

## 論文

## 탄소섬유 복합재료의 적층방법에 따른 파괴인성과 AE거동

이상국\* · 김옥균\* · 남기우\* · 오세규\*

## Fracture Toughness and AE Behavior by the Change of Stacking Method of CFRP

S.G. Lee\*, O.G. Kim\*, K.W. Nam\* and S.K. Oh\*

## ABSTRACT

This study is aimed to construct a database of system development for predicting, monitoring and analyzing of fracture toughness and behavior of CFRP laminates through AE technique. It was found in the evaluation on fracture toughness and behavior by the change of stacking method using AE that fracture toughness had highest value in zero degree specimen than those of other fiber angle, and decreased proportionally to increase of fiber angle. AE-event counts generated during fracture toughness test increased proportionally to increase of fracture toughness, and also AE amplitude and AE energy increased with increase of fracture toughness and AE-event count had nothing to do with fiber direction.

## 초 록

본 연구에서는 AE장치를 사용하여 탄소섬유복합재료의 파괴인성과 거동에 대한 예측, 모니터링 및 해석을 할 수 있는 시스템개발의 데이터베이스를 구축하는데 목적이 있다. 적층판의 섬유배향각 변화에 따른 파괴인성과 파괴거동 특성을 연구하였다. 탄소섬유복합재료에서는 섬유배향각이 증가할수록 AE신호는 낮은 하중에서 발생하기 시작하여 초기손상이 급진전되는 것으로 확인되었다. 섬유배향에 따른 파괴인성 $K_{Ic}$ 와 AE-event count사이에는 상호 비례관계에 있으며, AE진폭과 에너지는 섬유배향에 의존하지 않고 파괴인성과 AE-event count와 함께 거의 선형적으로 비례하여 증가하는 분포를 나타내었다. 섬유배향각에 따른 균열전파는 노치선단에서 섬유배향 방향으로 진전되는 양상이 관측되어 탄소섬유복합재료 적층판의 균열전파방향의 예측이 가능하였다.

## 1. 서 론

섬유강화 복합재료는 경량성, 내식성등이 우수하여 우주항공, 자동차 및 선박등의 구조부재로서 점점 많이 사용되고 있는 실정이므로, 강도에 관한

문제가 중요한 관점으로 대두되고 있다. 그러나 섬유강화 복합재료는 재료특유의 이방성과 불균일성 또는 재료의 제조과정에서 발생하는 각종 형태의 결함을 내재할 가능성이 크고 적층각 또는 적층순서에 따라 매우 복잡한 파괴특성을 갖고 있다. 따

\* 부산수산대학교 공과대학

라서 복합재료를 구조용 재료로 사용하기 위하여는 재료내부에 존재하는 각종 손상 및 결함이 어떠한 성장과정을 거쳐 최종파괴에 이르는가 하는 연구가 필요하다. 또한 이에 관한 해석 방법과 복합재료의 파괴거동이 대단히 정성적이기 때문에 정량적인 파괴역학적 해석방법의 도입도 최근 시급히 필요한 실정이다[1~6]. 한편, 저자등은 복합재료의 미손상재와 충격손상재에 있어서 인장시험시 발생하는 AE를 측정하여 파괴거동을 구명하였다[7,8].

본 연구에서는 섬유강화복합재료의 파괴인성 및 파괴거동에 영향을 미치는 주요 인자중에서 적층방법에 따른 특성을 평가하기 위하여 파괴인성시험을 수행하였다. 또한, 이때 발생한 AE특성과 파괴거동을 상호 비교, 분석하여 적층방법에 따른 파괴거동을 AE에 의해 정성적 및 정량적으로 구명하고자 하였다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2-1. 시험편제작

본 연구에 사용된 시험편은 일방향강화 탄소섬유/에폭시 수지의 프리프레그(CU250NS)를 적층성형하여 제작하였다. 사용된 섬유 및 프리프레그의 기계적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. The mechanical properties of carbon fiber and prepreg

Property	Unit	Carbon fiber	Prepreg
Tensile strength	MPa	5,096	1,764
Tensile modulus	MPa	298,900	135,543
Elongation	%	1.7	—
Density	kg/m <sup>3</sup>	$1.76 \times 10^{-4}$	—
Filament count		12,000	—
Yield (tex)		410	—
Filament diameter	μm	5	—
Resin content	wt%	—	36 ± 2%
Carbon fiber weight	kg/m <sup>2</sup>	—	0.25

시험편은 프리프레그를  $[90_2/\theta_2]_S$  및  $[90/\theta]_{2S}$ 의 2종류 적층방법으로 프레스성형기에서 성형하였다. 이때 각각의 적층판은 프리프레그를 8ply 적층하였으며, 섬유 중량비는 약 53wt%이다. 성형조건은

초기압력 20kgf/cm<sup>2</sup>하에서 3.7°C/min의 승온속도로 130°C까지 승온한 후, 성형압력 200kgf/cm<sup>2</sup>하에서 90분간 유지하였다[7]. 그 후, 시험편 내부의 잔류열응력으로 인한 휨을 방지하기 위하여 성형압력을 유지한 상태에서 0.6°C/min의 냉각속도로 서서히 상온까지 냉각하였다. 성형된 적층판은 다이아몬드 휠톱을 사용하여 ASTM 규격 E399에 의거하여 Fig.1과 같은 컴팩트 인장(compact tension, CT) 시험편으로 가공하였다. 시험편의 노치는 선단에 정밀절단기를 이용하여 길이 2mm, 폭 0.2mm의 균열을 내었다. 그리고  $[90_2/\theta_2]_S$  및  $[90/\theta]_{2S}$  시험편의 적층성형시 섬유배향은 Fig.1에 나타난 것과 같이 배향각도  $\theta$ 를 0°, 15°, 30°, 45°로 하였다.

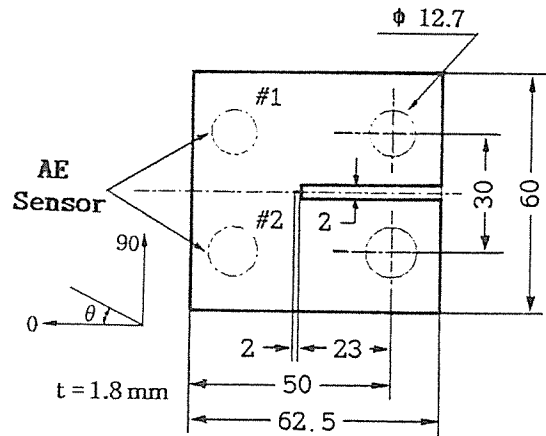


Fig.1. Dimension of compact tension specimen; all dimension in mm

### 2-2. 실험방법

#### 2-2-1. 파괴인성 $K_{IC}$

복합재료의 파괴인성 평가에 있어서는 시험편의 형상과 치수, 하중의 부하방법 및 균열길이 등의 영향을 받는 경우가 많다. 파괴인성  $K_{IC}$ 는 초기균열을 가공한 시험편의 하중-변위선도로 부터 구해지는 변수로서, 하중-변위곡선이 최대하중까지 선형성을 유지하면 최대하중을 이용하여 결정하고 있다[3]. 그러나 Fig.2와 같은 하중-변위곡선을 나타내면, 각각에 대하여 5% offset선을 그어서 하

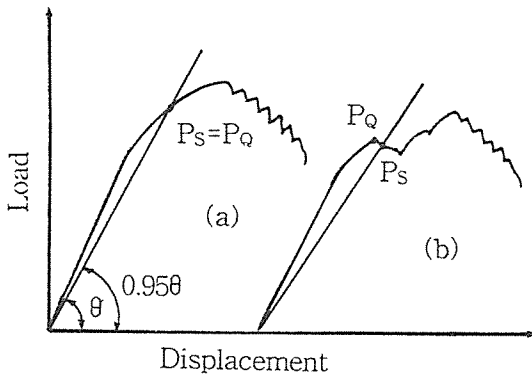


Fig. 2. Load-displacement curve during fracture toughness test

중-변위곡선이 만나는 점의 하중  $P_Q$ 를 구한다. 파괴인성  $K_{Ic}$ 를 구할 때는 그림에서 표시하는 하중  $P_Q$ 를 사용한다. 즉 (a)에서는  $P_Q = P_S$ 가 되고, (b)에서는  $P_S$ 에 이르기 전의 최대하중  $P_Q$ 가 된다.

본 연구에서도 파괴인성의 평가는 아래와 같은 식에 의하여 평가하였으며[9], 하중  $P_Q$ 를 아래식의  $P$ 에 대입하여 파괴인성  $K_{Ic}$ 를 구하였다.

$$K_I = P/B \sqrt{W} \cdot F(\xi)$$

단,  $\xi = a/W$ 로 둔다.

$$F(\xi) = 4.55 - 40.32\xi + 414.7\xi^2 - 1698\xi^3 + 3781\xi^4 - 4287\xi^5 + 2017\xi^6$$

여기서,  $P$ 는 하중,  $B$ 는 판두께,  $W$ 는 시험편폭,  $a$ 는 균열길이,  $F(\xi)$ 는 시험편 형상 및 부하방식에 따른 보정계수이다.

### 2-2-2. AE 측정

탄소섬유복합재료의 적층방법에 따른 파괴거동을 해석하기 위하여 CT시험편의 파괴과정에서 발생하는 AE를 측정하였다. 사용한 시험기는 최대하중 5ton의 유압식 만능시험기(UTM)를 이용하였으며, 실온(약 15°C) 대기중에서 시험속도는 0.5mm/min로 일정하게 유지하였다. 방출되는 AE의 측정 및 분석에는 LOCAN 320시스템이 사용되었다.

Fig. 1에 나타난 것과 같이 센서 #1, #2는 AE의 검출감도를 높이기 위하여 175kHz 공진형을 사용

하였다. 시험중 센서로부터 검출된 AE는 100~300 kHz 범위의 band-pass filter를 거쳐 pre-amp.에서 40dB, main-amp.에서 34dB로 증폭하였다. 이 때의 한계전압은 0.4V가 되도록 설정하였다. 인장시험기 및 시험편의 핀구멍(pin hole)에서 발생하는 잡음을 제거하기 위하여, 두 센서는 균열중심선으로부터 각각 20mm간격을 두고 부착하였다. 시험편 핀구멍에는 윤활유를 사용하여 마찰에 의한 AE를 최소화하였다. AE 데이터들은 post processing을 통하여 AE-event count, 최대진폭분포 및 에너지등의 분석에 이용되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 섬유배향이 파괴인성에 미치는 영향

시험시 섬유배향각  $\theta$ 가 탄소섬유복합재료의 파괴인성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 두가지 적층판으로 실험을 수행하였다.

$[90_2/\theta_2]_S$  및  $[90/\theta]_{2S}$  적층판의 섬유배향각  $\theta$ 를 0°, 15°, 30°, 45°로 변화시킨 CT시험편에 대한 파괴인성시험의 결과를 Fig. 3에 나타낸다. 이 그

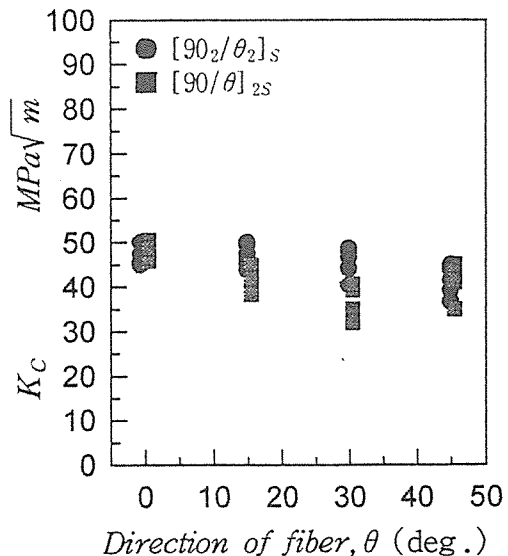


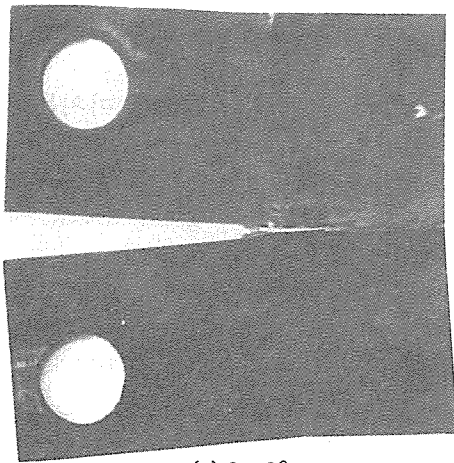
Fig. 3. The relation between fracture toughness versus fiber direction for  $[90_2/\theta_2]_S$  and  $[90/\theta]_{2S}$  specimen

림에서 섬유배향각  $\theta$ 가 증가할수록 파괴인성은 감소하는 경향을 나타내고 있으며,  $\theta$ 가  $0^\circ$ 인 적층판이 가장 높은 파괴인성을 나타내었다. 따라서 적층방법에 관계없이 섬유배향각  $\theta$ 가  $0^\circ$ 인 경우에 가장 높은 파괴인성을 얻을 수 있었다. 이와같이 섬유배향각  $\theta$ 의 증가에 따른 파괴인성의 감소경향은 배열된 섬유가 주 하중방향과 경사를 가짐으로써 축방향 응력에 대한 저항력 약화에 기인하는 것으로 생각된다.

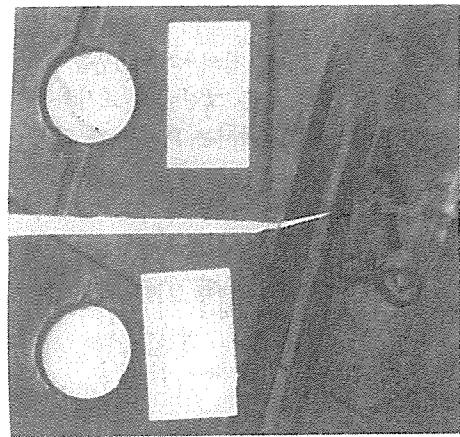
이에 대해 Kageyama등[1]은 하중증가에 따라 축방향의 인장력과 면내굽힘하중이 지배적이므로

방향에 대한 의존성이 없음을 보고하였다. 그러나, 본 연구의 파괴인성시험 결과에 의하면 섬유방향의 의존성이 확인되었으며, 다양한 섬유배향에 의하여 파괴인성을 변화시킬 수 있을 것으로 예측된다. 또한 두 종류의 적층판 파괴인성을 비교해 보면,  $[90_2/\theta_2]_S$  적층판의 경우가  $[90/\theta]_{2S}$  적층판보다 다소 높은 파괴인성을 가짐을 알 수 있다.

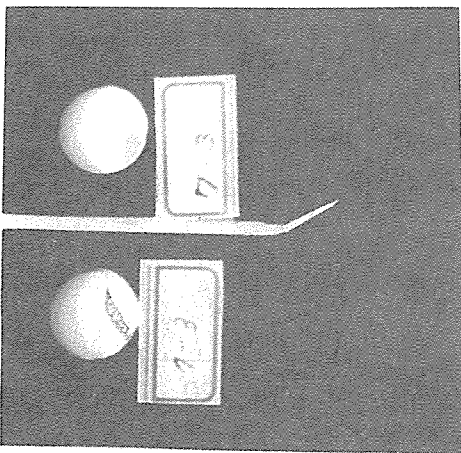
$[90_2/\theta_2]_S$  적층판의 섬유배향각  $\theta$ 를  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 로 변화시킨 CT시험편의 파괴인성시험 결과 파단사진을 Fig.4에 나타낸다. 이 그림에서 섬유배향각  $\theta$ 가  $0^\circ$ 인 경우, 균열은 부하방향에 직각으로



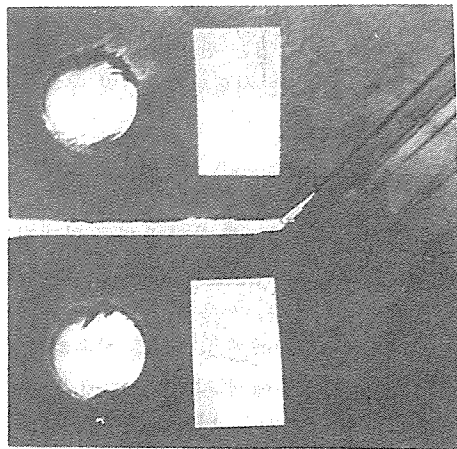
(a)  $\theta = 0^\circ$



(b)  $\theta = 15^\circ$



(c)  $\theta = 30^\circ$



(d)  $\theta = 45^\circ$

Fig. 4. Fracture shape of  $[90_2/\theta_2]_S$  specimen after fracture toughness test

진전됨을 알 수 있었고, 전단파괴없이 모든 시험편이 평탄한 파괴를 보여주고 있다. 그러나  $\theta$ 가  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 인 적층판은 섬유배향각 방향으로 균열이 진전됨을 알 수 있었다. 이는 하중방향은 mode I이지만 균열선단에서 섬유배향각 방향으로 전단응력이 발생하여 균열이 경사지게 진전하는데 기인한 것으로 추정하여 볼 수 있다. 한편,  $[90/\theta]_{2S}$  적층판의 경우도 같은 경향을 나타내었다.

### 3-2. 섬유배향에 따른 파괴거동의 AE평가

Fig.5와 Fig.6은  $[90_2/\theta_2]_S$  및  $[90/\theta]_{2S}$  적층판의 섬유배향각  $\theta$ 를  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 의 4종류로 변화시킨 CT시험편에 대하여 파괴인성 평가 시험 도중에 방출되는 AE를 검출하여 나타낸 것이다. 이것은 변위에 대한 하중과 AE 발생곡선이다. 여기서 횡축의 시간은 시험속도를 일정하게 유지했으므로 변위로 볼 수 있다.

Fig.5에서 변위에 대한 하중과 AE event count를 보면 섬유배향각  $\theta$ 에 관계없이 하중증가와 함께 AE 발생은 서서히 변화하며 거의 선형적으로 증가한다. 그후 최대하중점에서 peak를 보인 후, 간헐적으로 다소 큰 AE가 pon-in 현상과 거의 비슷한 주기로 반복되어 발생하고 있다.  $[90_2/\theta_2]_S$  시험편의 섬유배향각에 따른 AE발생을 살펴보면, 섬유배향각  $\theta$ 가  $0^\circ$ 인 경우는 최대하중의 약 18% 근방에서 발생하기 시작하며,  $\theta$ 가 증가하면서  $15^\circ$  시험편에서 약 15%,  $30^\circ$  시험편에서 약 14%,  $45^\circ$  시험편에서 약 11%에서 각각 발생함을 알 수 있다.

한편, Fig.6에서도 변위에 대한 하중과 AE event count를 보면, 섬유배향각  $\theta$ 에 관계없이 일정하중까지는 변위의 증가와 함께 하중이 거의 선형적으로 증가하다가 최대하중점에 도달하기 전에 pop-in 현상을 보였다. 그리고 최대하중점에서 큰 AE가 발생한 후, pop-in 현상이 계속되면서 최대하중점에서 발생한 AE보다 큰 AE가 간헐적으로 발생하면서 파단에 이르는 양상을 보이고 있다. 이때 간헐적인 큰 AE는 pop-in 현상과 거의 비슷한 주기로 증감이 반복되었다. AE의 이와같은 현상은  $0^\circ$  및  $90^\circ$ 층이

순차적으로 적층되어 이들 층간에서 기지파단, 층간박리 및 부분적인 섬유인발등이 순서대로 발생하면서 생긴 것으로 추정된다. 그리고 최대하중과 총 AE-event count는 섬유배향각  $\theta$ 가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.  $[90/\theta]_{2S}$  시험편의 섬유배향각에 따른 AE 발생을 보면, 섬유배향각  $\theta$ 가  $0^\circ$ 인 경우는 최대하중점의 약 23% 근방에서 발생하기 시작하며,  $\theta$ 가 증가하면서  $15^\circ$  시험편에서 약 20%,  $30^\circ$  시험편에서 약 17%,  $45^\circ$  시험편에서 약 10%로 섬유배향각이 증가할수록 비교적 낮은 하중에서 AE가 발생하는 거동을 보였다. 이러한 거동은  $[90/\theta]_{2S}$  시험편이  $[90_2/\theta_2]_S$  시험편보다 초기의 AE 발생 하중점이 약간 상승한 것을 알 수 있다. 그러나, 두 종류의 시험편 모두 거의 비슷한 초기 AE 발생 하중점을 보이고 있다고 말할 수 있다.

이와 같이 섬유배향각 이 증가할수록 AE발생 하중점이 감소하는 것은 초기부하시 mode I 성분에 하중이 증가함에 따라 균열선단에 mode II 성분이 중첩되어 작용함으로써 초기손상이 급진전되는 것으로 생각된다. 이를 통하여 섬유배향각에 따른 초기손상을 AE로부터 추정할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig.7과 Fig.8은  $[90_2/\theta_2]_S$  및  $[90/\theta]_{2S}$  시험편의 파괴인성시험 종료시까지 AE의 진폭분포와 총 AE-event count의 관계를 각 섬유배향각에 대하여 나타낸 그림이다. 이 그림에서 섬유배향각  $\theta$ 가 증가할수록 각진폭에 대한 AE-event count가 적게 나타남을 알 수 있다. 그리고, 섬유배향각에 관계없이 AE 진폭이 증가함에 따라 총 AE-event count가 증가함을 알 수 있다. 따라서, 섬유배향에 따라 AE 진폭은 변화하지 않음을 알 수 있었다. 이는 탄소 섬유복합재료의 인장시험시 섬유방향에 따른 AE의 진폭특성에 관한 연구[10]에서 섬유와 섬유사이의 기지균열에 의해 발생하는 AE의 진폭은 섬유방향과 주응력방향이 이루는 각도에 따라 크게 영향을 받는다. 또한 섬유방향과 주응력방향이 이루는 각도가 작을수록 섬유와 섬유사이의 기지균열에 의해 발생하는 AE의 진폭은 커진다고 보고하였다. 그러나 파괴인성 시험편의 경우는 섬유방향과 주응력 방

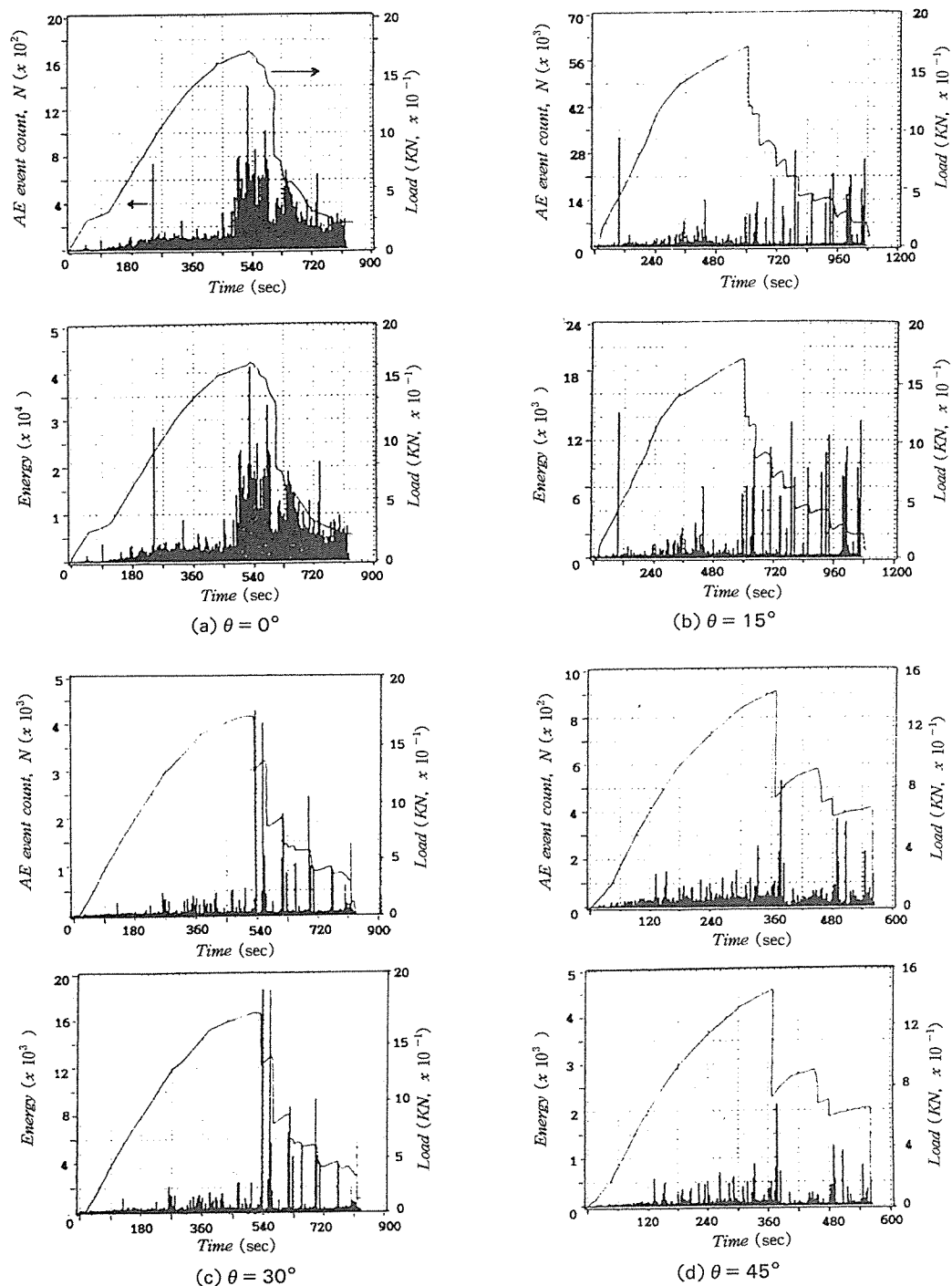


Fig. 5. AE-event count, energy and load vs. displacement curve for  $[90_2/\theta_2]_s$  specimen during fracture toughness test

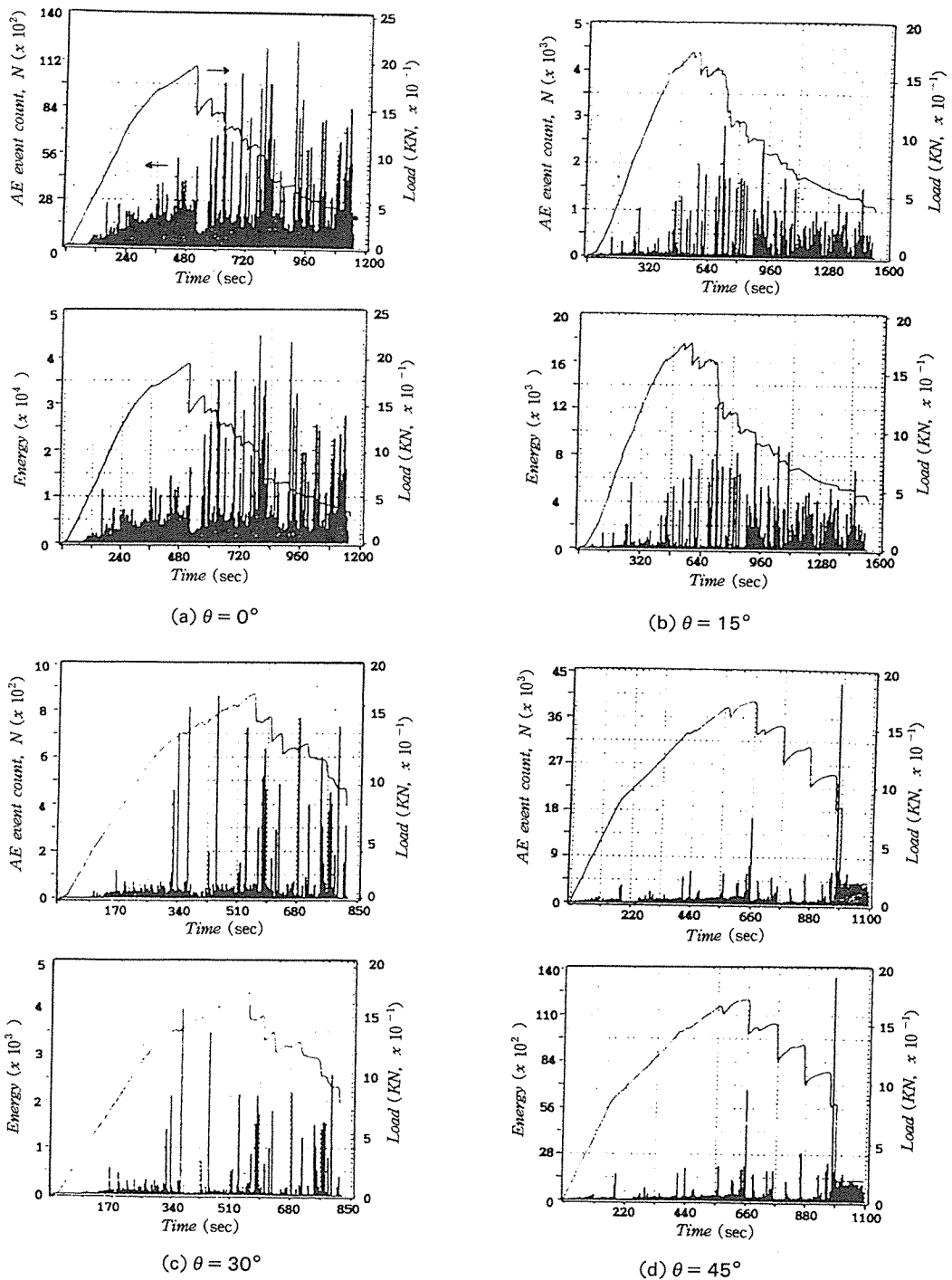


Fig. 6. AE-event count, energy and load vs. displacement curve for  $[90/\theta]_{2S}$  specimen during fracture toughness test

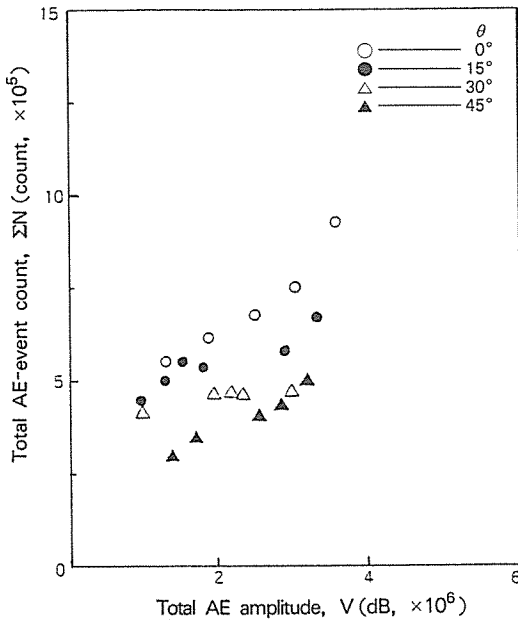


Fig. 7. The relation between AE amplitude and total AE-event count by fiber direction for  $[90_2/\theta_2]_s$  specimen

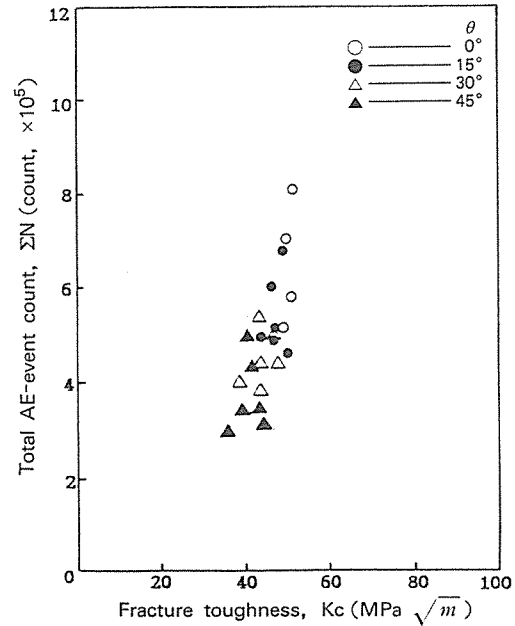


Fig. 9. The relation between fracture toughness and total AE-event count by fiber direction for  $[90_2/\theta_2]_s$  specimen

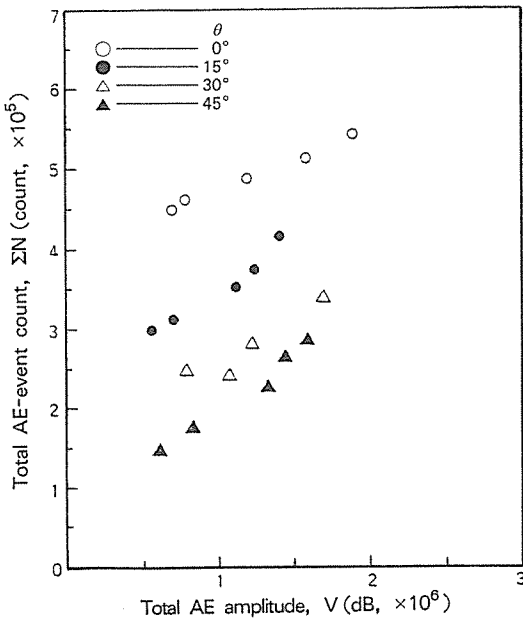


Fig. 8. The relation between AE amplitude and total AE-event count by fiber direction for  $[90/\theta]_{2s}$  specimen

향이 이루는 각도가 작아짐에 따라 증가된 mode II 성분과 mode I 성분의 응력차가 인장응력의 경

우에 비해 대단히 작다. 그러므로 mode II 성분에 의한 기지균열 발생시 생긴 AE진폭은 mode I에 의한 기지균열 진전시의 AE진폭과 큰 차이를 갖지 못하기 때문으로 생각된다.

Fig. 9는  $[90_2/\theta_2]_{2s}$  시험편에 대하여 섬유배향각  $\theta$ 의 변화에 따른 파괴인성 Kc와 AE-event count의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 섬유배향각  $\theta$ 가 증가함에 따라 파괴인성과 총 AE-event count는 감소하는 것을 알 수 있다. 총 AE-event count는 대략  $3 \sim 8 (\times 10^5)$  count에 걸쳐 분포하고 있어, 파괴인성분포에 비해 대체로 분산이 크다.

한편, Fig. 10은  $[90/\theta]_{2s}$  시험편에 대하여 섬유배향각  $\theta$ 의 변화에 따른 파괴인성 Kc와 AE-event count의 변화를 나타낸 것이다.  $[90_2/\theta_2]_s$  시험편의 경우와 같이, 섬유배향각  $\theta$ 가 증가함에 따라 파괴인성과 총 AE-event count는 모두 감소하는 것으로 나타났다. 총 AE-event count는 약  $1.5 \sim 5.5 (\times 10^5)$  count에 걸쳐 분포하고 있어, 파괴인성의 분포에 비해 대체로 분산이 크다. 또한  $[90_2/\theta_2]_s$  시험편의 경우가  $[90/\theta]_{2s}$  시험편보다 높은 AE-event count를 가진 신호가 많이 검출되었다. 이는  $[90_2/$



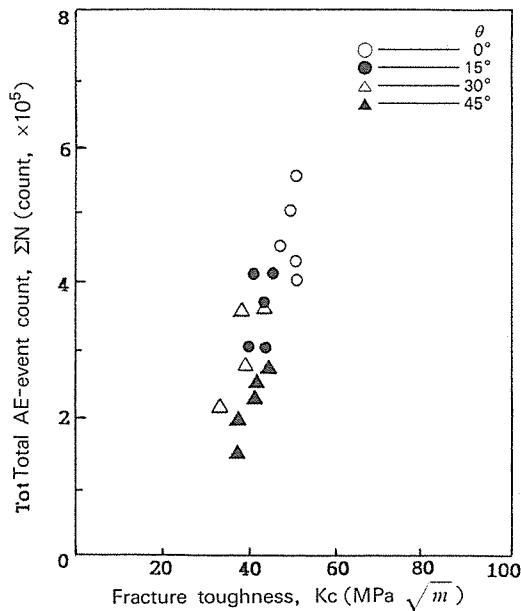


Fig. 10. The relation between fracture toughness and total AE-event count by fiber direction for  $[90/\theta]_{2S}$  specimen

$\theta_2]_S$  적층판이  $[90/\theta]_{2S}$  적층판보다 높은 파괴인성을 갖는 것과 잘 일치하였다. 그러나 두 종류의 시험편 모두 파괴인성 Kc가 증가함에 따라 총 AE-event count도 증가를 나타내어, 파괴인성 Kc와 총 AE-event count간에는 상호 선형적 관계가 있음을 알 수 있었다. 파괴인성 Kc가 가장높은  $0^\circ$  방향의 경우,  $[90_2/\theta_2]_S$  시험편이  $6\sim 8(\times 10^5)$  count,  $[90/\theta]_{2S}$  시험편이  $4.5\sim 5.5(\times 10^5)$  count를 나타내었다.

#### 4. 결 론

탄소섬유복합재료의 파괴거동에 영향을 주는 주요인자중 섬유배향에 따른 파괴인성과 파괴거동 특성을 AE에 의하여 정성, 정량적으로 연구 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 탄소섬유복합재료에서는 섬유배향각이 증가할 수록 AE신호는 낮은 하중에서 발생하기 시작하여 초기손상이 급진전되는 것으로 확인되었다.
- 섬유배향에 따른 파괴인성 Kc와 AE-event count 사이에는 상호 비계관계에 있으며, AE진폭과

에너지는 섬유방향에 의존하지 않고 파괴인성과 AE-event count와 함께 거의 선형적으로 비례하여 증가하는 분포를 나타내었다.

- 섬유배향각에 따른 균열전파는 노치선단에서 섬유배향 방향으로 진전되는 양상이 관측되어 탄소섬유 복합재료 적층판의 균열전파방향의 예측이 가능하였다.

#### References

1. K. Kageyama, K. Nonake, S. Shimamura and S. Fukuda, JSME(Part A), Vol.50, No.454, 1984, p.1260-1266
2. C.E. Harris and Don H. Morris, ASTM STP 893, 1986, p.177
3. Dunegan, H.L., Harris, D.O. and Tatro, C.A., Eng. Fract. Mech., Vol.1, 1986, p.105-122
4. Blachette, Y., Dickson, J.I. and Bassim, M.N., Eng. Fract. Mech., Vol.17, No.3, 1983, p.227-234
5. Blachette, Y., Dickson, J.I. and Bassim, M.N., Eng. Fract. Mech., Vol.20, No.2, 1986, p.359-371
6. Takahashi, H., Khan, M.A., Kikuchi, M. and Suzuki, M., Experimental Mech., Vol.21, No.1, 1981, p.89-99
7. 오세규, 이상국, 남기우, 김옥균, 음향방출법에 의한 탄소섬유 복합재료의 인장 및 파괴인성 시험시의 파괴거동에 관한 연구, 한국비파괴검사학회지, 제15권 제1호, 1995, p.277-290
8. 오세규, 이상국, 남기우, 김옥균. 탄소섬유 복합재료의 AE에 의한 충격잔류강도와 손상특성 평가, 한국해양공학회지, 제9권 제1호, 1995, p.47-56
9. J.C. Newman, Jr. Stress Analysis of the Compact Specimen Including the Effect of Pin Loading, ASTM STP 560, 1974, p.105-121
10. J.S. Lee, Ph.D. thesis, National Fisheries University of Pusan, 1993