

論文

GMT 복합재료의 혼합모드 하중하에서 파괴 인성 평가에 관한 연구

이춘재* · 김희송**

A Study on the Evaluation of Fracture Toughness under Mixed Mode Loading in GMT Composite Materials

Choon Jae Lee* and Hei Song Kim**

ABSTRACT

In this paper, a fracture toughness test under mixed mode loading was proposed using a single edge-cracked specimen subjected to bending moment(M), shearing force(F), and twisting moment(T). The J-integral of a crack in the specimen is expressed in the form $J=J_I+J_{II}+J_{III}$, where J_I , J_{II} and J_{III} are the components of mode I, mode II and mode III deformation, respectively. J_I , J_{II} and J_{III} can be estimated from $M-\theta$ (θ : crack opening angle), $F-U$ (U : crack shear displacement) and $T-\alpha$ (α : crack twisting angle). In order to obtain the $M-\theta$, $F-U$ and $T-\alpha$ diagram in real time, a new deformation gage for mixed mode loading was proposed using the optical position sensing device(PSD). The fracture toughness test was carried out with GMT composite materials according to impregnated quantities of glass mat. The loading apparatus was designed and manufactured for this experiment. When the fracture toughness (J_c) was classified according to various specimens, it showed that MMT-3(mode I+mode II+mode III) specimen has the lowest value out of specimens, and the specimen(40% Wt) with the highest impregnated quantity has the most value for fracture toughness, when it was classified according to impregnated quantities(20%, 30%, 40% Wt) of glass mat.

The measurement of the initial crack point has been made with the AE apparatus(Locan AT), and AE amplitudes at the crack initiation point have almost constant values regardless of the various specimens or impregnated quantities of glass mat.

초 록

본 논문에서는 혼합모드하중하에서 파괴인성시험을 굽힘모우멘트(M), 전단력(F), 비틀림모우멘트(T)를 받고 있는 편축균열시험편을 사용하였다. 시험편의 균열부에서 J 적분은 $J=J_I+J_{II}+J_{III}$ 로 구하였다. 여기서 J_I , J_{II} 와 J_{III} 는 모드 I 과 모드 II, 모드 III 변형으로 만들어지는 각각의 J 적분값이다. J_I , J_{II} 와 J_{III} 는 $M-\theta$ (θ : 균열개구각), $F-U$ (U : 균열전단변위), $T-\alpha$ (α : 균열 비틀림각)로 부터 계산하였다. 실시간에 따른 $M-\theta$, $F-U$ 그리고 $T-\alpha$ 를 얻기 위하여 혼합모

* 대전산업대학교 기계공학과

** 단국대학교 기계공학과

드하중에 대한 새로운 변형계이지로 광학위치측정장치(PSD)를 사용하였다. 파괴인성시험은 유리섬유의 함침량(20%, 30%, 40% Wt)에 따른 GMT 복합재료로 수행하였다. 부하장치는 이 실험을 위하여 설계하여 제작하였다. 파괴인성치(J_c)를 시험편의 하중조건에 따라 분류하여 보면 MMT-3(모드 I + 모드 II + 모드 III) 시험편이 가장 작은 값을 갖고 있다. 유리섬유의 함침량에 따라 분석하여 보면 함침량이 많은 시험편이 파괴인성에서 가장 큰 값을 갖는다. 균열개시점은 AE (Acoustic Emission)로 측정하였고 균열개시점에서 진폭은 시험편의 하중조건 또는 유리섬유의 함침량에 관계없이 거의 일정한 값을 갖는다.

1. 서 론

과학과 문명이 발전되면서 대기는 온난화, 오존층 파괴, 산성비, 유해 폐기물등의 지구 환경이 급격히 변화되고 있다. 이에 따라 구조물 또는 기계부품의 금속재료들은 부식이 급진전되어 파괴가 발생되기도 하며 대기오염의 주요인인 자동차의 배기가스를 최소화 하기 위하여 무게를 경량화 하려는 노력이 진행되고 있다. 이러한 관점에서 비강도 내식성, 내마모성 파괴인성, 충격특성을 향상시키는 재료를 개발한 것이 복합재료(Composite material)라고 할 수 있다. 따라서 복합재료의 파괴인성을 명확히 평가할 필요가 있다. 재료의 파괴인성을 평가하기 위하여 CT시험, 3점굽힘 또는 4점굽힘파괴인성시험, C형상파괴인성시험등이 있다[1~6] 그리고 Mode I + Mode II의 혼합모드조건하에서 파괴인성을 조사하기 위하여 여러가지 실험방법이 제안되어 있다. Maiti와 Smith[7]는 취성재료의 파괴인성을 평가하기 위하여 직선 균열을 갖는 무한판(infinite sheet)으로 실험하였으며, Atkinson[8]은 Brazillian Disk를 사용하여 실험하였다. Cotterell과 Mai[9]는 평면 응력상태하에서 박판의 전성파괴에 대하여 J적분값을 구하여 파괴인성을 평가하였다. 복합재료의 파괴인성 평가에 대하여는 G.C. Sih와 P.C. Paris, G.R. Irwin[10]은 이방성재질에 대한 균열선단의 응력장 방정식을 복소수이론을 사용하여 유도하였다. 균열성장에 대한 조건을 응력세기 계수로 정의하고 응력함수로 직접 평가하였다. D.C. Phillips[11]는 탄소섬유강화 에폭시와 탄소섬유 강화유리 복합재료의 임계응력계수를 구하고 파괴표면에너지를 Griffith-Iwin의 파괴기준으로 측정하여 선형탄성파괴역학을 적용할 수 있는 것을

보여 주었다.

D.F. Devitt와 R.A. Schapery[12]는 유리/에폭시 적층 복합재료의 균열진전량의 함수로 층간 분리 파괴인성을 구하기 위하여 외팔보의 형태로 하중을 작용시켜 서로 다른 두께의 시험편 넓은 범위의 하중의 크기로 실험을 수행하였다. J. P. Berry[13]는 폴리머(Glassy polymer)와 폴리스티렌(Polystyrene)에 대한 파괴 표면에너지를 측정하기 위하여 인장실험과 벽개(cleavage) 실험을 수행하였다. 그러나 복합재료는 재료의 특성과 파괴양상의 복잡성 때문에 아직까지 뚜렷한 파괴기준이 설정되어 있지 않은 실정이다.

본 연구의 목적은 유리섬유 mat의 함침량(Wt 20%, 30%, 40%)이 다른 GMT(glass mat reinforced thermoplastic) 복합재료와 Al(6061)을 전단력, 굽힘모우멘트, 비틀림모우멘트를 동시에 받는 혼합모드 하중조건에서 파괴인성을 구하기 위하여 AE(acoustic emission)를 이용하여 파괴개시점을 측정하고 광학 PSD(position sensing devices)를 사용하여 균열부의 3차원 변위를 측정함으로써 파괴인성 파라메타(parameter)인 J적분값인 J_c 값을 구하여 GMT와 Al의 파괴인성을 여러가지 혼합모드조건하에서 비교함으로써 복합재료의 파괴인성을 명확하게 하고자 한다.

2. J적분의 계산

편측균열시험편에 굽힘 모우멘트 M, 전단력 F, 비틀림 모우멘트 T가 동시에 작용하면 균열부분은 모드 I(개구형변위), 모드 II(면내의 전단변형), 모드 III(면외의 전단변형)가 동시에 만들어 지며 Fig.1과 같이 균열개구각 θ , 균열전단변위 U, 균

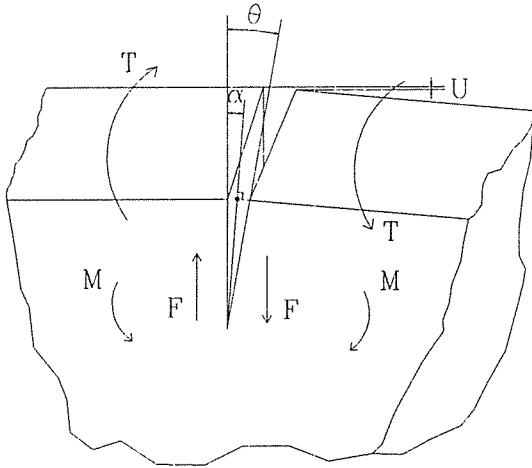


Fig. 1. Generalized aspect of deformation for the mixed mode crack

열부의 비틀림각 α 가 만들어진다. 균열에 대한 J 적분은 다음식으로 주어진다.

굽힘모우멘트 M으로 인한 균열 개구각 θ 가 만드는 모드 I 상태의 J 적분인 J_I 는 다음식으로 계산한다.

$$J_I = \frac{1}{B} \int_0^M \left(\frac{\partial \theta}{\partial \alpha} \right)_M dM = \frac{2}{LB} \int_0^\theta M d\theta \quad \dots\dots (1)$$

전단력 F로 인한 전단변위 U^p 와 U^e 가 만드는 모드 II 성분의 J 적분값 J_{II} 는 다음식으로 계산된다.

$$J_{II} = J_{II}^e + \frac{2}{LB} \left[\int_0^U F dU - \frac{1}{2} FU \right] \quad \dots\dots (2)$$

비틀림모우멘트 T로 인한 균열비틀림각 α 가 만드는 모드 III 성분의 J 적분값 J_{III} 는 다음식으로 계산된다.

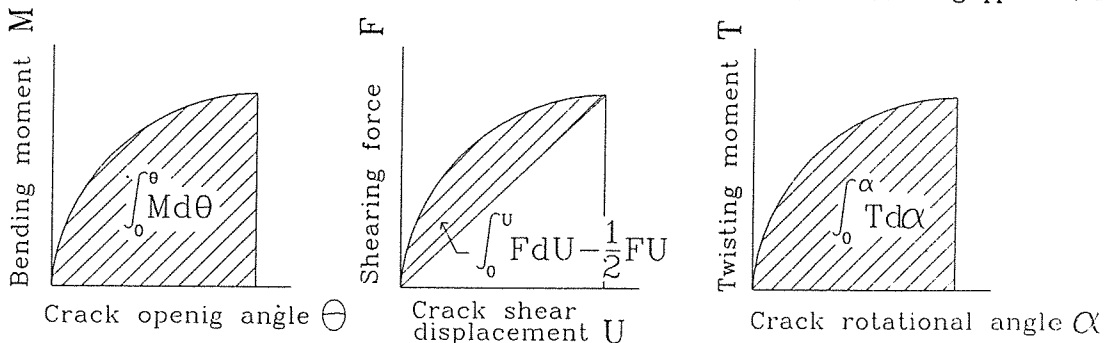


Fig. 2. M- θ , F-U and T- α of a specimen under mixed mode loading

$$J_{III} = \frac{1}{B} \int_0^T \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \alpha} \right)_T dT = \frac{2}{LB} \int_0^\alpha M d\alpha \quad \dots\dots (3)$$

결국 J의 값은 (1)식, (2)식, (3)식의 합으로 계산된다.

즉

$$J = J_I + J_{II} + J_{III} \quad \dots\dots (4)$$

J_{II} 는 모드 II의 탄성 부분이며 응력 확대 계수 K_{II} 는 다음과 같다.

$$K_{II} = \left(\frac{F}{WB} \right) \sqrt{\pi a F_{II}} \quad \dots\dots (5)$$

$$J_{II}^e = \frac{K_{II}^2}{E'} = \frac{\pi a F^2}{E'(WB)^2} F_{II}^2 \quad \dots\dots (6)$$

여기서

F_{II} : 수정계수

$$E' = \begin{cases} E & : \text{평면응력} \\ \frac{E}{1-\nu^2} & : \text{평면변형} \end{cases}$$

즉, 편축 균열을 갖는 시험편의 J적분은 Mode I 성분과 Mode II 성분, Mode III 성분의 합으로 계산된다. J_I 과 J_{II} , J_{III} 는 Fig.2에서와 같이 M- θ , F-U, T- α 선도로부터 얻어지며 이 방법의 타당성은 참고문헌[14]에서 혼합모드 균열에 의한 유한요소 해석에 근거를 두어 이미 증명한 바 있다.

3. 실험 장치 및 시험편

3-1. 부하장치 제작

본 실험에 사용한 부하장치(loading apparatus)는

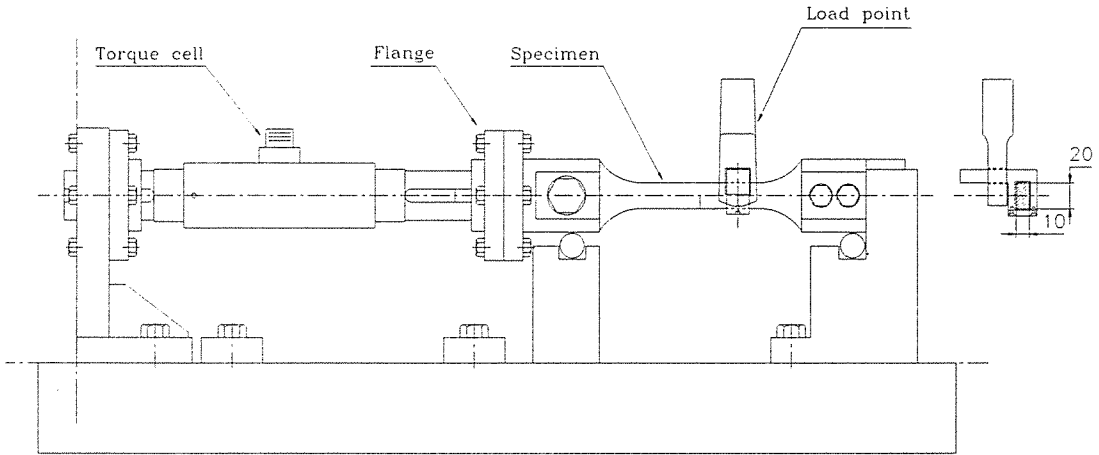


Fig. 3. Loading apparatus

한개의 하중점에서 혼합 모드가 만들어지도록 하였으며 ASTM E 813-81의 3점굽힘시험에 의한 J_{IC} 시험법에 근거를 두어 제작하였으며 특히, 접촉부의 저항 및 마찰을 최소화하기 위하여 가능하면 모든 접촉부는 점접촉 및 선접촉이 되도록 하였다. 부하장치의 개략도는 Fig.3과 같다. Fig.4는 부하장치와 시험편에 위치측정장치(position sensing device : PSD)의 부착된 모양을 보여준 것이다.

혼합 모드(모드 I+II+III)의 조건은 시험편에 고정구를 설치하여 한개의 하중점으로 압축하중과 함께 편심하중을 작용시킴으로서 시험편에는 굽힘모우멘트와 전단력 그리고 비틀림모우멘트가 동시에 작용하도록 설계하였다. 각 시험편의 굽힘모우멘트 M , 전단력 F , 비틀림모우멘트 T 의 크기와

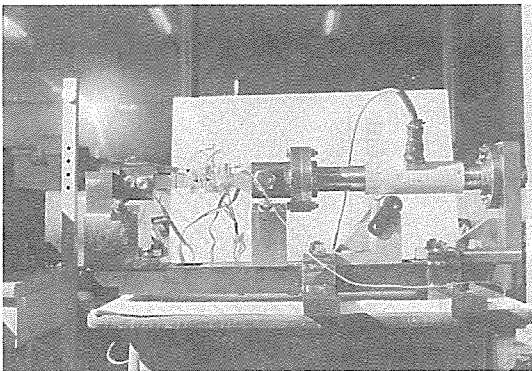
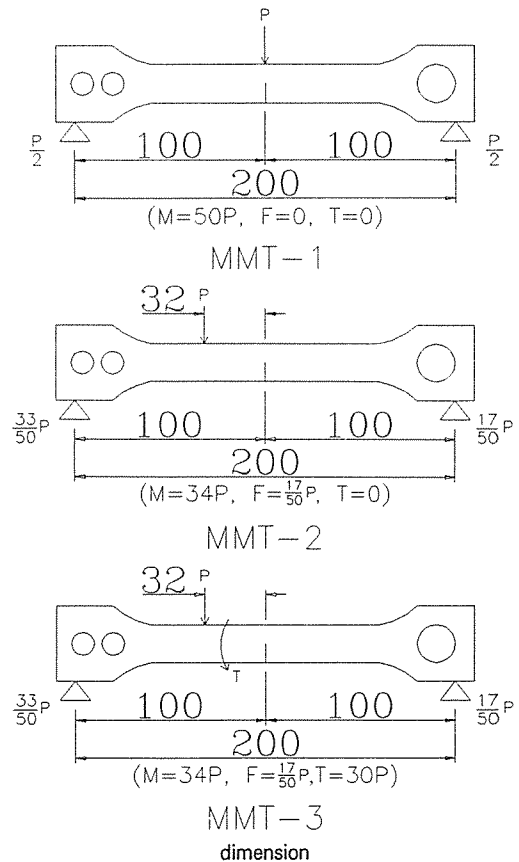


Fig. 4. Loading apparatus and aspect of specimen attachment

하중의 위치를 Fig.5에 표시하였다.



L : mm M : kN-mm F : kN T : kN-mm
 Fig. 5. Specimen geometrics and loading method

3-2. 시험편의 형상과 제작

1) 시험편의 제조

GMT(Glass mat reinforced thermoplastic)는 연속 섬유 강화된 sheet 형의 열가소성 복합재료이다. 즉 mat 형상의 유리섬유에 열가소성 수지를 함침한 sheet로서 프레스에 의하여 압축 성형법으로 성형 가공하였다. 기지는 폴리프로필렌(pp)을 사용하였다. Glass mat의 함침량은 20%, 30%, 40% Wt의 3가지 종류를 제조하였다.

2) 시험편의 형상

시험편은 glass mat의 함침량과 하중조건에 따라 각각 6개씩 준비하였으며 Fig.5에서 MMT-1은 3점굽힘 시험편으로서 순수 모드 I 시험편이며, MMT-2 시험편은 모드 I+II의 혼합모드 시험편으로서 균열길이 $a=10\text{mm}$, 폭 $B=10\text{mm}$, ligament 길이 $L=10\text{mm}$, 높이 $W=20\text{mm}$ 이다. 그리고

MMT-3은 혼합 모드(모드 I+II+III) 시험편으로서 응력집중을 방지하기 위하여 높이의 변화가 있는 부분은 곡선으로 제작하였으며 다른 조건은 3점굽힘 시험편과 동일하다.

3-3. 혼합 모드 균열의 변형 측정 장치

Fig.1에서 굽힘 모우멘트 M , 전단력 F , 비틀림 모우멘트 T 를 받는 혼합모드 시험편의 J적분을 계산하기 위하여 균열개구각 θ 와 균열 비틀림각 α , 균열전단변위 U 를 실시간에 따라 측정할 필요가 있다. 본 실험에서는 2차원 광학 PSD(position sensing device)를 사용하여 변형량 및 변형각을 측정하였다. 측정 시스템은 전자 다이오드 레이저, PSD, PSD신호 처리 장치이며 개략적인 측정 시스템은 Fig.6에서 보여주고 있다. 시험편의 표면에 부착된 PSD에 전자 다이오드 laser빔이 방사되면 시

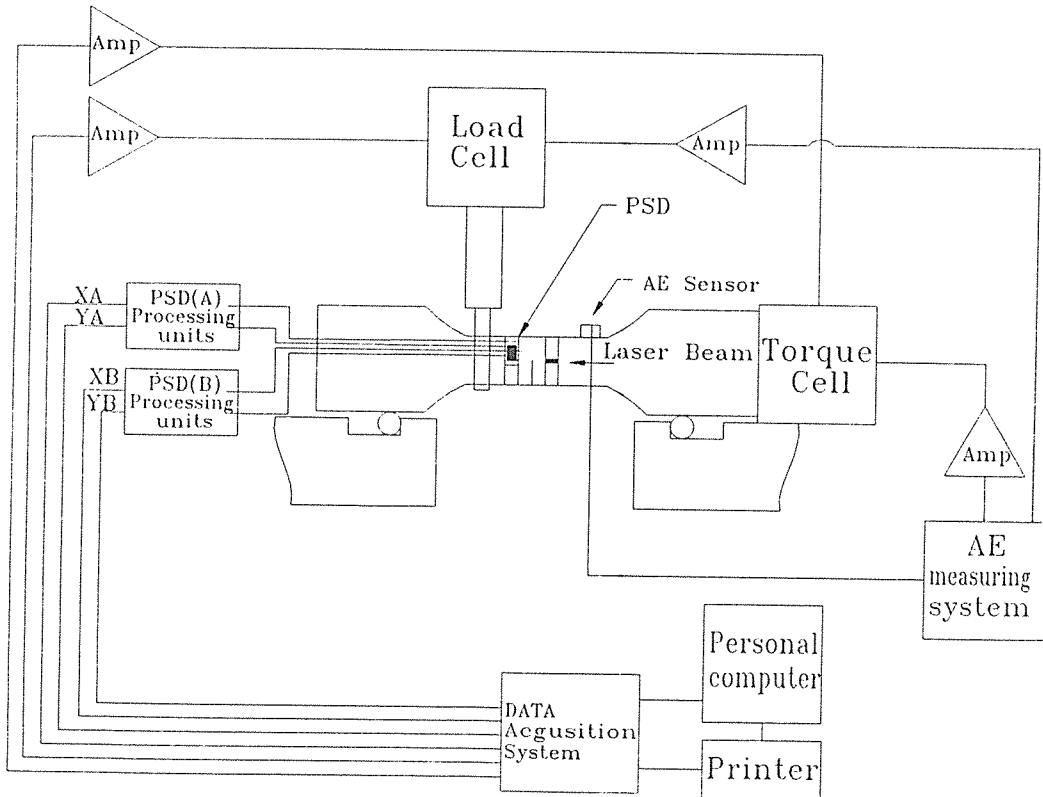


Fig.6. Measuring system for deformation of a mixed mode crack

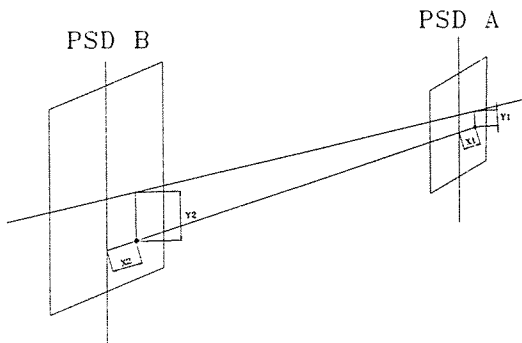


Fig. 7. Measuring principle of deformation in crack
 편의 변형과 함께 빔 spot의 움직이는 위치가 전
 압으로 측정된다. 그리고 빔 spot의 움직이는 거
 리는 Fig.7과 같이 각각 X1, Y1, X2, Y2로 하였다.

3-4. PSD의 측정 원리

Fig. 8은 시험편에 PSD와 laser beam을 부착시킨
 것이며 Fig.9는 모우멘트에 의하여 만들어지는 균열
 개구각 θ 의 측정 원리를 보여준 것이며 Fig.10은
 전단력에 의하여 만들어지는 전단변위 U를 측정
 하는 원리이고 Fig. 11은 비틀림 모우멘트에 의하여
 만들어지는 균열 비틀림 각 α 를 측정하는 원리를
 보여준 것이다. 그리고 균열개구각 θ , 균열전단변
 위 U, 균열비틀림각 α 는 다음 식(7)(8)(9)에서
 구한다.

굽힘 모우멘트 M에 의한 균열 개구각 θ 는

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Y2 - Y1}{d} \dots\dots\dots (7)$$

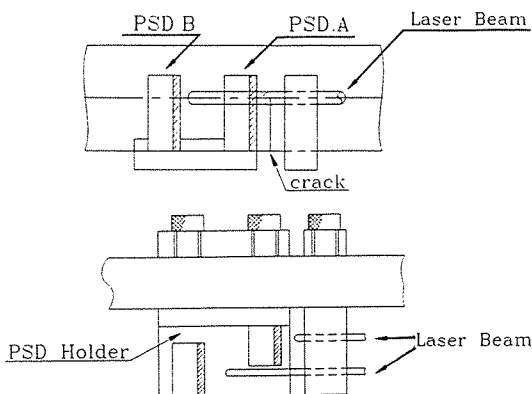


Fig. 8. Attachment of P.S.D and laser beam
 to a specimen

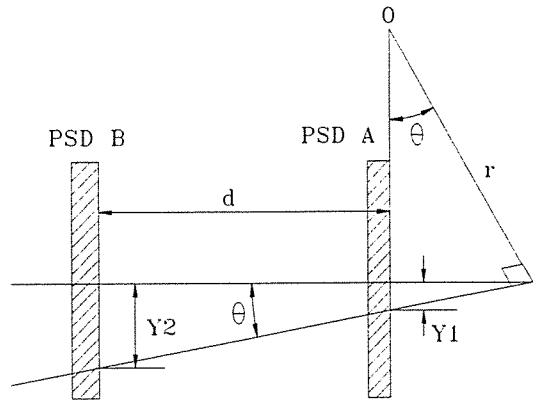


Fig.9. Measuring principle of a crack opening
 angle(θ) due to bending moment(M)

전단력 F에 의한 균열 전단변위 U는

$$U = Y1 - \overline{BC} = Y1 - r \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \dots\dots\dots (8)$$

θ 가 미소한 각 즉 변위가 미소하면 두번째 항은
 무시될 수 있다.

$$U \approx Y1$$

비틀림 모우멘트 T에 의하여 만들어지는 균열 비
 틀림각 α 는

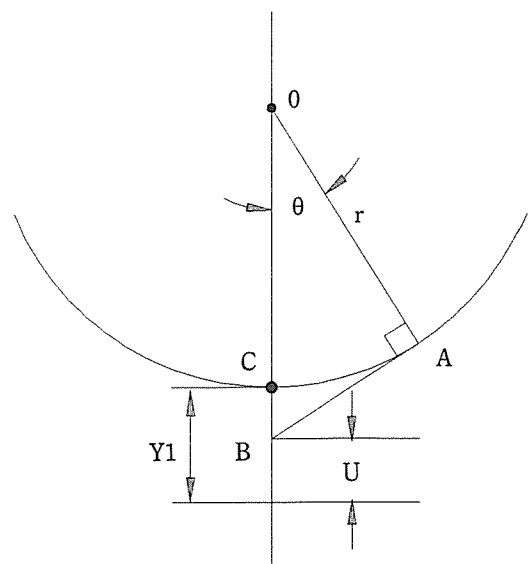


Fig.10. Measuring principle of a displacement(U)
 due to Shearing force(F)

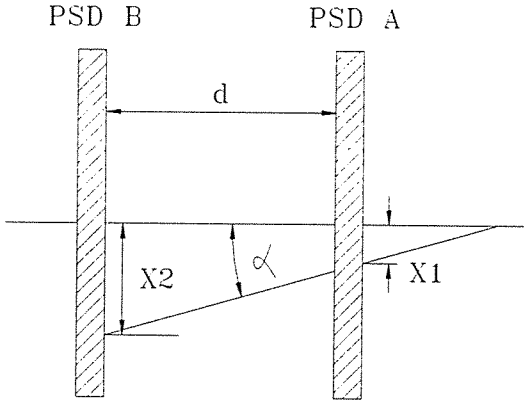


Fig. 11. Measuring principle of a crack twisting angle(α) due to twisting moment(T)

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{X2 - X1}{d} \dots\dots\dots (9)$$

식(8)에서 r의 값은 모드 I 상태에서 레이저 빔으로부터 회전 중심까지의 거리를 의미하는 것이며 회전 중심이 하중 방식에 의존되지 않는다는 가정 하에서 혼합모드 하중의 경우에도 동일한 r의 값을 갖는다고 할 수 있다.

본 실험에서 PSD를 사용하여 측정된 균열개구각(θ), 전단변위 U, 균열비틀림각(α)의 값을 정확도를 확인하기 위하여 알루미늄의 각 시험편에 대하여 균열개시 이후까지 하중이 가해진후 계측현미경(최대배율 50배, 분해능 0.01mm)을 사용하여 각각의 변위를 측정하여 θ, U, α 를 계산하고 PSD의 측정된 값과 비교한 결과 Table 1과 같다. 대체로 PSD의 측정값이 계측현미경에 의하여 측

Table 1. The comparison with measurement result of the optical PSD and digital reading microscope

Specimen		PSD	Reading microscope	Error base on PSD(%)
MMT-1	θ (rad)	0.0519	0.0493	5.0
	U (mm)	0.7917	0.79	0.21
MMT-2	θ (rad)	0.0680	0.0675	0.7
	U (mm)	0.7917	0.79	0.21
	α (rad)	0.047	0.045	4.26

Table 2. The mechanical property of GMT composite materials

Item	unit	GMT(Wt %)			Aluminium	Steel
		20	30	40		
Specific weight	-	1.02	1.12	1.23	2.7	7.8
Tensile strength	Kg/mm ²	6	9	13	16	28
Elastic modulus	Kg/mm ²	350	450	560	7200	21000
Izod	Kg cm	55	65	80		

정한 값보다 약간 큰값을 갖고 있지만 이것은 시편이 하중을 제거하면 균열개시이후라도 변위의 미소량이 복원되기 때문이라고 생각되며 결과적으로 PSD를 사용하여 측정값은 신뢰할 수 있을 것으로 본다.

4. 실험방법

본 실험에 사용한 GMT 복합재료는 Table 2와 같은 기계적 성질을 갖고 있다.

피로예균열은 복합재료의 특성 때문에 칼날을 사용하여 만들었다[15]. 3점굽힘 시험과 본 실험에서 개발된 혼합 모드 시험은 상온에서 실행하였다.

본 실험에 사용한 압축시험기는 일본에서 제작한 25 Ton 만능재료시험기로서 0.5 mm/min의 속도로 하중을 작용시켰으며 변형은 평면 변형 상태로 가정하였다. 균열개시점은 AE(acoustic emission)를 이용하여 측정하였다.

실시간에 다른 균열개구각 θ , 전단변위 U, 균열비틀림각 α 은 PSD의 A와 B에서 각각 전압으로 측정되어 자료획득 장치(data acquisition system)에 저장되도록 하였다. 하중점에서 하중은 재료 시험기의 로드셀(load cell)에서 측정되고 비틀림으로 인한 비틀림모우먼트는 부하장치에 설치된 토르크 변환기(torque transducer)에서 측정하였다. Fig. 15의 (a), (b), (c), 16의 (a), (b), 17로 부터 면적을 구하여 식(1), (2), (3)에 대입하여 $J_{Ic}, J_{IIc}, J_{IIIc}$ 의 값을 각각 계산하고 식(4)로부터 J_c 를 결정하였다.

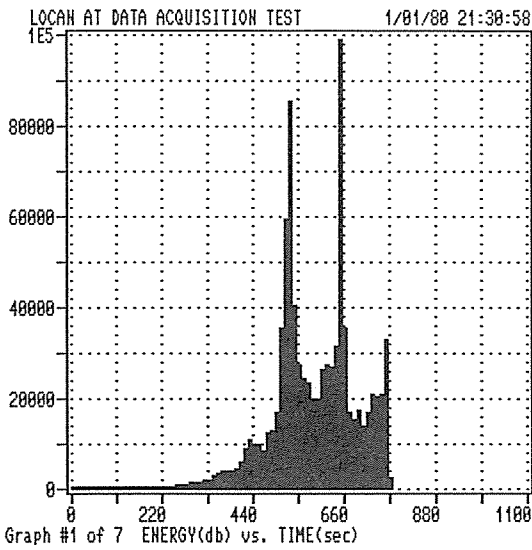


Fig. 12. AE signal for the MMT-2 specimen (40% Wt)

균열개시점은 미국에서 제작한 Locan AT인 AE (acoustic emission) 장비를 사용하였으며 Threshold 30dB, HDT(hit definition time) 200 μ s, PDT(peak definition time) 50 μ s, HLT(hit lockout time) 300 μ s로 하여 preamplifier 40 dB(single), AE sensor는 R15 I 를 사용하여 균열부로부터 40

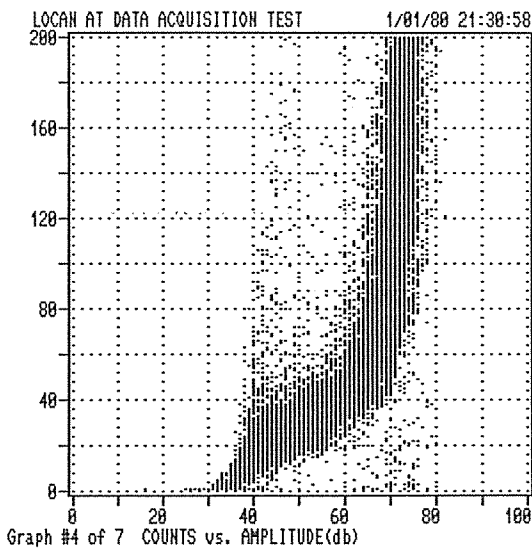


Fig. 13. AE signal for the MMT-2 specimen (40% Wt)

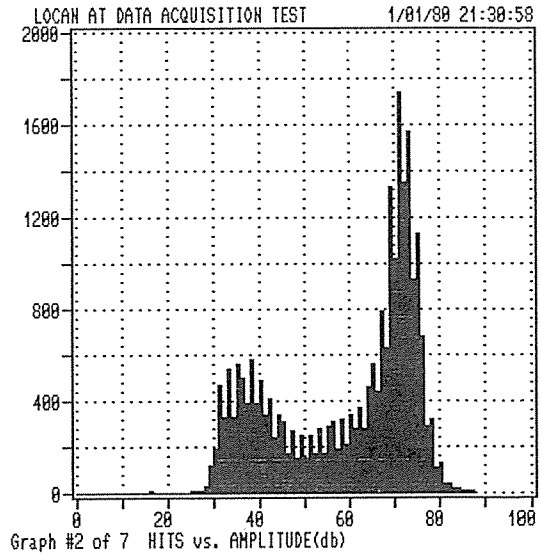


Fig. 14. AE signal for the MMT-2 specimen (40% Wt)

mm 떨어진 위치에 부착하였으며 균열개시점을 균열선단부에 부착하여 균열개시점을 비교하므로써 균열개시점에서의 count수, event수, 진폭, AE 에너지의 기준점을 설정하였다. 실험에 의하면 시험편의 하중조건과 glass mat의 함침량에 관계없이 진폭이 70 dB 정도에서 AE 에너지와 이벤트수가 급증하는 것을 알았다. 따라서 본 실험에서는 진폭 70 dB 이상에서 AE 에너지와 이벤트 수가 급증하는 점을 균열개시점으로 판정하였으며 이 때의 시간을 구하여 J 적분값을 계산하므로써 재료의 파괴인성을 평가할 수가 있었다. Fig. 12와 13, 14는 대표적인 시험편에 대하여 시간에 따른 AE의 에너지, 진폭과 hit 수, count 수의 변화를 보여준 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 균열개시점에서 진폭이 70 dB이며 시간은 하중이 가해진후 530 초에서 균열이 개시됨을 알 수 있다.

5. 실험결과 및 검토

Fig. 15의 (a), (b), (c)는 시험편 MMT-1, MMT-2, MMT-3에 대하여 실험에서 얻어진 굽힘모우멘트(M)와 균열개구각(θ)의 관계를 그래픽한 것이다. 각 시험편의 함침량 별로 분석하여 보면 일

정한 크기의 균열개구각을 만드는데 저항하는 모우멘트는 MMT-1, MMT-2 시험편에서는 Wt %가 많은 시험편이 큰값을 갖는 경향이 있으며 MMT-3인 모드 I + 모드 II + 모드 III가 동시에 작용하는 경우는 20%의 시험편이 현저히 작은 저항모우멘트를 갖고 30%와 40% 시험편의 경우는 균열개구각(θ)이 0.1 rad까지는 거의 같은 저항모우멘트를 갖고 균열개구각이 더욱 커지면 40% 시험편의 저항모우멘트 값이 큰값을 갖는다. 하중조건에 따라 분석하여 보면 MMT-1, MMT-2, 시험편의 저항모우멘트는 함침량 별로 거의 비슷하지만 MMT-

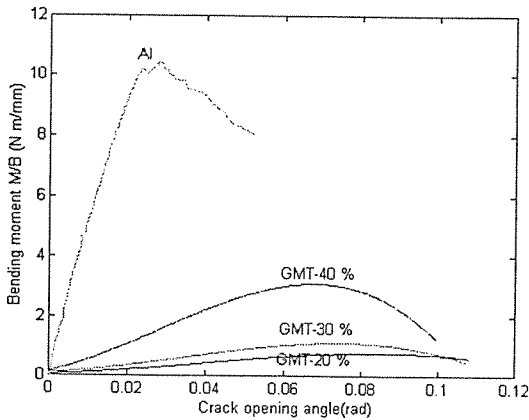


Fig. 15(a). Relation of bending moment(M) and crack opening angle(θ) Wt % for the GMT composite materials and Al(6061) in MMT-1 specimen.

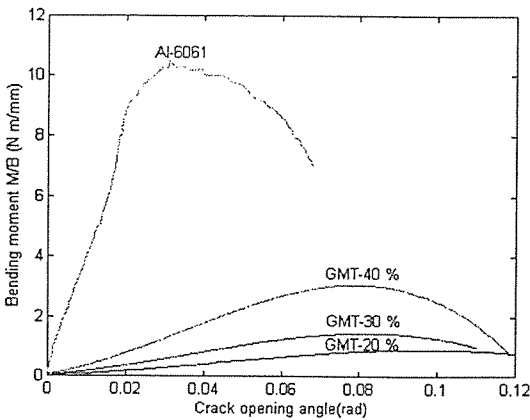


Fig. 15(b). Relation of bending moment(M) and crack opening angle(θ) Wt % for the GMT composite materials and Al(6061) in MMT-2 specimen.

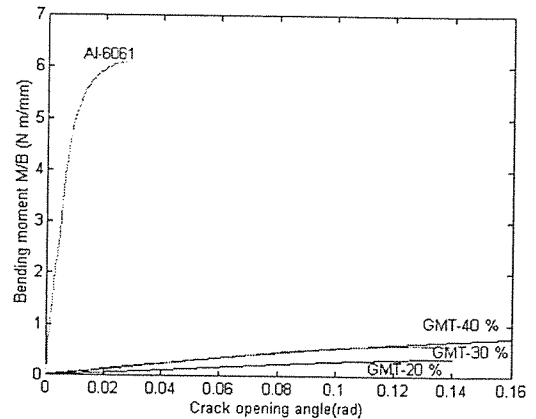


Fig. 15(c). Relation of bending moment(M) and crack opening angle(θ) according to Wt % for the composite materials and Al(6061) in the MMT-3 specimen.

3는 MMT-1 또는 MMT-2에 비하여 상당히 작은 값을 갖는다. AI은 모든하중조건에서 GMT 복합재료 비하여 작은 균열개구각에 따라 큰 저항굽힘모우멘트 값을 갖는다.

Fig. 16의 (a), (b) 시험편과 함침량 별로 전단력(F)와 전단변위(U)의 관계를 그래픽한 것이다. Glass mat의 함침량에 따라 분석하여 보면 MMT-2, MMT-3 시험편에 대하여 공히 전단변위에 따른 전단력은 함침량이 큰 시험편이 큰값을 갖는다. 시험편 별로 분석하여 보면 MMT-2에 비하여

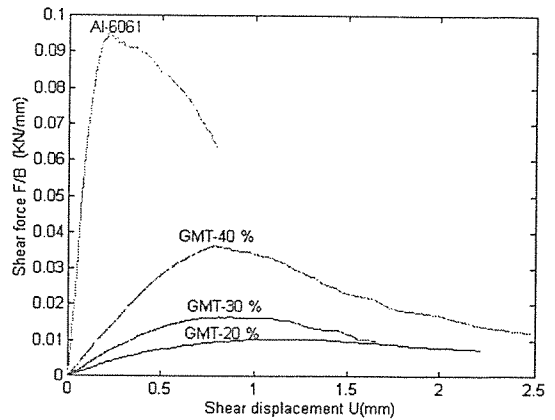


Fig. 16(a). Relation of shear force(F) and shear displacement(U) according to Wt % for the GMT composite materials and Al(6061) in the MMT-2 specimen.

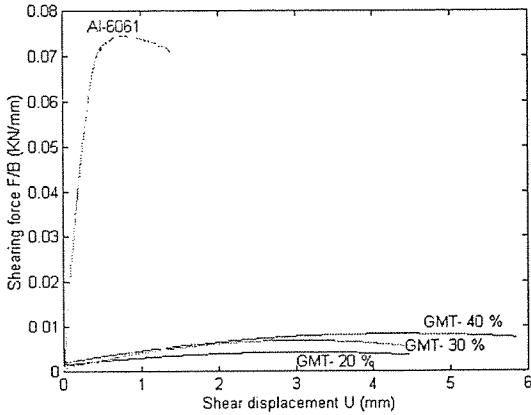


Fig. 16(b). Relation of shear force(F) and shear displacement(U) according to Wt % for the GMT composite materials and Al(6061) in the MMT-3 specimen.

MMT-3가 최대 전단력을 기준으로 하여 상당히 작은 저항전단력을 갖는다. Al은 모든 하중조건에 따라 GMT 복합재료에 비하여 미소전단변위를 만드는데 큰 전단력이 필요함을 알 수 있다. Fig. 17은 MMT-3 시험편의 비틀림모우멘트(T)와 균열회전각(α)에 대한 관계를 그래픽한 것이다. 비틀림저항모우멘트는 함침량이 큰 것이 큰 값을 갖는다. Al의 경우는 역시 GMT 복합재료에 비하여 모든 시험편이 큰 비틀림모우멘트에 대하여 작은 균열 비틀림각을 만든다.

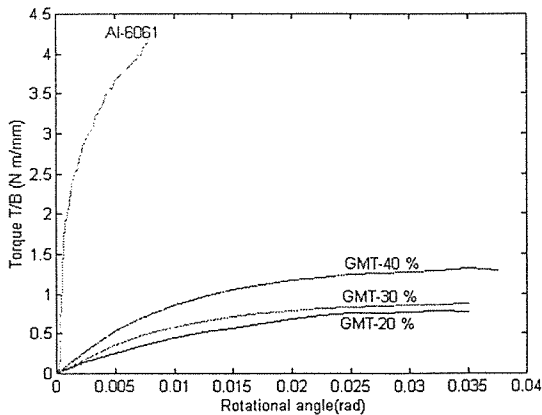


Fig. 17. Relation of torque(T) and rotational angle (α) according to Wt % for the GMT composite materials and Al(6061) in the MMT-3 specimen.

Fig. 18의 (a), (b), (c)는 MMT-1, MMT-2, MMT-3 시험편의 균열개구각(θ)의 변화에 따른 모드 I 성분의 J적분 값인 J_I 을 표시한 것이다. 순수모드 I인 MMT-1 시험편과 모드 I+II인 MMT-2 시험편의 J_I 값은 함침량 40%가 가장 큰 값을 갖는다. 그러나 모드 I+II+III인 MMT-3 시험편에서는 30%, 40%가 거의 같은 J_I 값을 갖지만 20%는 가장 작은 값을 갖는다.

Fig. 19의 (a), (b)는 시험편 MMT-2와 MMT-3의 모드 II의 J적분 값인 J_{II} 를 전단변위(U)의 변화에 따라 표시한 것이다. MMT-2 시험편에서는

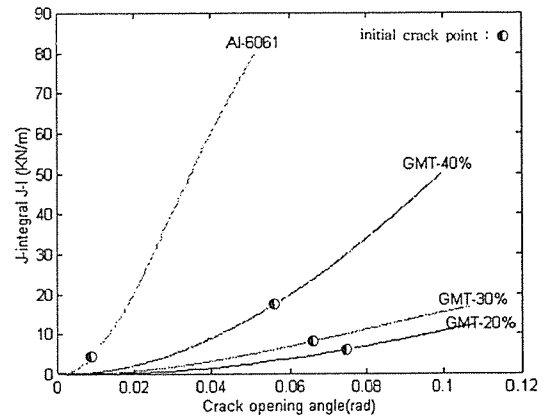


Fig. 18(a). J-integral(J_I) and crack opening angle (θ) according to Wt % for the GMT composite materials and Al(6061) in the MMT-1 specimen.

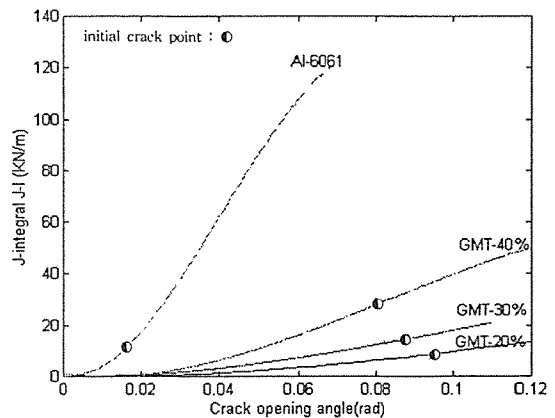


Fig. 18(b). J-integral(J_I) and crack opening angle (θ) according to Wt % for the GMT composite materials and Al(6061) in the MMT-2 specimen.

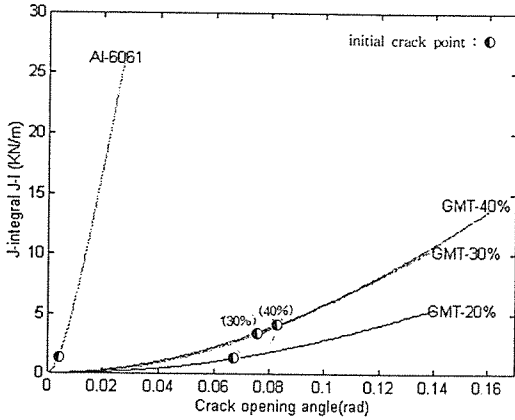


Fig. 18(c). J-integral(J_I) and crack opening angle (θ) according to Wt % for the GMT composite materials and Al(6061) in the MMT-3 specimen.

J_{II} 값이 함침량이 큰 40%의 경우가 가장 큰 값을 갖고 함침량 별로 현저한 차이를 갖지만 MMT-3는 일정한 전단변위까지 거의 같은 J_{II} 값을 갖는다. 그러나 MMT-2 보다 MMT-3 시험편이 함침량 별로 공히 상당히 작은 J 값을 갖는다.

Fig. 20은 모드 I + II + III 인 MMT-3 시험편에 대한 J 적분값인 J_{III}을 균열비틀림각(α)의 변화에 따라 표시한 것이다. J_{III} 값은 동일한 비틀림각에 대하여 함침량의 값이 큰 40%의 경우가 가장 큰 값을 갖는다.

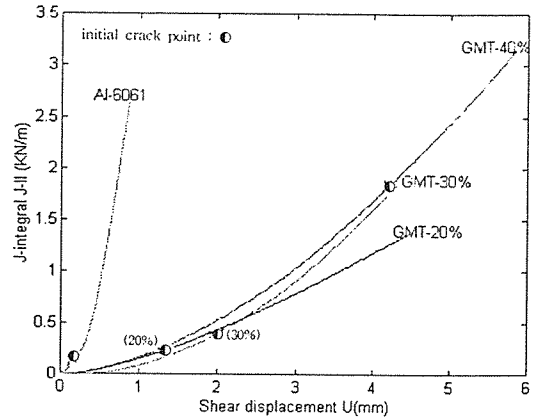


Fig. 19(b). J-integral(J_{II}) and shear displacement (U) according to Wt % for the GMT composite materials and Al(6061) in the MMT-3 specimen.

균열개시점에서 glass mat의 함침량에 따른 균열개구각을 비교하여 보면 MMT-1과 MMT-2는 균열개시점에서 균열개구각이 glass mat의 함침량이 많을 수록 작는데 비하여 MMT-3에서는 함침량이 많을 수록 균열개구각이 큰 것을 볼 수 있다. 또한 균열개시점에서 J_I 값은 모든 시험편에 대하여 공히 glass mat의 함침량이 가장 많은 40%의 경우가 제일 큰 값을 갖는다.

전단변위에 따른 균열개시점은 MMT-2와 MMT-3에서는 함침량이 20%와 30%의 경우가 거의

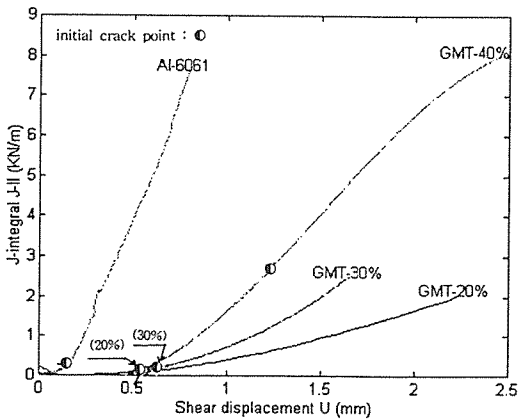


Fig. 19(a). J-integral(J_{II}) and shear displacement (U) according to Wt % for the GMT composite materials and Al(6061) in the MMT-2 specimen.

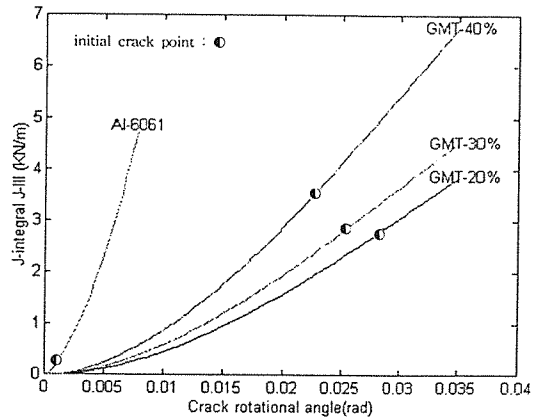


Fig. 20. J-integral(J_{III}) and crack rotational angle (α) according to Wt % for the GMT composite materials and Al(6061) in the MMT-3 specimen.

비슷한 값에서 만들어지지만 함침량이 40%의 경우는 현저하게 큰 값에서 발생됨을 알 수 있다. 균열개시점에서 J_{II} 값은 함침량에 비례하여 40%의 경우가 가장 큰 값을 갖는다. 균열비틀림각에 따른 균열개시점은 함침량이 많을 수록 작은 각에서 발생되며 균열개시점에서 J_{III} 값은 함침량이 많을 수록 큰 값을 갖는다. AI의 경우에 균열개시점을 GMT 복합재료와 비교하여 보면 모든 시험편에 대하여 GMT 보다는 작은 균열개시각, 전단변위, 균열비틀림각에서 만들어지며 균열개시점에서 J 값도 작은 값을 갖는다.

Fig. 21은 GMT 복합재료의 MMT-1과 MMT-2 시험편의 함침량별로 J_I 과 J_{II} 의 관계를 표시한 것이다. 균열개시점의 J 값은 모드 I 시험편과 모드 II 시험편이 공히 함침량의 값이 큰 40%의 경우가 가장 큰 값을 갖고 있다.

Fig. 22는 GMT와 AI의 J_I, J_{II}, J_{III} 값을 갖는 MMT-3 시험편에 대하여 3차원 공간좌표에 표시한 것이다. 함침량에 따른 균열개시점의 J 값을 보면 역시 함침량이 40%의 경우가 가장 큰 값을 갖으며 AI의 경우는 GMT의 어느 시험편 보다 가장 작은 J_c 값을 갖는다.

Table 3. 은 시험편의 하중조건과 함침량의 변화에 따른 균열개시점에서 J 적분값과 하중의 크기, 작용한 하중에서 최고하중을 보여준 것이다. 또한 본

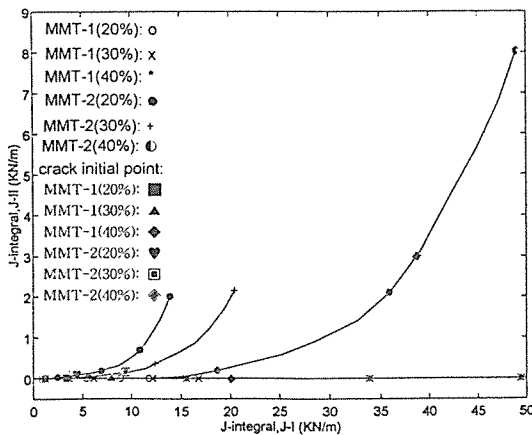


Fig. 21. Loading processes and condition of crack initiation on J_I - J_{II} coordinate according to Wt % for the MMT-1 and MMT-2 specimens.

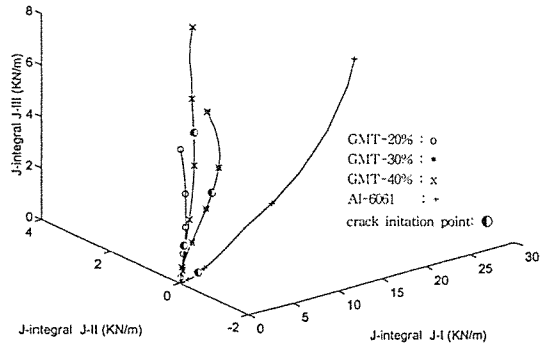


Fig. 22. Loading processes and condition of crack initiation on J_I - J_{II} - J_{III} coordinate according to Wt % for the GMT composite materials and AI(6061) in the MMT-3 specimen.

실험과 동일한 조건에서 AI(6061)을 사용하여 실험한 균열개시점에서 J 적분값을 보여준 것이다. 함침량이 40%인 GMT 복합재료와 AI에서 하중조건에 따른 파괴인성은 모드 I + 모드 II 인 MMT-2 시험편이 가장 큰 값을 갖고 있으며 모드 I + 모드 II + 모드 III의 혼합모드인 MMT-3 시험편이 가장 작은 값을 갖고 있다. 동일한 하중조건에서 glass mat의 함침량에 따른 파괴인성은 함침량이 가장 많은 40%가 제일 큰 값을 갖는다.

AI(6061)의 파괴인성치와 비교하면 동일한 하중 조건에서 GMT(40 Wt%) 복합재료가 더 큰 파괴인성을 갖고 있는 것을 볼 수 있으며 AI에서 MMT-1과 MMT-3의 파괴인성치는 비는 약 6인데 비하여 GMT 복합재료(40 Wt%)에서는 약 2의 값을 갖는다. 이것은 알루미늄과 같은 금속재료에서는 혼합모드(모드 I + 모드 II + 모드 III)의 하중이 작용하면 파괴인성이 급격히 감소함을 의미하며 GMT 복합재료의 파괴인성이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

glass mat의 함침량이 동일한 조건에서 순수모드 I 인 MMT-1 시험편과 모드 I + II + III인 MMT-3 시험편의 파괴개시점에서 J 적분값의 차이 정도는 Wt 20%가 가장 작고 함침량이 가장 큰 Wt 40%가 가장 큰 값을 갖는다. 이것은 glass mat의 함침량이 많을 수록 혼합모드(모드 I + 모드 II + 모드 III) 하중에 대하여 파괴인성에 취약함을 의미한다.

Table 3. Comparison of the experimental value according to the various specimen

materials	specimens	impregnated rate of glass mat(Wt %)	J-integral value for the initial crack point (KN/m)	sum of J-integral for the initial crack point(KN/m)	load of initial crack point(KN)	maximum load (KN)
GMT Composite Materials	MMT-1	20	$J_I = 4.4328$	$J_c = 4.4328$	0.1495	0.1738
	MMT-2	20	$J_I = 3.2499$ $J_{II} = 0.0585$	$J_c = 3.3084$	0.1946	0.302
	MMT-3	20	$J_I = 0.9374$ $J_{II} = 0.2999$ $J_{III} = 2.9417$	$J_c = 4.179$	0.0293	0.0518
	MMT-1	30	$J_I = 7.5317$	$J_c = 7.5317$	0.233	0.2623
	MMT-2	30	$J_I = 6.9976$ $J_{II} = 0.0746$	$J_c = 7.0722$	0.8284	1.0638
	MMT-3	30	$J_I = 3.8822$ $J_{II} = 0.3876$ $J_{III} = 2.0134$	$J_c = 6.2832$	0.0446	0.0581
	MMT-1	40	$J_I = 20.29$	$J_c = 20.29$	0.6838	0.7229
	MMT-2	40	$J_I = 39.4676$ $J_{II} = 3.1143$	$J_c = 42.5819$	0.3831	0.4813
	MMT-3	40	$J_I = 4.6989$ $J_{II} = 2.0959$ $J_{III} = 4.6981$	$J_c = 11.4921$	0.0823	0.0894
A1(6061)	MMT-1	-	$J_I = 3.54$	$J_c = 3.54$	0.8599	2.804
	MMT-2	-	$J_I = 16.23$ $J_{II} = 0.1571$	$J_c = 16.3871$	1.9402	2.4078
	MMT-3	-	$J_I = 0.5473$ $J_{II} = 0.0395$ $J_{III} = 0.0105$	$J_c = 0.5973$	0.4343	1.5134

6. 결 론

광학 PSD를 이용한 GMT 복합재료의 파괴인성을 평가하기 위하여 혼합모드(모드 I + 모드 II + 모드 III)가 작용하는 부히장치를 제작하여 실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 동일 하중조건에서 glass mat의 함침량에 따른 파괴인성은 glass mat의 함침량이 큰 시험편이 큰 값을 갖는다.

(2) Glass mat의 함침량이 동일한 조건에서 순수모드 I인 MMT-1과 모드 I + II + III의 혼합모드인 MMT-3와의 파괴개시점에서 J값의 차이 정도는 Wt 20%가 가장 작고, Wt 40%의 경우가 가장 큰 값을 갖는다.

(3) 균열개시점에서 AE의 진폭은 시험편의 하중

조건, Glass Mat의 함침량에 관계없이 일정한 값을 갖는다.

(4) GMT 복합재료(Wt 40%)의 파괴인성치는 알루미늄(6061)의 파괴인성치 보다 큰 값을 갖으며 특히, 혼합모드인 MMT-3 시험편에 대한 파괴인성치는 더욱 큰 차이값을 갖는다.

참 고 문 헌

1. Keiichiro. Tohgo and Hitoshi. Ishii., 1992, "Elastic-Plastic Fracture Toughness Test under Mixed Mode I - II Loading," Engineering Fracture Mechanics, Vol.41, No.4, pp.529-540.
2. Eradogan. F and Sih. G. C., 1963, "On the Crack Extention in Plates under Plane Loading

and Transverse Shear”, Trans ASME, Ser. D85, pp.519-527.

3. Williams. J. G and Ewing. P. D., 1972, “Fracture under Complex Stress-the Angled Crack Problem”, International Journal of Fracture Mechanics, Vol.8, No.4, pp.441-446.

4. Sih. G. C., 1974, “Strain Energy Density Factor Applied to Mixed Mode Crack Problem”, International Journal of Fracture. 10, pp.305-321.

5. Shih. C. F., 1974, “Small-Scale Yielding Analysis of Mixed Mode Plane-Strain Crack Problem”, ASTM STP 560, pp.187-210.

6. Gurson. A. L., 1977, “Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth”, Trans. ASME, ser. A99, pp.2-15.

7. Maiti. S. K and Smith R. A., 1983. “Theoretical and Experimental Studies on the Extension of Cracks Subjected to Concentrated Loading near their Faces to Compare the Criteria for Mixed Mode Brittle Fracture”, J. Mech. Phys. Solids. Vol.31, No.5, pp.389-403.

8. Atkinson, C., 1982., “Combinded Mode Fracture via the Cracked Brazilian disk test,” International Journal of Fracture. Vol.18, No.4, pp.279-291.

9. Cotterell. B, Lee. E and Mai. Y. W., 1982, “Mixed mode plane stress ductile fracture”, International. J. Fracture, 20, pp.243-250.

10. Sih. G. C, Paris. P. C and Irwin. G. R.,

1965, “On cracks in Rectilinearly Anisotropic Bodies,” International J. Fracture Mechanics. Vol. 1, pp.189-203.

11. Phillips. D. C., 1973, “The Fracture of Carbon Fibre Laminates,” J. Composite Materials, Vol.8, pp.130-141.

12. Devitt. D. F and Schapery. R. A., 1980, “A Method for Determinated the Mode I Delamination Fracture Toghness of Elastic and Viscoelastic Composite Materials,” J. Composite Materials, Vol.14, pp.270-285.

13. Berry. J. P., 1993, “Determination of Fracture Surface Energies by the Cleavage Technique,” Journal of Applied Physics, Vol.34, No.1, pp.62-68.

14. 東郷敬一郎. 大塚昭夫. 野嶋泰資. “曲けとせん断を受ける混合モード片側き裂試験片のJ積分簡便評價法,” 日本機械學會 論文集 A編, 第55巻 第519號, pp.2307-2315.

15. 이억섭, 한민구, 1993, 복합재료 파괴역학, 원창출판사, pp.62-74.

16. 배성일, 한민구, 1993, 파괴역학실험법, 원창출판사, pp.73-106.

17. 이대길, 1993, 복합재료역학 및 가공법, 성안당, pp.103-122.

18. Whitney, J. M., Daniel, I. M and Pipes, R. B., Experimental Mechanics of Fiber Reinforce Composite Materials, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp.203-233.