

경전철용 복합적층재에 대한 저속충격특성의 실험적 연구

Experimental Investigation of Low Velocity Impact Characteristics of Composites Laminate Used in the Light Rail Transit

김재훈*, 김후식*, 박병준**, 조정미**, 주정수**
Kim J H, Kim H S, Park B J, Cho J M, Joo J S

ABSTRACT

It is well known that composite laminates are easily damaged by low velocity impact. Low velocity impact damage characteristics and residual compressive strength of composite laminates used in light rail transit are investigated. The damage of composite laminates subjected to impact loading are occurred matrix cracking, delamination, and fiber breakage. The damage of matrix cracking and delamination are reduced suddenly the compressive strength after impact. The objectives of this study is to evaluate impact characteristics and the relationship between impact force and inside damage of composite laminates by low velocity impact loading. UT C-scan is used to determine impact damage areas by impact loading.

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 기존의 금속재료에 비하여 비강도 및 비강성이 우수하여 적층각 및 적층순서에 따라 적절한 강도와 강성을 갖는 재료로 설계 제작할 수 있는 장점을 지니고 있어 중량이 중요한 요인이 되는 경량화 구조물인 항공우주산업 및 철도차량 등 수송체 구조물에 많이 이용되고 있다.

복합재료 적층 구조물에 충격 손상을 발생시키는 것은 구조물의 제조과정이나 사용 중 발생한다. 이러한 손상은 구조물의 제조과정이나 구조물을 보수하는 과정에서 작업자의 실수로 인한 도구의 낙하와 운전 중 우박이나 파편들의 충돌로 인해 발생될 수 있다. 이렇게 외부로부터 가해지는 복합 적층판의 충격은 내부손상에 민감하며, 적층 두께방향으로 섬유 강화의 결핍 때문에 층간 분리와 횡방향 균열인 기지 균열을 쉽게 발생 할 수 있다. 반면에 섬유들은 기지균열이 생길 때까지 심각하게 손상을 받지 않을 수 있다. 비록 섬유 파손이 없을 지라도 충격 손상은 적층판의 기계적 성능 특히 압축 강도에 크게 영향을 줄 수 있다. 충격을 받은 복합 적층판의 손상모드는 기지균열, 층간분리, 섬유파손등이 있으며, 이로 인해서 원래 구조물이 가지고 있는 강도와 강성을 심각하게 감소시켜 안정성에 영향을 미치며 계속적인 사용동안 구조물의 완전 붕괴를 발생시키는 손상 성장의 시작점이 될 수 있다. 그러므로 복합재료를 사용한 구조물의 설계 및 제작은 복잡한 형태의 충격특성, 잔류압축강도 및 파괴기구를 규명하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 기존 철도차량의 내장재로 쓰이는 Mat/U.P와 난연성 재료로 경량 지하철전두부에 사용되는 Glass650/phenol, 내장재로 사용되는 Glass823/phenol의 저속 충격 특성을 시험

* 충남대학교 대학원

** (주) 한국화이버

평가 비교하고, 저속충격 후 시편에 대한 UT C-scan 및 광학현미경으로 표면과 단면을 관찰하여 충격 손상을 고찰하였으며, 충격 후 잔류 압축강도를 평가하였다.

2. 재료 및 시험 방법

2.1 재료 및 시험편

경량화 지하철 전두부에 사용되는 프리프레그는 (주)한국화이버에서 제작되고 있는 두께 0.23mm 인 Glass fabric 823과 0.5mm Glass fabric 650 및 Mat 450 등의 3종류를 사용하였다. Table 1은 3 가지 재료에 대한 기본 사양들을 나타낸 것이다. 모든 시험편의 두께는 5mm로 하기 위해 적층수를 달리 하였으며 면밀도 및 경사와 위사로 들어가는 fiber의 수가 다르고 기지 두께의 변화가 있음을 알 수 있다. 이들 재료의 물성치는 Table 2에 있다. 이 세가지 재료는 탄성계수 E_{11}, E_{22} 가 같은 값을 갖는 것은 Mat/U.P은 모든 방향에 대하여 방향성이 없고, 두 가지 Glass/phenol은 [0/90]로 적조된 프리프레그의 형상을 갖고 있기 때문이다.

이 세가지 재료의 성형 사이클은 Mat/U.P은 상온에서 경화했고, 두 가지 Glass/phenol의 성형 주기는 오토클레이브에서 압력 5bar로 일정하게 유지시키고 80℃에서 30분 유지시킨 후에 온도를 서서히 올려 120℃에서 30분 유지시키고 최종에는 150℃에서 90분 동안 유지시킨 후 서서히 냉각시켜 제작하였다. 충격 시험편은 보잉사 BSS 7260 규격에 따라 152×101mm의 크기를 가지도록 절단된 충격 시험편을 제작하였다. 모든 시험편에 충격 전 UT C-scan으로 시험편의 경사와 위사를 살펴보고 그 후 저속 충격 특성 시험 후 시각적 관찰과 광학현미경, UT C-scan으로 단면과 표면을 관찰한 후 압축시험을 수행하였다

Table 1 Glass fabric specification

Item	Unit	Mat 450	Glass fabric 823	Glass fabric 650
Specific density	g/m ²	450	294	529
Density	Horizontal fiber	count/inch	-	56
	Vertical fiber	count/inch	-	53
Thickness	mm	-	0.23	0.5
Ply	mm	-	20	10

Table 2 Mechanical properties of composite laminates

Material property	Mat/U.P	Glass650/phenol	Glass823/phenol
E_{11}, E_{22} (GPa)	8.13	19.74	19.06
C_{11}, C_{22} (GPa)	9.13	18.54	21.62
G_{12} (GPa)	3.26	3.69	4.44
Poisson's ratio	0.298	0.138	0.139

2.2 저속충격실험

본 연구에서 사용한 시험기는 타워형 충격체 낙하식 시험기인 Instron dynatup 8250이고, 충격시험데이터 시스템은 Dynatup 830-I이다.

시험 방법은 Boeing standard BSS 7260에 준하여 충격자의 지름 15.7mm, 반구형 강체, 충격자의 중량은 2.85kg와 6.45kg인 두가지를 사용하여 125×75mm의 창을 가지고 있는 지그에 시험편을 놓고 네 모서리를 고정한 후 충격자의 높이를 변화시키면서 시험편의 중앙에 충격 하중을 가하였다. 중량이 2.85kg인 충격자를 이용하여 충격에너지가 작은 0.9J~5J까지 충격 하중을 가하였고, 무게 6.45kg인 것은 충격에너지가 6J~65J까지 충격 하중을 가하는데 사용하였다.

시험편 제작 후 제작과정에서 발생할 수 있는 결함을 찾기 위해서 충격 받지 않은 전체 시험편에 대하여 비파괴 검사인 UT C-scan을 이용하여 충격 손상 여부 및 크기를 검사하였다. 이 때 탐촉자는 직경이 0.75inch이고, 주파수 5MHz인 변환장치를 사용하였으며 스캔 속도는 400mm/s, 스캔 증분은 1mm이다. 또한 충격시험편의 내부손상 모드를 파악하기 위해서 충격 받은 시험편을 선택하여 수냉식 다이아몬드 톱을 사용하여 손상영역의 단면을 절단하였고 그 후 표면을 고품격 연마하였다. 표면에 남아있는 이 물질을 제거하기 위해서 메틸알콜을 사용하여 초음파 세척을 한 다음 광학 현미경을 이용하여 손상 단면을 70배로 확대하여 기지크랙, 층간분리, 섬유파단 등의 손상을 상세히 관찰하였다.

2.3 충격 후 압축 시험

충격 후 압축 시험(CAI)에서 압축 하중을 가할 때 적층재의 좌굴을 방지하기 위해서 많은 시험장치들이 설계되고 실용화되어 사용되고 있다. 그러나 아직까지 규격화되어 사용되는 방법은 없으며 많은 연구자들에 의해서 다양한 방법이 사용되고 있다. 대표적인 예로써 CASA, GRAG, UK, NASA, Boeing 및 Hell 규격이 있다.

본 연구에서 사용한 저속충격 후 압축시험은 시험편의 크기가 비교적 작은 보잉사의 BSS 7260 규격에 따라 수행하였다. 충격 후 압축 시험에 이용한 시험기는 MTS 810으로 25ton 로드셀을 이용하여 시험하였다. 시험 하중속도는 0.5mm/min 변위 제어방식을 선택하여 시험하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 충격특성평가

Fig. 1은 저속 충격시험을 통해 구한 전형적인 결과로써 충격시간에 대한 충격하중이력과 에너지 이력을 나타낸 것이다. 하중이력곡선에서 하중은 초기에 급격히 증가하나 3000N 근방에서 약간 하중이 하락하였다. 그 다음 경사가 약간 완만해 지면서 최대 하중에 도달하여 심한 진동이 발생한 다음 충격 하중은 떨어진다. 이때 하중이 초기에 급격히 감소되는 지점(P₁)은 판재 내부의 기지 균열 손상이 발생함으로써 강성이 감소하기 시작하는 곳이다. 에너지이력곡선은 초기의 충격체의 운동에너지(E₀)와 충격과정 중의 충격체의 운동에너지와의 차이를 나타낸 것이다. 충격주기가 끝난 마지막 단계에서의 에너지는 충격 과정 중에 비가역적으로 손실된 에너지와 충격 후의 시편의 잔류 진동으로 시편이 갖는 운동에너지와의 합을 의미하며, 이력곡선 중에 나타나는 최대 에너지와 손실된 에너지와의 차이는 시편의 변형이나 진동에 의해 시편이 흡수했던 에너지 중에서 충격 후 충격체로 되돌려진 탄성에너지(E_e)이다.

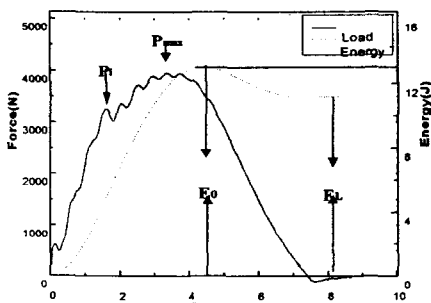


Fig. 1 Typical impact load history

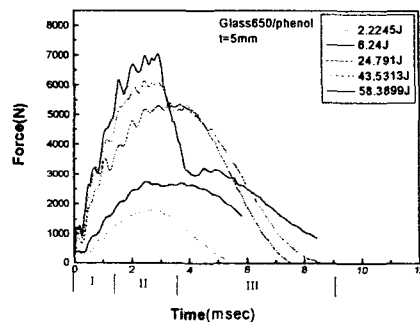


Fig. 2 Impact force vs. time traces

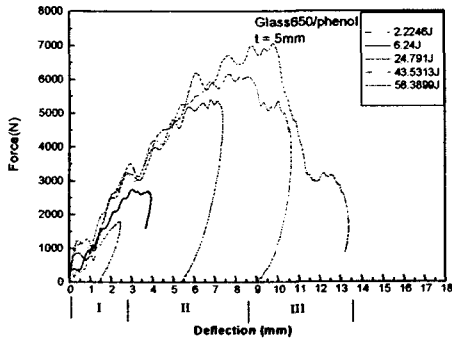


Fig. 3 Impcat force vs. deflection

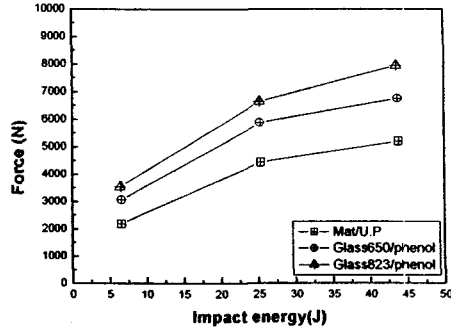


Fig. 4 Maximum force vs. impact energy

Fig. 2는 두께 5mm인 Glass650/phenol로 제작된 복합 적층판의 에너지 변화에 따른 하중이력곡선을 나타낸 것이다. Glass650/phenol은 6.24J의 충격에너지로부터 충격 손상 개시점이 발생하였다. 이 재료에서는 기지균열이 성장하기 힘든 직조된 섬유로 구성되어 있기 때문에 상대적으로 층간분리가 발생하는 구간이 짧으며 관통이 시작되어 하중의 증가 없이 많은 진동을 가지는 구간이 길게 나타난다.

Fig. 3는 두께 5mm인 Glass/phenol의 에너지 변화에 따른 처짐곡선을 나타낸 것이다. 손상이 생긴 시험편과 손상이 개시해서 관통직전까지와 관통한 다음의 처짐 곡선이 뚜렷이 구별된다. 적층판의 횡방향 압축 하중에 의한 중앙 처짐 변형은 처짐의 양에 따라 하중 경로를 결정할 수 있다. 하중-변위 경로는 크게 3단계로 구분할 수 있다. 초기 1단계는 충격체의 압입에 의한 거동으로 손상이 가지 않은 5J까지이다. 2단계는 초기 균열 발생에 의한 하중강화로 적층판의 처짐과 함께 층간 분리 및 섬유파손개시가 발생하는 부분으로 6J~44J까지이며, 3단계에서는 최대 하중에서 관통과 함께 하중 감소가 나타나며, 이에 해당하는 충격에너지는 50J이상에서 나타난다.

Fig. 4은 세가지 재료의 충격에너지에 대한 최대 하중을 나타낸 것이다. Glass fabric이 경사와 위사에 들어가는 fiber의 수가 가장 많아 면밀도가 가장 낮은 Glass823/phenol이 가장 우수한 저속 충격 특성을 나타냈다. Mat/U.P는 방향성이 없는 Chopped로 구성되어 있어 저속충격에 가장 취약한 특성을 나타냈다.

3.2 충격 손상 평가

Fig. 5는 세가지 재료의 충격 후 손상영역을 평가하기 위해서 UT C-scan을 사용하여 손상영역이 확인된 사진이다. 세가지 재료에 대해 모두 동일한 충격에너지를 비교하기 위하여 충격자의 높이를 동일하게 놓고 시험하였다. 세 가지 재료 중 손상 면적은 Chopped으로 구성되어 상온경화 시킨 Mat/U.P가 가장 손상면적이 작았다. 이것은 충격자가 시험편에 접촉하는 부분만 손상이 가고 더 이상의 손상이 진전되지 않는다는 것을 의미한다. Glass650/phenol과 Glass823/phenol은 손상면적이 비슷하게 나타났다. 그러나 두 재료에 기지파손과 층간분리가 일어나는 영역이 확연히 다르다는 육안 검사와 광학현미경 관찰로 알 수 있었다. Glass650/phenol은 경사와 위사에 들어가는 Fiber의 수가 적어 층간분리보다는 기지파손이 많이 일어나고, Glass823/phenol은 기지파손보다는 층간분리가 많이 발생한 것을 알 수 있었다.

Fig. 6은 충격 받은 시험편의 중앙을 절단한 후 광학현미경으로 파단면을 관찰한 사진이다. 모든 재료에 기지파손과 층간분리가 함께 일어나는 지점인 25J가량의 충격 에너지를 받은 시험편을 절단하여 관찰하였다. Glass650/phenol과 Glass823/phenol에서만 층간분리가 발생한 것을 볼 수 있다. Mat/U.P는 기지크랙이나 층간분리 그 어느 것도 관찰되지 않았다.

Fig. 7은 Glass650/phenol의 UT C-scan을 이용하여 구한 손상 면적에 대한 최대하중을 나타낸 것이다. I 구간은 충격 하중은 받았으나 손상면적이 나타나지 않는 영역이다. Glass/phenol은 최대하중이 2500N까지는 충격 손상을 받지 않는다. 이때의 충격 에너지는 5J정도였다. 그 이상의 충격 하중을 가하게 되면 II구간으로 성장하게 되며 육안으로는 확인 되지 않지만, UT C-scan 상에는 충격 손상이 나 있는 것을 알 수 있다. 약 12J이상이 되면 육안으로 섬유파손이 보이며 층간분리도 같이 발생한다. 50J이상 즉 III구간으로 가며 관통에 가까운 섬유파손을 볼 수 있었다

Fig. 8은 UT C-scan을 이용하여 구한 충격에너지에 대한 손상면적을 나타낸 것이다. 세가지 재료에서 Glass823/phenol과 Glass650/phenol이 저속충격특성이 비슷하게 나타났다. 이것은 면밀도가 낮은 Glass823/phenol은 섬유파손이 일어나면서 층간분리로 성장해 가는 범위가 상대적으로 크기 때문이다. Mat/U.P는 방향성이 없는 Chopped으로 구성되어서 층간분리가 전혀 발생하지 않아 충격자가 접촉한 부분만 손상이 발생한 것을 알 수 있었다.

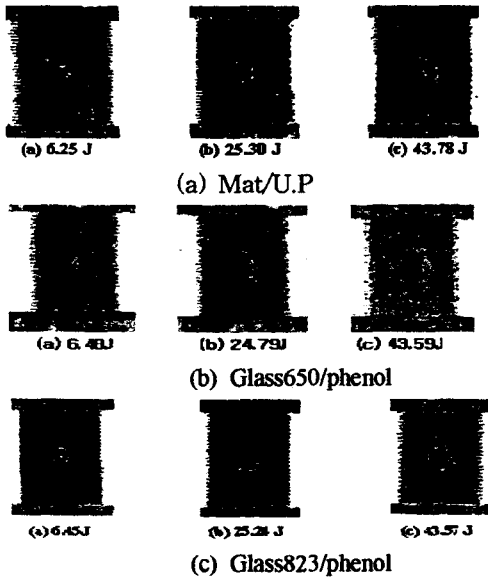


Fig. 5 UT C-scan image of specimens

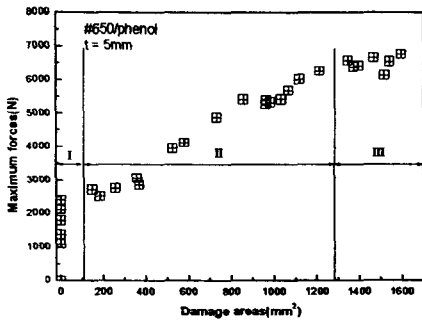


Fig. 7 Maximum forces vs. damage areas

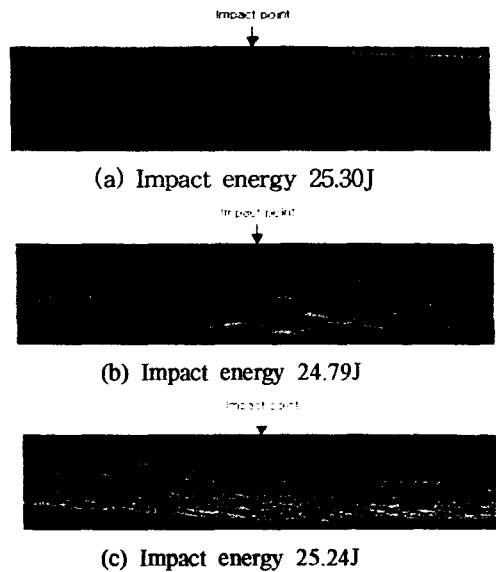


Fig. 6 Photomicrograph of cross-sectional area

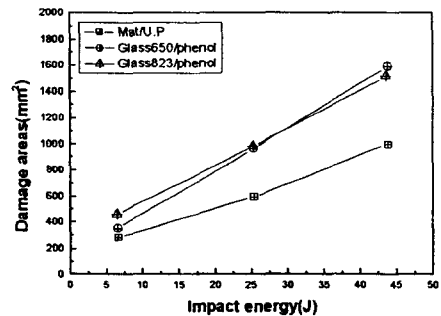


Fig. 8 Damage areas for the variation of impact energy

3.4 충격 후 압축 시험 결과

Fig. 9는 세가지 재료의 충격시험 후 충격 에너지에 대한 잔류압축강도를 나타낸 것이다. 충격 받지 않은 시험편에 대하여도 압축시험을 수행하여 초기 압축강도를 측정하였다.

여기에서 Glass650/phenol과 Glass823/phenol은 잔류 압축강도는 유사한 그래프를 보이고 있다. 두 재료에서 보듯이 직조된 섬유로 구성된 시험편은 초기에 급격히 압축강도가 작아지나, 기지파손

이 일어나고 층간분리가 시작되는 지점인 약 25J가량에서부터는 강도저하가 완만해 지는 것을 볼 수 있다. 그러나 Mat/U.P는 모든 충격 에너지에서 급격한 강도 저하가 없었다. 이는 Mat/U.P의 특징인 층으로 구성되어 있지 않고, 하나의 요소로 되어 있어 충격의 전파가 없어서이다.

모든 시험편에 대해 강도 조사를 해보면 Glass650/phenol은 관통까지 약 43%가량 압축강도가 감소하고, Glass823/phenol은 약46%, Mat/U.P는 31%가량 감소함을 알 수 있었다.

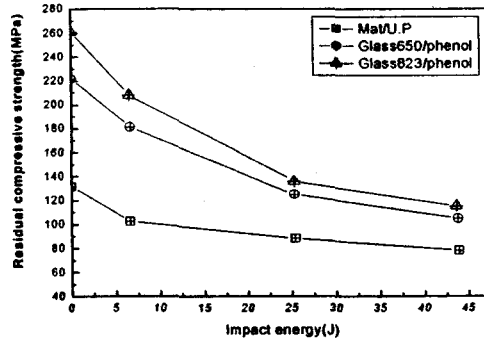


Fig. 9 Impact energy vs. residual compressive strength

4. 결론

경전철 전두부와 내장재에 들어가는 Glass/phenol과 기존 전철에 들어가는 Mat/U.P 복합 적층재의 충격거동, 내부 손상 결정을 평가하기 위하여 저속충격시험을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 세가지 재료에서 동일 에너지에서의 충격 특성을 비교한 결과 Glass823/phenol이 면밀도가 가장 낮은 특성으로 인하여 섬유가 경사와 위사로 들어가는 수가 많아 저속충격특성이 가장 좋은 것으로 평가된다.
- (2) UT C-scan과 광학현미경을 이용하여 시각적으로 보여지는 부분 외에 기저 안에서 일어나는 층간분리까지 손상면적을 구할 수 있고, 각 재료의 충격에너지에서의 손상정도를 예측할 수 있었다.
- (3) 잔류압축강도는 Glass650/phenol에서 보면 낮은 충격에너지를 받았을 때 압축강도는 급격히 감소한다는 것을 알 수 있었고, Glass823/phenol이 잔류압축강도가 가장 우수하게 나타났다.

후 기

본 연구 결과는 산업자원부와 (주)한국화이바의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Boeing, 1979, "BSS 7260, Compressive Properties After Impact of Carbon Laminates"
- (2) G. Caprino, 1983, "On the Prediction of Residual Strength for Notched Laminates", Journal of Materials Science, Vol. 18, pp. 2269-2273
- (3) G. Caprino, 1984, "Residual Strength Prediction of Impacted CFRP Laminates", Journal of Composite Materials, Vol. 18, pp. 508-518
- (4) 최익현, 최윤록, 홍창선, 1993, "Graphite/Epoxy 및 Graphite/PEEK 복합적층판의 저속 충격 후 잔류 압축강도에 대한 실험적 해석", 한국복합재료학회지, 제6권, pp. 69-79