최신 이미징 기법과 아스팔트 혼합물의 실내 역학 실험

서영국 | 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 연구원(공학박사)

최근 들어 아스팔트 포장과 포장 재료 설계시 역학 개념이 도입됨에 따라 포장 재료에 대한 고급 물성 실험과 정확한 결과분석이 중요한 설계변수로 인식되고 있습니다. 현재 대부분의 아스팔트 혼합물의 실내 실험에 사용되는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)는 가격이 비교적 저렴하고 설치 및 관리가 쉬운 장점이 있는 반면, 항상 시편에 부착해야 하고 미리 정해진 범위 내에서만 계측이 가능하기 때문에 실험결과의 오류를 유발하고 해석 범위에 늘 제한이 있습니다.

1980년대 초부터 급속한 발전을 보인 광학 기술과 디지털 이미지 관리 및 분석기술은 Computer Vision Technology로 통칭되는 이미징 기법과 시스템 개발을 가능하게 했고 현재 실험역학(Experimental Mechanics)의 핵심 분야로 기술적 성장을 거듭하고 있습니다. 본 기법의 적용 대상도 금속, 복합재료, Portland cement concrete, 나무와 종이는 물론이고, 생명공학의 다양한 재료까지 그 응용범위를 계속해서 넓혀가고 있습니다. 이러한 이미징 기법의 일반적인 장점은 계측 범위에 대한 제한이 상대적으로 적고, 대상이 되는 실험재료와의 물리적 간섭이 거의 없기 때문에 정확하게 재료의 물성만을 계측하고 분석할 수 있습니다.

본 기사는 대표적인 최신 이미징 기법들을 소개하고 실제로 아스팔트 혼합물의 역학실험에 적용된 예를 통해 이미징 기법이 제공할 수 있는 장점들을 알아보고자 합니다.

1. Moire Interferometry

하중을 받는 시편에서 발생하는 평면 변위를 일정한 간격을 갖는 격자간(specimen and reference gratings)의 상호 간섭을 이용하여 사진 1에서 보는 바와 같은 Moire로 표현하는 기법입니다. 시편의 전 단면(full field)계측이 가능하고 실험 목적에 따라 다양한 격자간격을 이용하여 계측의 정밀도를 조절할 수 있습니다. 반면에 이미지를 얻기 위해서 고가의 장비와 엄격한 실험 환경이 요구되고 특히 높은

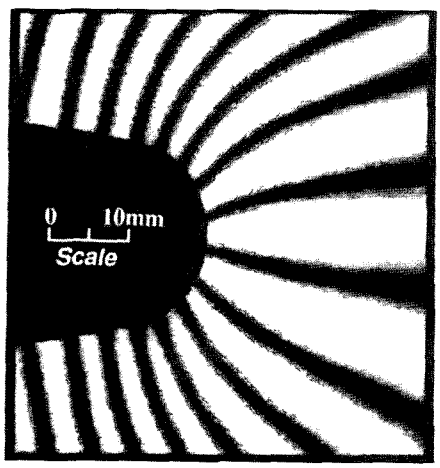

사진 1. 인장 파괴 하중을 받는 알루미늄 시편의 균열 선단에서의 연직 변위

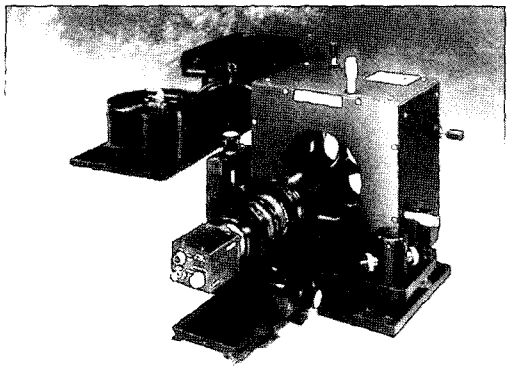

사진 2. Moire Interferometry의 기본 장비구성
(ESM Technology, 2004)

정밀도를 필요로 하는 실험인 경우 격자의 제작과 설치에 따른 기술적 어려움이 있습니다. 사진 2는 전형적인 장비구성을 보여주고 있습니다. 이미지를 얻기 위한 CCD(Couple Charged Device) 디지털 카메라는 두 개의 줌 렌즈를 사용하여 균열선단의 파괴영역(Fracture Process Zone)과 같은 국부적인 정밀도를 요구하는 실험에 적용하기도 합니다.

본 기법은 압축을 받는 합성기둥의 응력 해석, 인장을 받는 금속의 피로 파괴 해석, 전자회로기판의 열에 의한 변형 해석, 그리고 합성섬유의 변형 특성 분석과 같은 폭넓은 재료와 실험 환경에 응용할 수 있습니다.

2. Grid Method

시편 표면의 정방형 격자가 이루는 점들이 초기상태의 기준점(초기이미지의 좌표)으로부터 이동하는 양을 이용해서 평면 변위를 계측하는 이미징 기법입니다.

정방향 격자는 수술용 칼이나 두께가 얇은 펜을 이용해서 시편 표면의 수직, 수평선으로 구성합니다. 격자 간격은 실험 후 변형도 연산을 위한 계측 범위(gauge length)로 사용됩니다. 일반적으로 아스팔트 시편의 파괴역학 실험에 사용되는 격자의 최소 간격은 4에서 5㎜ 정도입니다. 본 기법은 비교적 실험장비가 간단하고 손쉽게 계측 및 해석이 가능하지만, 아래와 같은 단점이 있습니다.

- 시편 준비 과정이 복잡하고 시간이 많이 소요
- 시험자의 숙련도에 따른 해석 결과 차이 발생
- 각 실험당 정해진 계측 범위(fixed gauge length)

3. DIC(Digital Image Correlation)

Grid 혹은 Speckle method와 그 이론적 기초를 같이하는 DIC는 University of South Carolina의 Michael A. Sutton에 의해서 처음 실험역학분야에 소개되었고 그 후 많은 기술적 발전과 응용분야를 넓히고 있습니다. DIC의 기본개념은 시편의 변형전의 이미지와 변형후의 이미지들의 표면에 존재하는 빛의 강도(light intensity)에 대한 정보 변화를 비교해서 최적화 기법을 이용, 물리적인 변위와 변형도를 구하는 것입니다. 본 기법의 기본 장비는 일반적으로 사진 3에서와 같이 CCD 카메라, 이미지용 A/D converter, 조명, 변위와 변형도 연산을 위한 소프트웨어로 구성되어 있습니다.

기본적으로 본 계측시스템은 주로 면내(in-plane) 변위를 측정할 용도로 개발되었으나 현재에는 CCD 카메라 2대를 이용해서 면외(out of plane)변위까지

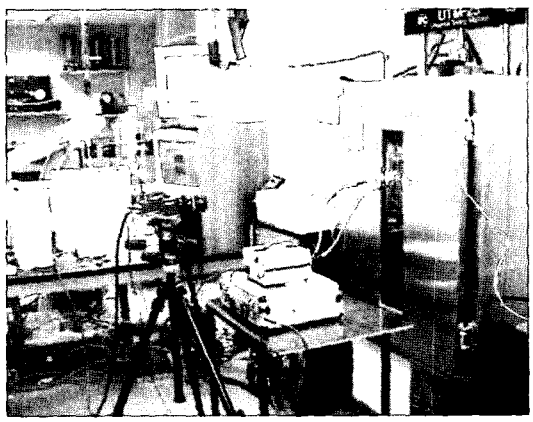

사진 3. DIC 기본 장비구성(Seo *et al*, 2001)

정확하게 계측할 수 있는 3D 시스템이 이미 상용화 되어 있습니다. 이 기법의 적용대상도 콘크리트, 알루미늄, 티타늄, 고무 등 다양하고, 특히 아스팔트 혼합물과 같이 비선형 거동 특성을 보이는 재료의 국부적 물성 검토에 적합한 계측 시스템입니다.

4. DIC의 응용-간접인장 실험 (Indirect Tensile Test on asphalt materials)

포장이 받는 실재 응력 상태(biaxial stress state)를 가장 근사하게 모사하고 현장 채취 시편에 대한 물성 평가를 할 수 있다는 장점으로 인해서 간접인장 실험은 국내외 많은 시험소 및 연구기관에서 시행되고 있습니다. 하지만 간접인장 실험은 직접인장 실험에 비해 실험자의 부주의로 인한 오차(rocking and tilting)가 발생하기 쉽고, 시편의 직경과 최대골재 크기를 고려한 계측 길이(gauge length) 선정에 대한 적정성 논란이 계속되고 있는 실험이기도 합니다. 본 장에서는 DIC를 이용해서 간접인장을 받는 시편의 전 단면 해석과 불안정한 하중재하로 인한 시편의 초기 회전에 관한 측정실험 결과를 소개하고자 합니다.

사진 4는 각각 간접인장 강도 실험을 위해서 2개의 수평, 수직 LVDTs (miniature type)를 시편의 후면에 설치한 모습과 CCD 카메라로 촬영한 시편 전면의 모습입니다. 시편의 직경은 150mm, 두께 38mm이고 LVDT 계측 길이는 50.8mm를 사용해서 최대 골재와 상하 재하판의 영향을 최소화 하고자 하였습니다. 아울러 시편의 회전을 최대한 억제하기 위해서 SHRP-LGD (Loading Guide Device)를 이용하여 하중을 재하하였습니다. 사진 5부터 사진 7은 각각 시편 전면에 발생한 수평, 수직, 전단 변형도의 DIC 이미지로 왼쪽 이미지부터 시작하여 변형이 점차 증가하면서 macro균열이 발생하기 바로 직전의 맨 오른쪽 이미지까지 시편 전 영역의 변형을 잘 보여주고 있습니다. 맨 오른쪽 그림의 가운데 사각형은 실재 LVDT 계측과 비교하기 위한 영역(50.8×50.8mm)으로 재하판(폭 12mm)으로 인해 발생한 시편의 상하 국부변형이 LVDT 계측에 미치는 영향 여부도 아울러 관찰할 수 있습니다.

간접인장 실험에서 발생하는 시편의 회전(rocking)은 주로 시편의 부적절한 설치와 하중 재하장비(loading fixture)의 근본적 문제에 의해서 악화되는 경우가 많습니다. 사진 8은 Resilient Modulus Fixture(MTS)을 사용하여 간접인장 강도 실험시 초기에 시편 전체가 시계반대방향으로 회전한 예를 보여주고 있습니다. 이미지의 파란색은 시편이 왼쪽으로 이동하는 영역을 의미하고 빨간색은 오른쪽으로 이동하는 부분입니다. 이러한 시편의 회

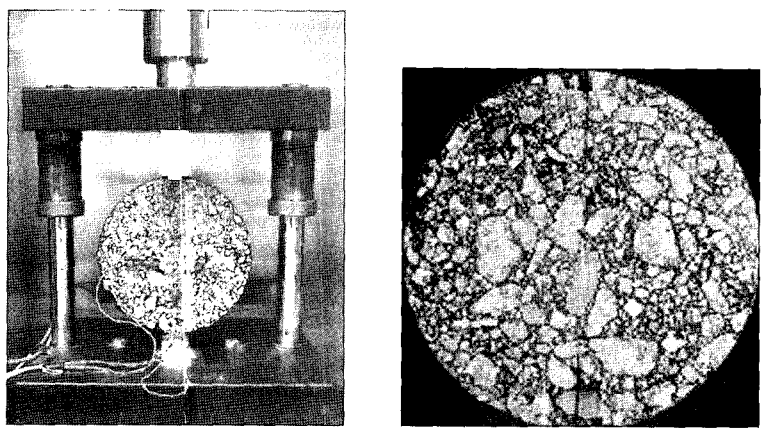

사진 4. 간접인장 실험 전경과 시편 전면의 이미지

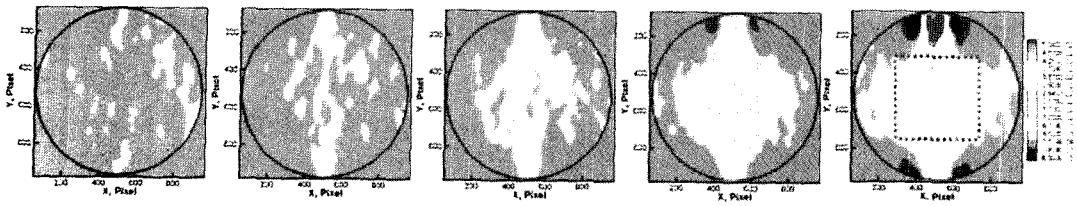

사진 5. 수평 변형도 DIC 이미지

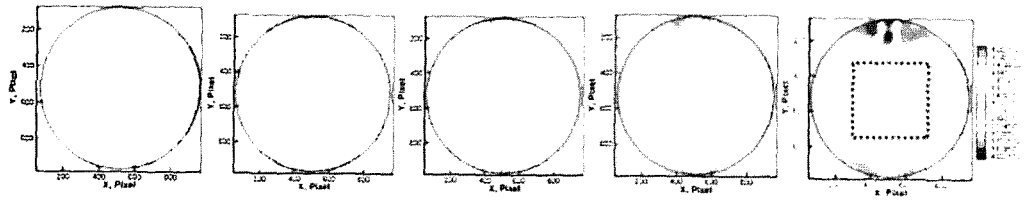

사진 6. 수직 변형도 DIC 이미지

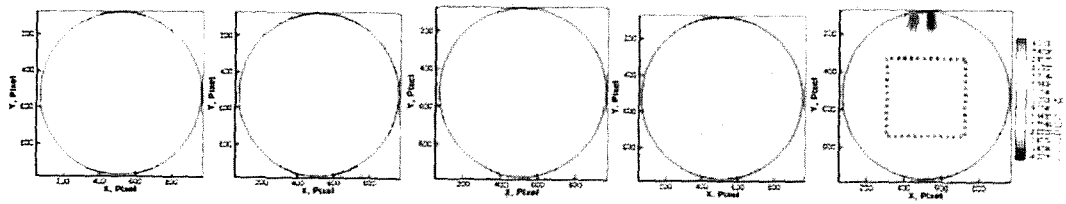

사진 7. 전단 변형도 DIC 이미지

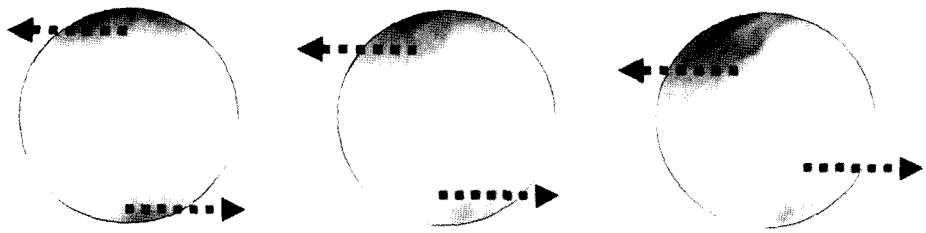

사진 8. 시편의 초기 회전을 보여주는 DIC 이미지

전은 대부분의 경우 육안으로 그 존재 유무를 관찰하기가 어려운 경우가 많습니다. DIC와 같은 전 단면 계측 특성을 이용해서 그 존재 유무를 파악할 수 있음은 물론이고 각 실험의 회전량을 고려하여 보다 정확한 해석 결과를 얻을 수 있습니다.

이와 같이 이미징 기법을 이용한 물성 분석은 기존의 LVDT의 단점인 부착성(contact), 제한된 계측길이/영역의 한계를 극복하고 보다 정확하고 이해하기 쉬운 결과를 제공할 수 있으며 우수한 품질의 이미지를 획득 할 수 있는 최소한의 실험 조건만 만족된다면 그 적용범위는 무한 할 것으로 생각됩니다.