구하면 다음과 같다.

$$G_I = \frac{P^2}{16BEIL^2} ((S-4L)a+2LS)^2 \quad (9)$$

$$G_{II} = \frac{3P^2}{64BEIL^2} (2LS-Sa)^2 \quad (10)$$

또한 혼합 모우드 비는 다음과 같다.

$$\frac{G_I}{G_{II}} = \frac{4}{3} \frac{(S(2L+a)-4La)^2}{(S(2L-a))^2} \quad (11)$$

식(11)로부터 혼합 모우드 비는 식(6)과는 다르게 균열이 진전함에 따라 한 종류의 시편 으로부터 다양한 혼합 모우드 비를 구할 수 있음을 보여주고 굽힘 하중점의 위치에 따라 서는 변하지 않음을 알 수 있다.

한편 총변형에너지방출율은 각 모우드의 변형에너지방출율의 합이 되어 아래와 같이 나온다. 식(12)는 균열길이가 굽힘 하중점 위치보다 작은 경우이고 식(13)은 균열길이가 굽힘 하중점 위 치보다 큰 경우이다.

$$G_C = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \\ = \frac{P^2 a^2}{16BEIL^2} \left(\frac{S(2L+l)-4Ll}{l} \right)^2 + \frac{3P^2 a^2}{64BEIL^2} \left(\frac{S(2L-l)}{l} \right)^2 \quad (12)$$

$$G_C = \frac{P^2}{16BEIL^2} ((S-4L)a+2LS)^2 + \frac{3P^2}{64BEIL^2} (2LS-Sa)^2 \quad (13)$$

식(12)에서 컴플라이언스를 구하면 다음과 같이 정리된다.

$$C = \frac{a^3}{24EIL^2} \left(\frac{S(2L+l)-4Ll}{l} \right)^2 + \frac{a^3}{32EIL^2} \left(\frac{S(2L-l)}{l} \right)^2 + C_0 \quad (14)$$

여기서 C_0 는 균열이 없을 때의 loading lever 하중 부과점에서 얻어지는 컴플라이언스 이며 다음과 같이 표현된다.

$$C_0 = \frac{(2L-l)^2 S^2}{48EIL} \quad (15)$$

식(12)와 식(14)를 조합하여 정리하면 다음과 같이 새로운 식이 나온다.

$$G_I = \frac{P\delta a^2}{16BL^2} \frac{a^2}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (16)$$

$$G_{II} = \frac{3P\delta a^2}{64BL^2} \frac{\beta^2}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (17)$$

$$G_C = \frac{P\delta a^2}{16BL^2} \frac{a^2}{A_1 + A_2 + A_3} + \frac{3P\delta a^2}{64BL^2} \frac{\beta^2}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (18)$$

여기서 각 변수들은 다음과 같다.

$$A_1 = \frac{a^3}{24L^2} \left(\frac{S(2L+l)-4Ll}{l} \right)^2 \quad (19)$$

$$A_2 = \frac{a^3}{32L^2} \left(\frac{S(2L-l)}{l} \right)^2 \quad (20)$$

$$A_3 = \frac{(2L-l)^2 S^2}{48L} \quad (21)$$

$$a = \frac{S(2L+l)-4Ll}{l} \quad (22)$$

$$\beta = \frac{S(2L-l)}{l} \quad (23)$$

균열길이가 굽힘 하중점보다 큰 경우인 식(13)에 대해서도 위와 같은 과정을 반복하면 다음과 같은 최종식이 나온다.

$$G_I = \frac{P\delta}{16BL^2} ((S-4L)a + 2LS)^2 \frac{1}{B_1 + B_2 + B_3} \quad (24)$$

$$G_{II} = \frac{3P\delta}{64BL^2} (2LS - Sa)^2 \frac{1}{B_1 + B_2 + B_3} \quad (25)$$

$$B_1 = \frac{1}{8L^2} \left(\frac{(S-4L)^2 a^3}{3} + 4L^2 S^2 a + 2LS(S-4L)a^2 \right) \quad (26)$$

$$B_2 = \frac{3}{32L^2} \left(\frac{S^2 a^3}{3} + 4L^2 S^2 a - 2LS^2 a^2 \right) \quad (27)$$

$$B_3 = \frac{(2L-l)^2}{48L} S^2 \quad (28)$$

한편 균열의 안정성장은 다음과 같은 조건식을 만족하여야 한다.

$$\Gamma = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \frac{(2L-l)^2 S^2 L}{(4a^2 + 3\beta^2)a^3} \leq 1 \quad (29)$$

식(29)는 굽힘 하중점의 위치가 균열길이보다 작은 경우이며 큰 경우의 균열 안정성장 조건식은 다음과 같다.

$$\Gamma = \frac{F_1}{2F_2} \frac{F_3}{F_2} \leq 1 \quad (30)$$

$$F_1 = 24 \left(\frac{(S-4l)^2 a^3}{3} + 2LS(S-4L)a^2 + 4L^2 S^2 a \right) + 18 \left(\frac{S^2 a^3}{3} - 2LS^2 a^2 + 4L^2 S^2 a \right) + 4(2L-l)^2 S^2 L \quad (31)$$

$$F_2 = 24((S-4L)^2 a^2 + 4LS(S-4L)a + 4L^2 S^2) + 18(S^2 a^2 - 4LS^2 a + 4L^2 S^2) \quad (32)$$

$$F_3 = 24(2(S-4L)^2 a + 4LS(S-4L)) + 18(2S^2 a - 4LS^2) \quad (33)$$

3. 시험

3.1 ELS 시험

순수 모우드 II 임계변형에너지방출율을 구하기 위하여 end loaded split (ELS) 시험을 제작하여 파괴시험을 수행하였다. ELS 시험은 탄소/에폭시 프리프레그를 일방향으로 16겹

적층하고 50 mm 깊이까지 인위적인 초기균열을 만들기 위하여 테프론 필름을 삽입한 후 다시 16겹을 적층하였다. 총 32겹으로 적층된 프리프레그를 autoclave에서 curing하고 3.8 mm 두께로 된 적층판을 diamond cutter로 길이 250 mm, 폭 20 mm로 절단하고 하중을 가하기 위하여 블록을 장착하여 ELS 시편을 만들었다. 최종 시편의 형상은 Fig.3(a)에 나와 있다. 하중 증가에 따른 균열 진전길이를 측정하기 위하여 시편 옆면에 흰 색 수정액으로 코팅을 하고 눈금을 표시하여 20배 배율의 현미경으로 균열 진전길이를 측정하였다. 테프론 필름이 삽입된 끝부분은 수지과다 지역이므로 완전히 날카로운 균열로 볼 수 없다. 따라서 피로하중을 가하여 테프론 필름 끝에서부터 10 mm 이상 되는 초기균열을 생성시켰다. 시편의 상부층과 하부층 사이의 마찰을 감소시키기 위하여 균열이 있는 부분에 작은 roller를 삽입하고 피로균열을 갖는 시편을 재료시험기에서 변위 제어 모우드로 crosshead speed를 정적상태에 가까운 1 mm/min로 인장하중을 가하면서 균열을 측정하였다. 균열의 길이가 변함에 따라 여러 부위에서 하중과 변위를 측정하였다. 하중과 변위는 증폭기와 A/D 변환기를 이용하여 수집하였다.

3.2 혼합 모우드 굽힘 시편

혼합 모우드 굽힘 시편은 ELS 시편에 장착한 블록 대신에 시편 상하면에 굽힘 모멘트가 발생하지 않도록 힌지 탭을 부착하여 쌍외팔보 시편의 형상과 같도록 하였다. 본 시편은 다른 시편에 비해 하중이 크게 작용하기 때문에 힌지 탭을 본드로 접착한 경우 시험도중 이탈이 되었다. 따라서 본 시험에서는 시편에 탭을 내어 힌지 탭을 볼트로 체결하였다. 그 외의 사항은 ELS 시편 제작 과정과 동일하다. 최종 시편의 형상은 Fig.3(b)에 나와 있다. 시편의 총길이는 140 mm, 두께는 3.8 mm, 폭은 20 mm이다. 시험은 다양한 혼합 모우드 비를 구하기 위하여 loading lever의 하중 부과점 위치와 굽힘 하중 부과점 위치를 변화시키면서 수행하였다. 균열 길이가 굽힘 하중 부과점의 위치와 너무 많이 차이가 나면 식(29)에서 알 수 있듯이 불안정한 균열 진전을 나타낸다. 식(29)를 이용하여 구한 안정한 균열진전 범위가 Fig.4에 나와 있다. 이 그림은 loading lever의 하중 부과점 위치가 100 mm인 경우이다. 본 시험에 들어가기 전에 예비시험을 통하여 위의 결과를 확인한 결과 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 시험에서는 식(29)를 이용하여 loading lever의 하중 부과 위치와 굽힘 하중 부과점의 위치에 따른 균열 안정성장 범위를 계산하여 균열 안정성장 범위내에서 시험을 수행하였다. 한편 loading lever의 무게를 보상하기 위하여 loading lever의 끝단에 추를 달아 시편을 장착하기 전에 평형을 유지하도록 하였다. 하중과 변위는 loading lever에 가해지는 부분의 값을 수집하였다.

4. 결과 및 토론

ELS 시험으로부터 얻은 대표적인 하중-변위선도가 Fig.5에 나와 있다. 하중-변위 선도로부터 균열이 진전하는 시발점까지 거의 선형에 가까움을 알 수 있어 선형 보이론이 적용 가능함을 확인할 수 있다. 또한 균열길이가 진전할수록 하중은 감소하였다. 파괴인성은 다음과 같은 식 즉 $G_{IIc} = 9a^2P_c\delta/2B(L^3 + 3a^3)$ 를 사용하여 구하였으며 균열 진전

길이에 따라서 거의 일정하였다(Fig.6). 그 결과 순수 모우드 II 파괴인성은 1105 J/m^2 로 나왔다. 한편 본 적층판을 이용하여 쌍외팔보 시험을 한 결과 순수 모우드 I 파괴인성은 333 J/m^2 로 나왔다. 이 값들은 일반적인 파괴인성보다 상대적으로 크게 나왔는데 이는 적층판 제작시 수지의 양을 너무 적게 흡수하여 나온 결과로 사료된다. 그러나 순수 모우드 I에 대한 모우드 II의 비는 일반적인 결과들과 거의 유사함을 알 수 있어 혼합 모우드 굽힘 시편으로서 사용하는데 무리가 없음을 알 수 있다.

Fig.7에 loading lever의 하중 부과점 위치에 대한 굽힘 하중점 위치와 균열길이에 따른 혼합 모우드 비의 변화량이 나와 있다. 여기서 굽힘 하중점 위치에 대한 혼합 모우드 비는 균열길이가 굽힘 하중점 위치보다 작은 경우이며 균열길이에 대한 혼합 모우드 비는 균열길이가 굽힘 하중점보다 큰 경우이다. loading lever의 하중 부과점 위치가 시편의 길이와 일치할 때는 굽힘 하중점 위치와 균열길이에겐 무관하게 혼합 모우드 비가 $4/3$ 으로 MFMF 시험의 형상과 일치함을 알 수 있다. 한편 loading lever의 하중 부과점이 시편의 길이보다 작은 경우 굽힘 하중의 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. 위의 사항들을 고려하여 시험을 한 결과가 Fig.8에 나와 있다. 이 그림은 굽힘 하중점 위치가 균열길이보다 작은 경우로 균열길이가 증가함에 따라 하중은 감소함을 보여주고 균열 시발점까지는 선형에 가까움을 알 수 있다. Fig.9는 식(14)와 실험으로부터 구한 킴플라이언스이다. 이들은 거의 일치함을 알 수 있어 위의 이론식의 전개가 정확함을 파악할 수 있다.

혼합 모우드 비에 대한 각 모우드의 변형에너지방출율과 총변형에너지방출율이 Table 1에 나와 있다. 이들은 식에 따라서 거의 일치함을 알 수 있고 총변형에너지방출율은 혼합 모우드 비가 증가할수록 감소하였다. 이 데이터를 쌍외팔보 시험으로부터 구한 순수 모우드 I 파괴인성과 ELS 시험으로부터 구한 순수 모우드 II 파괴인성으로 나누어 무차원화하면 Fig.10과 같이 기존의 파괴조건식들과 비교할 수 있다. 이 그림으로부터 본 복합재료 적층판은 $m = 2, n = 1$ 일 때와 Hahn이 제안한 식[8] 사이에 놓임을 알 수 있어 해석과 시험 결과의 타당성을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

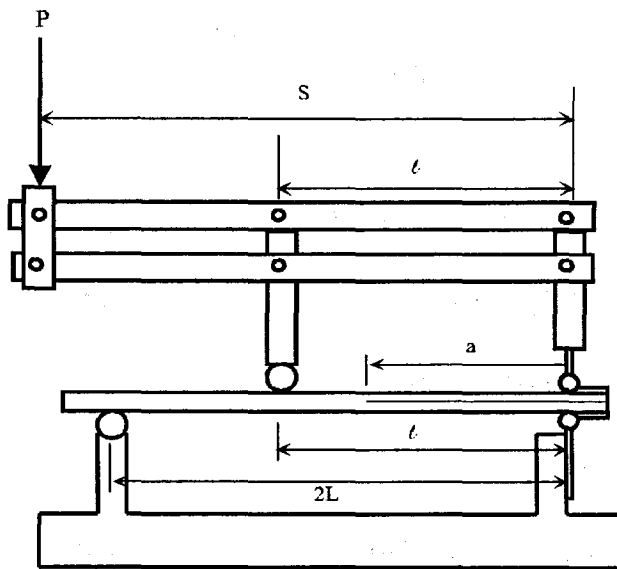
탄소/에폭시 복합재료 적층판의 층간분리 연구를 위하여 ELS 시편과 혼합 모우드 굽힘 시편을 사용하였다. ELS 시편은 순수 모우드 II 파괴인성을 측정하기 위하여 사용되었으며 혼합 모우드 굽힘 시편은 상하 두께가 같은 상태에서 다양한 혼합 모우드 비를 구하기 위하여 사용하였다. 순수 모우드 II 파괴인성은 1105 J/m^2 로 균열길이에겐 무관하였다. 혼합 모우드 비는 loading lever의 하중 부과점 위치와 시편에 작용하는 굽힘 하중점 위치를 변화시킴으로써 다양하게 구할 수 있었다. 이들 결과는 기존의 파괴조건식 내에 존재하여 해석과 시험 결과의 타당성을 확인할 수 있었다. 또한 이론과 시험을 병행한 결과 이들은 잘 일치하여 일반적으로 사용될 수 있는 시험 방법으로 정립될 수 있음을 확인하였다.

6. 참고 문헌

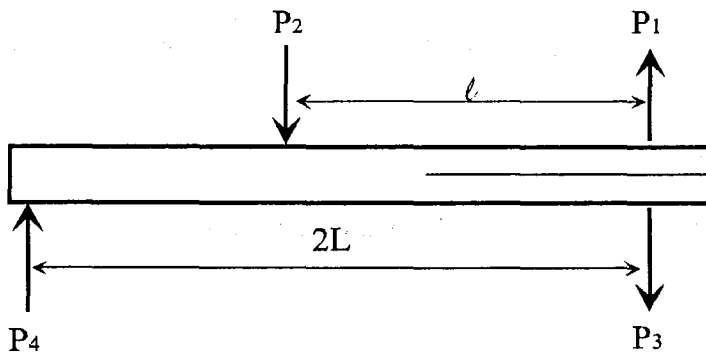
1. Devitt, D.F., Schapery, R.A. and Bradley, W.L., "A Method for Determining the Mode I Delamination Fracture Toughness of Elastic and Viscoelastic Composite Materials", J. of Composite Materials, Vol.14, pp.270-285, 1980.
2. Chow, C.L. and Woo, C.W., "Fracture Studies with DCB Specimen", International Journal of Fracture, Vol.16, pp.121-131, 1980.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Hahn, H.T., "A Mixed Mode Fracture Criteria for Composite Materials", Composite Technology Review, Vol. 5, pp. 26-29, 1983.

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

G_I/G_{II}	G_I (J/m^2)		G_{II} (J/m^2)		G_C (J/m^2)	
	eq.(4)	eq.(16)	eq.(5)	eq.(17)	eq.(12)	eq.(18)
1.33	222	239	167	179	389	418
0.56	184	184	327	326	511	509
0.29	132	133	454	458	586	591
0.07	46	50	691	752	737	801



(a) schematic diagram of apparatus



(b) test specimen and loading

Fig.1 Test apparatus for mixed mode bending specimen

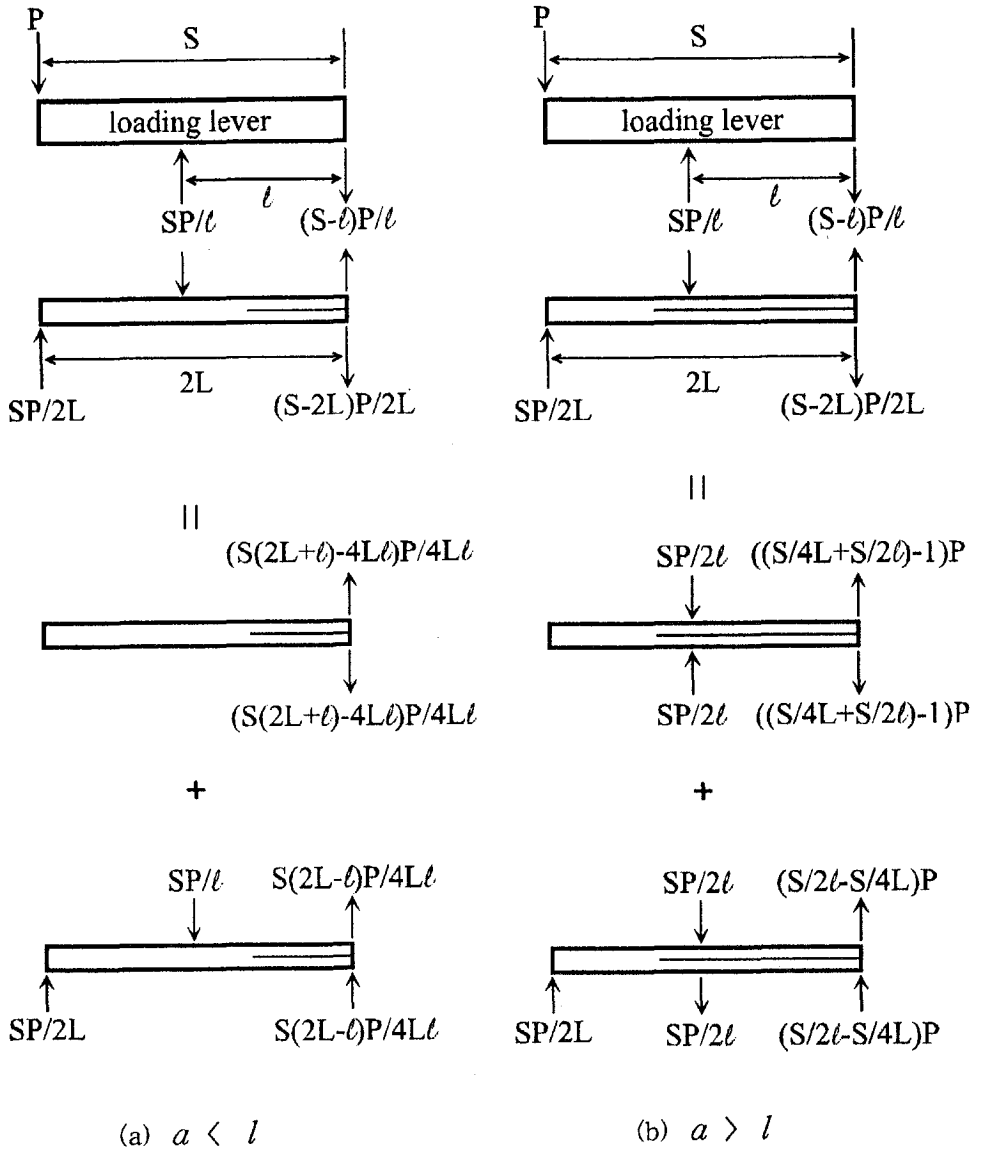
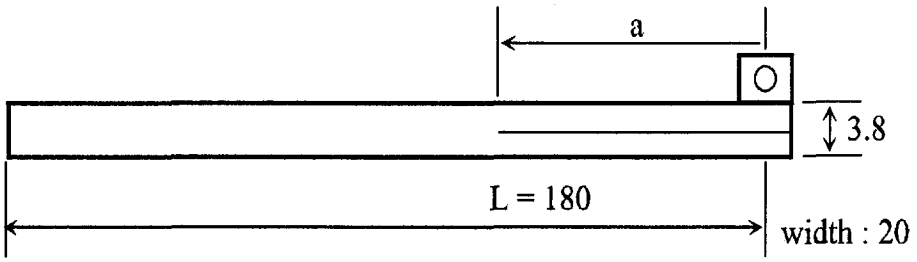
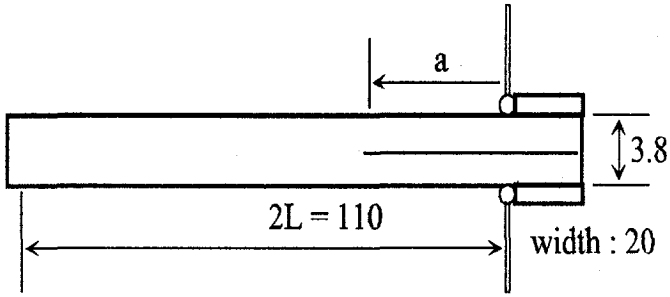


Fig.2 Mode partition for mixed mode bending specimen



unit : mm

(a) end loaded split (ELS) specimen



unit : mm

(b) mixed mode bending specimen

Fig.3 Geometry of specimens

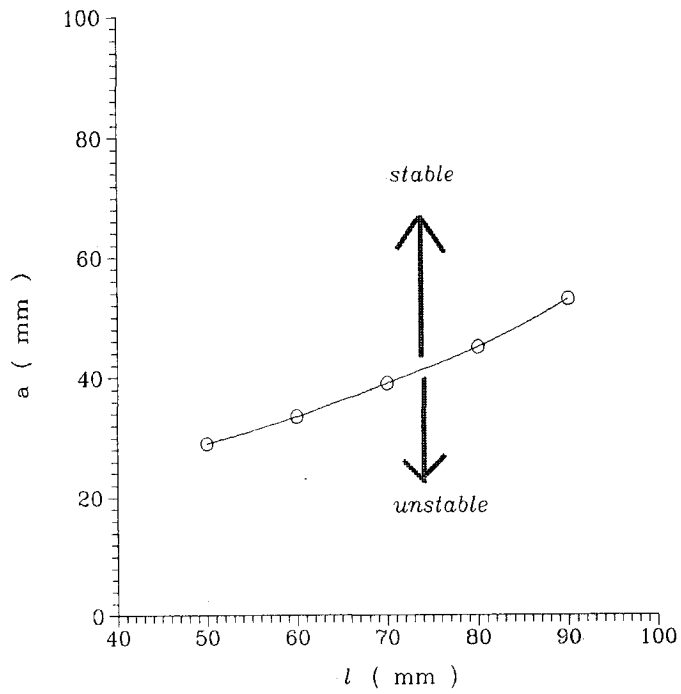


Fig.4 Stability of mixed mode bending specimen(S=100 mm)

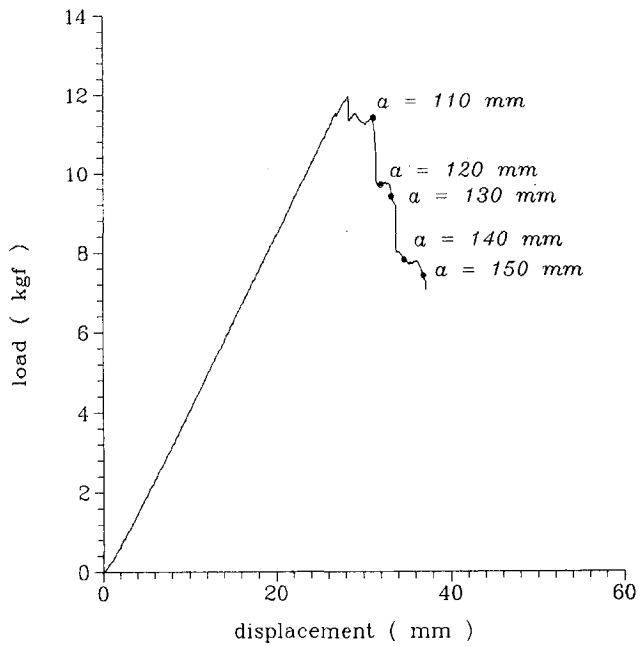
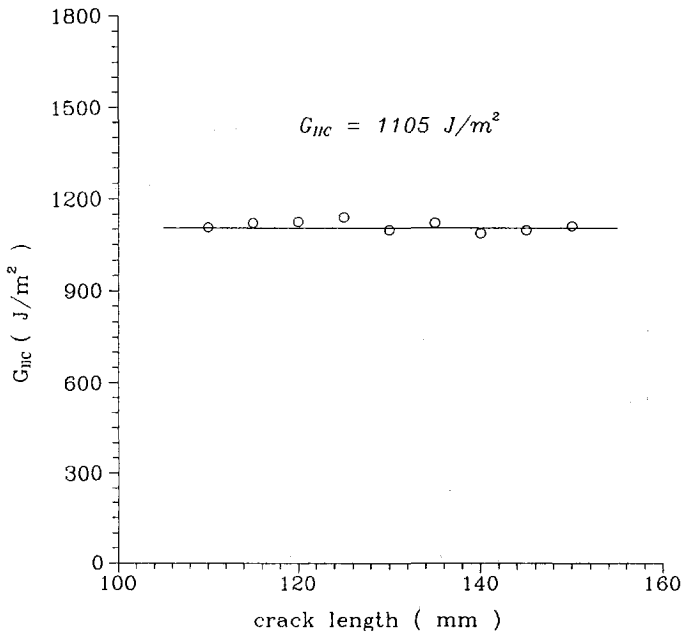
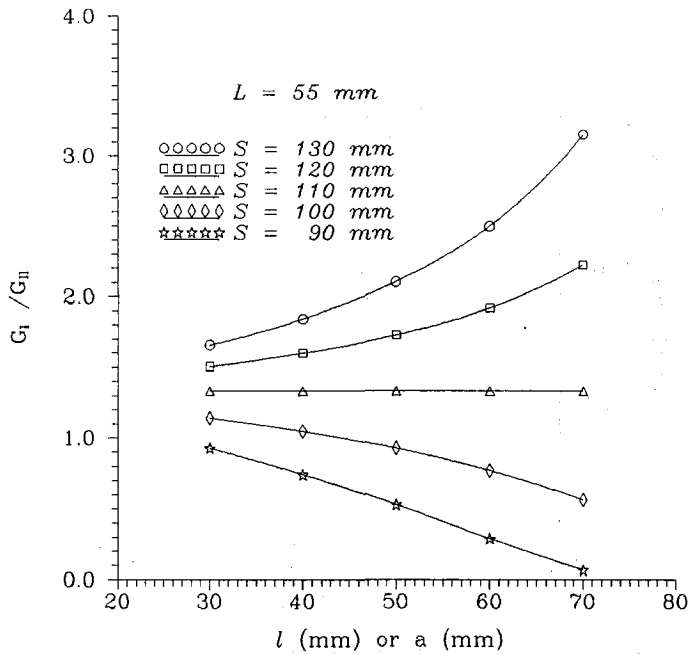


Fig.5 Load-displacement graph for ELS specimen

Fig.6 G_{IIc} variation for crack length of ELS specimenFig.7 G_I/G_{II} variation for l or a of mixed mode bending specimen

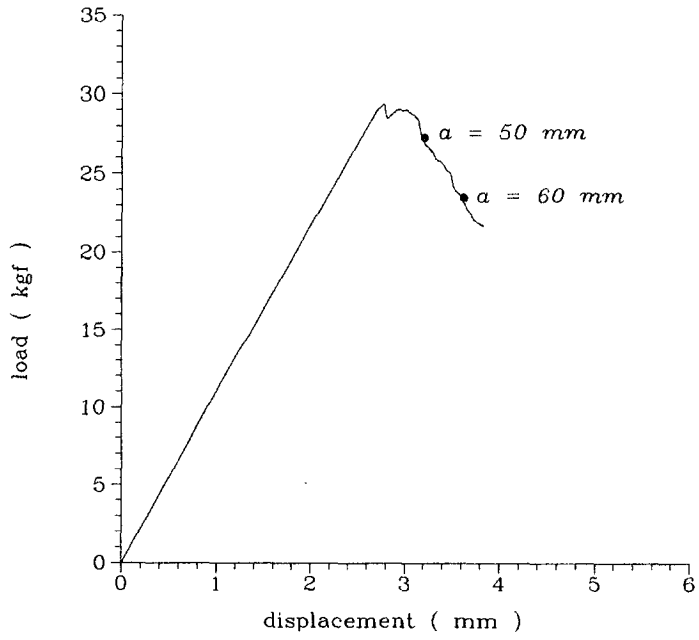


Fig.8 Load-displacement graph for mixed mode bending specimen($a < l$)

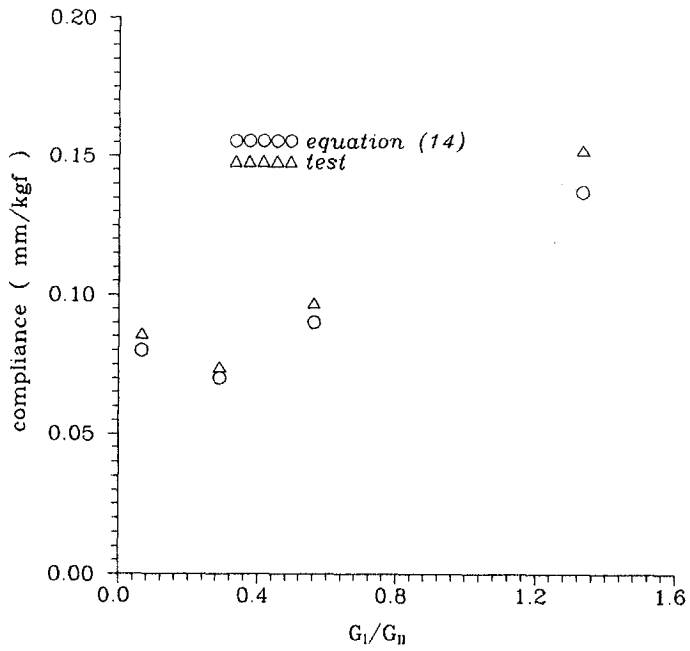


Fig.9 Compliance for G_I/G_{II} of mixed mode bending specimen

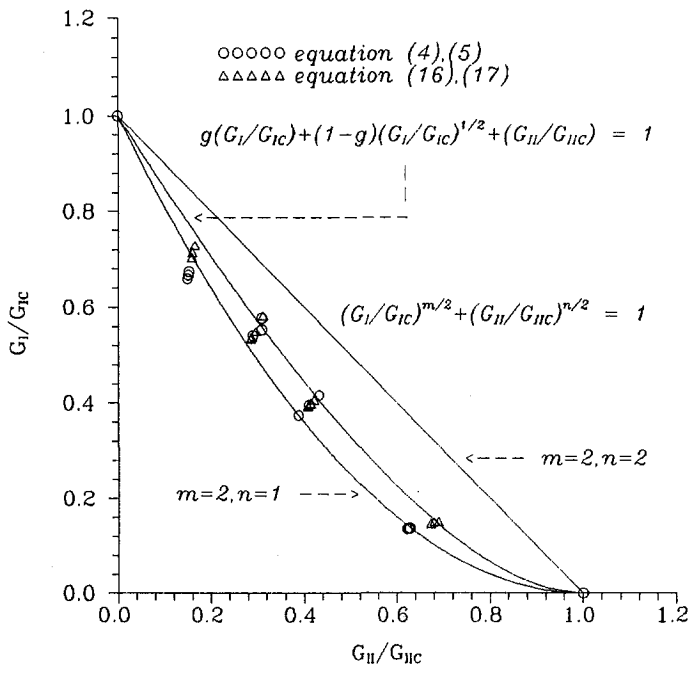


Fig.10 Fracture criterion for mixed mode bending specimen