

# 경량전철 복합 적층판의 환경변화에 대한 저속충격특성

## Low velocity impact characteristics on environmental variation of composite laminates used in the light rail transit

김후식\*, 김재훈\*\*, 이영신\*\*, 박병준\*\*\*, 조정미\*\*\*

Kim, Hu-Shik Kim, Jae-Hoon Lee, Young-Shin Park, Byung-Jun Cho, Jeong-Mi

### Abstract

Glass/phenolic composite laminates have been used in the field of non-flammable light rail transit and their applications have expanded more widely. Low velocity impact tests have been used to evaluate the effect of temperature and acceleration aging on low velocity impact response of phenolic matrix composites reinforced with woven E-glass fabric. The damage of matrix cracking and delamination are suddenly reduced the compressive strength after impact. The damage area increases with increasing temperature and impact energy. UT C-scan is used to determine damage areas by impact loading. Therefore, all this observations indicate reduced impact damage resistance and damage tolerance of the laminates at elevated temperature

### 1. 서론

경량전철은 차량규모나 수송용량이 기존의 지하철(중량전철)보다는 작으나 버스보다는 큰 새로운 개념의 도시철도로서, 버스와 지하철의 중간규모의 교통수요처리에 효과적인 교통수단이다. 경량전철은 기존에 사용되는 철 금속에서 섬유강화 복합재료를 사용하여 구조물을 경량화시켜, 에너지 절약, 수송인원의 증대등의 효과를 볼 수 있다. 섬유강화 복합재료가 철도차량에 사용하려면 몇 가지 사항을 충족시켜야 한다. 먼저 불연성(Non flammable)을 갖고 있어야 하며, 화재 발생 시, 저연(Low smoke)이어야 하고, 저독성(Low toxicity)이어야 한다. 이러한 요구를 만족시키기 위하여 유리/페놀(Glass/phenolic) 적층재를 사용하고, 금속과 같은 강도와 강성을 유지하기 위하여 직조하여 적층하였다.

섬유강화 복합재료는 수직충격하중에 대하여 보강재가 없어 취약한 특성을 나타낸다. 저속 충격으로 인한 손상은 우박이나, 새에 의한 충돌, 운행 중 작은 돌에 의한 충돌이 있으며, 이러한 충격은 육안으로 관찰되지 않는 내부손상이기 때문에 지속적인 운용시 갑작스런 파손의 원인이 될 수 있다.[1,2] 이러한 손상은 현재 많은 연구자들에 의하여, 실험과 해석을 통하여 규명하고 있다.

섬유강화 복합재료는 대기 환경에 노출 시 강도와 강성이 변화된다. Hirai[3] 등은 복합 적층재의 온도 변화에 대한 충격 응답, 손상 형상, 잔류 강도 감소 영향에 대하여 연구하였다. 이 연구에서 섬유강화 복합 적층재는 고온에서는 적은 충격에도 쉽게 손상 진전이 되나, 저온에서는 손상 개시 에너지는 크게 나타나나, 고 에너지로 가면 고온보다 많은 손상이 진전된다고 보고하였다.

복합 적층재에 노화시 강도와 강성이 변화된다. NASA technical paper[4]에서 복합 적층재에 대

\* 충남대학교 기계설계공학과  
\*\* 충남대학교 기계설계공학과 교수  
\*\*\* (주) 한국화이버

하여 10년 동안 알래스카에서 아프리카 적도 지방까지 대기 노출 후 저속충격 후 압축 시험에서 노출시키지 않은 시험편과 비교해 약 10%정도의 강도 감소가 있음을 보고하고 있다. Wang[5]등은 가혹한 환경을 가해 강도의 감소를 살펴보았다.

따라서 본 논문에서는 유리/페놀 적층재의 환경의 인자인 온도의 가속 노화를 가한 후 저속 충격 시험을 실시하고, 충격 후 UT C-scan을 통하여 내부 손상을 관찰하고, 잔류 압축 강도 시험을 수행해 충격 특성 및 잔류압축강도를 평가하여 경량 전철 전두부에 적용성 및 온도 및 환경의 영향에 대하여 분석하였다.

## 2. 재료 및 시험방법

### 2.1 재료 및 시험편

경량전철 전두부에 사용되는 직조된 유리/페놀 적층재의 프리프레그는 (주) 한국 화이바에서 제작되고 있는 두께 0.5mm Glass fabric 650이다. 프리프레그의 두께는 0.5mm이며, 시험편 제작시 적층판의 두께를 5mm로 하기 위해 적층수를 10층으로 하였다. 유리/페놀 적층판의 성형은 오토클레이브에서 수행하였으며, 유리/페놀 적층재의 물성은 인장 강도가 259.6MPa, 압축강도 354.3MPa, 포와송 비는 0.138이며, x방향과 y방향으로 섬유가 직조되어 있어 기계적 물성은 같은 값을 나타낸다.

### 2.2 환경 변화에 대한 저속 충격 시험

본 연구에서 사용된 충격 시험 방법은 BSS7260에 의거하여 시험하였다. 저속 충격에 사용된 시험기는 충격체 낙하시 시험기로 Instron dynatup 8250을 사용하였으며, 시스템은 830-I이다. 충격 시험에 사용된 시험편의 형상은 101 × 152mm 이고, 충격자는 반구형 강체로 지름이 15.7mm로 시험편 중앙에 충격을 가하였다. 다양한 충격 에너지 레벨을 얻기 위해서 충격자의 무게를 고정하고 높이를 변화시켰다.

섬유강화 복합 적층재를 구조물에 적용 시 계절에 따른 다양한 온도 변화를 만나게 된다. 이러한 복합 적층재의 온도 영향에 대해 심각하게 고려해야 하며, 온도 변화에 대한 저속충격 특성은 구조물에 적용 시 매우 중요한 요소로 작용하게 된다. 온도 변화에 대한 저속 충격 시험은 -76℃~80℃ 사이에서 5개의 에너지 레벨을 선택하여 시험하였다. 고온 충격 시험은 공기 순환식 항온조(Toyo FS-34D)를 사용하였다. 저온 충격 시험은 드라이아이스와 에틸알콜을 사용하였다. -76℃는 드라이아이스 박스에 하루동안 유지시킨 후 시험하였으며, -30℃와 -60℃는 에틸알콜에 드라이아이스를 첨가해 Thermo couple을 사용하여 온도를 맞춘 후 2시간 이상 유지시키고 시험편이 안정화되었을 때 시험하였다.

가속 노화는 ASTM G26-97에 근거로 하였으며, 몇가지 방법이 있으나 본 논문에서는 60℃, 습도 60%를 지속적으로 유지시키고, UV lamp인 Xenon arc lamp를 108분 동안 시험편에 비추주고, 12분동안 시험편에 물을 분사하는 것을 한 주기로 하여 500hr, 1000hr, 1500hr 동안 유지시킨 후 저속 충격 시험을 실시하였다. 가속 노화 장비는 weather-O-mether(Atlas electric 23-wr)을 사용하였으며, 용량은 2500W 이다.

### 2.3 충격 후 압축 시험

환경 변화를 준 후 충격 후 압축 시험(CAI)은 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. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 환경 변화에 대한 충격 특성 평가

Fig. 1은 유리/페놀 적층재에 대하여 온도 변화에 대한 저속 충격시험에서 얻은 전형적인 충격시간에 대한 충격하중이력곡선을 나타낸 것이다. 온도 변화에 대한 하중이력곡선은 상온에서 충격분리가 주 손상으로 진전되는 충격에너지 수준으로 12J을 선택하여 비교하였다. 하중은 초기에 급격히 증가하다 감소되는 지점(P<sub>1</sub>)이 판재 내부의 강성이 감소하기 시작하는 충격 손상 개시점이다. 충격 손상 개시점은 온도가 증가할수록 하중이 떨어진다. 유리/페놀 적층재는 상온에서 6.24J의 충격에너지로부터 충격 손상 개시점이 발생하였다. 온도의 영향으로 충격 손상 개시점이 감소되는 것은 작은 충격에도 쉽게 손상을 받을 수 있다는 것을 의미하며 온도가 증가할수록 손상 개시점이 저하되는 것은 기지재인 페놀은 열에 강한 난연성 재료이나, 층과 층사이에 접착력이 완화되면서 충격을 흡수하는 것으로 사료된다.

Fig. 2는 고온과 저온에서 충격 에너지가 증가함에 따라 충격체에 되돌려진 에너지인 탄성에너지의 변화를 나타낸 것이다. 저온에서는 37J까지 계속적으로 탄성에너지가 증가하여 시험편이 충격체로 반발하는 탄성 에너지가 커지고, 고온으로 갈수록 시험편에서 충격을 흡수하여 탄성에너지는 작아지게 된다.

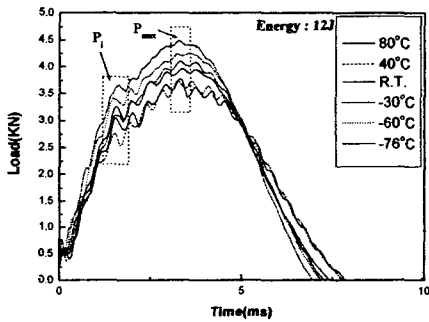


Fig. 1 Impact load vs. time traces for the variation of temperature under impact energy 12J

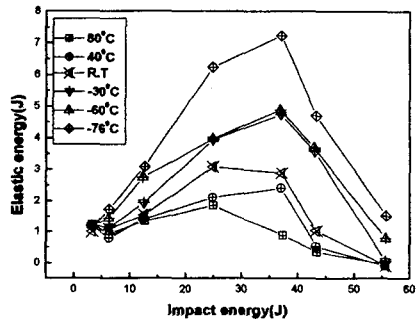
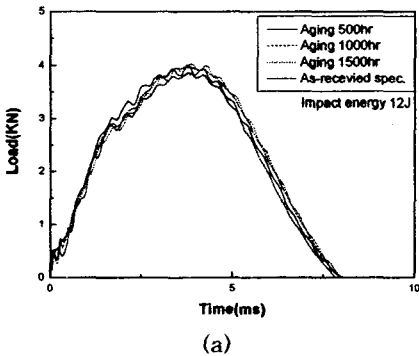
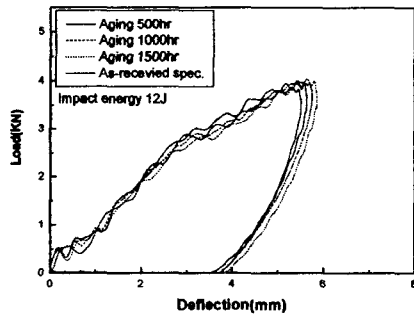


Fig. 2 Elastic energy vs. impact energy for the variation of test temperature



(a)



(b)

Fig. 3 Comparisons of accelerated aging specimens (a) Load vs. time (b) Load vs. deflection

Fig. 3의 (a)와 (b)는 유리/페놀 적층재에 대하여 가속 에이징 시간 변화에 따른 하중 이력 선도와 처짐 선도를 보여주고 있다. 노화시키지 않은 시험편과 가속 에이징 500hr, 1000hr, 1500hr 동안 가속 노화한 결과 최대 충격 하중에는 미세한 영향을 주고 있다. 그리고 손상 개시점인  $P_1$  지점에서 장시간 가속 에이징한 것이 손상 충격 지점이 낮은 수치를 보였다. 그리고 처짐 이력 선도를 보아도 1500hr 동안 에이징한 것이 가장 큰 처짐을 나타냈다. 이것은 표면이 손상되고, 내부 층간분리가 발생하는 지점인 12J에서만 정확하게 나타났으며, 그 이상의 에너지에서는 손상을 확인하기에 충격 에너지가 너무 커서 정확하게 나타나지 않았다.

### 3.2 충격 손상 평가

저속 충격 후 손상 평가에 대한 손상 허용과 손상 저항을 분석하는데 육안 관찰, UT C-scan을 사용하였다. 육안 관찰로서 시험편을 보면 80°C에서 충격 받은 면을 살펴보면 충격 지점에 원형의 관통이 발생하였고, 주 손상은 섬유파손으로 다른 섬유로의 손상진전이 작다는 것을 볼 수 있다. 그 배면을 살펴보면 원형으로 파손영역이 나타나 있다. 그러나 -76°C에서 충격 받은 면이 충격 지점에 원형의 압흔을 중심으로 세로방향으로 크게 층간분리 및 섬유파손이 진전한 것을 볼 수 있다. Fig. 4는 기지 손상이 발생하고 층간 분리로 발전하는 단계인 충격 에너지 12J에서의 온도 변화에 대한 UT C-scan 사진이다. 저온으로 갈수록 손상 면적이 작아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 고온으로 갈수록 시험편이 흡수하는 충격 에너지가 많다는 것을 의미한다. 또한 고 에너지로 가면 저온에서의 손상 면적이 관통없이 증가하여 더 큰 형상을 볼 수 있다.

각 재료들의 결합과 손상 영역을 찾기 위해서 UT C-scan을 사용하였으며, Fig. 5 (a)와 (b)에 나타나 있다. Fig. 5 (a)는 유리/페놀 적층재에 대하여 온도 변화에 따른 충격 에너지와 손상 면적의 관계를 나타낸 것이다. 동일 충격 에너지 수준에서 충격 시험 온도가 고온으로 갈수록 손상 면적이 커지며, 기지재가 연성을 나타내게 되어 충격에 저항하지 않고 대부분을 흡수하는 것을 알 수 있다. 충격 실험에서 보면 80°C에서 충격 에너지 40J정도부터 섬유파손이 발생함을 알 수 있었고, 그 후 UT C-scan에서 더 이상의 층간분리가 발생하지 않았음을 알 수 있다. 저온으로 가면 상온

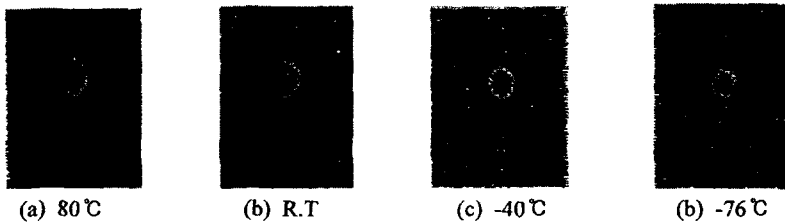


Fig. 4 UT C-scan images of specimens after impacted 12J for the variation of temperatures

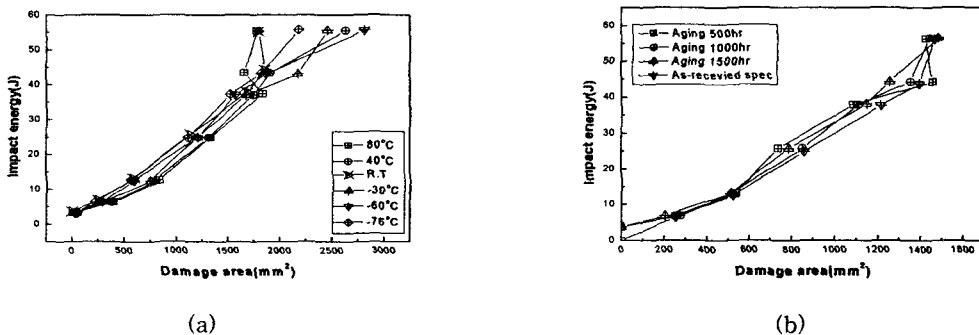


Fig. 5 Impact energy vs. damage area (a) Various temperatures (b) Accelerated aging time

에서 관통하는 55J에서도 관통없이 지속적인 하중이 증가하고 있다.

Fig. 5 (b)는 유리/페놀 적층재 재료에 대하여 가속 에이징 시간의 변화에 따라 충격 시험 후 구한 충격에너지와 손상 영역의 관계를 나타낸 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 손상 면적은 기지파손과 층간분리가 발생하는 충격 에너지 12J까지 에이징 시간에 관계없이 거의 일정하였다. 그러나 12J 이상의 충격 에너지에서는 에이징 시간에 따라 손상면적이 차이를 보이고 있다. 이것은 에이징이 표면 노화에만 관계가 있는 것으로 해석할 수 있으며, 적층재 내부에 층간분리나 섬유파손에는 크게 영향을 미치지 않는 것이다. 그러나 표면이 갈라질 정도로 많이 노화되어 있다. 이것은 가속 에이징 시간이 긴 것일수록 그 정도는 심해진다. UV lamp인 xenon arc lamp는 표면을 급속히 노화시키는 자외선을 발산한다. 보통 xenon arc lamp는 색깔 변퇴색 시험을 하는 데 많이 이용하고 있으며, 본 시험에서 사용한 lamp는 미국 남부 플로리다 시험 장소에서 자연폭로 시험한 것과 비교할 때 많은 제품들이 98%정도의 높은 상호 요인을 갖는 것으로 조사되고 있다.

### 3.3 충격 후 압축강도평가

충격받은 유리/페놀 복합적층판의 잔류 압축 강도를 예측하기 위해 Caprino[7]가 제안한 모델을 사용하였다.

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_0} = \left( \frac{U_0}{U} \right)^a \quad (1)$$

식 (1)은 잔류 압축강도  $\sigma_r$ 과 충격 받지 않은 시험편의 압축강도  $\sigma_0$ 와 비,  $\sigma_r/\sigma_0$ 에 대한 충격 에너지 U의 함수를 나타내고 있다. 압축 하중 부하 시 일정하중에 도달하면 충격 받은 시험편에 존재하던 손상이 급격히 시험편의 측면으로 전진되어 파손되었다. 유리/페놀 적층재의 최고 압축 강도 감소율은 48%이었다.

Fig. 7 (a)는 유리/페놀 적층재의 온도 변화에 따른 잔류 압축 강도 감소를 충격 에너지 변화에 따라 나타낸 것이다. 모든 재료에 대하여 유사한 선도를 나타냈으며, 온도 변화가 잔류 압축 강도 감소에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 먼저 약 25J까지는 급격히 잔류 강도가 떨어지다가 그 이상의 충격 에너지가 증가해도 더 이상의 강도 감소 없이 일정하게 55J까지 충격 에너지가 증가하는 것을 알 수 있다. 초기 기지 손상과 층간분리가 주 영역이 25J까지이다. 이때까지 잔류 압축 강도는 내부에 존재하며 그 이상은 섬유 파손이 주 영역으로 더 이상의 강도 감소는 발견되지 않았다.

Fig. 7 (b)은 유리/페놀 적층재에 대하여 가속 에이징에 대한 잔류 압축 강도 감소 평가를 한 것이다. 일반 상온에서 시험한 시험편이 잔류 압축강도 감소 평가에서 가장 우수한 수치를 나타냈으며,

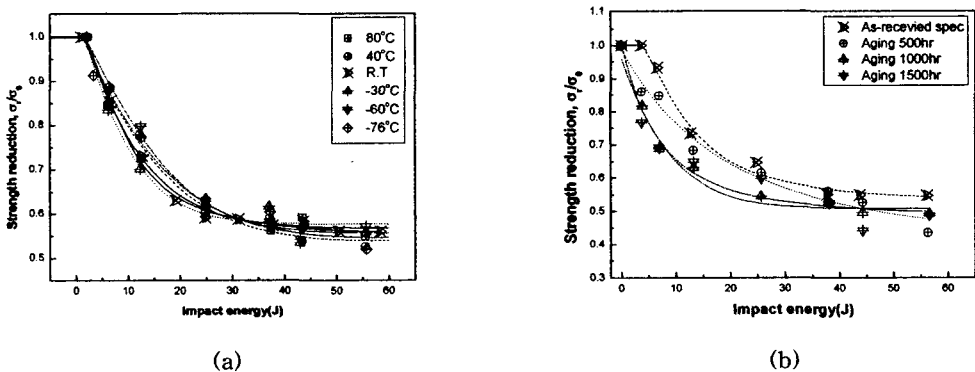


Fig. 6 Reduction of residual compressive strength (a) Various temperatures (b) Accelerated aging time

Table 1 Results of threshold energy  $U_0$  and exponent  $\alpha$

Experimental constant	80℃	40℃	-30℃	-60℃	-76℃	Aging 500hr	Aging 1000hr	Aging 1500hr
$U_0$ (J)	2.803	3.207	3.448	3.637	3.451	2.020	1.671	0.894
$\alpha$	0.213	0.236	0.254	0.351	0.201	0.221	0.265	0.169

가속 에이징한 것은 압축 강도가 낮았다. 가속 에이징 시간이 길수록 초기 손상 에너지인  $U_0$ 의 에너지가 낮았으며, 잔류압축강도도 감소하고 있다.

#### 4. 결 론

유리/페놀 적층재에 대하여 온도, 가속 노화의 환경 영향을 고려하여 철도차량 경량 구조물에 적용성을 평가하기 위하여 저속 충격에 대한 충격 거동, 내부 손상 및 충격 후 잔류 압축 강도를 시험 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유리/페놀 적층재의 충격 특성은 온도에 매우 민감하며, 초기 균열이 발생하는  $P_1$ 와  $P_{max}$ 의 지점이 동일 에너지 레벨에서 고온으로 갈수록 작아지며, 가속 노화는 가속 시간에 대하여 충격 하중은 미세한 차이를 보인다.
- (2) 손상 영역은 동일 충격 에너지 수준에서 고온으로 갈수록 증가하고, 저온으로 갈수록 감소한다.
- (3) 가속 에이징 시험편은 상온 시험편에 비하여 미세하지만 충격 손상 개시 에너지  $U_0$ 가 작다. 그리고 잔류 압축 강도도 감소하고 있다.

#### 참고 문헌

1. L. Reis and M. de Freitas, 1997, "Damage Growth Analysis of Low Velocity Impacted Composite Panels", Composite Structures, Vol. 38, pp. 509-515
2. G. A. Schoepner and S. Abrate, 2000, "Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates", Composites: Part A, Vol. 31, pp. 903-915
3. Y. Hirai, H. Hamada, J. K. Kim, 1997, "Impact Response of Woven Glass-Fabric Composite II. Effect of Temperature", Composites Science and Technology, Vol. 58, pp.119~128
4. NASA Technical paper, 1994, "Ten-year Ground Exposure of Composite Materials used on the Bell Model 206L Helicopter Flight Service Program", ARL technical report 480
5. H. Parvatareddy, J. Z. Wang, D. A. dillard, T. C. ward and M. E. Rogalski, 1995, "Environmental Aging of High-Performance Polymeric Composites : Effects on Durability", Composites Science and Technology, pp.399-409
6. Boeing, 1979, "BSS 7260, Compressive Properties After Impact of Carbon Laminates"
7. G. Caprino, 1983, " On the Prediction of Residual Strength for Notched Laminates", Journal of Materials Science, Vol. 18, pp. 2269-2273
8. G. Belingard, R. Vadori, 2002, "Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates", International Journal of impact Engineering, Vol. 27, pp. 213-229

#### 감사의 글

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