

철도차량 복합소재의 인장파괴 특성분석

Tensile Failure Characterization of Composites for Railway Vehicle

김정국[†] 권성태* 김정석* 윤혁진**
Jeongguk Kim Sung-Tae Kwon Jung-Seok Kim Hyuk-Jin Yoon

ABSTRACT

The tensile failure behavior of polymer matrix composite materials was investigated with the aid of a nondestructive evaluation (NDE) technique. The materials, E-glass fiber reinforced epoxy matrix composites, which are applicable to carbody materials in railway vehicles to reduce weight, were used for this investigation. In order to explain stress-strain behavior of polymer matrix composite sample, the infrared thermography technique was employed. A high-speed infrared (IR) camera was used for in-situ monitoring of progressive damages of polymer matrix composite samples during tensile testing. In this investigation, the IR thermography technique was used to facilitate a better understanding of damage evolution, fracture mechanism, and failure mode of polymer matrix composite materials during monotonic loadings.

1. 서론

철도차량의 고속화에 따라 안전에 관한 이슈가 보다 중요해 지고 있으며, 또한 세계적으로 최근의 환경에 대한 관심의 고조에 따라 에너지 효율의 증진을 위한 노력도 많이 시도되고 있다. 철도차량분야에서도 환경 및 에너지 효율화 관점에서 철도차량의 경량화를 위한 시도가 이뤄지고 있는데, 이에 대한 대표적인 사례가 복합소재를 이용한 기존소재의 대체가 될 수 있다. 특히, 고분자 기지의 복합소재 (Polymer Matrix Composites, PMCs)는 기존 금속재료에 비해 강도의 저하가 없으면서도 구조물의 경량화가 가능하다는 이유로 철도차량분야에서도 차체는 물론이며 대차에 대해서도 적용하는 연구가 시도되고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 철도차량의 대차에 적용될 고분자기지 복합소재에 대하여 단일축 인장파괴 거동에 대한 특성을 분석하였다. 본 연구에 사용된 복합소재는 E유리 파이버로 보강된 에폭시기지의 고분자 복합재료로 철도차량의 경량화를 목적으로 대차소재로 이용되는 재질이다. 시편은 복합재료 판넬로부터 준비하여 인장시험은 한국산업규격에 따라 수행하였다. 인장특성을 해석하기 위해 적외선 열화상 (Infrared Thermography) 기술을 이용하였는데, 적외선 카메라 (Infrared Camera)를 이용한 열화상 기술 (Thermography)은 물체의 표면에서 방사되는 적외선을 이용하여 물체의 표면 온도 분포를 영상으로 볼 수 있게 하는 기술로서 초기에는 비접촉 온도측정 장비로 이용되었지만, 최근에는 비접촉식, 초고속, 다양한 온도범위에서의 분해능 등과 같은 특성으로 인하여 단순한 온도 측정뿐만 아니라 검출된 적외선을 이용하여 비파괴 진단 및 검사, 고장분석, 응력해석, 의료분야에 이르기까지 다양한 분야에서 응용되고 있다.

본 논문에서는 철도차량 경량화를 목적으로 대차 복합재료로 제안된 소재의 인장파괴특성을 분석하였으며, 인장시험 동안 시편의 파괴특성을 모니터링하기 위해 고속 적외선카메라를 이용하였고, 인장시험

† 정회원, 한국철도기술연구원, 주행추진연구실, 선임연구원
E-mail : jkim@krti.re.kr
TEL : (031)460-5518 FAX : (031)460-5299

* 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

** 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

동안 시편 표면의 온도변화를 모니터링하여 온도의 함수로 인장파괴 거동을 설명하고 파괴모드를 규명하고자 하였다.

2. 본 문

2.1 재료 및 인장시험

본 연구에 이용된 인장시편은 철도차량의 경량화를 목적으로 고안되고 있는 대차용 고분자 복합재료와 동일한 소재이다. E유리 섬유로 보강된 에폭시 고분자 복합재료로 두께가 약 3 mm의 판넬 형태로 제작되어 인장시험을 위해 시편이 준비되었으며, 시편은 ASTM 규정에 따라 치수가 결정되었고 직사각형 형태의 시편으로 가공되었다. 시편 가공은 가공시 생길 수 있는 가공결함을 최소화하기 위해 워터젯가공 방식을 이용하여 인장시편이 가공되었다. 또한 인장 시험기에 시편의 로딩시 시편그립 부위의 파단을 방지하기 위해 시편에 강소재의 탭을 부착하였는데 인장시편의 형상은 그림 1에서 나타난 바와 같다.



그림 1. 인장시험편의 형상

위와 같이 준비된 인장시편을 이용하여 KS 규격(KS B 0802 : 2003)에 따라 인장시험을 실시하였으며, 응력증가율에 따라 인장시험기의 하중속도를 조절하였으며, 평균응력 증가율을 $3 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ 로 하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험동안 인장시편표면의 온도모니터링 및 표면의 변화를 관찰하기 위하여 초고속 적외선 카메라 (High-speed Infrared Camera)를 사용하였으며, 카메라의 속도는 100 Hz로 하여 인장시험을 실시하였다. 그림 2는 인장시험동안 사용된 적외선카메라를 포함한 시험 장치를 나타내고 있다.



그림 2. 인장시편 및 적외선 카메라 시험 시스템

2.2 인장시험 결과 및 분석

2.2.1 인장시험 결과 및 분석

그림 3은 복합소재시편의 인장시험결과를 나타내고 있다. 총 10개의 인장시험이 실시되었으며 그림 3에서는 대표적인 시편의 인장시험결과를 나타내었다. 대체적으로 초기 변형과정에서부터 직선적인 탄성거동을 나타내고 있으며, 최대인장하중 도달 후 바로 파괴되는 탄성거동을 나타내었음을 알 수 있

다. 또한 기계적 성질에 있어서는 최대인장강도가 약 360 MPa 정도로 관찰되었고 파괴시점의 변위는 약 2.6 mm 정도임을 알 수 있다.

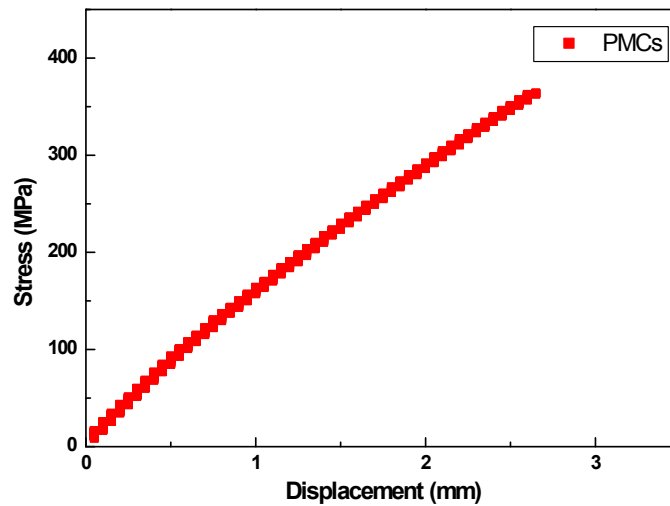


그림 3. E유리섬유/에폭시 복합재료의 인장시험 결과

2.2.2 인장시험동안의 시편온도 모니터링

인장시험동안 초고속 적외선 카메라를 이용하여 인장시험동안 발생하는 열과 이로 인한 시편 표면의 온도변화를 모니터링 하였다. 적외선 카메라를 이용한 목적은 인장시험동안 발생하는 열로 인한 시편 표면의 열분포 분석을 통하여 인장시험동안의 시편의 변화를 온도의 함수로 관찰하기 위한 것과 시편표면의 온도변화 모니터링을 통하여 인장시험의 파괴모드와 파괴과정을 해석하는 데 있다.

그림 4는 복합재 인장 시편의 적외선 열화상 이미지를 나타내고 있다. 적외선 열화상 카메라의 속도는 100 Hz로 관찰하였는데 적외선 열화상 이미지는 0.01초당 이미지를 나타내고 있다. 총 6개의 이미지중 3번째 이미지에서 최초 파괴가 시작되었음을 그림 4에서 알 수 있다. 최초 2개의 이미지는 최종 파단시점에서 0.02초 및 0.01초 전의 이미지를 나타내고 있으며, 그 후의 열화상 이미지는 0.01초당 이미지를 나타내고 있다. 그림 4에서 2번째와 3번째 열화상 이미지를 보면, 파괴는 순식간에 (0.01초 이내), 아무런 전조적 징후없이 급작스럽게 진행되었으며, 최초 기지재료(에폭시) 균열의 발생과 동시에 취성적으로 파괴가 일어났음을 알 수 있다. 기지균열의 파편은 그림 4의 3번째 이후의 열화상 이미지에서 관찰되고 있다. 이러한 결과는 그림 3에서 나타난 인장시험결과와 부합되는 것으로 시편의 파괴가 매우 순식간에 취성적으로 일어났음을 적외선 열화상 이미지로 분석이 가능함을 알 수 있다.

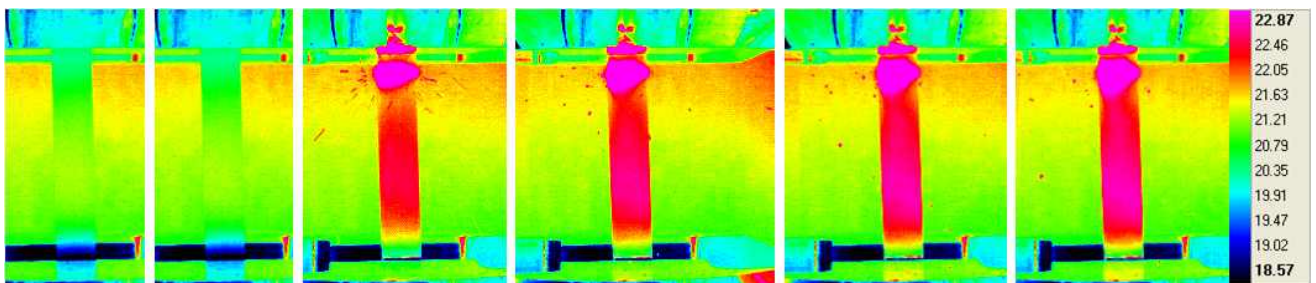


그림 4. 복합재 인장 시편의 파단 전후의 0.01초 당 적외선 열화상 이미지

열화상 이미지를 통한 온도분석을 위해 시편의 각기 다른 지점에서 온도변화를 관찰하였는데, 그 기준점은 최종파단이 일어난 열화상 이미지를 바탕으로 4 지점을 선택하였다(그림 5). 시편은 그림 5

의 온도변화 곡선에 나타난 바와 같이 인장시험동안 전 지점에서 온도변화가 거의 관찰되지 않았고, 최종 파단점에서 급격한 온도피크가 관찰되고 있음을 알 수 있다. 이는 응력-변위 (그림 3)결과에서 나타난 바와 유사하며, 또한 그림 4의 시편 최종 파단지점 부근의 열화상 이미지 결과와도 같음을 알 수 있다. 즉 탄성 영역내에서 직선적 하중증가로 인하여 시편 전반적으로 온도변화를 관찰할 수 없었으며, 최종파단의 경우 사전 징후가 없이 순간적 및 취성적으로 파괴되어 인장시험이 완료되었음을 그림 3, 4 및 5의 결과를 종합해 볼 때 파괴모드의 추측이 가능하다. 특이한 것은 인장시험 동안 시편의 온도변화가 관찰되지는 않았지만 최종파단지점에서는 급작스런 온도상승 피크(최고 66°C)가 관찰되었는데 이는 최초 예폭시 기지 균열의 발생과 순식간에 이어지는 균열전파, 파이버의 파단 등으로 인한 파괴에너지의 증가로 인한 결과로 추론된다. 이 부분에 대한 정확한 추측은 향후 전자현미경을 이용한 파면 분석을 통해 파괴의 구체적 과정에 대한 연구가 필요하다.

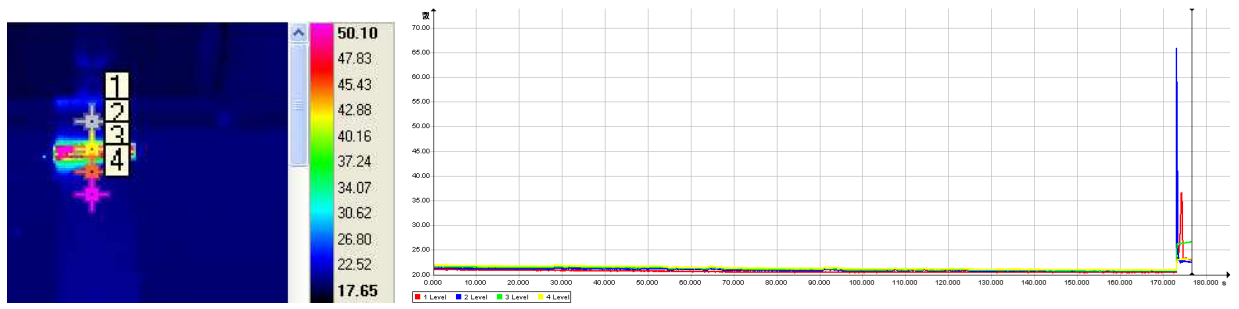
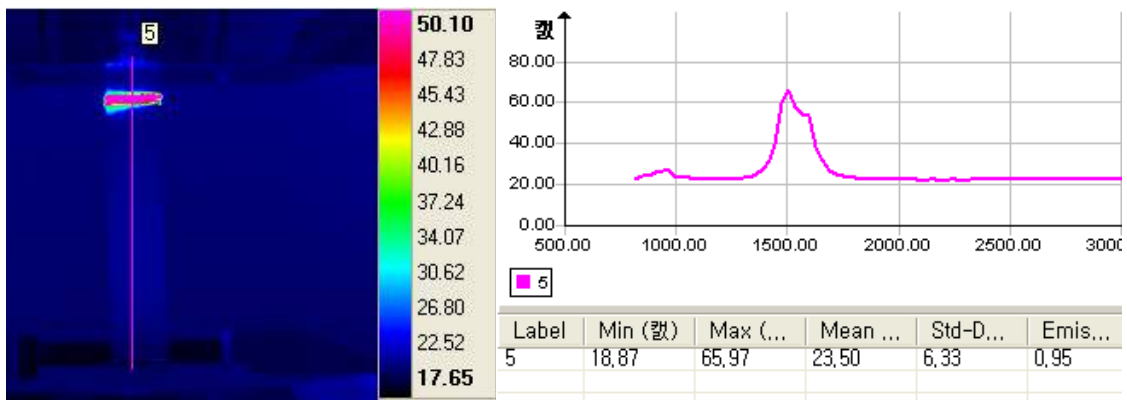
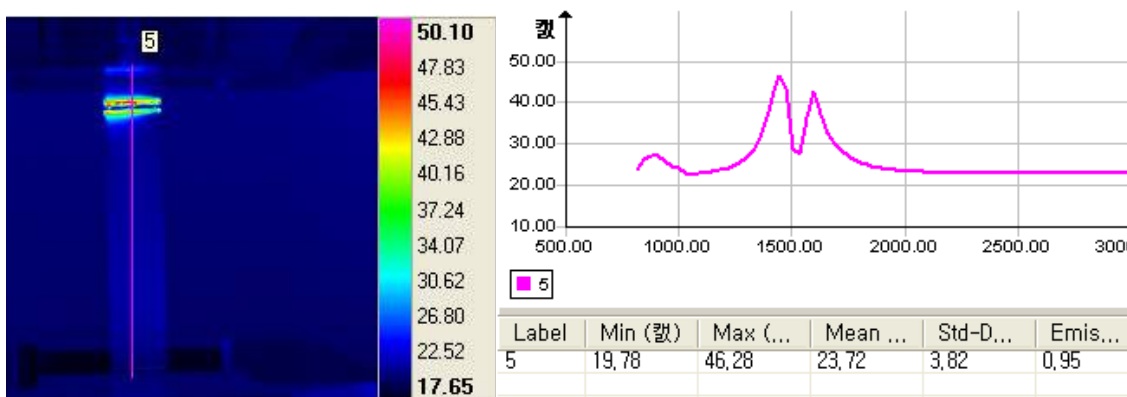


그림 5. 인장시험동안의 시편 각 지점의 온도변화



(a) 최초균열시작지점 (17,262번째 프레임(173.19초))



(b) 시편완전분리 지점 (17,287번째 프레임(173.44초))

그림 6. 균열발생지점의 열화상 이미지와 균열로 인한 온도 피크

시편이 순간적으로 파괴됨에 따라 최초 균열발생시점부터 시편의 마지막 분리가 어떻게 일어났는지를 분석하기 위해 열화상 이미지 결과를 이용하여 분석을 실시하였는데 그림 6에서 나타낸 바와 같다. 그림 6(a)에서는 균열이 최초로 발견된 시점의 열화상이미지(17,262번째 프레임 및 시험 시작후 173.19초 경과시점)와 열화상 이미지의 선분석(Line analysis)을 통해 도출된 온도피크를 나타내고 있다. 인장시편에서 균열의 형성에 따라 피크가 형성되었음을 나타내고 있다. 그림 6(b)에서는 인장시편이 완전히 분리된 시점의 열화상이미지(17,287번째 프레임 및 시험 시작후 173.44초 경과시점)를 나타내고 있으며, 열화상 이미지의 선분석 결과를 보면 그림 6(a)의 온도 피크와 달리 온도피크에서의 분리를 관찰할 수 있다. 이는 열화상이미지를 통해서 구별이 용이하지 않으나 온도 피크 분석 결과에서는 뚜렷한 시편의 분리를 관찰할 수 있다. 또한 그림 6의 열화상 이미지 분석을 통해 균열이 시작된 시점부터 최종 시편분리까지의 시간은 0.25초가 소요되어 본 연구에 사용된 복합재의 인장파괴는 순식간에 기지균열의 발생 및 전파에 따라 일어났으며, 취성모드로 파괴가 진행되었음을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

철도차량의 대차에 적용될 고분자 복합소재의 인장 파괴특성을 분석한 본 연구에서는 다음의 결론이 도출되었다.

- (1) 인장시험을 통하여 복합재료의 파괴모드를 예측할 수 있었으며, 탄성영역 내에서 직선적 인장파괴 거동이 관찰 되었다.
- (2) 적외선 열화상 기술을 이용한 인장시험동안의 온도변화는 시험동안 특이한 온도변화 없이 일정하게 유지되다가 파괴시점에서 파괴에 의한 에너지 증가로 추론되는 급격한 온도피크가 관찰되었다. 이를 통해 복합재의 인장파괴는 순식간에 기지균열의 발생 및 전파에 따라 일어났으며, 취성모드로 파괴가 진행되었음을 확인할 수 있었다.
- (3) 복합소재의 인장파괴특성을 적외선 열화상 분석을 통해 설명할 수 있었으며, 응력-변위 관계에서 예상된 파괴모드가 적외선 열화상 분석을 통해 증명될 수 있었고 이러한 관계를 통해 적외선 열화상 기술이 인장시험의 온도 모니터링에 있어 재료의 변형 및 파괴해석에 유용하게 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. ASTM D 3039/D 3039M-08, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
2. KS B 0802 : 2003, 금속 재료 인장 시험 방법
3. 이대길 외, 복합재료, 홍릉과학출판사, 2007.
4. 김정국, "철도차량 윤축재료의 파괴특성 분석," 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 2009.