

논 문

비 파괴 검사 학회지
Journal of the Korean Society
for Nondestructive Testing
Vol. 17, No. 2 (1997)

탄소섬유복합재료의 충격 손상에 따른 파괴 인성과 AE 특성

이상국*, 남기우**, 오세규*

* 한전전력연구원

** 부경대학교 공과대학

요 약 탄소섬유강화복합재료(CFRP) 적층판에 비교적 낮은 에너지의 충격을 주어, 충격에 의해서 손상된 적층판을 사용하여 인장강도, 파괴 인성 및 AE 신호 특성에 미치는 충격 손상의 영향에 대하여 검토하였다. 충격 손상재의 인장강도, 파괴 인성 및 AE-event count는 충격 속도와 박리 면적의 증가에 따라서 감소함을 알 수 있었다. 그리고 충격시험시에 발생한 박리 면적은 충격 속도와 비례하였다. 또한 적층 방법에 따른 손상재의 강도비와 파괴 인성비가 달라짐이 확인되어 복합재료의 내충격 설계시 손상량과 손상재의 파괴 인성 및 강도에 대한 정량적 평가를 AE 신호로부터 해석할 수 있음이 확인되었다.

1. 서 론

탄소섬유강화재료(CFRP)는 비강도와 비강성이 높기 때문에 항공우주분야에서 폭넓게 사용되고 있다. CFRP는 탄소 섬유와 수지를 복합화한 재료이기 때문에 불균질성과 이방성을 가지고 있고 파괴 현상이 복잡하다. 또한 CFRP는 뛰어난 정직강도를 가지고 있는 반면, 충격 하중에 대하여 난점이 있고, 더욱이 손상이 있는 CFRP는 강도의 저하가 현저하다. 그 때문에 충격 손상에 의한 강도의 저하는 큰 문제이고, 많은 연구가 실시되고 있다^{1~7)}. 그러나 강도저하에 미치는 충격 손상 기구의 영향 및 충격 손상 형태별 강도 저하의 변화 등 각종 충격 손상에 따른 강도 저하 원인의 많은 부분이 아직 해명되어 있지 않은 실정이다. 따라서 충격 손상이 강도 저하에 미치는 영향과 손상의 진전 기구를 해명하는 것은 중요한 과제이다.

그리고 AE법은 충격 손상재에 대한 미시결함의 초기 검출과 손상 정도 및 파괴 모우드를 모니터링

하여 이들을 정량화할 수 있으며, 잔류 강도의 예측과 파괴 메카니즘을 규명하는데 매우 적합한 방법이다^{8~10)}.

본 연구는 2종류의 적층 방법으로 적층된 CFRP 적층판에 비교적 낮은 에너지의 충격을 주어, 충격에 의해서 손상된 적층판을 사용하여 인장강도, 파괴 인성 및 AE 신호 특성에 미치는 충격 손상의 영향에 대하여 검토하였다.

2. 시험편 및 실험 방법

2.1. 시험편

본 연구에서 사용된 시편은 일방향 강화탄소섬유/에폭시 프리프레그(국내K사, CU100NS) 16 ply를 열성형 기에서 적층 성형하여 제작하였다. 본 실험에 사용된 탄소섬유복합재료 시험편은 [0/90]_{2S}, [0/90]_{4S}와 같이 2종류로 적층하였으며, 섬유 중량비는 약 56wt%가 되도록 성형하였다. 성형 압력은 성형 초기 압력 20kg/cm²

그리고 성형 유지 압력 200kg/cm^2 으로 하였으며, 성형 방법은 가열($3.7^\circ\text{C}/\text{min}$, 30분), 성형(130°C , 90분) 및 냉각($0.6^\circ\text{C}/\text{min}$, 180분)의 순서로 하였다. 성형된 탄소섬유복합재료 적층판은 Fig. 1과 같은 형상과 치수의 인장시험편과 CT시험편으로 각각 가공하였다.

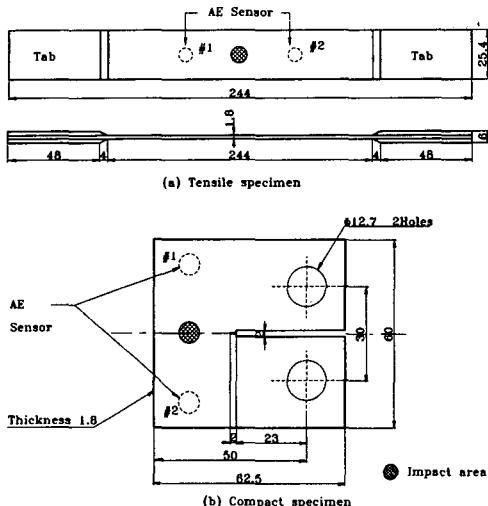


Fig. 1. Test specimens : all dimension in mm

2.2. 실험 방법

2.2.1. AE 실험

탄소섬유복합재료의 충격시험, 충격 손상재에 대한 인장시험 및 파괴인성시험중의 AE 신호의 측정에는 공진 주파수 150kHz 의 공진형 AE 센서를 장

Table 1. Amplification frequency and threshold voltage setting for each test

Test AE parameter		Impact test	Tensile test	Fracture toughness test
Amplifier	pre-Amp	40dB	40dB	40dB
	main-Amp	20dB	26dB	34dB
Frequency		100~ 300kHz	100~ 300kHz	100~ 300kHz
Threshold voltage		0.2V	0.2V	0.4V

착한 LOCAN 320 시스템이 사용되었다. 특히 잡음을 제거하기 위해 pre-amp에 내장된 100-300kHz 범위의 band-pass filter를 사용하였다. 또한, 센서

#1과 센서 #2의 신호를 민감하게 수집하기 위하여 시험편과 센서 사이에 고진공 실리콘 그리이스와 정압 클램프로서 고정하였다. 충격 및 충격 손상재에 대한 인장과 파괴 인성시험에 대한 LOCAN 320 시스템의 변수 설정값을 Table 1에 나타낸다. AE 한계값은 오실로스코프를 이용하여 전기적 잡음과 기계적 잡음을 측정한 결과를 기준으로 설정하였으며, 주위의 소음 환경에 주의하며 실험하였다.

2.2.2. 충격 실험

인장시험편 및 CT시험편에 초기 손상을 주기 위하여 공기압식 충격시험 장치를 사용하였다. 사용한 실험 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 충격 손상은 직경 8.8mm (2.7g)의 강구를 시험 장치에 부착된 내경 9mm 의 발사관(유리관)을 통과시켜 시험편에 충돌시켰다. 시험편 고정대에는 $50 \times 40(\text{mm})$ 의 정방형 구멍을 내고 두께 4mm 의 고무판을 붙인 후, 중앙부에 시험편을 고정하여 시험편 중심에 강구가 충돌하도록 하였다. 또한, 공기압은 8.5kgf/cm^2 까지 일정한 압력으로 충격시험이 가능하며 가압된 공기를 제어밸브에서 타이머를 통하여 순간적으로 개폐되면서 충돌체의 속도를 가속시킬 수 있도록 하였다. 충돌체의 속도 측정은 발사관 아래 수광다이오드 센서 2개를 200mm 간격으로 두고 설치하여, 2개의 센서 설치 지점을 통하여 시간차로 계산하였다. 사용된 디지털 카운터는 10^{-4}sec 까지 측정 가능하다. 충격 속도는 제어밸브를 이용하여 공기압축기의 압력을 변화시켜 $3.5\text{m/s} \sim 150\text{m/s}$ 범위에서 속도를 변화시킬 수가 있다. 발사 공기 압력과 발사 속도와의 관계를 Fig. 3에 나타내며, 본 실험 장치에서는 발사 속도를 대략 $\pm 3\%$ 의 정확도로 제어 가능하였다.

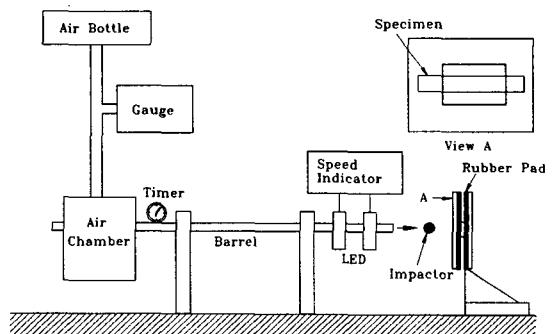


Fig. 2. Schematic diagram of impact apparatus

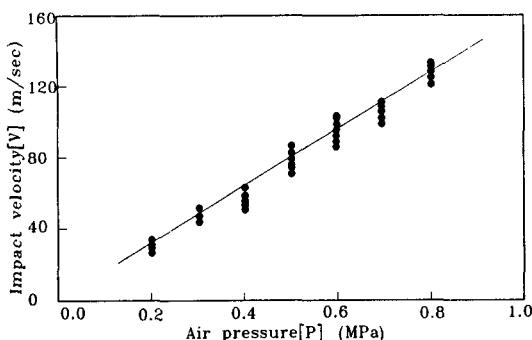


Fig. 3. Relation of air pressure and impact velocity

2.2.3. 인장 및 파괴 인성 실험

충격 손상재의 인장 및 파괴 인성시험에는 최대 하중 5ton의 UTM이 사용되었다. 시험 속도는 인장 시험의 경우 1.0 mm/min, 파괴 인성시험의 경우는 0.5 mm/min로 하였다. AE 측정을 위하여 인장시험편에 부착된 센서 #1, #2는 예상되는 주 파단부위를 중심으로 인장시험의 경우는 60 mm, 파괴 인성시험의 경우는 20 mm 간격을 두고 부착하여, 인장시험기 및 grid 부위에서의 잡음을 최소화하였다. 그리고, 시험편 두께 방향으로의 좌굴을 방지하기 위하여 좌굴방지 치구를 별도로 사용하였다.

본 연구에서 파괴 인성의 평가는 ASTM E-399-78에 의거한 아래의 (1), (2)식으로 평가하였다^{11~14)}.

$$KI = P/B \sqrt{W} \cdot F(\xi) \quad \dots \dots \dots (1)$$

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

여기서, P는 하중, B는 판두께, W는 시험편 폭, a는 균열 길이, F(ξ)는 시험편 형상 및 부하 방식에 따른 보정계수이다. 그리고 $\xi = a/W$ 로 둔다.

2.2.4. 손상재의 박리 면적 산출

충격 손상재의 손상량을 조사하기 위하여 손상 시험편에 대하여 초음파 C-scan 시험장치를 이용하여 박리 면적을 산출하였다. 초음파 C-scan 시험 장치는 MATEC사의 MBS 8000 시스템 및 US 450 C-scanner를 사용하였다. 시험에 사용된 초음파

주파수는 2MHz였으며, 진폭과 펄스폭을 변화시켜 시험편의 저면에서 반사된 신호에 대해 최적 탐상 조건을 설정하였다. 탐상 조건은 진폭 0.3V, 수신 gain 20 dB, 펄스폭 0.05 μsec, scan pitch 0.3 mm 이었다. 박리 면적 계산 방법은 적층판의 각 층간 계면 박리 면적을 합산하여 총 박리 면적으로 할 수 있으나, 본 실험에서는 편의상 저면 반사하여 시험편의 표면에서 스캐닝된 박리 손상의 면적을 면적계로 측정한 값을 박리 면적으로 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 손상재의 인장강도와 AE 특성

Fig. 4와 5는 [0/90]_{2S}와 [0/90]_{4S}형 인장시험편에 대한 충격시험 속도 변화에 따른 박리 면적과 충격시 발생한 총 AE-event count(AE event의 총 갯수, 즉 시험 종료시까지의 AE event의 누적수)의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 충격 속도가 증가함에 따라 박리 면적과 총 AE-event count도 증가하는 경향을 보인다. 또한, [0/90]_{4S} 시험편을 [0/90]_{2S} 시험편과 비교해 보면, 동일한 충격 속도에서 [0/90]_{4S} 시험편이 [0/90]_{2S} 시험편에 비하여 다소 큰 박리 면적을 가졌으며, 총 AE-event count의 경우도 [0/90]_{4S} 시험편이 많이 발생하였다. 이것은 [0/90]_{2S} 시험편의 경우 중앙의 90° 4개층이 충격에 저항할 수 있는 구조로 되어 있어 충격 흡수가 많다. 그러나, [0/90]_{4S} 시험편은 0°, 90° 층이 교대로 적층되어 있어 충격 흡수에 약하므로 충격 손상이 크다. 이에 따라 탄성 변형에 의한 박리 면적과 AE-event count가 많이 발생하는 것으로 생각된다.

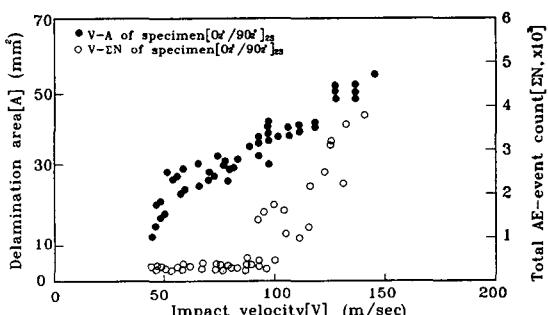


Fig. 4. Relation of delamination area and total AE-event count vs. impact velocity
([0/90]_{2S} specimen)

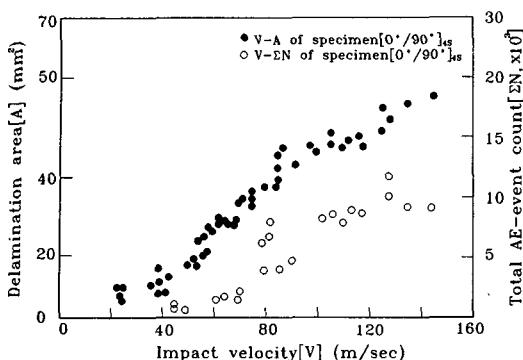


Fig. 5. Relation of delamination area and total AE-event count vs. impact velocity ([0/90]_{4s} specimen)

Fig. 6은 [0₂/90₂]_{2S}, [0/90]_{4S} 시험편의 건전재(충격 속도가 0인 경우)와 충격에 의한 손상재의 인장강도 및 총 AE-event count의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 속도가 증가하면서 인장강도와 총 AE-event count가 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이는 충격 속도 증가에 따른 박리 면적의 증가로 인하여 인장강도가 감소하며, 인장시험 시 탄성 변형이 감소한 결과로 생각된다. 또한 양 시험편에 대한 건전재와 충격 손상재의 충격 속도에 따른 총 AE-event count의 변화를 보면 건전재의 AE량을 100%로 하였을 때, 충격 속도 125 m/sec에서 [0₂/90₂]_{2S} 시험편의 경우 약 71%, [0/90]_{4S} 시험편의 경우는 약 32%로 낮은 정도의 AE량을 나타내었다.

따라서, 본 실험에 사용된 [0₂/90₂]_{2S}, [0/90]_{4S} 시험편의 경우, 충격 속도에 따른 인장강도와 AE량의 변화가 일정한 경향을 나타내고 있는 것으로부터 충격 속도에 따른 손상재의 강도 저하율과 총 AE-event count 감소율의 정량적인 평가가 가능하리라 본다.

Fig. 7은 건전재의 인장강도에 대한 충격 손상재의 인장강도를 강도비로 나타내어 충격 에너지와의 관계로 나타낸 것이다. 이 그림에서 충격 에너지 3J 근처에서 [0₂/90₂]_{2S} 손상재 시험편의 경우 인장강도 비는 약 79%, [0/90]_{4S} 손상재 시험편의 경우는 약 77%로 거의 비슷한 값을 가졌으나, [0/90]_{4S} 시험편이 [0₂/90₂]_{2S} 시험편보다 강도 저하가 커짐을 알 수 있었다. 이는 [0/90]_{4S} 시험편의 강도 저하는 전술한 것과 같이 적층 구조상 [0₂/90₂]_{2S} 시험편에 비교하-

여 충격에 약한 특성에 의한 것으로 생각된다.

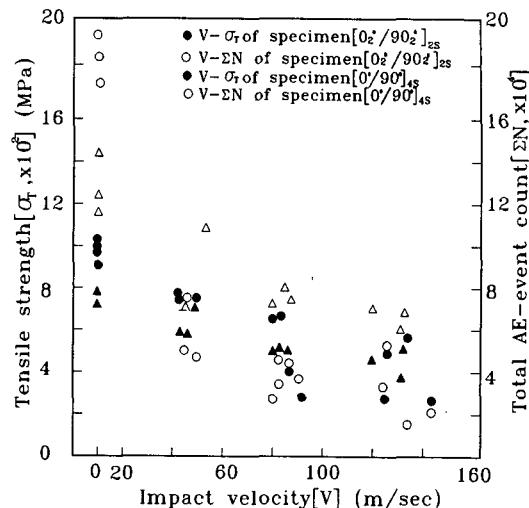


Fig. 6. Relation of tensile strength and total AE-event count vs. impact velocity

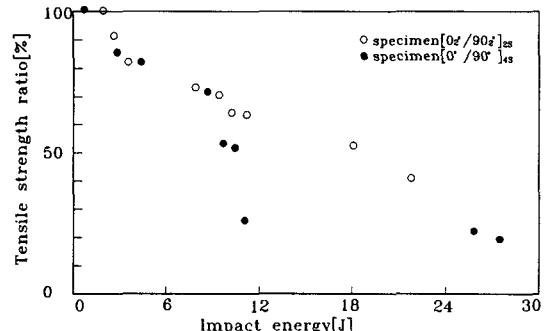


Fig. 7. Relation between impact energy and tensile strength ratio

Fig. 8은 [0₂/90₂]_{2S}, [0/90]_{4S}형 충격 손상재의 박리면적, 인장강도 총 AE-event count와의 관계를 나타낸 것이다. 전체적으로 박리 면적이 증가함에 따라 인장강도와 총 AE-event count가 감소하는 경향을 보였다. [0₂/90₂]_{2S}, [0/90]_{4S}형 시험편 모두 박리 면적의 증가에 따른 인장강도와 총 AE-event count의 감소 정도는 거의 비슷하였으나, [0₂/90₂]_{2S} 시험편에 비하여 [0/90]_{4S} 시험편의 경우가 감소 정도가 크게 나타났다. 이는 전술한 충격 속도와 박리 면적 관계를 고려해 보면, 결국 박리 면적의 증가는 속도 증가와 비례 관계에 있으므로 손상재의 인장강도와 총 AE-event count의 감소는 충격 속도 및

박리 면적과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

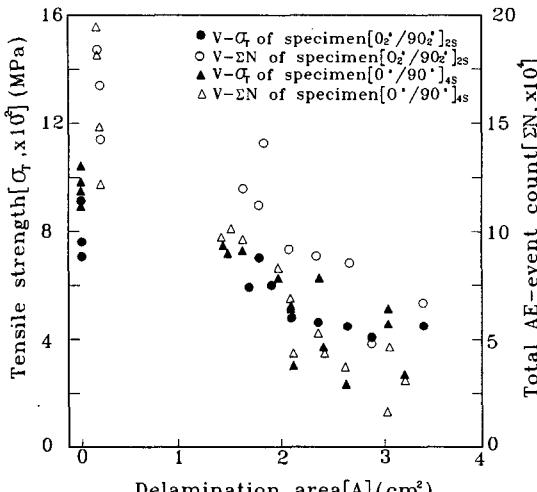


Fig. 8. Relation of tensile strength and total AE-event count vs. delamination area

3.2. 손상재의 파괴 인성과 AE 특성

Fig. 9와 10은 [0₂/90₂]_{2S}, [0/90]_{4S}형 CT시험편의 충격 속도에 따른 파괴 인성 K_c와 파괴 인성시험 중 발생한 총 AE-event count와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 충격 속도가 증가함에 따라 파괴 인성과 총 AE-event count는 감소하는 경향을 나타내었다.

그리고, 전전재의 파괴 인성값을 100%로 하였을 때, 충격 속도에 따른 손상재의 파괴 인성비와의 관계를 Fig. 11에 나타낸다. Fig. 11에서 [0₂/90₂]_{2S} 시험편의 경우, 충격 속도가 증가함에 따른 파괴 인성 저하 정도를 보면, 39 m/s이내에서는 파괴 인성의 저하를 확인할 수 없었으나, 40 m/s이상에서는 충격 속도가 증가함에 따라서 파괴 인성비는 감소하였다. 한편, [0/90]_{4S} 시험편은 30 m/s이내의 속도에서는 파괴 인성값의 저하를 확인할 수 없었다. 이는 30 m/s 이내의 인장 시험편과 다른 경향을 보였는데, 인장의 경우는 하중 증가시 축방향의 인장력을 받으나 CT시험편의 경우는 대부분 면내굽힘응력을 받으므로 적은 박리 손상으로 인하여 파괴 인성의 차이가 발생하지 않은 것으로 생각된다. 40 m/s이상에서는 충격 속도가 증가함에 따라서 손상재의 파괴 인성비는 감소하였으며, 100 m/s이상의 속도에서는 시편을 관통하였으므로 실험 조건에서 제외하였다.

한편 양 시험편 모두 71~80 m/s에서 거의 같은 정도의 파괴 인성비를 보인다. 그 후 81 m/s 이상에서 [0/90]_{4S} 시험편의 파괴 인성비가 급격히 감소하는 경향으로부터 손상재에 대한 파괴 인성비는 적 충 방법에 따라 큰 차이가 발생함을 알 수 있다. [0/90]_{4S} 시험편과 같이 0° 또는 90° 충을 그대로 적 충하기 보다는 [0₂/90₂]_{2S} 시험편과 같이 시험편 두께 방향의 중앙 부분에 0° 또는 90° 충 중에서 한 종류를 다수겹으로 적충하는 적충 구조가 충격 저항을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

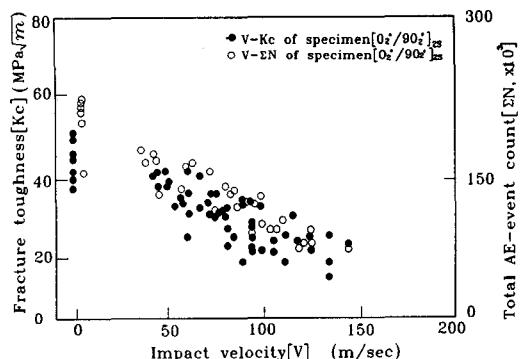


Fig. 9. Relation of fracture toughness and total AE-event count vs. impact velocity ([0₂/90₂]_{2S} specimen)

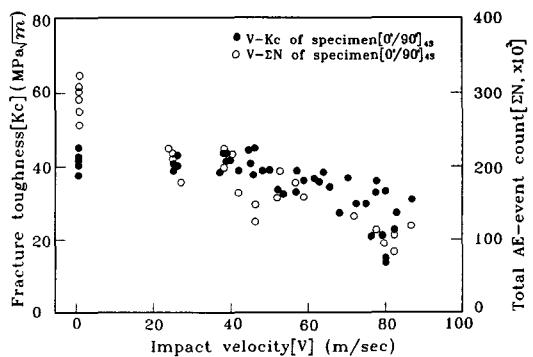


Fig. 10. Relation of fracture toughness and total AE-event count vs. impact velocity ([0/90]_{4S} specimen)

Fig. 9와 Fig. 10으로부터 충격 손상재의 파괴 인성시험시에 발생한 AE 발생량의 변화 범위를 측정하여 손상 정도에 따른 파괴 인성의 변화를 정량적으로 평가 및 예측할 수 있으며, 따라서 손상 정도별 파괴 인성 저하를 AE 신호(즉, 손상별 AE량의

범위) 평가에 의해 파괴시험을 거치지 않고 AE량만으로 모니터링한다면 내충격 설계시 파괴 인성의 평가가 가능하리라 본다.

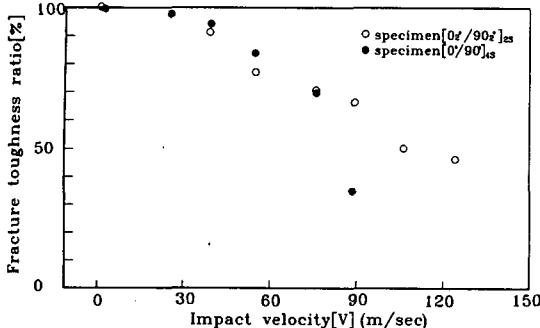


Fig. 11. Relation of fracture toughness ratio and impact velocity

3.3. 박리면적과 파괴인성

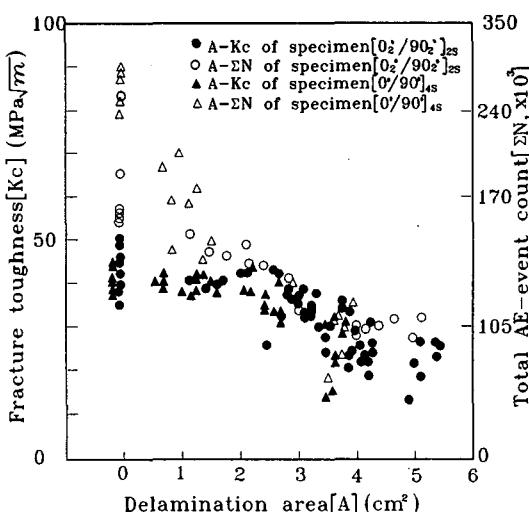


Fig. 12. Relation of fracture toughness and total AE-event count vs. delamination area

Fig. 12는 [0 $/90_2$]₂₃, [0 $/90$]₄₃형 시편의 충격 손상에 의한 박리 면적과 파괴 인성값 및 총 AE-event count와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 박리 면적이 증가함에 따라 파괴 인성값과 총 AE-event count가 감소함을 알 수 있다. [0 $/90_2$]₂₃ 시편의 경우, 박리 면적이 커짐에 따라 파괴 인성값은 서서히 감소하나 [0 $/90$]₄₃는 박리 면적이 3~4(cm 2)의 범위에서 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이는 Fig. 11

의 충격 속도와 파괴 인성간의 관계에서 충격 속도 80~100 m/s로 충격 손상을 받은 경우, 파괴 인성비가 35%로 급격히 저하되는 것을 잘 뒷받침해 주고 있다.

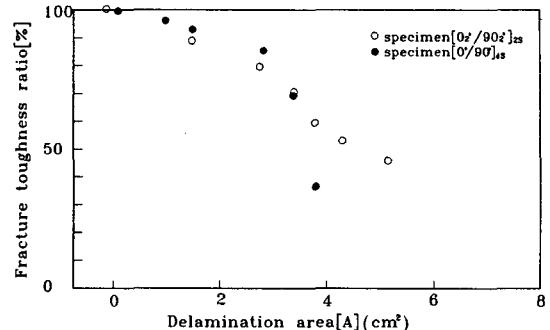


Fig. 13. Relation of fracture toughness ratio and delamination area

Fig. 13은 [0 $/90_2$]₂₃, [0 $/90$]₄₃형 시험편에 대하여 이들의 관계를 박리 면적에 대한 파괴 인성값의 비로 나타낸 것이다. [0 $/90$]₄₃형 시험편의 경우, 박리 면적이 3~4(cm 2)의 범위 즉 80~100 m/s에서 전전재의 파괴 인성값을 100%로 했을 때 약 35%가 됨을 알 수 있다.

따라서, Fig. 9~Fig. 13의 충격량과 AE량의 관계로부터 충격 속도에 따른 파괴 인성과 총 AE-event count의 변화가 일정한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 이와 같은 관계로부터 충격 손상재의 파괴인성 저하율과 총 AE-event count의 감소율을 충격 속도 및 박리 면적에 따라 정량화할 수 있음이 확인되었다.

4. 결론

탄소섬유복합재료(CFRP) 적층판에 비교적 낮은 에너지의 충격을 주어 손상된 적층판을 사용하여 인장강도, 파괴 인성 및 AE 신호 특성에 미치는 충격 손상의 영향에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충격 손상재의 인장강도, 파괴 인성 및 AE-event count는 충격 속도와 박리 면적의 증가에 따라서 감소함을 알 수 있었다.
- 2) 충격시험시 발생한 탄소섬유강화복합재료의 박리 면적은 충격 속도와 비례하였다.

- 3) 적층 방법에 따른 손상재의 강도비와 파괴 인성비가 달라짐이 확인되어 복합재료의 내충격 설계시 손상량과 손상재의 파괴 인성 및 강도에 대한 정량적 평가를 AE 신호로부터 해석 할 수 있음이 확인되었다.

참고 문헌

- 1) 田中吉助, 黒川知明, “横衝撃を受けるCFRP板の損傷と残留曲げ強度”, 日本航空宇宙學會誌, 第37卷 第25號(1989), pp. 29-36
- 2) 武田展雄, “複合材料の衝撃應答と破壊(I)”, 日本複合材料學會誌, 第11卷, 第4卷(1985), pp. 151-161
- 3) O. Ishai and A. Shragi, “Effect of Impact Loading on Damage and Residual Compressive Strength of CFRP Laminated Beams”, Composites Struct., Vol. 14 No. 4(1990), pp. 319-337
- 4) H. Matsumoto, M. Okazaki, T. Adachi and S. Uujihashi, “Evaluation of Residual Fatigue Strength for Impacted CFRP laminates”, JSME (PART A), Vol. 57, No. 535(1991), pp. 576-582
- 5) 이종오, 이주석, 조경식, 이승희, 오세규, “CFRP 복합재료의 인장시험시 파괴기구의 해석” 한국복합재료학회지, 제5권, 제2호(1992), pp. 11-23
- 6) 김문생, 김남식, 박승범, “고속충격실험에 의한 적층 복합재의 파동전파에 관한 연구” 대한기계학회지, 제17권, 제8호(1993), pp. 1931-1939
- 7) 심재기, 양인영, 오택열, “충격하중을 받는 CFRP 적층판의 충격손상과 굽힘 잔류강도” 대한기계학회지, 제17권, 제11호(1993), pp. 2752-2761
- 8) 이상국, 오세규, 남기우, 김옥균, “음향방출법에 의한 탄소섬유 복합재료의 인장 및 파괴인성 시험시의 파괴거동에 관한 연구”, 한국비파검사학회지, 제15권 제1호(1995)
- 9) 이상국, 오세규, 남기우, 김옥균, “탄소섬유 복합재료의 AE에 의한 충격손상재 강도와 손상특성 평가”, 한국해양공학회지, 제9권 제1호(1995), pp. 47-56
- 10) 이상국, 김옥균, 남기우, 오세규, “탄소섬유 복합재료의 적층방법에 따른 파괴인성과 AE거동”, 한국복합재료학회지, 제8권 제4호(1995), pp. 83-91
- 11) C. K. Moon, “Composite Structure and Fracture Toughness of Fibrous Composite Materials”, Ph. D. thesis, Tokyo Institute Technology(in Japan)(1989)
- 12) P. W. R. Beaumont, J. Adhesion, 6(1974), pp. 107
- 13) D. C. Phillips, J. Comp. Mater., 8(1974), pp. 130
- 14) H. Hyakutake, H. Nisitani and T. Hagio, “Fracture Criterion of Notched Plates of FRP” JSME (Part A), Vol. 53. No. 498(1988), pp. 326-332

Fracture Toughness and AE Behavior of Impact-Damaged CFRP

S. G. Lee*, K. W. Nam** and S. K. Oh**

* Korea Electric Power Research Institute, Taejon 305-380

** Pukyong National University, Pusan 608-737

Abstract Impact behavior of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates were evaluated with tension test and compact tension test. A steel ball launched by an air gun collides against CFRP laminates to generate impact damage of relatively low energy. The static tensile and fracture toughness tests were performed to evaluate the residual strength and the AE behavior of impact-damaged laminates. As a results, it was found that the static strength, the fracture toughness and the AE-event count were decreased with increasing of impact velocity and delamination area, and to have a different strength ratio and fracture toughness ratio for each stacking method. And also, it was confirmed that strength and fracture toughness of impact-damaged CFRP laminates could be evaluated and analyzed quantitatively by AE techniques.