論 文

韓國非破壞檢査學會誌
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
第13號 Vol. 7, No. 2, (1988)

一方性 複合材料의 破壞擧動 및 強度評價에 關한 硏究

張洪根*·李柱石*·曺卿植*·李昇熙**·朴璁洙***

A Study on the Strength Evaluation of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Plastics by Nondestructive Method

H. K. Chang, J. S. Lee, K. S. Cho, S. H. Lee, E. S. Park

Abstract The off-axis tensile strength of the unidirectional carbon fiber reinforced plastic and the residual strength of impact damaged CFRP were measured and compared with the stress wave factor (SWF) of the specimens. The SWF values were measured to be decreased with the strength reduction in both cases and found to be useful for the nondestructive strength evaluation of unidirectional CFRP. The failure behaviour of the unidirectional CFRP during off-axis tensile testing was also monitored by acoustic emission(AE) method. The AE energy release showed the characteristic feature depending on the off-axis angle and this result was analyzed to be caused by the difference of the expected failure mode depending on the off-axis angle. The failure mode of CFRP was found to be analyzed by investigation of the peak amplitude distribution of AE.

1. 서 론

복합재료는 2종 이상의 소재를 복합시켜 각각 단독으로는 얻을 수 없는 우수한 특성을 얻고자 하는 것이기 때문에 본질적으로 비균질성을 가지게 되며 소재를 제조 또는 사용하는 과정에서 본질적으로 결함이나 손상이 발생할 가능성이 높으므로 각각의 제품에 대한 비파괴적인 품질검사는 필수적이라 하겠다. [1]

이와같이 복합재료는 비균질한 적층구조를 가지고 있기 때문에 기존 금속재료에 적용하던 비파괴시험방법의 직접적인 적용이 곤란하여 새로운 적용기법의 개발이 절실히 요구된다. [2]

본 연구에서는 fiber orientation 및 충격피로에 의한 손상에 따라 변화하는 일방성 CFRP 시편의 파괴 강도를 비파괴적인 방법으로 평가하고자 하였다.

2. 실 험 방 법

2.1 시편제작

한국화이바(주)에서 제작한 Unidirectional prepreg를 사용하였으며 fiber는 Toray사의 T-300 고강도 탄소섬유이다. 시편은 prepreg 8ply를 일방향으로 적층하여 Autoclave에서 승온속도 3°/min로 140℃까지 가열하여 4기압의 압력하에서 95분간 성형하였으며 급냉에 의한 시편의 휨을 방지하기 위하여 분당 2℃의 속도로 서서히 냉각하였다.

시편의 형상은 Fig. 1과 같으며 시편의 양단에 CFRP로 된 tap을 부착하여 인장시험시에 자주 발생하는 미끄러짐을 방지하고자 하였으며 시편의 중앙부에 2ϕ drill hole을 가공하여 인장에 의한 파단이 중앙부에서 발생하도록 하였다.

*韓國機械硏究所(非破壞試驗硏究室) **啓明大學校 ***서울産業大學
接受: 1988年 2月 4日

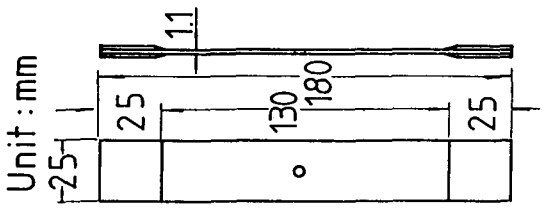


Fig. 1. Tensile specimen.

시편의 off-axis angle은 0°, 5°, 10°, 15° 그리고 45°로 하였으며 $[0°]_8$ 시편에 대하여는 각각 0, 10, 20, 50 그리고 100회의 충격을 가한 시편을 준비하였다. 충격피로는 Fig. 2와 같은 장치를 이용하였으며 10㎜ 두께의 steel plate 사이에 시편을 설치한 후 bolt로 steel plate를 고정 하였으며 중량이 150g 인 강구를 1.3m 높이에서 자유낙하하여 1 회 충격운동량을 0.75kg.m/sec.로 하였으며 충격 부위가 일정하도록 하기 위하여 indenter를 사용하였다.

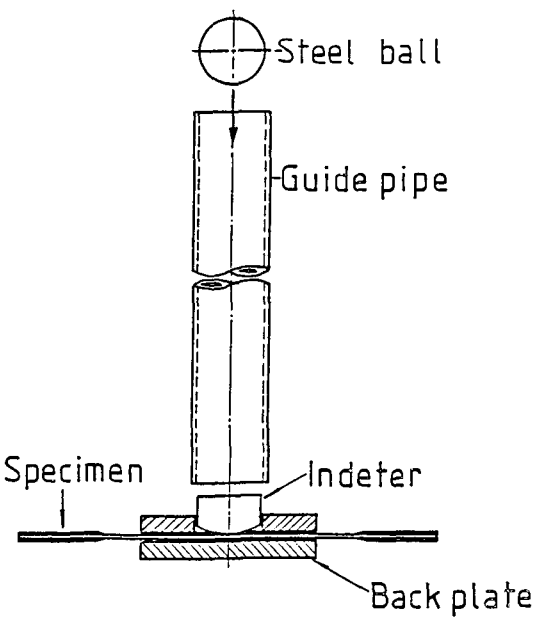


Fig. 2. Apparatus for ball drop impact damage.

2.2 응력파 계수(SWF ; Stress wave factor)[3] 측정

반복되는 초음파 펄스를 시편내부에 입사시켜 시편의 상태에 따라 변화하는 SWF를 측정하여 재료의 파괴강도를 측정하는 방법으로 측정 system의 block diagram은 Fig. 3 과 같다.

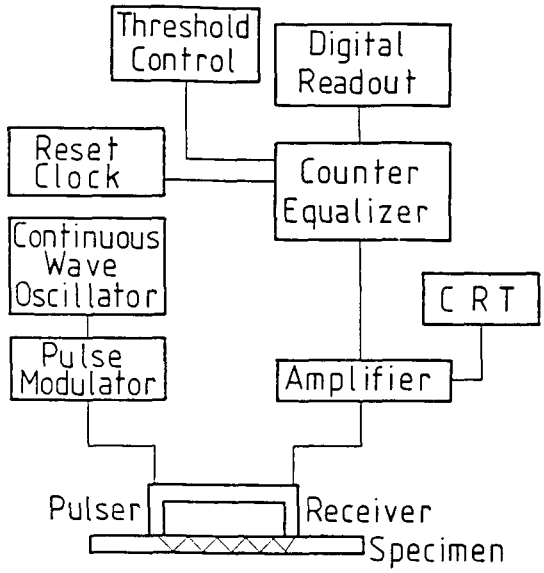


Fig. 3. Block diagram of SWF measuring system.

측정장치는 AETC사의 206AU이며 Pulse/Receiver 장치로는 AETC사의 WF1 fixture를 사용하였다. 또한 SWF 측정시 시편과 pulser/receiver 사이에 일정한 압력이 가해지도록 하여 측정의 재현성이 좋도록 하였으며 counting threshold, gain, pulse rate, 측정 time interval은 모든 측정시 일정하게 유지하였다.

2.3 Ultrasonic C-Scan

충격에 의한 CFRP시편의 손상 및 충격 횟수에 따라 변화하는 손상영역을 탐지하기 위하여 초음파탐상시험을 실시하였다. 본 실험에 사용한 장비는 Automation Industries Ind.의 Reflectoscope S80 이다. 탐촉자는 수침형 15MHz의 것을 사용하였으며 분해능을 개선하기 위해 focusing lens를 사용하였다.

2.4 인장시험 및 AE 시험

Off-axis 시편 및 충격피로 시편에 대하여 인장시험을 실시하여 파괴강도를 측정하였으며 또 인장시험과정에서 복합재료의 동적인 손상 mechanism을 monitoring 하기 위하여 AE 시험을 병행하였다. AE 측정장치로는 AETC 사의 AET 4900 system을, 인장시험 장치로는 Schenk 사의 만능시험기 UTM 120을 사용하였으며 인장시험기의 cross head speed는 0.5㎜/min 로

하였고 측정 system의 block diagram은 Fig.4와 같다.

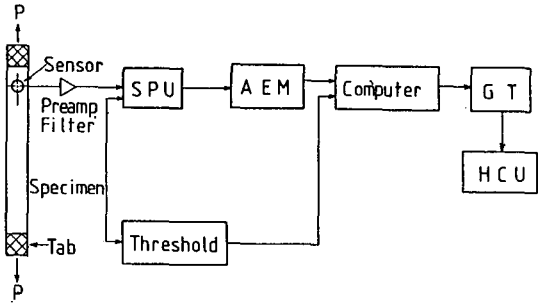


Fig. 4. Block diagram of AE measuring system during tensile test.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 충격손상의 양상

Fig. 5는 충격손상을 입은 CFRP 시편에 대한 손상의 양상을 초음파 C-scan을 통하여 조사한 결과이며 충격횟수가 증가함에 따라 충격손상의 영역이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 충격에 의한 손상은 fiber의 주축 방향으로 성장하는 것을 알 수 있었다.

a) number of impacts : 10

b) number of impacts : 100

Fig. 5. Ultrasonic C-scan of $[0°]_8$ specimen after impact damage.

3.2 인장시험중의 AE 특성

Fig. 6 및 Fig. 7은 각각 $[0°]_8$ 및 $[10°]_8$ 시편의 인장시험시 방출된 AE의 총 에너지 및 총 event 수를 인장하중과 같이 표시한 것이다. 여기서 하중곡선 초기부분의 kink는 하중초기에 인장 grip의 미끄러짐을 방지하기 위해 변위율을 변화시켰기 때문에 나타난 것이다. Fig. 6 및 7에서 보듯이 일방성시편에서의 총 event 수는

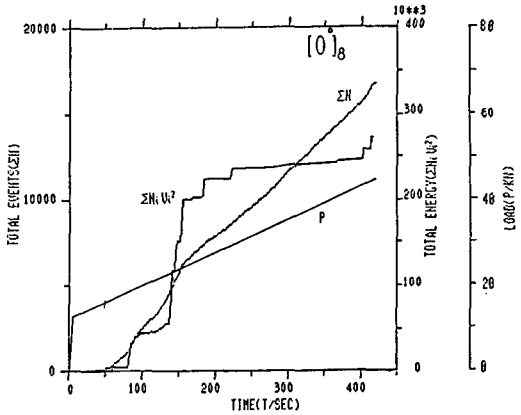


Fig. 6. Total AE event, energy and load of $[0°]_8$ specimen vs time during tensile test.

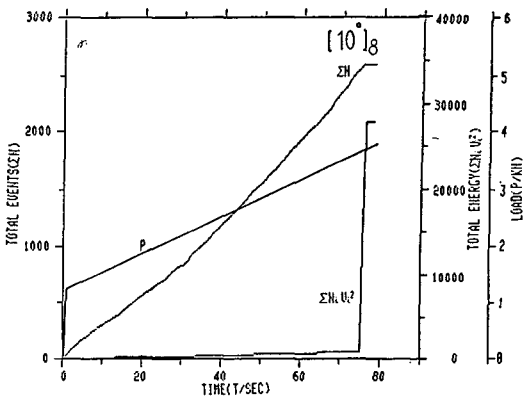


Fig. 7. Total AE event, energy and load of $[10°]_8$ specimen vs time during tensile test.

off-axis 각도에 거의 무관하게 시간에 따라 거의 선형적으로 증가함을 관찰할 수 있었다. 반면 총 AE 에너지는 $[0°]_8$, $[5°]_8$ 시편은 Fig.6과 같은 경향을 나타냈으며 $[10°]_8$, $[15°]_8$, $[45°]_8$ 시편은 Fig. 7과 같은 경향을 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 7의 총 에너지 곡선을 비교하여 보면 off-axis 각도, θ가 5° 이하로 작은 경우에는 catastropic한 파괴 훨씬 이전에 여러 곳에서 sporadic한 AE activity를 관측할 수 있었던 반면 10° 이상인 경우에는 파괴 이전에 많은 AE event가 발생하였음에도 불구하고 파괴시에만 강한 AE activity가 관측되었다. 이러한 AE 양상의 차이는 일방성시편의 off-axis 각도 변화에 따라 파괴양태가 크게 차이가 있는데 기인한 것으로 생각되었다. Jenkins의 최대

응력이론[4]에 의하면 일방성 섬유강화 적층판이 fiber의 방향에 대해 θ의 off-axis 각을 가진 축으로 일축 인장응력 σ를 받는다면 이론의 적절한 변환을 거쳐 최대하중은 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\sigma = \frac{X}{\cos^2\theta} \quad \text{(섬유파단) X : 일축인장강도}$$

$$\sigma = \frac{Y}{\sin^2\theta} \quad \text{(기지파손) Y : 압축강도}$$

$$\sigma = \frac{S}{\sin\theta\cdot\cos\theta} \quad \text{(전단파손) S : 전단강도}$$

Fig. 8은 인장시험 후의 off-axis 각도가 다른 일방성 시편의 파괴형태를 나타낸 것이며 $\theta \leqq 5°$ 시편에서의 AE는 파괴 양태와 비교해 볼 때 주로 섬유 파단 또는 fiber pull-out에 의한 것이며 $\theta \geqq 10°$ 시편에서의 AE 는 주로 fiber/matrix debonding 또는 기지 파손에 의한 것이다. 이러한 AE source의 차이는 AE의 peak amplitude 분포로 구별할 수 있으며 이것을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9 (a) 는 $[0°]_8$ 시편 즉 Fig. 6의 결과에 대응되는 것이며 Fig. 9 (b)는 $[10°]_8$ 즉 Fig. 6의 결과에 대응되는 peak amplitude 분포로서 peak amplitude는 탐촉자 출력전압으로 50 μV의 기준에 대한 비로 나타내었다. 각 분포도는 castropic한 파괴 직전까지의 결과로서 $[5°]_8$ 시편은 Fig. 9 (a)와, $[15°]_8$ 및 $[45°]_8$ 시편은 Fig. 9 (b)의 결과와 비슷한 양상을 보였다.

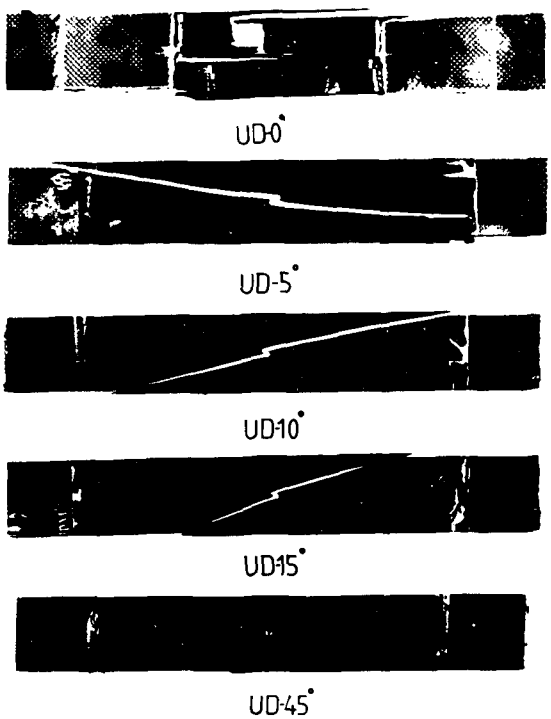


Fig. 8. Fracture shape of unidirectional specimen after tensile test.

Fig. 9에서 볼 수 있듯이 $[0°]_8$ 및 $[5°]_8$ 시편은 b-value[5]가 0.7−0.8 사이의 값을 나타내고 있으며 $[10°]_8$, $[15°]_8$ 및 $[45°]_8$ 시편은 3.0—4.0 사이의 값을 보이고 있다. 이상과 같은 b-value에 대한 결과는 섬유파단 및 fiber pull-out에 의한 AE가 기지파손 및 fiber/matrix debonding에 의한 AE 보다 단위 event당

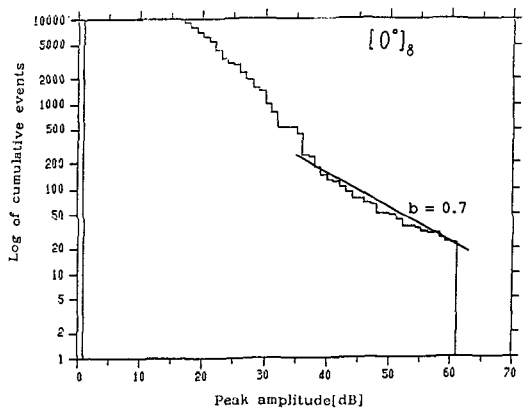
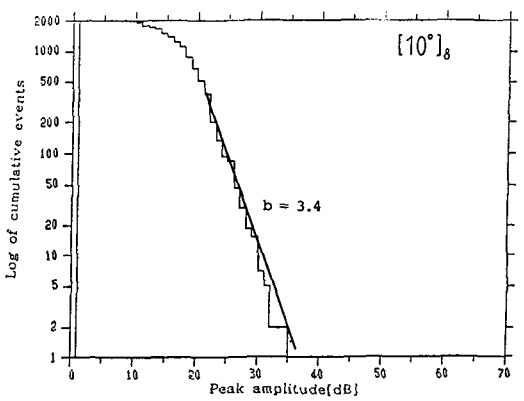


Fig. 9.(a) Log of cumulative distribution events of $[0°]_8$ specimen vs peak amplitude [dB] during tensile test.



(b) Log of cumulative distribution events of $[10°]_8$ specimen vs peak amplitude [dB] during tensile test.

의 에너지가 크다는 것을 의미하며 이러한 b-value의 차이에 의해 AE source의 구별이 가능할 것으로 판단된다.

3.3 SWF에 의한 강도평가

Fig. 10은 일방성 시편의 aff-axis 각도 θ의 변화에 따른 파괴응력, SWF 및 파괴시까지 방출된 AE의 총 energy를 나타낸 것으로 파괴응력은 이론적으로 예측된 바와 같이[4] θ의 증가에 따라 급격히 감소하였으며 SWF 및 총 energy도 같은 경향을 보이고 있다.

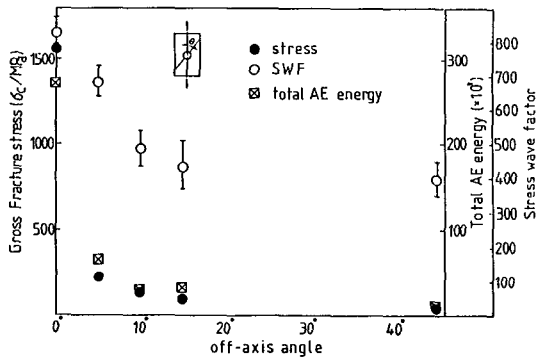


Fig. 10. Gross fracture stress, total AE energy and SWF of unidirectional specimen vs off-axis angle.

SWF의 이러한 경향성을 이용하면 일방성시편에서의 섬유방향각은 비파괴적인 방법에 의해 정성적으로 측정될 수 있다. 또한 인장시험중 파괴시까지 방출된 총 energy는 대응되는 파괴응력의 값과 유사한 경향성을 나타내었다.

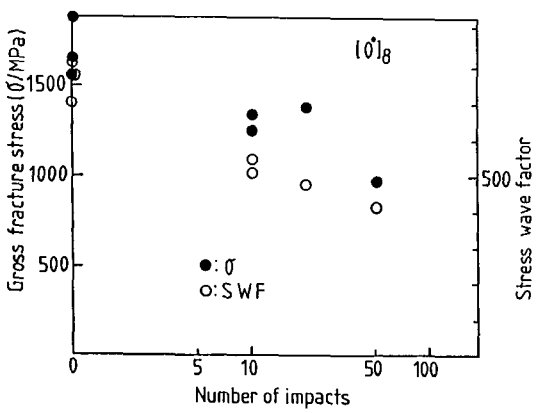


Fig. 11. Gross fracture stress and SWF of $[0°]_8$ specimen vs number of impacts.

Fig. 11은 $[0°]_8$ 시편의 충격손상에 의한 파괴강도의 저하 및 SWF를 측정한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 파괴강도는 충격피로 횟수의 증가에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 강도의 저하는 충격에 의해 시편 내부에 생성된 층간분리 및 기지균열 등의 손상에 의한 것이며, 이들 결함들은 응력파의 전파에 장애요인으로 작용하여 SWF의 감소를 야기한 것으로 판단된다. 따라서 SWF의 측정은 복합재료 내부손상 정도의 정성적인 평가에 적용될 수 있으며 손상에 의한 강도 저하를 평가하는데 이용될 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

4. 요　약

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 초음파 C-scan 법에 의하여 층간분리, 기지균열 등의 손상 정도, 크기 및 형태의 판별이 가능하며 충격손상은 주로 섬유의 주축방향으로 성장한다.

2) 복합재료의 인장파괴시 적층구조에 따라 상이한 AE 양상을 나타내며 이 원인은 파괴 mode의 차이에 기인한다.

3) 섬유의 파단은 기지파단의 경우 보다 강력한 AE activity를 나타내며 peak amplitude의 분포를 분석하여 파괴 mode의 해석이 가능하다.

4) 복합재료의 파괴강도는 적층구조, 충격손상 등에 영향을 받으며 응력파 계수(SWF)의 측정에 의해 정성적 평가가 가능하다.

참 고 문 헌

1. T. S. Jones, "Inspection of composites using automated ultrasonic scanning system(AUSS)", Materials Evaluation / 43. May 1985, ASNT.
2. J. B. Nestleroth, L. J. Rose, M. Bashyam and K. Subramanian, "Physically based ultrasonic feature mapping for anomaly classification in composite materials', Materials Evaluation/43. April 1985, ASNT

3. A. Vary and R. F. Lark, "Correlations of fiber composites tensile strength with the ultrasonic stress wave factors", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 7, No. 4, 1979.
4. "Handbook of composites", Vol. 3, edited by North-Holland-Amsterdam, 1985.
5. Adrian A. Pollock, "Acoustic Emission Amplitude Distributions" Dunegan/ Endevco, DE- 79— 10.