

CFRP/GFRP 적층복합재의 두께가 혼합모드 균열거동과 AE에 미치는 영향

윤유성 · 김다진솔* · 권오현**

(주)IBS 이노베이션 · *부경대학교 대학원 안전공학과 · **부경대학교 안전공학과
(2014. 8. 8. 접수 / 2014. 9. 16. 수정 / 2014. 10. 10. 채택)

The Effect of the CFRP/GFRP Composite Thickness on AE Characteristics and Mixed Mode Crack Behavior

Yu-Seong Yun · Da-Jin-Sol Kim* · Oh-Heon Kwon**

IBS Innovation Co., Ltd.

*Department of Safety Engineering of Graduate School, Pukyong National University

**Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received August 8, 2014 / Revised September 16, 2014 / Accepted October 10, 2014)

Abstract : Recently many efforts and researches have been done to cope with industrial facilities that require a low energy machines due to the gradual depletion of the natural resources. The fiber-reinforced composite materials in general have good properties and have the proper mechanical properties according to the change of the ply sequences and fiber distribution types. However, in the fiber-reinforced composite material, there are several problems, including fiber breaking, peeling, layer lamination, fiber cracking that can not be seen from the metallic material. Particularly, the fracture and delamination are likely to be affected by the thickness of the stacking laminates when the bi-material laminated structure is subjected to a load of the mixed mode. In this study, we investigated the effect of the thickness ratio of the difference in the CFRP/GFRP bi-material laminate composites by measuring the cracking behavior and the AE characteristics in a mixed mode loading, which may be generated in the actual structure. The results show that the thickness of the CFRP becomes more thick, the mode I energy release rate becomes a larger, and also the influence of mode I is greater than that of mode II. In addition, AE amplitude which shows the level of the damage in the structure was obtained the more damage in the CFRP with the thin thickness.

Key Words : fiber reinforced composite, delamination, fracture toughness, energy release rate, acoustic emission, amplitude

1. 서론

기계 및 산업 설비는 최근 천연자원의 점차적인 고갈로 인하여 저 에너지를 요구하는 설비로 대처하기 위해 많은 노력과 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구의 결과, 복합재료의 성능향상을 가능케 하여 많은 산업 분야에서 그 사용이 증가되고 있다. 특히 섬유강화 복합재료는 다양한 적층방법과 섬유종류의 변경에 따라 금속재료보다 우수한 비강도 및 비강성을 가질 수 있어 기계적 특성이 매우 우수하다. 하지만 섬유복합재료는 균질재 금속에서 볼 수 없는 섬유파단, 박리, 적층 분리, 섬유균열 및 기지균열 등을 포함하는 문제점이 발생되고 있다. 이러한 이유로 복합재료에 대한 기계적

성질 및 균열거동을 파악할 필요가 있으며 복합재료에 대한 파괴 모드 I 과 모드 II에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 실제 구조물에서는 각각의 파괴모드에서 발생하는 경우보다 복합적인 환경에서 파괴가 이루어지는 경우가 많으므로 혼합모드에서의 연구가 중요하다. Tumino 등¹⁾은 파괴 모드 I, II와 혼합모드 조건에서 피로 및 준 정적상태에 의한 박리현상을 연구하여 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)에 대한 파괴인성치가 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)에 대한 파괴인성치보다 더 크다고 발표하였다. Kwak 등²⁾은 CFRP/GFRP 하이브리드 복합재료에서 하중 지지점을 달리한 복합 파괴 모드에 대해서 연구하여 그들은 하중 점 지지거리가 클수록 Mode I 에너지 해방률 크기가 감

* Corresponding Author : Oh-Heon Kwon, Tel : +82-51-629-6469, E-mail : kwon@pknu.ac.kr

Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-Gu, Busan 608-737, Korea

소함을 나타내었다. 특히 Bennati 등³⁾은 혼합모드에서의 적층박리에 대한 평가식을 확장 보 이론을 이용하여 잘 제시하였고, Soboyejo 등⁴⁾은 이종재료에서 나타나는 계면파괴현상에 대하여 수정된 혼합모드 평가식을 실험과 수치 해석적으로 제시하였다. Yun 등⁵⁾은 DCB (Double Cantilever Beam) 시험편을 통하여 음향방출 (Acoustic Emission; 이하 AE) 특성치를 평가하여 층간 파괴인성치에 의한 AE 진폭 및 카운트가 파괴형태와 가지는 연관성을 평가하였다. Sebaey⁶⁾는 적층각의 불일치의 영향에 대한 연구를 진행하였다. Iwamoto 등⁷⁾은 일방향 CFRP의 적층계면 파괴인성치를 AE 특성치로 잘 나타내었다. 그들은 가교섬유가 AE 신호음의 중요한 기점이며 균열길이와 AE 카운트 상의 선형관계를 주요인으로 분석하였다. 이와 같이 여러 연구가 진행되고 있으나 이종 적층판의 두께 차이에서 오는 파괴특성에 대하여는 아직 많은 연구가 이루어져 있지 않다. 따라서 본 연구는 복합재료의 많은 문제점 중에서 적층 두께가 다른 이종재료의 접합으로 이루어진 CFRP/GFRP 적층 복합재료에 대하여 혼합모드에서 파괴인성치를 획득함과 동시에 파손현상을 AE에 의한 특성치로 평가하였다.

여기서 얻어진 결과는 혼합모드를 받는 이종 적층 복합재료의 적층분리 및 손상평가를 위한 AE 특성치의 적용에 대한 기초적인 자료를 제공할 것으로 판단된다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

본 실험에 사용된 실험재료는 이종접합복합재료를 만들기 위해 한국카본(주)에서 생산·시판되고 있는 직물구조의 CFRP 프리프레그와 현대카본에서 생산·시판되는 GFRP 프리프레그를 사용하였다. 이들 재료는 제조과정에서 원단으로 생산된다. 따라서 시험편 제작을 위해 가로·세로 각각 125×250 mm로 절단하였다. 절단된 GFRP 프리프레그는 단일 방향으로 10 ply (겹) 적층하였고, CFRP 프리프레그는 10, 12, 15 및 20 ply로 4가지 종류로 적층하여 두께 변화에 대한 파괴거동 및 AE 특성치에 대한 영향을 검토하였다. Table 1은 프리프레그에 대한 기계적 특성치를 나타낸다.

시험편을 제작할 때 CFRP/GFRP 이종 적층판 사이에 두께 약 80 μm의 테프론을 50 mm 길이로 삽입하여 초기균열을 형성한 후 각각 적층된 CFRP/GFRP 이종 Table 1. Mechanical properties of the CFRP and GFRP in prepreg

Laminates	Properties	Elastic modulus, E (GPa)	Ultimate strength, σ^u (GPa)	Poisson's ratio, ν
CFRP (woven)		54.3	1.52	0.13
GFRP (UD)		43.3	1.10	0.3

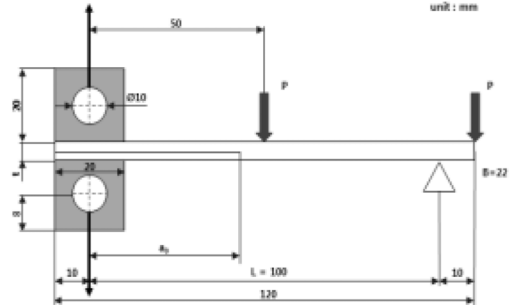


Fig. 1. The geometry of the mixed mode specimen.

적층 복합재료는 열성형기에서 성형온도 약 130°C, 성형압력 약 2 MPa로 하여 60분 동안 가압 성형하였다. 시험편의 최종 두께는 GFRP는 1.2 mm로 성형되었고, 여러 두께의 CFRP층의 경우에 10 ply는 2.09 mm, 12 ply는 2.33 mm, 15 ply와 20 ply는 각각 3.03 mm와 4.06 mm로 성형되었다. 성형된 CFRP/GFRP 이종 적층 복합재료는 ASTM D6671-M06⁸⁾을 참고하여 Fig. 1과 같은 형상과 치수로 절단 가공하였다.

절단된 시험편은 시험기의 그림에 고정 시키기 위해 자체적으로 제작한 알루미늄 블록을 에폭시 수지를 이용하여 부착하였다. 이때 알루미늄 블록의 접촉강도를 강화하기 위하여 약 100°C에서 약 30분간 열처리를 수행하여 사용하였다. 균열을 안정적으로 진전시키기 위하여 만능동적시험기(국내 H사)를 통해 a_0/L 비가 0.43으로 피로예비균열을 삽입하였다.

2.2 실험방법

파괴시험은 소형 인장시험기(T.O.사, 5 kN)를 이용하여 0.5 mm/min의 변위제어로 행하여 졌다. 혼합모드를 적용하기 위해 ASTM D6671-M06⁸⁾을 참고하여 혼합모드용 지그를 자체적으로 변형·제작하였다.

균열길이는 디지털변환기가 부착된 이동식 실체현미경(Kyowa, ×20)을 이용하여 측정하였다. 손상기구 해석을 위한 AE 특성평가는 AE 전용해석 보드인 AEDSP 장착 PC와 프리앰프 및 센서(R 15)로 구성된 AE 시스템을 사용하였다. AE 특성 평가 시 시험편 표면과 AE 센서 사이의 공기층을 제거하고 밀착시키기 위해 실리콘 접착매질을 바르고 천테이프로 압착하여

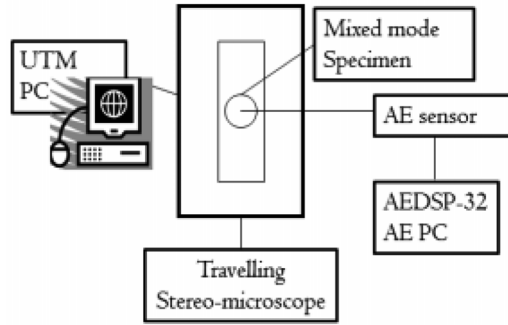


Fig. 2. The apparatus schematics of the experimental equipments.

고정하였다. Fig. 2에는 실험장치의 개략도를 나타낸다.

R15 센서는 공진주파수가 150 kHz이고 100 kHz~300 kHz의 밴드패스 필터를 사용하였다. AE 신호는 프리앰프에서 40 dB로 증폭하였고 AE 문턱값(threshold)은 Hsu-Nielsen source 법⁹⁾을 사용하여 46 dB로 설정하였다. AE 신호해석은 MISTRAS 프로그램¹⁰⁾을 이용하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 파괴시험

두께 영향을 고려한 이중 적층 복합재료를 구성하기 위해 GFRP는 모두 10 ply로 일정하게 하고 CFRP는 각각 20, 15, 12 및 10 ply로 변화시켜 GC20, GC15, GC12 및 GC10의 4가지 종류로 명명한 후 시험편을 제작하고 파괴시험을 수행하였다. 파괴시험은 혼합모드 굽힘 상태에서 이루어졌으며, 얻어진 하중과 하중선 변위 및 균열성장 길이를 Fig. 3에 나타내었다. 4종류의 시험편은 피로예비균열이 삽입된 지점까지 두께 변화와 관계없이 선형적으로 하중이 증가하였다. 시험편의 최대 하중은 GC20의 150.4 N에서부터 GC10의 61.2 N까지 두께가 작아짐에 따라 당연한 결과로써 점차 감소하였으며 최대 하중에 대응되는 하중점 변위는 8.84, 12.30, 13.57 및 15.70 mm로 점점 커지고 있음을 알 수 있다. 또한 하중은 최대 하중 이후 감소하는데 GC20인 경우에는 다소 급속히 저하하지만 CFRP의 두께가 얇아짐에 따라 점점 저하속도가 완만하게 나타난다. 이러한 현상은 단면적의 감소에 의한 굽힘강성의 저하에 따른 것으로 여겨지며 균질재의 경우와 동일하여 특별히 이중재 두께의 변화에 따른 영향은 없는 것으로 나타났다. 한편 균열개시 시점은 모든 경우에서 최대 하중에 도달하기 전(6.18, 6.82, 9.47 및 10.54 mm)에서 나타났지만 이후에도 선형적 균열 진전과 더불어 하중이 상승하는 구간이 발생하였다. 균열진전크기는 GC20,

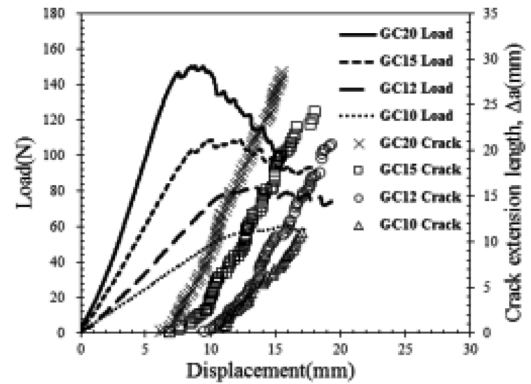


Fig. 3. The relationships of the load-displacement and crack extension length according to the thickness variation under mixed mode fracture test.

GC15, GC12 및 GC10 순으로 각각 28.60, 24.25, 20.70 및 11.02 mm 까지 성장하여 두께가 두꺼워질수록 균열은 더 크게 진전하였다. GC20의 균열진전크기에 해당되는 1,860 sec에서 같은 시간의 GC15, GC12 및 GC10의 균열진전크기는 각각 19.48, 10.63 및 7.48 mm로 얻어졌으며, GC20의 경우 상대적으로 두께가 두꺼워 동일 변위에 대하여 컴플라이언스가 작으므로 더 많은 하중이 작용되어 균열진전이 많이 진행된 것으로 여겨진다.

3.2 혼합모드 에너지 해방률 평가

혼합모드 에너지 해방률 평가식은 Williams 해석식을 기본으로 유도한 Marannano¹¹⁾의 하이브리드 직교 이방성 적층판 적용식 (1)~(4)를 사용하였다.

$$G_I = \frac{6P_I^2(a+\chi h)^2}{W} \left(\frac{1}{WE_{11}h_1^3} + \frac{1}{WE_{21}h_2^3} \right) \quad (1)$$

$$G_{II} = \frac{6P_{II}^2 a^2}{W^2} \gamma \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\alpha}{E_{11}h_1^3} + \frac{\beta}{E_{21}h_2^3} - \frac{1}{h^2(E_{11}h_1 + E_{21}h_2)} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{E_{11}h_1^3}{E_{11}h_1^3 + E_{21}h_2^3}, \quad \beta = 1 - \alpha \quad (4)$$

여기서 G_I 과 G_{II} 는 각각 Mode I과 Mode II에 해당하는 에너지 해방률을 나타낸다. α, β 는 적층판 각각 (CFRP 및 GFRP)에 적용되는 Mode II 하중 P_{II} 의 부

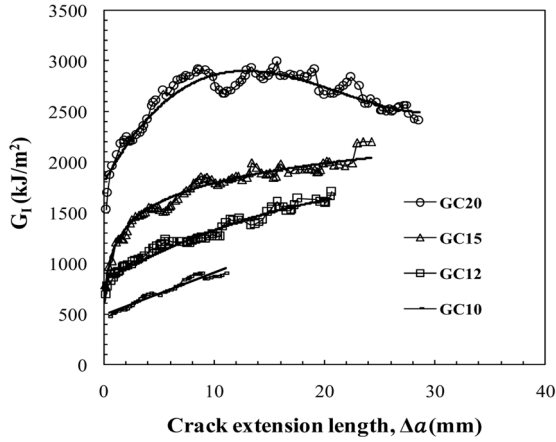


Fig. 4. The fracture resistance curves of Mode I energy release rate to the crack extension length according to the thickness variation.

분력이다. 그리고 a 는 균열길이, P_I 과 P_{II} 는 각 모드의 하중, E_{11} 과 E_{21} 은 재료의 탄성계수, W 는 시험편 폭, h_1 과 h_2 는 CFRP와 GFRP의 적층판 두께, χ 는 균열길이의 수정계수를 나타낸다. Fig. 4는 이동식 실험현미경으로 관찰한 균열성장길이, Δa 에 대한 Mode I 에너지 해방률, G_I 의 변화를 나타낸다. 각 시험편의 Mode I 에너지 해방률 파괴인성인 G_c^I 는 GC20, GC15, GC12 및 GC10의 순서로 각각 1531.51, 786.16, 697.94 및 468.96 kJ/m²로 구해졌다. CFRP와 GFRP의 적층 수가 동일한 GC10의 경우에 두께비($t_{CFRP}/GFRP$; C/G)가 $C/G = 1.7$ 로 약 2배에 해당되며 균열의 성장을 위하여 계속적인 하중의 증가가 나타나고 에너지 해방률의 값은 계속 증가하게 된다. 반면에 $C/G = 3.4$ 인 CFRP가 20 ply 적층된 경우는 에너지 해방률이 초기 증가형태에서 안정 상태로 변화하지 않고 다시 감소하는 형태를 나타내었다. 이것은 균열성장에 따라 급속한 하중의 감소에 기인하는 것으로 여겨진다. Mode I 에너지 해방률은 CFRP가 15 ply 적층된 $C/G = 2.5$ 의 경우가 비교적 안정적 균열성장의 경향이 있음을 나타낸다. Fig. 5는 Mode II에 해당하는 에너지 해방률, G_{II} 의 변화를 나타낸다. G_c^{II} 는 각 시험편 GC20, GC15, GC12 및 GC10의 순서로 각각 101.2, 123.23, 194.71 및 152.8 kJ/m²로 구해졌다. 이때 CFRP층이 얇아질수록 G_{II} 의 값이 커지다가 GC10의 경우 즉, CFRP를 10 ply 적층한 $C/G=1.7$ 인 경우에는 오히려 12 ply 적층한 경우보다 더 낮게 측정되어 약간의 차이는 있으나 GC15의 경우와 유사한 값을 나타내는 것처럼 보인다. 측정 평가의 정확성을 얻기 위하여 3번 이상의 실험을 수행하여 동일한 결과를 도출하였으며 이것은 두께의 비가

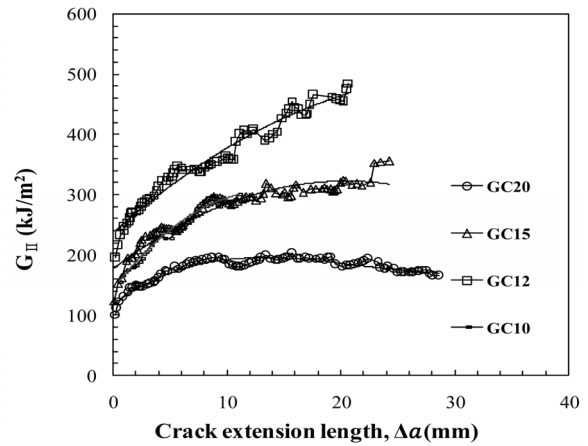


Fig. 5. The variation of Mode II energy release rate to the crack extension length according to thickness variation.

작아짐에 따라 식 (3)의 γ 의 항목이 커지게 되고 또한 균열진전속도가 GC15의 경우와 유사함에 따라 얻어지는 결과로 여겨진다. Fig. 6은 일정한 두께를 가지는 GFRP층에 대해 CFRP 두께 변화의 비가 Mode II 에너지 해방률의 변화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. C/G 가 커질수록 전체 에너지 해방률에 대한 Mode II 에너지 해방률 비가 점점 작아지고 있음을 나타낸다. 결국 두께가 얇아질수록 Mode II의 영향이 커짐을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5에서 결과의 타당성을 나타낸다. 이 결과에 대하여 향후 CFRP의 적층 수를 더 적게 한 보다 더 많은 경우의 여러 시험편을 제작하여 확인 실험을 수행할 예정이다. Mode II 에너지 해방률 G_{II} 에 있었어도 GC15의 경우에 가장 안정적인 저항곡선을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig 4와 Fig. 5의 결과를 비교해 보면 현재의 두께비에서는 Mode I에 영향을 더 받는 것으로 여겨진다.

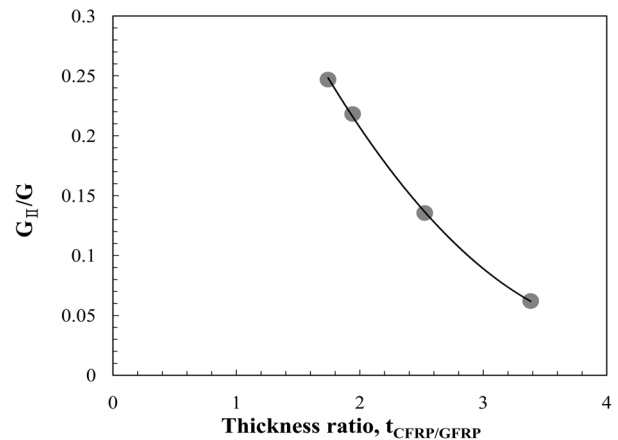


Fig. 6. The variation of G_{II}/G according to the ratio of CFRP to GFRP thickness.

3.3 음향방출특성 평가

Fig. 7 (a), (b) 및 (c)는 각 CFRP/GFRP 적층판에 대하여 혼합모드 파괴시험 동안 실시간으로 획득된 AE 특성치인 AE 진폭과 AE 카운트를 균열성장길이, Δa 에 대하여 평가한 관계를 나타낸다. 문턱값(threshold 값)인 46 dB 이하의 저 진폭은 무시하도록 설정하여 잡음은 최소화한 상태로 측정하였다. AE 특성 중 AE 카운트는 구조물이나 재료에 외력이 가해짐으로써 나타나는 손상 빈도를 나타내는 척도이다. 각각의 시험편 GC20, GC12 및 GC10의 실험종료 시점까지 누적된 AE 카운트는 각각 7.13×10^5 , 12.46×10^5 및 2.26×10^5 으로 얻어졌으나, GC20의 최대 누적 AE 카운트에 해당되는 1,860 sec와 같은 동일시간대에서는 GC12의 AE 카운트가 6.26×10^5 , GC10의 경우는 1.40×10^5 으로 얻어져, GC20의 AE 카운트가 비교적 많은 카운트 수가 얻어진 결과로 보아 높은 하중을 받아 손상빈도가 많은 것으로 여겨진다. AE 카운트가 재료의 손상빈도를 나타낸다면 AE 진폭의 경우에는 그 손상의 크기를 나타내는 척도이다. GC20에서 하중이 처음으로 감소하는 구간인 약 900 sec 지점에서 59.3 dB의 큰 진폭을 확인하였고 그 이후 하중이 다시 증가하는 형태를 보이다가 다시 감소하는 약 1,130 sec 구간에서 63.3 dB의 큰 진폭이 관찰되었다. 이후 계속된 증감형태의 하중을 보이다가 변위가 13.2 및 15.1 mm인 최대 균열 직전의 1,570 및 1,820 sec 지점에서 62.5 및 63.4 dB의 최대 AE 진폭을 확인하였다. GC12의 경우에는 초기균열이 일어나기 전 하중증가율이 다소 감소한 구간에서 AE 진폭이 점차 관찰되기 시작하였으며 초기 균열이 발생하여 하중 감소가 이루어진 지점인 약 1,660 sec에서 최대 AE 진폭인 69.2 dB로 측정되었고 이후 하중이 계속적으로 증감하는 형태로 진행되어 급감하는 지점인 약 1,820 및 1,980 sec에서 각각 66.2 및 65.2 dB의 큰 진폭이 측정되었다. GC10인 경우에도 마찬가지로 하중 증가율이 약간 감소한 구간에서 AE 진폭이 조금씩 관찰되기 시작했으며 하중이 급감하게 된 지점인 약 1,600 sec에서 최대 AE 진폭인 70 dB이 측정되었고 이후 계속된 하중의 증감형태에서 감소하는 지점마다 큰 진폭이 관찰되었다. 두께에 따른 AE 진폭크기를 비교해 볼 때 GFRP에 대한 CFRP의 두께비가 낮을수록 최대 AE 진폭은 더 크게 나타났으며 이것은 CFRP적층부의 강성이 낮아짐에 따라 손상정도가 더 크게 발생되고 있음을 나타내는데 이것은 단면적의 감소로 섬유소의 파괴분율이 감소하게 되고 기지의 계면분리현상이 증가하여 손상이 증가한다고 여겨진다.

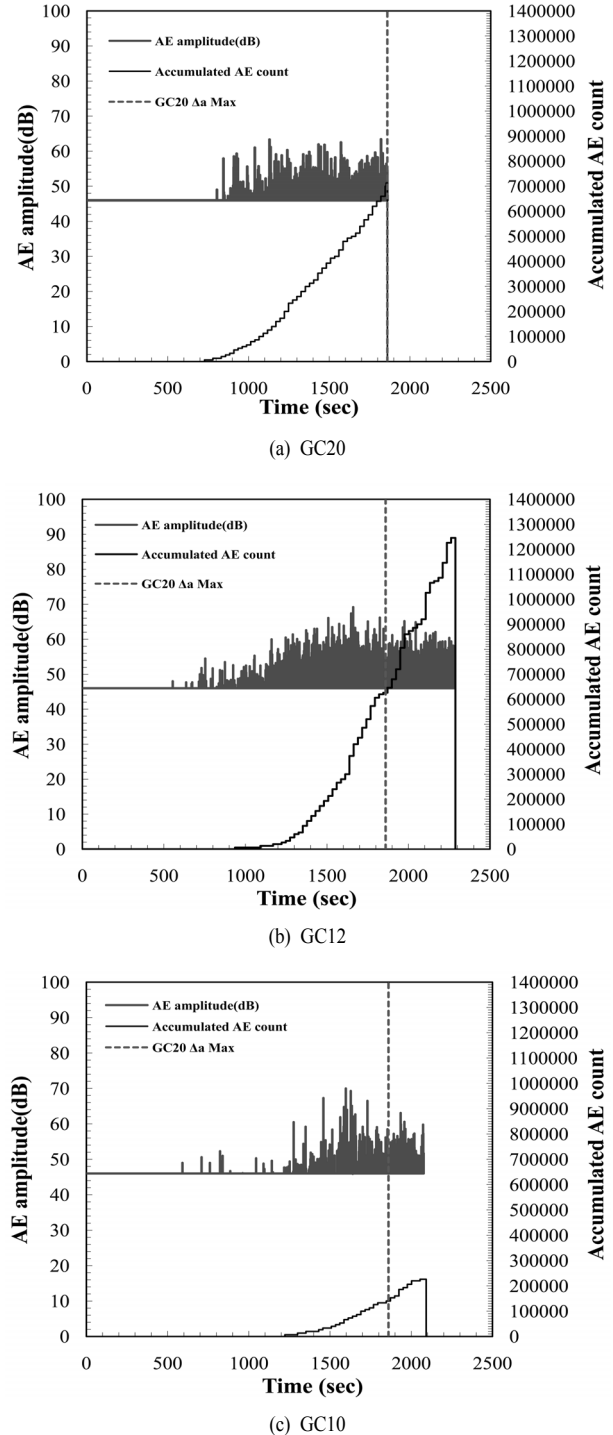


Fig. 7. The relationships of AE amplitude and AE count during the mixed mode fracture test.

4. 결론

두께비가 다른 CFRP/GFRP 이중 적층 복합재의 혼합모드 시험편에 대한 파괴시험을 수행하여 파괴거동 및 AE 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 시험편의 최대하중은 GC20의 150.4 N에서부터 GC10의 61.2 N까지 두께가 작아짐에 따라 점차 감소하였으며, 균열개시 시점은 모든 경우에서 최대 하중에 도달하기 전에 나타났고, 균열진전크기는 두께가 두꺼워질수록 균열은 더 크게 진전하였다.

2) Mode I 에너지 해방률 파괴인성치 G_c^I 은 GC20, GC15, GC12 및 GC10의 순서로 1531.51, 786.16, 697.94 및 468.96 kJ/m² 얻어져 CFRP 적층 수가 가장 높은 GC20 시험편의 에너지 해방율이 가장 높게 나타났다.

3) Mode II 에너지 해방률 파괴인성치 G_c^{II} 은 GC20, GC15, GC12 및 GC10의 순서로 101.2, 123.23, 194.71 및 152.8 kJ/m²으로 구해졌다. 혼합모드의 G_I 과 G_{II} 값을 비교하면 Mode I에 영향을 더 받는 것으로 여겨진다.

4) 재료의 손상크기를 나타내는 AE 특성인 최대 AE 진폭은 GC20, GC12 및 GC10의 순으로 각각 63.4, 69.2 및 70 dB로 나타났으며, 이것은 CFRP적층부의 강성이 낮아짐에 따라 손상정도가 더 크게 발생되고 있음을 나타낸다고 여겨진다.

감사의 글 : 이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

References

- 1) D. Tumino and B. Zuccarello, "Fatigue Delamination Experiments on GFRP and CFRP Specimens under Single and Mixed Fracture Modes", *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 1791-1796, 2011.
- 2) J. H. Kwak, J. W. Kang and O. H. Kwon, "The Experimental Evaluation of the Mixed Mode Delamination in Woven CFRP/GFRP Laminates under MMB Test", *Journal of the KOSOS*, Vol. 28, No. 4, pp.14-18, 2013.
- 3) S. Bennati, P. Fiscaro and P. S. Valvo, "An Enhanced Beam Theory Model of the Mixed Mode Bending Test-Part II : Application and Results", *Meccanica*, Vol. 48, pp. 465-484, 2013.
- 4) W. O. Soboyejo, G. Y. Lu, S. Chengalva, J. Zhang and V. Kenner, "A Modified Mixed Mode Bending Specimen for the Interfacial Fracture Testing of Dissimilar Materials", *Fatigue Fracture Engineering Material Structures*, Vol. 22, pp. 799-810, 1999.
- 5) Y. S. Yun and O. H. Kwon, "The Evaluation of Interlaminar Fracture Toughness and AE Characteristic in a Plain Woven CFRP Composite with DCB Specimen", *Journal of the KOSOS*, Vol. 20, No. 1, pp. 49-54, 2005.
- 6) T. A. Sebaey, E. V. Gonzalez, C. S. Lopes, N. Blanco, P. Maimi and J. Costa, "Resistance and Damage Tolerance of Dispersed CFRP Laminates : Effect of the Mismatch Angle between Plies", *Composite Structure*, Vol. 101, pp. 255-264, 2013.
- 7) M. Iwamoto, Q. Q. Ni, T. Fujiwara and K. Kurashiki, "Interlaminar Fracture Mechanism in Unidirectional CFRP Composite - Part I: Interlaminar Toughness and AE Characteristics", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 64, pp. 721-745, 1999.
- 8) Standard Test Method for Mixed Mode I, Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM D6671M-06, ASTM Annual Book of Standards, 2006.
- 9) P. J. Shull, *Nondestructive Evaluation*, Marcel Pekker, Inc, pp. 370-371, 2000.
- 10) MISTRA 2001 User's Manual REV. 1.
- 11) G. V. Marannano and A. Pasta, "An Analysis of Interface Delamination Mechanism in Orthotropic and Hybrid Fiber metal Composite Laminates", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, pp. 612-626, 2007.