

나노입자 코팅 CFRP의 모의 낙뢰 충격손상 후 압축시험에서의 음향방출 거동

Acoustic Emission Monitoring of Compression-after-Impact Test of Nano-Particles-Coated CFRP Damaged by Simulated Lightning Strikes

신재하*, 권오양**†, 서성욱*

Jae-Ha Shin*, Oh-Yang Kwon** and Seong-Wook Seo*

초 록 모의 낙뢰시험에 의해 충격손상을 입은 탄소섬유강화플라스틱(CFRP) 복합재료의 잔류압축강도를 평가하는 시험(CAI) 중 손상부의 거동을 음향방출(AE)법으로 관찰하였다. CFRP 시편은 ITO 나노입자를 탄소섬유에 직접 코팅한 CFRP prepreg를 이용하여 만들었고, 모의 낙뢰시험은 고전압 대전류 인가장치(ICG)를 이용하여 시편에 10~40 kA의 충격과 전류를 인가하여 실시하였다. ITO 나노입자 코팅의 효과와 인가전류의 세기에 따른 손상영역의 크기와 잔류압축강도를 AE 거동과 연관하여 평가하였다. 손상영역의 크기는 초음파 C-scan 영상을 이용하여 측정하였으며, AE events 수와 AE event가 발생하기 시작할 때의 압축응력 수준을 연관시킨 결과 ITO 나노입자 코팅 CFRP의 경우 상대적으로 손상이 작고 훨씬 높은 응력수준에서 AE가 발생하기 시작하였다. CAI시험 중 AE측정은 실제로 낙뢰손상을 입은 복합재 동체 구조물의 손상된 정도를 구별하는 데 유용한 지표로 활용될 수 있음을 확인하였다.

주요용어: 탄소섬유강화플라스틱, 모의 낙뢰, 충격손상 후 압축시험, 나노입자 코팅, 음향방출

Abstract Nanoparticles-coated and impact-damaged carbon-fiber reinforced plastics(CFRP) laminates were tested under compression-after-impact(CAI) mode and the propagation of damage due to compressive loading has been monitored by acoustic emission(AE). The impact damage was induced not by mechanical loading but by a simulated lightning strike. CFRP laminates were made of carbon prepreps prepared by coating of conductive nano-particles directly on the fibers and the coupons were subjected to simulated lightning strikes with a high voltage/current impulse of 10~40 kA within a few microseconds. The effects of nano-particles coating and the degree of damage induced by the simulated lightning strikes on the AE activities were examined, and the relationship between the compressive residual strength and AE behavior has been evaluated in terms of AE event counts and the onset of AE activity with the compressive loading. The degree of impact damage was also measured in terms of damage area by using ultrasonic C-scan images. From the results assessed during the CAI tests of damaged CFRP showed that AE monitoring appeared to be very useful to differentiate the degree of damage hence the mechanical integrity of composite structures damaged by lightning strikes.

Keywords: Carbon-Fiber Reinforced Plastic(CFRP), Lightning Strike, Compression-after-Impact(CAI), Nano-Particles Coating, Acoustic Emission(AE)

1. 서론

최근 복합재료는 높은 비강도와 비강성, 좋은 피로 특성과 부식 저항 능력 때문에 항공기 자재로서 그 사용량이 늘고 있다[1]. 비강도와 비강성은 탄소섬유복합재의 중요한 특징 중 하나이다. 그래서 항공기에서 탄소섬유강화플라스틱(CFRP)의 사용량은 매년 늘고 있다.

그러나 두께 방향의 충격 하중으로 인한 복합재 동체 구조물의 민감도가 증가하는 문제는 더욱더 광범위하게 사용하는데 있어서 심각한 문제이다. 특히 충격에 약한 복합재료의 압축강도는 공구를 떨어뜨리거나, 저속의 물체에 충격을 받을 경우 두드러지게 감소한다[2]. CAI 후의 잔류 압축강도의 특성은 복합재 구조물의 손상허용을 설계 하는데 중요한 점으로 고려된다[3].

최근 또 다른 문제는 항공기에 쓰이는 복합재가 낙뢰로 인해 쉽게 손상을 입을 수 있다는 것이다. 항공기는 운항 중 연간 1~2회의 낙뢰를 맞게 된다. 최근 항공기는 복합재를 사용하여 제작을 하는데 이러한 복합재 항공기 동체의 경우 낮은 전기전도도로 인해 큰 충격손상이 발생할 수 있다[4,5]. 낙뢰로 인한 충격손상이 발생한 동체 구조물에 외압이 작용하면 복합재 동체의 경우 위험한 상황이 발생할 수 있다. 이러한 충격손상은 사실상 눈에 보이지 않으므로 충격손상 후 잔류압축강도의 평가를 위해 compression-after-impact (CAI) 시험을 실시하게 되었다. 이 연구로 낙뢰에 의한 충격손상 후 압축강도를 받았을 때 CFRP 동체의 층간분리와 같은 결함의 위험성을 사전에 예측할 수 있으리라 기대하였다.

이번 연구에서는 세 종류의 시편(대조시편, ITO 30% 코팅시편, ITO 40% 코팅시편)에 모의 낙뢰를 인가한 후 잔류압축강도를 평가하는 과정에서 음향방출 측정을 사용함으로써 손상부의 거동을 평가하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 시편 제작

코팅 되지 않은 CFRP 시편은 SK Chemical사의 USN125C prepreg를 이용하여 제작하였다.

ITO 나노입자로 코팅한 CFRP 시편을 제작하기 위하여 먼저 Methyl-Ether-Ketone(MEK) 용액으로 prepreg의 resin을 제거한 후 섬유에 ITO 나노입자를 농도 별로 분사시켜 도포하였으며, 코팅된 탄소섬유를 resin film사이에 넣고 hot press를 이용하여 압착하는 형식으로 제작하였다. CAI 시험에 사용된 시편은 [0/90]8s로 적층하였고, 시편의 크기는 100x150 mm, 시편의 평균 두께는 3.6 mm이다.

2.2. 실험 절차

모의 낙뢰 충격손상은 고전압 대전류 인가장치(ICG)를 사용하였다. CFRP 시편 중앙에 10 kA부터 40 kA까지 충격과 전류를 인가하는 형식으로 실험을 진행하였다. CAI 시험 장치는 ASTM D7137에 의거하여 만들었으나 여러 차례 압축시험을 진행한 후 새롭게 수정을 하였다[6]. CAI 시험은 인장시험기를 사용하였고, 속도는 1.25 mm/min로 모든 시험은 동일하게 진행하였다. 그리고 시편의 사분면에 하나씩 4개의 AE 센서(B1025, Digital Wave)를 부착하였고 표면에 접착제를 사용하여 고정시켰다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 CAI시험 후의 CFRP 시편의 육안 관찰 사진이다. 왼쪽 사진을 보면 시편의 중앙부인 낙뢰손상 영역에서 시편이 부서진 것을 볼 수 있지만 오른쪽 사진은 낙뢰손상 영역 윗부분에서 시편이 부서진 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 현상은 ASTM D7137에서 충분히 허용될 수 있는 사항인 것으로 알려져 있다.

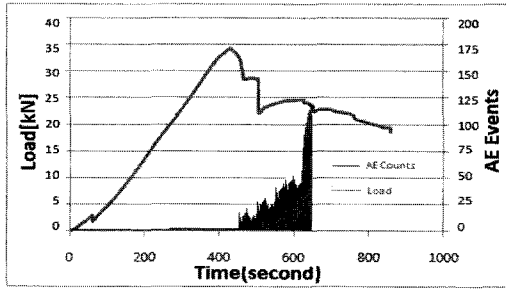


Fig. 1 Photographs of CFRP specimens after the CAI tests

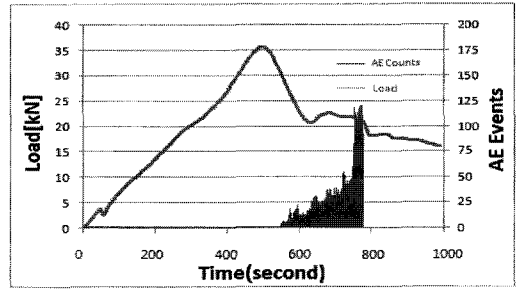
Fig. 2와 Fig. 3은 코팅하지 않은 시편과 ITO 40 % 코팅한 시편에서 압축강도와 AE 신호 발생과의 관계를 나타내는 그래프이다. 시편을 압축하는 실험에서 압축강도는 최고점까지 올라간 후 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이때 AE event는 시점은 압축강도가 급격히 떨어진 시점

부터 발생하기 시작하였다. 또한 시편이 부서질 때 AE 센서가 시편에서 떨어져 나갔기 때문에 AE events는 최고점에서 순간적으로 0으로 감소하는 현상이 나타나게 된다.

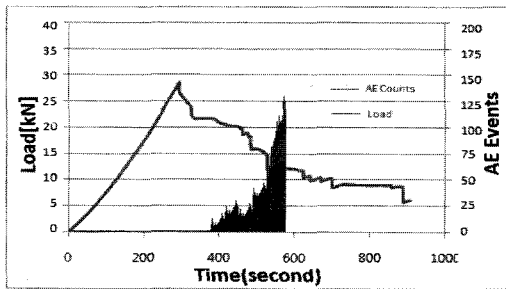
두 종류의 시편 모두에서 AE 발생거동은 인가된 전기 충격이 증가할수록 일찍 나타났으나



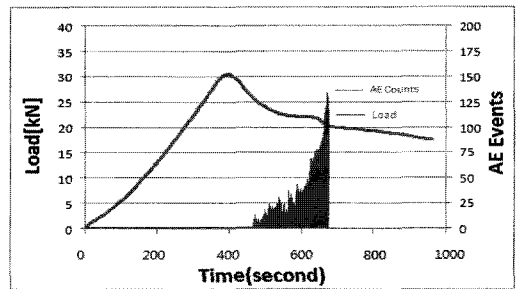
(a) Uncoated and 10 kA



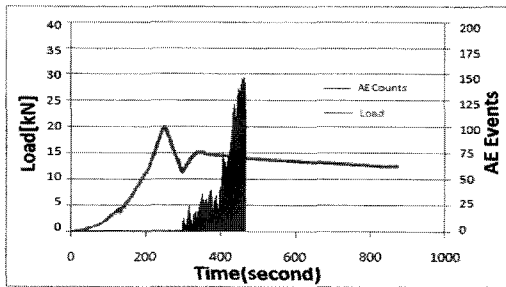
(a) ITO 40 % coated and 10 kA



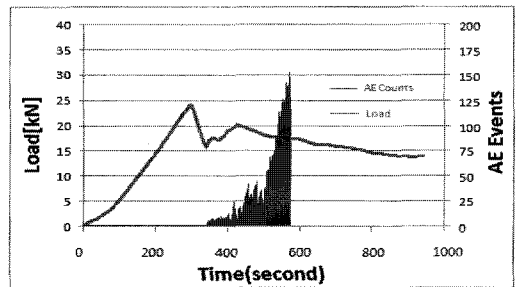
(b) Uncoated and 20 kA



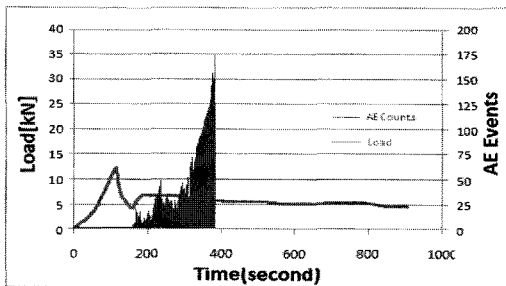
(b) ITO 40 % coated and 20 kA



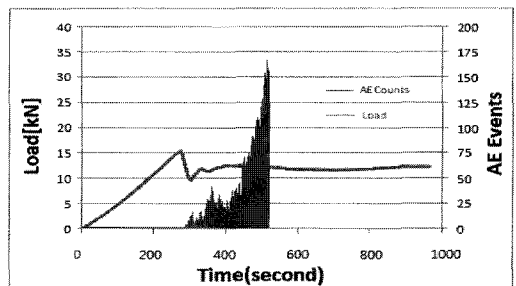
(c) Uncoated and 30 kA



(c) ITO 40 % coated and 30 kA



(d) Uncoated and 40 kA



(d) ITO 40 % coated and 40 kA

Fig. 2 Relationship between load and AE events with time for uncoated CFRP

Fig. 3 Relationship between load and AE events with time for ITO 40 % coated CFRP

ITO 40 % 코팅한 시편에서는 AE 거동이 더 늦게 나타나는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 최고 압축강도와 잔류압축강도는 ITO 40 % 코팅한 시편보다 코팅하지 않은 시편에서 더 낮게 나타났다. 이는 같은 강도의 충격을 받았을 때 코팅하지 않은 시편이 입은 충격 손상이 더 크기 때문이다. 이는 Fig. 4를 보면 압축강도와 모의 낙뢰 전류의 관계로부터 더욱 명확하게 나타난다.

Fig. 4는 압축강도와 인가 전류의 세기에 따른 그래프이다. 코팅하지 않은 대조시편, ITO 30 % 코팅시편, ITO 40 % 코팅시편 모두에서 압축강도는 인가 전류의 세기와 거의 반비례하는 것을 볼 수 있다. 같은 인가 전류에서는 코팅하지 않은 시편에서 가장 낮은 압축강도를 보였고 ITO 40 % 코팅한 시편에서 가장 높은 압축강도를 보였다.

Fig. 5는 시편의 충격손상 부위를 초음파 C-scan으로 영상화한 사진이다. 충격손상 부위는 코팅하지 않은 시편에서 가장 크게 나타났고 그 다음은 ITO 30 % 코팅, 그리고 ITO 40 % 코팅 순서로 점점 작게 나타났다.

Fig. 6은 세 가지 CFRP에 대한 총 AE events와 충격손상의 크기와의 관계를 보여주는 그래프이다.

AE events 수는 모의 낙뢰로 인해 손상된 영역의 크기와 거의 완벽하게 비례관계를 보여준다. AE events와 충격손상 영역의 연관성은 복합재료 동체 구조물의 낙뢰에 의한 손상의 정도를 가늠하는 유용한 지표로 활용할 수 있다.

Felicity ratio는 첫 AE 발생하중을 이전 최고 하중으로 나눈 값으로 정의되며 복합재료와 같이 불균질한 미세구조를 가진 재료나 구조에서 손상 영역의 존재를 나타낼 수 있는 값이다. Fig. 7은 각기 다른 크기로 손상을 입은 CFRP 시편에

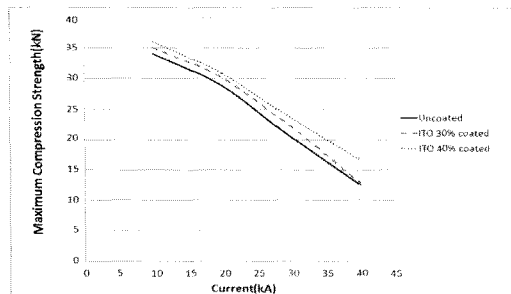


Fig. 4 Relationship between maximum compressive strengths and the levels of impulse current

CAI 시험을 하였을 때 AE 활동이 나타난 것으로 Felicity ratio를 구한 그래프이다. 이 그래프에는 최고 압축강도와 AE events가 다시 나타나기 시작할 때의 압축강도가 포함되어있다. Felicity ratio는 코팅하지 않은 시편에서 인가 전류가 증가함에 따라 급격하게 감소하고 특히, 40 kA의

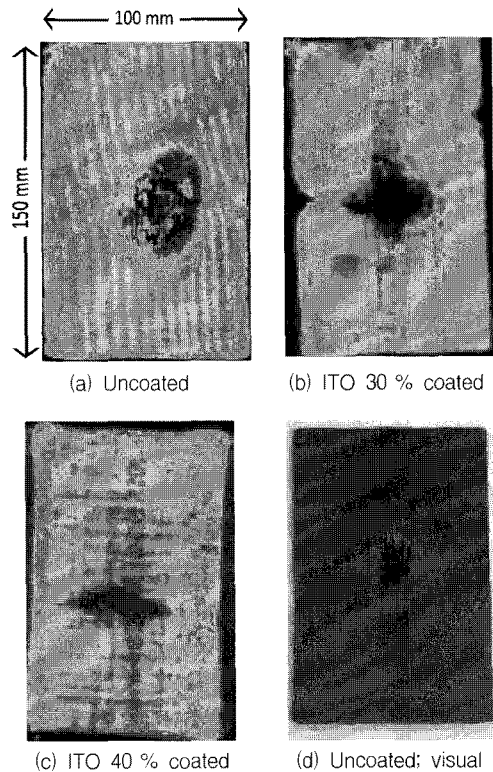


Fig. 5 Impact-damaged area measured by ultrasonic C-scan images for three types of CFRP coupons after the impulse current of 40 kA was applied. A visual image of damaged area for the uncoated is shown as a reference in (d).

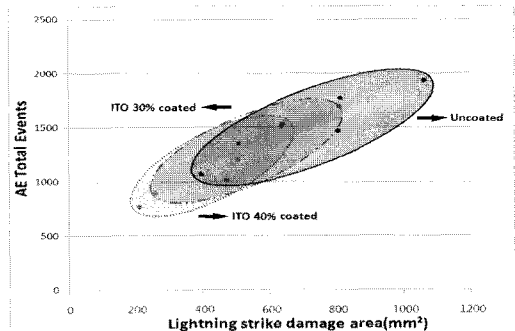


Fig. 6 Relationship between AE total events and the impact-damaged area

전류로 시험하였을 때 그 감소폭이 더 심하다. 그러나 ITO 30% 코팅 및 40% 코팅 CFRP 시편은 그 감소폭이 40 kA 때의 실험값에서도 급격하게 떨어지지 않고 다른 크기의 전류를 인가했을 때와 마찬가지로 균등하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 코팅하지 않은 시편에서 Fig. 4와 5에서 본 것과 같이 충격손상 영역이 가장 크고 압축강도가 가장 낮게 나타난 것과 연관시킬 수 있다.

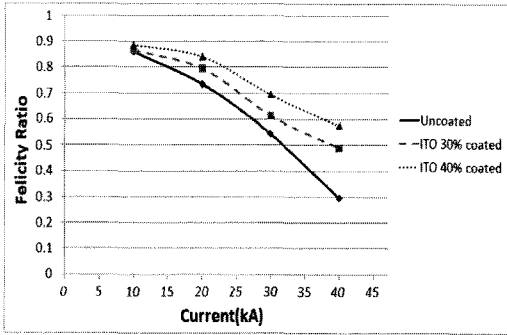


Fig. 7 Felicity ratio decreasing with the levels of impulse current applied

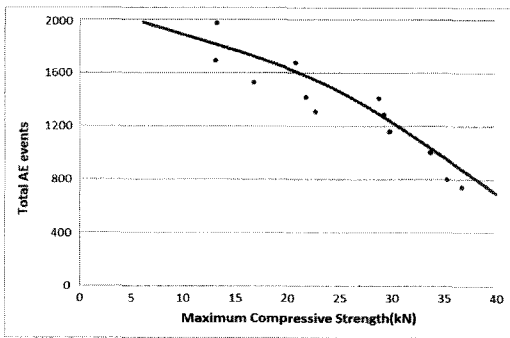


Fig. 8 Relationship between maximum compressive strength and total AE counts

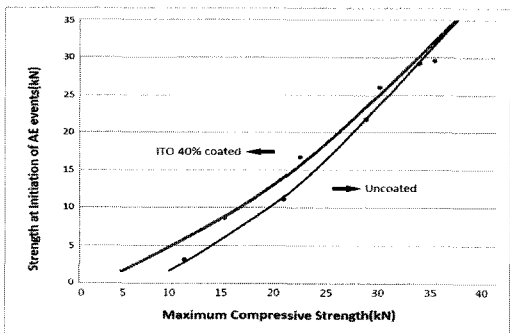


Fig. 9 Relationship between maximum compressive strengths and the stress level of AE counts initiation

Fig. 8은 총 AE events 수와 압축강도와의 관계를 보여주고 있는 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 CFRP 시편의 종류와 충격손상의 정도와 관계없이 거의 반비례하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 총 AE events 수가 작다는 것은 그 시편의 충격손상 영역의 크기가 작고 파괴되기까지 더 높은 압축강도를 나타낼 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 9는 각각의 시편에서 최고 압축강도와 AE events가 처음 시작하는 지점의 압축강도와의 관계를 나타낸 그래프이다. 압축강도는 Fig. 4에서와 같이 인가 전류의 크기와 거의 반비례하기 때문에 시편이 파괴될 때 필요한 압축강도가 더 낮다는 것은 그 시편이 손상된 정도가 더 크다는 것을 의미한다. Fig. 9에서 왼쪽 아래가 바로 이와 같은 조건에 해당한다. 코팅하지 않은 시편에서 AE events가 나타나기 시작할 때의 압축강도는 ITO 40% 코팅한 시편보다 훨씬 낮게 나타났다. 이는 낙뢰로 인한 복합재료 동체 구조물의 손상 정도를 가늠할 수 있는 또 다른 지표로 삼을 수 있다.

4. 결론

나노입자로 코팅한 CFRP 시편에 대하여 모의 낙뢰에 의한 충격손상을 일으킨 후 CAI시험 과정에서 음향방출 거동을 관찰하였고 모의 낙뢰에 사용한 인가 전류의 수준에 따라 평가할 수 있었다. 코팅하지 않은 대조시편, ITO 30% 코팅시편, ITO 40% 코팅시편으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 충격 후 압축강도는 인가 전류의 세기와 낙뢰 손상의 크기에 밀접한 관계가 있다.
- 2) 모의 낙뢰에 의한 충격손상의 크기가 커질수록 AE events는 더 많이 발생하였고, AE events가 발생하는 시기도 더 빠른 것을 볼 수 있다. 이는 복합재료 동체 구조물에서 실제 낙뢰로 인한 손상의 정도를 가늠하는데 유용한 지표로 활용할 수 있다.
- 3) 코팅하지 않은 시편에서 AE events가 나타나기 시작할 때의 압축강도가 ITO 나노입자를 코팅한 시편보다 훨씬 낮게 나타났다. 이는 최고 압축강도와 AE events가 나타나

기 시작할 때의 압축강도와외의 연관성도 복합재의 손상 정도를 예측하는 다른 지표로서 활용될 수 있음을 의미한다.

- 4) ITO 나노입자를 코팅한 시편이 코팅하지 않은 시편보다 모의 낙뢰로 인한 손상 영역이 더 작게 나타났다. 이는 ITO 나노입자 코팅이 복합재 항공기 동체 구조물에서 낙뢰로 인한 손상을 줄일 수 있는 효과적인 방법임을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] J. R. Kollgaard and S. G. LaRiviere, "NDE challenges with future commercial aircraft - A Boeing perspective," *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 27, pp. 23-28 (2008)
- [2] F. Aymerich and P. Priolo, "Characterization of fracture modes in stitched and unstitched cross-ply laminates subjected to low-velocity impact and compression after impact loading," *International J. of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 591-608 (2008)
- [3] I. Ohsawa, I. Kimpara, K. Kageyama, Toshio Suzuki and Akihiki Yamashita, "AE characterization of compressive residual strength of impact-damaged CFRP laminates," *Progress in Acoustic Emission VII*, JSNDI, pp. 511-516 (1994)
- [4] S. W. Seo, M. S. Ha, O. Y. Kwon and H. S. Choi, "Improvement of electrical conductivity of carbon-fiber reinforced plastics by nano-particles coating," *Proc. Spring Conf. of the Korean Soc. for Composite Materials*, pp. 222-227 (2010)
- [5] O. Y. Kwon and D. H. Hong, "Acoustic emission monitoring of impact-damaged CFRP laminates during flexural tests," *Progress in Acoustic Emission VIII*, JSNDI, pp. 163-168 (1996)
- [6] ASTM D7137-07, "Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates," ASTM International, PA, USA (2007)