

철도레일패드 재료의 파괴특성 분석 Failure Analysis of Rail Pad Materials in Railway Applications

*#김정국

*#Jeongguk Kim(jkim@krii.re.kr)
한국철도기술연구원 주행추진연구실

Key words : Railway pad materials, Infrared thermography, Tensile behavior

1. 서론

철도레일 패드는 철도레일과 레일을 지지하는 침목사이에 위치하여 철도차량 운행 시 레일에서 발생하는 하중을 지지하고 레일과 침목 간에서 발생하는 소음과 진동을 완충시키는 역할을 하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 통상 철도레일패드나 가변패드로서 열경화성 수지가 이용되고 있다. 다양한 열경화성 수지 중에서 타 플라스틱에 비해 상대적으로 우수한 인장 강도와 충격강도를 지니고 있어 레일과 침목간의 소음과 진동 완충에 적합한 불포화 폴리에스터 수지 (Unsaturated Polyester Resin, UPR)가 레일패드 재료로 이용되고 있는데, 이는 열경화성 플라스틱에 속하는 고분자화합물이며 액상수지의 형상에서 연쇄중합을 거쳐 3차원적인 불용 불용의 열경화성 플라스틱이 된다. 일반적으로 불포화 폴리에스터 수지는 유리섬유 보강 플라스틱 (FRP)와 같은 고분자 복합재료 (Polymer Matrix Composites)의 기지재료로 활용되고 있다.

적외선 카메라 (Infrared Camera)를 이용한 열화상기술 (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 온도 범위에서의 분해능 등과 같은 특성으로 인하여 단순한 온도 측정뿐만 아니라 검출된 적외선을 이용하여 비파괴 진단 및 검사, 고장분석, 응력해석, 의료분야에 이르기까지 다양한 응용 분야에서 활용되고 있다.

본 연구에서는 적외선 카메라를 이용하여 철도레일패드재료의 인장특성을 평가하고자 하였으며, 인장시험 동안에 적외선 열화상 카메라를 이용하여 시험편의 온도변화를 실시간 모니터링하였고, 인장시험 후에는 파괴된 시험편을 대상으로 전자현미경을 이용하여 파괴경로와 파괴 메커니즘을 분석하였다. 따라서 본 논문에서는 적외선 열화상기법과 주사전자현미경을 이용하여 철도레일 패드재료의 인장파괴특성 분석 결과를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 인장시험절차

본 연구에 이용된 철도레일 패드재료는 불포화 폴리에스터 수지로서 앞서 설명한 바와 같이 전형적인 열경화성 플라스틱 수지로서 고분자 복합재료의 기지재료로 활용되는 재질이다. 그림 1에서는 실제의 인장시험편을 나타내고 있으며, 본 시험편은 한국 산업 규격에서 제시한 플라스틱 인장시험편 규정에 따라 제작되었다.



Fig. 1. The tensile coupon of unsaturated polyester resin

인장시험은 한국 산업 규격 (KS M 3015) 열경화성 플라스틱의 시험방법에 따라 상온에서 수행되었다. 인장시험 동안에 고속 적외선 카메라를 설치하여 온도 표면의 온도를 실시간 모니터링 하였으며, 이들 정보로부터 레일패드 재료의 파괴모드와 인장파괴 거동을 해석하고자 하였다.

본 연구에 이용된 적외선 카메라는 최고속도가 320×256 픽셀에서 380 Hz까지 가능한 고속적외선 카메라로서 본 논문의 인장 시험에서는 50 Hz 즉, 매 초당 50 프레임의 열화상 이미지를 얻어 인장시험동안 미세한 온도변화까지 관찰하는데 이용되었다. 본 적외선 카메라의 주요특성을 보면, 공간 분해능이 5.4 μm이며, 온도해상력은 상온에서 0.02°C일 정도로 분해능이 매우 뛰어나다.

3. 시험결과 및 분석

그림 2는 불포화 폴리에스터 수지 시험편의 인장시험결과를 나타내고 있다. 인장거동을 살펴보면 응력의 증가에 따라 변형이 비례적으로 증가하는 초기의 탄성영역이 나타나 있고 최대인장강도 도달 후에는 완만한 변형을 보이며 변형량이 증가하다가 최종파괴가 일어나는 파괴특성을 나타내고 있다. 그림 2에서는 응력과 신장의 관계로 표시하였으나 실제 시험편의 단면적 등을 고려한 계산에 의하면 UPR 시험편의 최대인장 강도는 약 36 MPa 정도이고 변형은 약 15% 이내로 추정되었다.

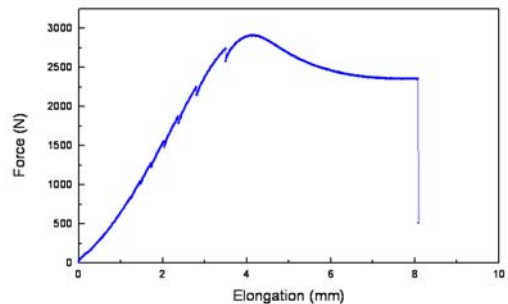


Fig. 2. The tensile behavior of UPR specimen

그림 3은 인장 시험편의 열화상 이미지를 나타내고 있는데 그림 3(a)에서는 파단 직전의 이미지를 그림 3(b)에서는 파단 직후의 이미지를 각각 나타내고 있다. 적외선 카메라의 속도가 50 Hz 이므로 최종 파괴를 기점으로 0.02초의 차이를 두고 얻어진 열화상 이미지를 설명하고 있다. 그림 3에 나타난 열화상 이미지를 토대로 분석해보면 그림 2의 인장특성에서 이미 예측할 수 있듯이 UPR 시험편의 최종파괴는 매우 짧은 순간에 급격하면서 취성파괴모드로서 진행되었음이 열화상 이미지를 통해서도 알 수 있음이 증명되고 있다.

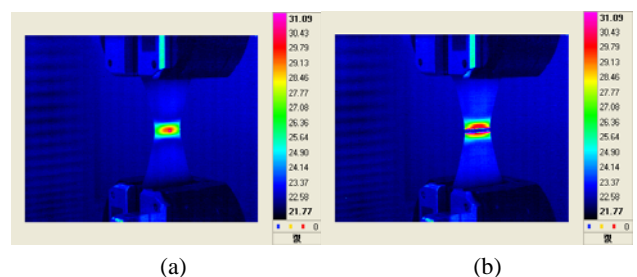


Fig. 3. Thermographic images of tensile failure specimen at (a) just 0.02 sec before failure and (b) at the time of failure. Note that the speed of infrared camera was 50 Hz during tensile testing.

그림 4는 인장시험동안 UPR 시험편의 점진적인 손상을 나타내

는 열화상 이미지를 보여주고 있다. 각각의 이미지는 약 6초마다 얻어진 이미지인데 그림 4의 결과를 통해 최초의 이미지부터 최종적인 파괴가 일어날 때까지의 점진적인 변화를 알 수 있다. 즉, 최초의 시편에서는 온도 및 시편의 변화가 없지만 점점 인장시험 시간의 경과에 따라 시편 중앙부위에서 열밴드(Thermal Band)가 형성되고 그 두께가 점점 확대되고 있으며, 최종 파단이 임박해 옴에 따라 열밴드의 온도는 상승하고 있으며, 최종 파단은 급격한 온도상승에 따라 이루어지고 있음을 그림 4에서 알 수 있다.

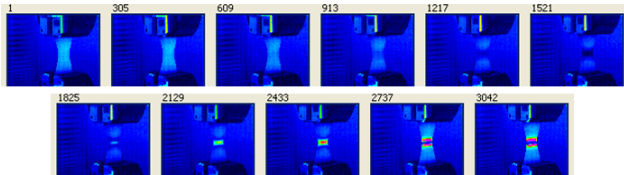


Fig. 4. The thermographic images of UPR sample during tensile testing. Note that each image was obtained at every 6 second until final failure of the specimen.

그림 5는 인장시험 동안 열밴드가 형성되는 열화상 이미지에서 시편중앙 근처의 특정 부위를 선정하여 그 위치에서 인장시험 동안의 온도 변화를 모니터링한 결과를 나타내고 있다. 총 3개의 위치에서 온도모니터링이 이루어졌다. 그림 5의 왼쪽의 그림은 열화상 이미지에서 선정한 3개 지점에서의 온도변화를 나타내고 있다. 전반적인 온도 변화 패턴은 우선 최초에 온도 감소, 온도 최소지점 형성, 그 후에는 점진적인 온도 증가를 나타내면서 최종적으로 급격한 온도 상승의 패턴을 나타내고 있다.

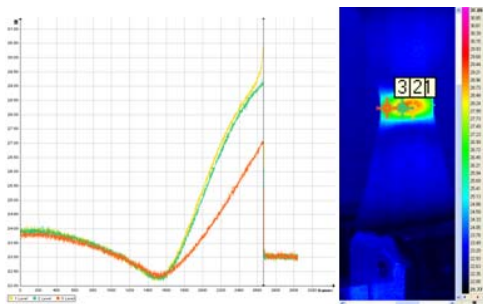


Fig. 5. Point profile analysis of infrared image during tensile testing

우선 초기의 온도 감소는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 초기 인장거동의 탄성영역에서 하중인가에 따른 열탄성 효과에 의한 온도 감소로 기인하며, 지속적인 온도감소는 최대인장응력 도달 후 탄성영역을 벗어나는 지점에서 정지되어 이후의 지속적인 시편의 연신율의 증가에 따라 온도상승으로 이어지는 것으로 보인다. 점진적인 온도 상승은 플라스틱 재료의 연신에 따른 것으로 추정되며 최종 파단점 근처의 급격한 온도 상승은 시편의 분리에 따른 온도변화를 나타내고 있다. 그림 5에서는 특정지점의 온도변화를 추적한 것으로 시편의 신장에 따른 특정지점의 위치변화 효과는 고려되지 않았다는 것을 알 수 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해 특정 지점의 선정에 따른 점분석(Point Analysis) 보다는 인장시험동안 시편의 연신율의 변화를 고려하여 특정 위치 보다는 영역에 대한 최대 및 최소 온도변화를 고려하였는데 그림 6에서는 그 결과를 나타내고 있다. 특히 그림 6에서는 영역 분석(Area Analysis)의 결과와 인장동안의 응력-변형 곡선을 함께 나타내어 시편의 인장거동과 온도의 특성 변화를 동시에 나타내고 있다.

그림 6에서 나타난 인장거동 동안의 시편의 최대 온도특성을 보면 그림 5에서 설명과 일치되는 유사한 패턴을 보이고 있음을 알 수 있다. 우선 최대인장강도 전후의 지점까지 열탄성효과에 의한 온도감소와 이어서 점진적인 온도상승, 그리고 최종적

시편 파단 시에는 약 11도 이상의 온도상승을 나타내며 최종적인 파괴거동을 나타내었다.

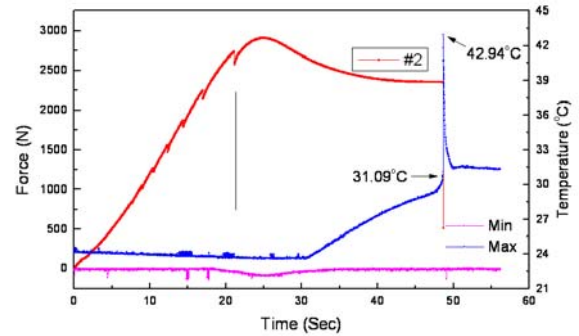


Fig. 6. A comparison between stress-strain behavior and temperature evolution during tensile testing in UPR sample.

그림 7은 파단된 시편 표면의 전자현미경 사진을 나타내고 있다. 불포화 폴리에스터 수지의 인장파괴는 분자간 찢어짐(Tearing)에 이어 미세한 파이버 파괴(Fibrillation)에 의해 파괴가 진행되었음을 알 수 있다.

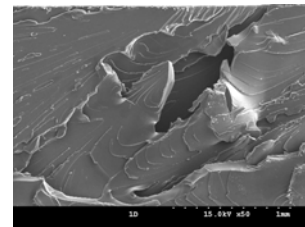


Fig. 7. SEM photograph of fracture surfaces of UPR material showing extensive tearing and fibrillation.

4. 결론

본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 불포화 폴리에스터 수지의 인장파괴 특성이 적외선 열화상 기법과 전자현미경 특성분석 방법을 이용하여 고찰되었으며, 비파괴기법과 SEM 기법의 융합을 통해 보다 효과적인 인장파괴 특성 해석이 가능함을 알 수 있었다.
2. UPR 재료의 파괴모드와 파괴 메커니즘은 SEM을 이용한 미세구조의 특성 분석을 통해 고찰 되었는데, 불포화 폴리에스터 수지의 인장파괴는 분자 간 찢어짐(Tearing)에 이어 미세한 파이버 결절(Fibrillation)에 의해 파괴가 진행됨을 알 수 있었다. 또한 이러한 과정들로 인해 최대인장강도 도달 이후에 점진적인 온도의 증가가 관찰되었으며 최종적인 파단의 시점에서는 급작스런 온도증가가 관찰되었다.
3. 인장파괴의 경우 최초 균열은 재료의 내부의 결함이나 응력이 취약한 부위에서 시작되며, 이러한 균열은 점차 시편의 표면방향으로 진전되어 최종적인 파괴는 찢어짐과 미세한 파이버 결절의 메커니즘으로 진행됨을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 한국철도기술연구원의 2009년도 주요사업 (철도시스템 건전성 모니터링 기초연구, PK09005A) 연구과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim, J. and Liaw, P.K., Journal of Engineering Materials and Technology, 127, 8-15, 2005.
2. X.P.V. Maldague, Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing, Vol. 3, ASNT, 2001.
3. Kim, J, Lee, J.H.K Key Engineering Materials, 297-300, 2533, 2005.