Polymer (Korea) Vol. 26, No. 2, pp 270 278 (2002)

낙하 충격 시험에 의한 저밀도 2-D 탄소/탄소 복합재의 충격파괴거동

주혁종†, 손종석*
충남대학교 고분자공학과, *LG화학 산업재연구소
(2001년 12월 21일 접수, 2002년 2월 19일 채택)

The Impact Fracture Behaviors of Low Density 2-D Carbon/Carbon Composites by Drop Weight Impact Test

Hyeok-Jong Joo† and Jong-Seok Son*
Department of Polymer Science and Engineering, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea
**Industrial Material Research Institute, LG Chemical Ltd, Cheongju 361-721, Korea*
†*e-mail : joohj@cnu.ac.kr*
(Received December 21, 2001;accepted February 19, 2002)

요 약 : 저밀도 2-D 탄소/탄소 복합재료의 저속 충격에 의한 파괴 거동과 첨가제에 따른 충격 에너지 흡수 경향을 연구하였다. 저속 충격시험은 mini tower 낙추 충격 시험기를 이용하였으며, 흑연, 카본블랙, 분쇄탄소섬유를 첨가제로 선택하였다. 흑연의 첨가는 최대하중값을 증가시켰으며, 전체적인 관통이 일어나기까지 응력을 오랫동안 유지시키는 효과를 나타내었다. 특히 9 vol%의 함량에서 흑연이 첨가되지 않은 시편보다 약 42%의 충격 흡수 개선을 보였다. 약 0.4 J의 낮은 충격에너지에 의한 충격 회수에 따른 실험에서 첨가제가 첨가되지 않은 시편의 경우, 충격에너지는 층간분리에 의해 소모되고, 흑연의 함량이 증가함에 따라 파괴 경향은 시편의 관통으로 변화함을 관찰할 수 있었다.

ABSTRACT : In this study, the fracture behavior by low velocity impact damage and the tendencies of impact energy absorption were investigated. Low velocity impact tests were performed using a mini tower drop weight impact tester, and graphite powder, carbon black and milled carbon fiber were chosen as additives. Addition of graphite powder increased the maximum load and maintained the stress long until the total penetration happened. At the content of 9 vol%, they showed the maximum of 42% improvement in impact strength compared composites containing no additives. At the test with low impact energy of 0.4 J, impact energy was consumed by delamination in the composite containing no additives, however, as graphite contents increased, the tendency of failure changed to the penetration of the specimen.

Keywords : *carbon/carbon composites, low velocity Impact test, impact energy, delamination, penetration.*

서 론

재료의 인성을 측정하는 보편적인 방법의 한 가지는 시편을 파괴시키는데 필요로 하는 에너지를 측정하는 것이다. 보통 등방성 재료의 충격 특성을 알기 위하여 Izod와 Charpy 테스트 방법이 사용되고 있으며, 이 실험 방법들은 재료의 노치(notch) 효과와 취성-연성 전이 온도(brittle-ductile transition temperature)와 같은 정보를 제공한다. 즉 Charpy와 Izod 실험방법은 서로 다른 종류의 재료를 상대적으로 비교하는데 매우 유용한 정보를 주므로, 금속이나 고분자 같은 등방성의 균질한 재료를 시험하는데 유용하다. 그

러나, 복합재료의 복잡한 파괴과정 때문에, 이 실험 방법들은 복합재료인 경우에 제한된 정보만을 제공한다. 복합재료는 파괴모드에 따라서 에너지를 흡수하는 방법이 다르며, 파괴모드는 섬유의 방향성, 시험편의 형상, 충돌속도 등에 의하여 영향을 받는다. 좀 더 현상을 잘 파악하기 위하여 이 두 실험 방법에 하중의 변화를 측정할 수 있는 장치를 부착시켜서 실험을 수행하기도 한다. 그러나 이와 같은 기존의 방법은 충돌속도와 충돌에너지를 바꾸기 어렵기 때문에 새로운 형태의 충격시험장치가 개발되었다. 복합재료의 충격시험에 가장 많이 사용되는 방법은 하중의 크기와 속도 및 충격자(impactor)의 형상을 임의로 바꿀 수 있는 낙하충격테스트(falling weight test, drop weight test) 방법이다. 이 시험법은 결과판정을 간단한 통계적 처리방식으로 이용하고 있는데 역학적 측면에서 반드시 명확하지는 않다. 이는 고분자재료의 경우 내충격성이 재료의 구조 및 주위조건, 충격의 형태와 진동수에 영향을 받기 때문이다. 종래의 충격 측정기기가 단순히 재료를 파괴시키기 위해 요구되는 충격에너지를 평가하는 것과는 달리 낙추 충격시험기는 낙추 충격과정에서의 충격저항과 시간관계를 조사하여 파괴거동이 상이한 재료특성을 조사할 수 있다. 또한 낙추 충격시험은 진동과 마모에 대한 오차가 적고, 시험편의 제작이 용이하며, toss factor를 함유하지 않기 때문에 이와 같은 측정기기에 대한 연구가 수십년에 걸쳐 이루어져 왔고, 현재에는 상업적으로 여러분야에 걸쳐 사용되고 있다.[1-4]

A. Kinsey는 저온 경화 에폭시 수지, 고무와 열가소성 플라스틱으로 개질된 에폭시 수지의 저속 충격시험과 더불어 비파괴 검사를 통한 실험에서 기질의 충격저항은 층간 구조와 기질의 성질, 계면간의 성질에 영향을 주며 크랙과 층간분리의 중요성을 지배한다고 밝혔다.[2] 또한 D. C. Prevorsek 등은 고속 낙추 시험에 의한 시편의 관통시험에서 관통의 유형은 크게 3가지로 정의되는데, 첫째, 섬유의 변형과 변위 둘째, 전단력과 압축력에 의한 섬유의 파단, 마지막으로 인장력에 의한 섬유의 파단으로 구분하였다.[3] S. W. Yurgartise 등은 탄소/탄소 복합재를 비롯한 취성이 강한 재료에 대해서 디지털 이미지 공정을 적용하여 미세크랙의 길이측정, 크랙의 간격, 그리고 배열을 통계적인 방법으로 측정하는 기술을 소개하였으며,[4] 이외에 Kim 등은 층간 구조의 복합재에서 이웃한 층들이 작은 각을 이룰수록 충격 저항에 효과적이라고 설명하였다.[5]

낙추 충격파괴의 형태. 낙추 시험에 의한 고분자 재료의 파괴후 시편으로 3종류의 파괴형태로 분류할 수 있는데 각각의 특징은 다음과 같다.

P-mode(Puncture failure mode) : P-mode 파괴거동은 파괴된 부위의 직경이 추의 직경과 거의 동일할 정도로 완전히 관통된 모습을 하는 것으로 일반적인 고분자재료의 경우 폴리카보네이트, 폴리에틸렌 등이 이와 같은 파괴거동을 보인다. 일반적으로 P-mode의 파괴거동은 파괴시 변위도 매우 크기 때문에 충격흡수 에너지가 매우 크다.

C-mode(Crack failure mode) : 폴리프로필렌, 프로필렌-에틸렌 블록공중합체에서 볼 수 있는 파괴형태이다. 추가 충돌한 주변에 백화영역으로 관찰된 변형영역이 생기고 그 위에 주변을 따라 크랙이 전파되어 판상의 시편이 빠지게 된다. 이와 같은 파괴에서는 시편의 파괴시의 변위는 P-mode와 비교하면 작고, 따라서 충격흡수 에너지도 작다.

B-mode(Brittle fracture mode) : 시편의 중심으로부터 크랙이 방사상으로 전파되어 파괴되는 경우로 폴리스티렌은 항상 이와 같은 파괴거동을 보인다. 이와 같은 파괴형태에서는 극히 작은 값의 충격흡수 에너지를 갖는다.

ABS는 위에서 기술한 B-mode와 C-mode의 중간형의 파괴형태가 되지만 이때의 충격흡수 에너지는 단순한 B-mode의 파괴시보다 크게 된다.[6]

적층 복합재에 대한 저속 충격은 압입, 기질크랙, 섬유기질의 손상, 층간분리 그리고 실제적으로 더욱 높은 충격 에너지에 대한 섬유 파손을 동반한 손상을 발생시킨다. 또한 시각적으로 보이는 충격 손상이 표면에서 관측되지 않을때 조차 내부에 기질 크랙이 발생될 수 있다.[7] 저속 충격시험이란 0 10 m/s의 속도를 의미한다.[8] 항공기 구조 적층재와 같은 복합재료에서 이와 같은 저속 충격은 도구낙하와 같은 보수사고, 파편 충돌과 같은 비행시 충격에 의해 야기될 수가 있다.[7] 본 연구에서는 저속 충격 하중에 의한 특수 복합재인 탄소/탄소 복합재의 충격파괴거동과 첨가제에 의한 기질의 개질로 인성 강화를 통한 충격에너지 흡수 개선에 관하여 연구하였다.

실 험

탄소/탄소 복합재의 제조. 탄소/탄소 복합재의 기질 전구체는 고형분이 약 60% 함유된 코오롱유화(주)의 레졸형 페놀수지를 사용하였으며 보강재는 태광산업(주)의 탄소섬유로 12,000가닥의 탄소섬유 평직을 사용하였다. 초벌제(green body)의 제조에 있어 우선 페놀수지를 탄소섬유 평직에 함침시킨 프리프레그를 제조하고 섬유분율이 50 vol%를 유지하기 위해 5장의 프리프레그를 적층한 후 두께를 2 mm로 조정하였다. 프리프레그 제조시 입자크기가 약 5 μm인 흑연분말을 페놀수지 고형분에 대하여 0, 3, 6, 9, 12 vol%를 첨가하였으며 카본블랙과 분쇄탄소섬유는 0, 1, 3, 6, 9 vol% 첨가하였다. 카본블랙과 분쇄탄소섬유의 입자크기는 각각 24 nm와 120 μm이였다.

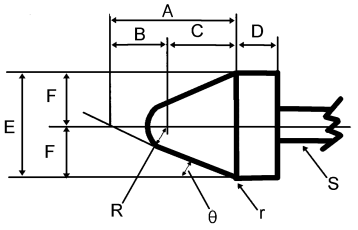
초벌제의 성형은 핫프레스 몰딩 방법을 택하였다. 100 ℃에서 알코올과 같은, 고형분 페놀수지 이외의 물질을 휘발시키고 160 ℃에서 2시간 경화시킨 후 180 ℃에서의 후경화 과정을 거쳤다.

이렇게 제조된 초벌제는 질소분위기로 상온에서 1200 ℃까지 20 ℃/hr의 승온속도로 탄화시켰으며 최고온도에서 1시간 유지하였다.

낙추충격시험. CFRC (carbon fiber reinforced composite)의 충격시험은 얇은 판상의 성형품에 대하여 이용하는 방법으로 추를 위에서 낙하 시켜 파괴될 때의 에너지를 구하였다. 흑연 및 카본블랙, 분쇄탄소섬유 함량에 따른 충격흡수 에너지를 구하기 위해 ASTM D5628에 의거한 낙추충격방법을 도입하였다.

ASTM D5628에 게재된 시편 치수들 중에서 강인하고 두꺼운 재료의 파괴에 적용되는 FB mode를 선택하였다. 충격시험기는 미국 Instron사의 Dynatup 8250인 mini tower 낙추 충격시험기를 사용하였으며 Figure 1에 사용된 tup의 모양 및 치수를 나타내었다. 시편을 지지하는 지지링의 내경은 38.1 mm이며, 시편의 크기는 51×51 mm의 정사각형이고 두께는 2±0.1 mm로 일정하게 제조하였다. 하중은 3.174 kg을 가하였으며, 낙하높이는 34 cm이고 낙하속도는 자유 낙하의 속도로써 약 2.6 m/sec이였다. 따라서 가해준 충격 에너지는 약 10.7 J이었다.

또한 흑연분말이 9 vol% 첨가된 시편과 첨가제가 첨가되지 않은 시편에 대해서 충격회수에 따라 충격



position	A	B	C	D	E	F	R (nose radius)	r (radius)	S [a] (diameter)	θ
dimension (mm)	27.2	15	12.2	6.4	25.4	12.7	6.35±0.05	0.8	6.4	25±1°

[a]: Larger diameter shafts may be used.

Figure1. Tup geometry for type FB in ASTM D5628.

에너지 흡수거동을 알아보았다. Tup과 시편사이의 거리를 4 cm로 유지하고 추의 무게를 작게 하여 전체적으로 가해준 충격에너지를 약 0.4 J로 유지한 후 한 시편에 대해 1, 2, 3회 충격을 가하였다.

Tomography 관찰. 충격회수에 따른 흑연분말이 탄소/탄소 복합재의 내부에 미치는 영향을 알아보기 위해 1, 2, 3회 충격을 가한 시편을 tomography 사진으로 관찰하였다. 사용된 tomography는 Indintor사의 VT400기종이었다.

결과 및 고찰

고정된 충격 에너지에 따른 첨가제별 파괴 거동. 충격시험은 표준시편을 충격하중으로 파괴할 때 필요로 하는 에너지를 구하는 것이다. 충격시험으로 측정하려는 본질적 성질은 시편이 견딜 수 있는 최고의 응력을 구하는 것이 아니고 파괴되는데 필요한 에너지를 구하는 것으로 이것은 하중-변위 곡선의 면적과 기울기에 대하여 상호 관계가 있다.

Figure 2(a)는 순수한 CFRC와 흑연이 첨가된 CFRC의 낙하충격시험 결과인 하중-시간 곡선이며 Figure 2(b)는 흑연 첨가에 대한 충격 특성 결과로 하중-변위곡선을 나타내고 있다. 하중-시간 곡선의 개략적인 그래프를 Figure 3에 나타내었다. 흑연이 첨가된 시편의 곡선(A', B', C', D)에서 흑연 함량에 따라 크기의 차이는 있으나, 그래프의 경향성은 서로 유사하였으며, 첨가제가 첨가되지 않은 시편의 그래프(A, B, C, D)와 다소 차이를 나타내었다. 하중-시

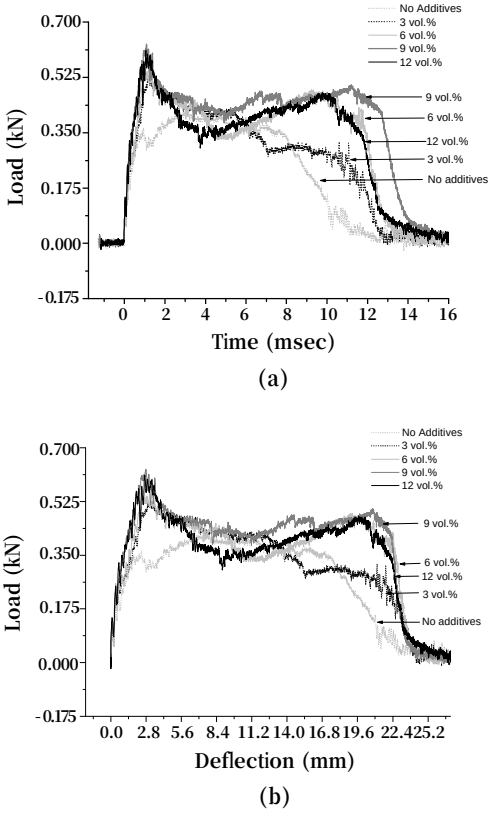


Figure 2. Impact fracture behavior of CFRCs as function of graphite contents. (a) load-time curve and (b) load-deflection curve.

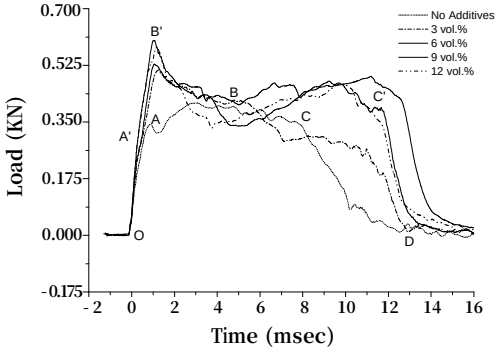


Figure 3. Schematic diagram of load-time curve for CFRCs with graphite contents.

간 곡선 및 하중-변위 곡선은 서로 비슷한 모양을 보이면서 5 부분의 전이 영역을 발견할 수 있는데,

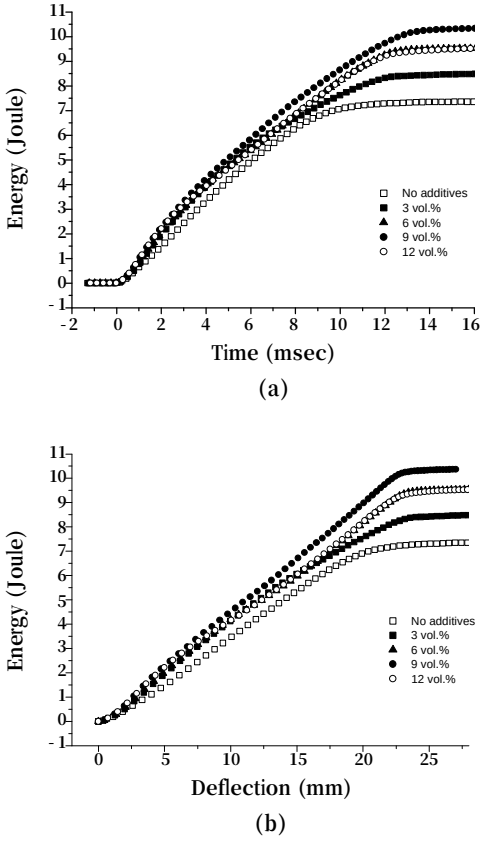


Figure 4. Impact absorption energy of CFRCs with graphite contents. (a) energy-time curve and (b) energy-deflection curve.

각 부분은 제각기 다른 파괴 메카니즘을 갖는다. 첫 번째 영역인 O→A(A')에서 층은 매트릭스 크레이징과 계면 박리를 보이지만 강성은 충격에 영향을 받지 않는다. 두 번째 영역인 A(A')→B(B')에서는 크랙과 분열 및 층간분리가 시작되어 포착되며, 세 번째 영역(B(B')→C(C'))에서 큰 규모의 매트릭스 크랙이 성장한다. 네 번째 영역인 C(C')→D 구간에서는 섬유의 파괴와 pull-out이 발생하며 마지막 단계(D)에서 시편은 최종적으로 관통되거나 파괴가 완료된다.[9-11] 흑연 첨가 시편에서는 최대 하중(B')이 초기에 나타나면서 취성을 갖는 복합재료와 비슷한 경향성을 나타내고 있으나 크랙의 성장(B'→C') 단계를 지연시켜 유지시키는 모양을 확인할 수 있다. 즉 흑연의 첨가는 충격시 최대 하중을 높이면서, 완전한 관통이 일

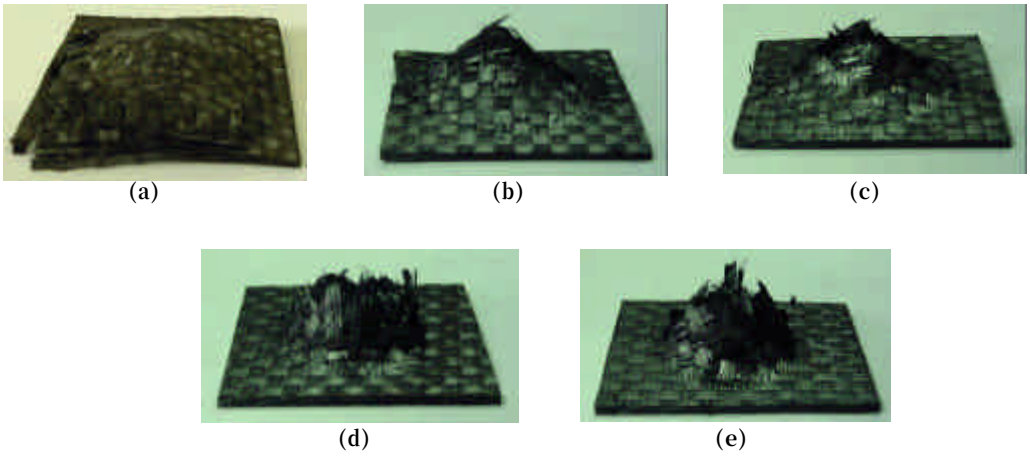


Figure 5. Specimens after impact test with contents of graphite. (a) 0 vol%, (b) 3 vol%, (c) 6 vol%, (d) 9 vol%, and (e) 12 vol%.

어나기까지 충격하중을 분산 또는 완화하여 오랫동안 이들을 유지할 수 있다. Figure 4는 충격 시 시편이 흡수할 수 있는 에너지를 나타낸 그래프로 우선 모든 시편의 에너지 곡선이 시간에 따라 계속 증가하다가 최고점에서 일정하게 유지하는 경향을 보이는데 충격에 사용된 에너지가 시편의 파괴에 모두 이용되었으며 탄성에 의한 tup으로의 에너지 이동이 전혀 없음을 알 수 있다. 흑연의 함량이 증가함에 따라 충격흡수 에너지는 증가하면서 9 vol%의 흑연 첨가 시편에서 최고의 충격흡수를 보여 첨가제가 첨가되지 않은 시편에 비해 약 42%의 에너지 흡수 효율을 나타내었다. 흑연이 과량 첨가된 12 vol%의 경우에는 에너지 흡수가 감소하면서 6 vol%의 흑연함량 시편과 거의 같은 값을 나타내었다.

Figure 5에서 볼 수 있듯이 첨가제가 첨가되지 않은 시편은 충격 시 파괴 에너지가 복합재의 층간분리에 사용하게 되어 시편은 일그러진 형태로 층간분리만을 발생시키고 시편은 관통되지 않았다. 그러나 흑연의 함량이 증가함에 따라 이러한 층간분리의 현상을 억제하면서, 섬유의 파단에 의해 시편이 관통되는 현상을 보이는데, 특히 9 vol%의 흑연 함량에서 P-mode에 가장 유사한 모습을 보이면서 파괴된 시편의 섬유는 거의 90°로 pull out된 모습을 볼 수 있다. 즉 관통에 의한 변위의 증가로 충격흡수 에너지는 가장 큰 값을 나타내었다. 일반적으로 전단강도가 어느 임계값보다 작으면 파괴는 주로 층간분리에 의하여 발생하고, 전단강도가 임계값보다 크면 파괴는 주로 섬유의 파단에 의하여 발생한다. 탄화 전 상태의 초벌제인 일반 고분자 복합재료의 경우에는 층간 계면강도가 낮으면 충격에너지 흡수가 증가한다. 즉 계면강도가 작을 때는 개시에너지는 작으나, 층간분리 시에 많은 에너지를 흡수할 수 있다.[12] 그러나 CFRC의 층간 전단강도 실험에서 효과가 가장 컸던 9 vol% 흑연함량 시편에서[13] 10.36 J로 가장 큰 충격에너지 흡수를 보였는데, 이는 탄소/탄소 복합재의 고유 특성인 기공의 존재에 의한 pseudo-plastic의 거동이며 충격흡수와 복합재의 인성을 증가시킬 수 있는 흑연입자 자체에 의한 충격흡수로 흑연의 함량이 증가함에 따라 층간강도가 커짐에도 불구하고 충격파괴 에너지는 감소하지 않는다고 해석할 수 있다. 반면 순수한 시편에서는 충격시 시편을 파괴하는 에너지가 복합재료의 층간분리 및 복합재의 뒤틀림을 일으키는 데 사용되면서 재료의 변형을 가장 크게 일으켰으나 마치 B-mode의 충격파괴거동을 가지면서 추의 변위는 작았다. 즉 약 11 J의 충격에너지를 동일하게 가하였을 때 순수한 CFRC는 뒤틀림과 층간분리에 에너지를 가함으로써 흡수된 에너지는 작았으며, 흑연이 첨가된 시편의 경우에는 충격 시 시편을 관통시키면서 변위를 크게 할 수 있었기 때문에 충격흡수 에너지는 증가하였다.

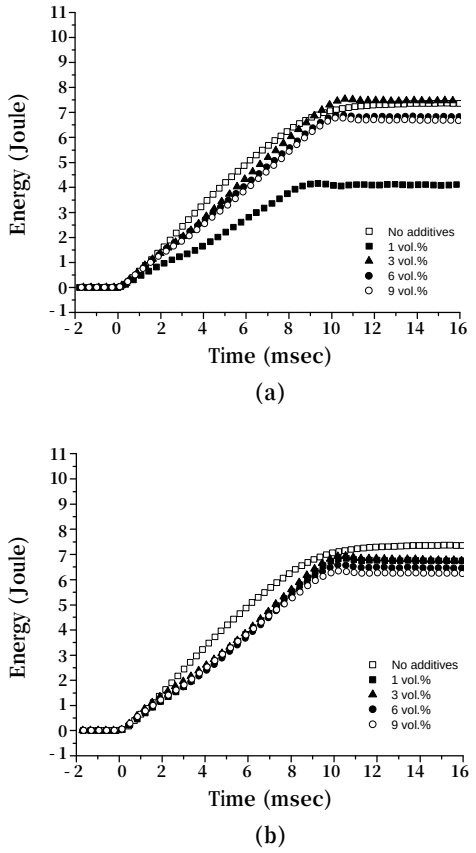


Figure 6. Impact absorption energy of CFRCs with the addition of carbon black (a) and milled carbon fiber (b).

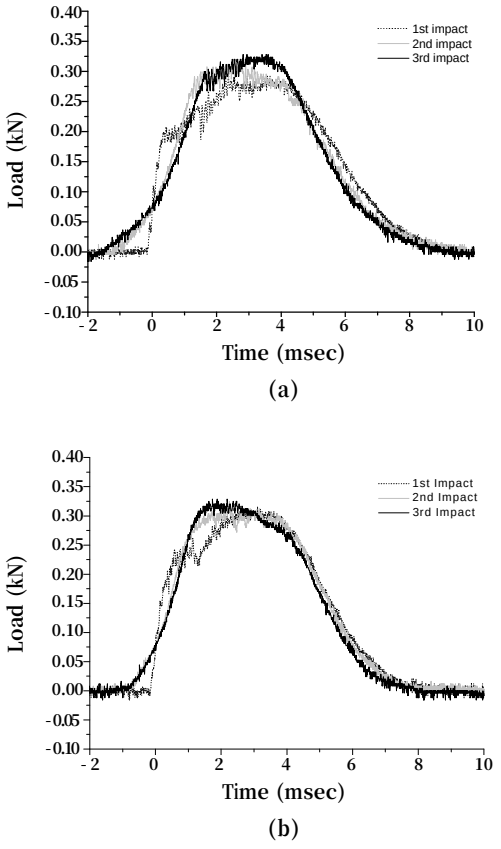


Figure 7. Load-time curves for the number of impact. (a) no additives and (b) graphite powder added(9 vol%).

Figure 6은 흑연분말 외에 카본블랙과 분쇄탄소섬유의 첨가에 따른 충격에너지 변동을 나타내었다. 카본블랙이 첨가된 경우 3 vol% 함량에서 첨가제가 첨가되지 않은 시편과 거의 같은 수치의 에너지 흡수를 보였으나 전체적으로 충격에너지 흡수에 큰 효과를 나타내지 못했으며, 분쇄탄소섬유의 첨가 또한 첨가량이 증가함에 따라 충격에너지 흡수를 저하시키는 효과를 나타내었다. 이는 카본블랙과 분쇄탄소섬유가 첨가됨에 따라 매트릭스의 개질에 효과가 없었으며, 초벌제의 탄화시 열수축에 의한 큰 크랙의 성장 억제에 흑연분말과는 달리 큰 효과를 나타내지 못했고 오히려 고른 함침 조건에 불순물로 작용했다고 판단된다. 이러한 현상은 지난 호에 기재한 논문에서[13] 언급한 바와 같이 첨가제의 종류와 양에 따라 bulk 밀도와 기공도에 큰 영향을 끼친 결과와 연관지을 수 있다.

충격회수에 따른 첨가제별 파괴거동. Figure 7은 첨가제가 첨가되지 않은 순수한 CFRC 시편과 충격에너지 흡수에 가장 효과적인, 흑연분말이 9 vol% 첨가된 시편의 충격회수에 따른 충격에너지 거동을 나타낸 그래프이다. 우선 두 그래프는 서로 비슷한 경향을 보였는데, 1회 충격시 판재 내부의 균열 손상이 발생하므로써 강성이 감소하기 시작하는 손상개시점이 발견되었지만, 2, 3회 충격시 이러한 손상개시점이 발견되지 않았다. 이는 주로 최초의 충격에 대해서 재료 고유 강성이 파괴에 저항하며 이 강성이 파괴되면 다음 충격부터는 시편 내부의 크랙과 기공에 의해 에너지를 흡수하면서 전체적인 파괴에 이른다. 첨가제가 첨가되지 않은 시편은 재료의 취성에 의해 초기

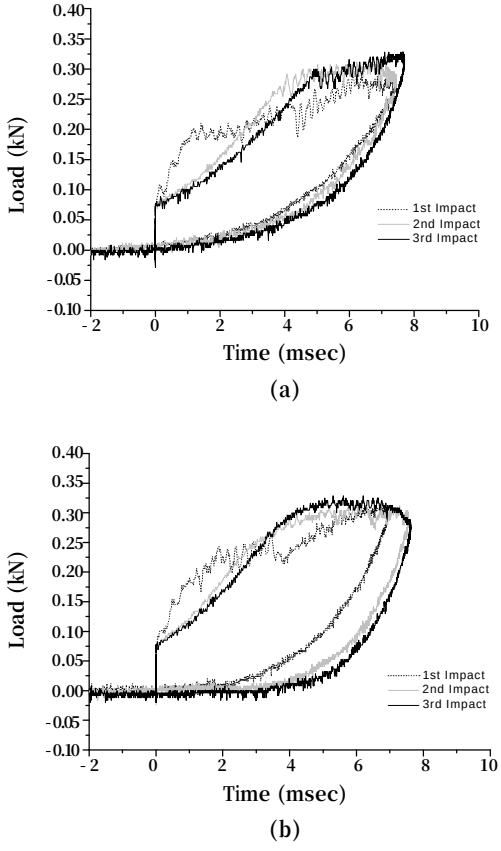


Figure 8. Load - deflection curves for the number of impact. (a) no additives and (b) graphite powder added (9 vol%).

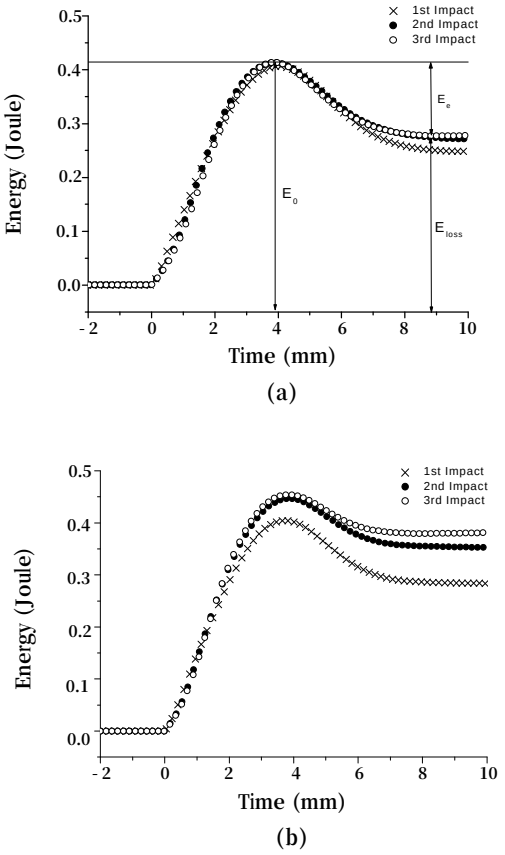


Figure 9. Energy - time curves for the number of impact. (a) no additives and (b) graphite powder added (9 vol%).

손상개시 하중값이 약 0.20 kN으로 작은 반면 흑연이 첨가된 시편은 약 0.25 kN으로 큰 값을 나타내었고, 또한 흑연이 첨가된 시편은 강성이 감소되는 시간이 상대적으로 길어짐을 알 수 있다. Figure 8은 위 결과의 하중 - 변위 곡선으로 1, 2, 3회의 충격 회수에 따라 재료의 단계적인 파괴에 따른 변위의 증가를 확인할 수 있다. 흑연분말이 9 vol% 첨가시 첨가제가 첨가되지 않은 시편에 비해 전체적으로 하중의 값이 크고, 크랙이 성장하는 구간이 길어짐을 확인할 수 있는데, 이는 하중 - 변위곡선의 단면적으로 정의되는[11] 충격에너지의 증가를 예측할 수 있다. 또한 9 vol%의 흑연함량에 대해서 초기 1회 파손에 비해 2, 3회 파손시 변위의 증가가 크게 증가됨을 확인할 수 있는데, 이는 9 vol% 흑연첨가 시편에서 시편 내부에 층간분리보다는 시편 내부로의 변위 이동으로 야기된 관통에 의한 효과가 크다는 것을 의미한다. 반면 첨가제가 첨가되지 않은 시편에서는 1, 2, 3회 충격시의 변위의 큰 증가를 볼 수 없는데, 이는 파괴시 재료는 관통보다는 층간분리에 의해 에너지를 흡수함을 뜻한다. Figure 9는 충격회수 시험에 따른 에너지 곡선을 보여준다. 앞에서의 고충격에너지의 실험 결과와는 달리 완전한 파괴가 이루어지지 않고, 저에너지의 충격을 재료가 흡수하기 때문에 다음과 같은 상이한 결과를 나타내었다. 우선 에너지 곡선은 초기의 충격체의 운동에너지인 E_0와 충격과정 중의 충격체의 운동에너지인 E_e, 그리고 시험편의 변형이나 진동에 의해 흡수되는 에너지와 시험편의 소성변형 및 손상발생, 기타 열 및 음향방출 등으로 손실되는 에너지와의 합

인 E_{loss}로 구분된다. 특히 최대에너지 E_0와 손실된 에너지 E_{loss}와의 차인 E_e는 시편의 변형이나 진동에 의해 시편이 흡수했던 에너지 중에서 충격 후 충격체로 되돌려진 탄성에너지를 의미한다.[14] 두 시편에서 공통적으로 충격회수가 증가함에 따라 에너지가 증가함을 확인할 수 있으며, 이는 내부의 크랙 및 층간분리의 증가로 변위의 상승에 따른 충격흡수 증가를 의미한다. 그러나 앞에서의 높은 에너지의 고정된 에너지 실험과 마찬가지로 흑연의 첨가는 상대적으로 충격흡수에 큰 효과를 나타냄을 확인할 수 있는데, 특히 첨가제가 첨가되지 않은 시편은 1회 충격 후 2, 3회 충격시 내부 크랙의 증가에도 불구하고, 큰 에너지 흡수효과를 보여주지 못하지만, 흑연이 9 vol% 첨가시 2, 3회 충격에 대해서 에너지 흡수의 차이는 상대적으로 크다. 이는 흑연 분말의 첨가에 의한 재료의 인성 증가로 충격흡수에 효과를 나타냈음을 확인한 결과이다. 이러한 결과로 탄성에너지인 E_e의 값이 흑연 첨가의 경우 작은데, 충격시 시편 내부로의 변위 이동 경향을 보임으로써 탄성의 감소를 나타낸다고 할 수 있다.

Tomography 관찰 결과. 일반적으로 기질의 크랙은 층간분리에 의해 지배되고, 층간분리는 항상 광범위한 기질 크랙과 연관된다. 기질의 크랙은 충격지점에서 가까운, 충격을 받은 바로 아래층에서 발견되며 층간분리 개시 이전에 낮은 에너지 크기에서 발견되기 시작한다. 각 접촉면 아래에서 층간분리는 접촉위층에 있는 기질 균열로부터 개시되며 접촉면 아래 단층의 섬유로 전파하게 된다.[7] Figure 10과 11은 순수한 CFRC와 흑연이 9 vol% 첨가된 시편을 1, 2, 3회 충격후 각 시편의 파괴 경향을 tomography 사진을 통해 확인한 결과이다.

흑연이 첨가되지 않은 시편은 반복된 충격에 의한 크랙의 방향이 시편의 길이방향으로 전달하면서, 3회 충격 후 크랙이 층간분리를 유도함을 확인할 수 있으며, 흑연이 첨가된 시편은 초기 국부적인 파괴 형상을 보이고, 층간분리를 일으키는 길이방향의 크랙이 전혀 발견되지 않는다. 따라서, 최종적으로 시편은 관통의 경향을 보이면서, 변위를 증가시키는 효과를 나타낸다. 이는 흑연의 첨가가 매트릭스를 개질하고 인성을 부여하여 충격발생시 시편 전체로의 크랙 전달을 막고, 국부적인 파괴를 유도하면서 변위를 증가시켜 충격에너지를 크게 흡수하는 효과라고 해석할 수 있다.

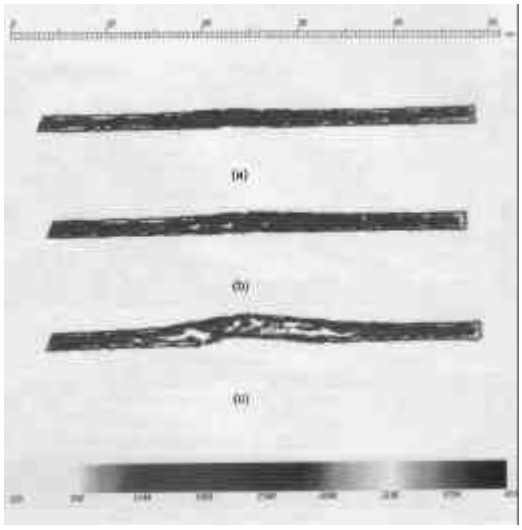


Figure 10. Tomograph of fracture surface for pure CFRCs after each impact test. (a) 1st impact, (b) 2nd impact, and (c) 3rd impact.

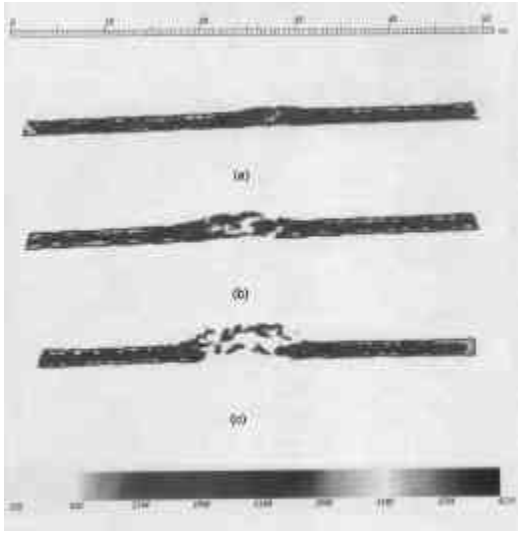


Figure 11. Tomograph of fracture surface for graphite(9 vol%) added CFRCs after each impact test. (a) 1st impact, (b) 2nd impact, and (c) 3rd impact.

결 론

충격하중을 받은 탄소/탄소 복합재의 충격파괴거동

과 내부손상의 관계를 파악하기 위해 흑연, 카본블랙, 분쇄탄소섬유와 같은 첨가제의 영향과, 저충격에너지의 회수별 충격에 의한 파괴 모드를 확인한 결론은 다음과 같다.

1. 탄소/탄소 복합재의 저속충격시험을 통해 매트릭스 크레이징과 계면 박리를 보이는 영역, 크랙과 분열 및 층간분리가 시작되어 포착되는 영역, 큰 규모의 매트릭스 크랙이 성장하는 영역, 섬유의 파괴와 pull-out이 발생하는 영역, 시편이 최종적으로 관통되거나 파괴는 영역의 5가지 파괴영역을 발견할 수 있었다.

2. 흑연 함량에 따른 시편의 충격파괴거동을 알아본 결과, 흑연이 첨가된 시편은 충격 시 최대 하중에 도달하는 시간이 가장 빨랐으나, 순수한 CFRC에 비해 매우 큰 값을 나타내었으며 최대하중 후에도 큰 잔류응력 및 크랙성장을 오래 유지하였다.

3. 흑연의 함량이 9 vol%일 때 P-mode의 파괴형상을 나타내면서 가장 큰 충격에너지 흡수를 보였으나 과량의 흑연함량에서는 매트릭스의 부족에 의한 충격흡수 에너지의 감소를 가져왔다.

4. 카본블랙과 분쇄탄소섬유는 첨가시 국부적인 밀집현상에 의한 층간 접착력 약화와, 매트릭스 개질에 효과를 나타내지 못하여 첨가제가 첨가되지 않은 시편과 마찬가지로 취성을 나타내었고, B-mode의 파괴형상을 보였다.

5. 회수에 따른 첨가제별 충격거동을 살펴본 결과, 9 vol%의 흑연첨가 시편에서 초기 1회 파손에 비해 2, 3회 파손시 변위의 증가가 크게 증가됨을 확인할 수 있는데, 이는 흑연첨가 시편에서 시편 내부에 층간분리보다는 시편 내부로의 변위 이동으로 야기된 관통에 의해 에너지를 흡수하는 경향이 크다는 것을 의미하고, 반면에 첨가제가 첨가되지 않은 시편의 충격에너지는 관통보다는 층간분리에 의해 흡수됨을 확인할 수 있었다.

적층된 복합재료 판에서 두께 방향의 강성과 강도는 매우 취약하다. 그 이유는 두께 방향으로 보강제가 존재하지 않기 때문으로 저속 충격에 의한 손상은 감지되지 않고 남아 있을 수 있으므로 충격을 받은 구조물은 잠정적으로 위험한 상태로 간주할 수 있다. 특수 산업 소재인 탄소/탄소 복합재의 충격 에너지 흡수에 관한 이번 연구에서 적절한 첨가제의 선택과 함량조절로 전체적인 충격 파괴 형태를 파악하였고 개선에 관한 방안을 예측할 수 있었다.

감사의 글 : 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (1999-2-30100-012-3) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. S. K. Lim, *Lucky Polymer Tech.*, 2, 71(1987).
2. D. E. J. Saimders. C. Soutis, and A. Kinsey, *Composites*, 26, 661(1995).
3. D. C. Prevorsek, H. B. Chin, and A. Bhatnagar, *Composite Structures*, 23, 137(1993).
4. S. W. Yurgartis, B. S. Macgibbon, and P. Mulvaney, *J. Material. Sci.*, 27, 6679(1992).
5. E. J. Jun, *J. Composite Materials*, 26, 2247(1992).
6. D. H. Hong, *Lucky Polymer Tech.*, 5, 40(1988).
7. S. Y. Lee, *3rd Conference on National Defese Materials*, C-102(2000).
8. E. J. Mcquillen and L. W. Gause, *J. Composite Materials*, 10, 79(1976).
9. C. C. Ma, N. H. Tai, G. Y. Wu, S. H. Lin, J. M. Lin, C. L. Ong, Y. C. Chang, and M. F. Sheu, *ANTEC '96 Preceeding*, 917(1996).
10. H. Maikuma, J. W. Gillespie, and D. J. Wilkins, *J. Composite Materials*, 24, 124(1990).
11. G. Zhou, *Composite Structures*, 31, 185(1995).
12. B. J. Kim, M. J. Choo, and T. J. Kang, *J. Korea Composite Materials*, 4, 1(1991).
13. J. S. Son and H. J. Joo, *Polymer(Korea)*, 24, 845(2000).
14. I. H. Choi, Y. R. Choi, and C.S. Hong, *J. Korea Composite Materials*, 6, 69(1993).