

<응용 논문>

디지털 이미지 상관법 기반 에어백 원단 인장 시험 분석 시스템 개발 및 검증

한성민¹⁾ · 진형빈¹⁾ · 강민규²⁾ · 허남수¹⁾ · 이치범^{*1)}

서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과¹⁾ · 현대모비스 통합시스템해석팀²⁾

Development and Validation of a Digital Image Correlation-Based Tensile Testing System for Airbag Fabrics

Seongmin Han¹⁾ · Hyungbin Jin¹⁾ · Mingyu Kang²⁾ · Namsu Huh¹⁾ · Chibum Lee^{*1)}

¹⁾Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

²⁾Integrated System Simulation Team, Hyundai Mobis, 17-2 Mabuk-ro, 240 beon-gil, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 16891, Korea

(Received 24 June 2025 / Revised 7 August 2025 / Accepted 9 August 2025)

Abstract : This study outlines the development and validation of a Digital Image Correlation (DIC) system designed to conduct tensile analysis on airbag fabrics. The proposed system combines a hardware setup using an industrial camera, lens, and polarizing filter to reduce optical noise, and a software platform built with the open-source library μ DIC. A user-friendly GUI was implemented using PyQt5. The system employs a Global DIC algorithm to enable continuous displacement field extraction, supported by preprocessing and visualization tools. Tensile tests were conducted on airbag fabrics and aluminum specimens to evaluate system accuracy. When compared to a commercial DIC system, the proposed system demonstrated maximum strain differences of 0.11 % for airbag fabrics and 0.06 % for metal specimens. Furthermore, stress - strain curves generated by the developed software showed strong agreement with conventional extensometers. These results confirm the potential of the proposed system for accurate mechanical property evaluation and its applicability across various materials.

Key words : Digital image correlation(디지털 이미지 상관), Airbag(에어백), Tensile test(인장 시험), Video extensometer(비디오 신율계), Displacement field(변위장), Strain field(변형률장)

1. 서론

자동차 산업의 발전에 따라 보다 안전하고 신뢰성이 높은 차량에 대한 요구가 증가하고 있으며, 이 중 교통사고로 인한 탑승자의 인명 피해와 상해를 최소화하는 기술은 핵심적인 연구 분야로 자리 잡고 있다.^{1,2)} 다양한 안전 시스템 중 에어백은 탑승자의 생명을 보호하는 주요 안전장치로, 그 성능을 확보하기 위해서는 원단의 기계적 물성을 정밀하게 평가하는 것이 필수적이다.³⁾ 에어백 원단, 즉 섬유 원단의 물성을 평가하기 위한 다양한 시험 방법이 존재하며, 이 중 인장 시험은 재료의 항복 강도, 최대 인장 강도 등 기본적인 기계적 특성을 평가할 수 있는 대표적인 방법이다. 이에 대한 ISO 기준도 존재하며, 표준화된 방법으로 활용되고 있다.⁴⁾

그러나 섬유 시편의 기계적 물성을 측정할 때는 여러

가지 제한 사항이 발생한다. 섬유 소재는 연성이 크고 씨줄과 날줄로 이루어진 격자 구조를 가지고 있어, 각 실이 풀릴 때마다 서로 다른 파단 양상을 보이며 비선형적 거동이 강하게 나타난다.^{5,6)} 이러한 구조적 특성으로 인해 금속과 달리 국소적인 변형이 빈번하게 발생한다. 기존의 변형 측정을 위해 스트레인 게이지나 신율계 등이 널리 사용되고 있으나, 섬유와 같은 재료에는 적용이 어렵다는 단점이 있다. 또한, 이러한 계측 장비는 접촉식 방식이기 때문에 섬유 시편 표면에 부착하기 어렵고, 고온·고압과 같은 극한 작동 환경에서는 사용이 제한된다는 한계도 존재한다.

이러한 문제점을 극복하기 위한 대안으로 비접촉식 계측 기술인 디지털 이미지 상관법(Digital Image Correlation, DIC)이 주목받고 있다.^{7,8)} DIC는 표면에 형성된 무작위

*Corresponding author, E-mail: chibum@seoultech.ac.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

스펙클 패턴(Speckle pattern)의 변화를 카메라로 촬영하고, 영상 간의 상관관계를 분석함으로써 물체의 변형 및 변위를 고해상도로 측정할 수 있는 기술이다. 즉, 카메라를 이용하여 시편 전체를 촬영함으로써 국부가 아닌 전체 영역의 변위 및 변형률을 동시에 측정할 수 있다. DIC는 1980년대에 처음 등장하여 빠르게 발전하였으며,⁹⁾ 단일 고정 카메라를 이용해 평면상의 변형을 측정하는 2D-DIC¹⁰⁾에서 시작하여, 스테레오 비전 시스템을 활용한 3D-DIC로 발전하였다.^{11,12)} 더 나아가 초고속 카메라를 결합하여 진동 및 충격을 분석할 수 있는 고속 3D-DIC,^{13,14)} 현미경 영상과의 융합을 통해 나노미터 수준의 해상도를 측정할 수 있는 마이크로/나노 DIC^{15,16)} 등으로 확장되고 있다. 이처럼 최근에는 하드웨어 및 연산 기술의 발달에 힘입어 다양한 연구 분야에서 DIC 기술이 활발히 적용되고 있으며, 기존 접촉식 계측기를 대체할 수 있는 유망한 기술로 각광받고 있다.

본 연구에서는 Python 기반의 오픈소스 라이브러리인 μ DIC¹⁷⁾을 활용하여 에어백 원단 인장 시험 분석에 적용 가능한 DIC 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 Global DIC 알고리즘을 기반으로 연속적인 변위장 추출이 가능하도록 구성되었으며, 에어백 원단의 격자 구조로 인한 광학적 노이즈를 줄이기 위한 필터링 기능도 포함하였다. 또한 금속 시편에 대한 실험을 추가로 수행하여, 개발된 프로그램의 일반적인 물성 측정 성능도 함께 검증하였다. 본 연구의 목적은 상용 장비 없이도 정밀한 변형률 분석이 가능한 DIC 시스템을 구현하는 데 있으며, 이는 향후 다양한 소재의 기계적 특성 분석에도 활용될 수 있는 기반을 제공할 수 있다.

2. Digital Image Correlation

2.1 Digital Image Correlation(DIC) 원리

DIC는 카메라를 이용하여 물체 표면에서 발생하는 변형을 비접촉 방식으로 측정하는 기술이다. 물체 표면에 인공적으로 스펙클(Speckle) 패턴을 형성하고, 이를 변형 전후의 상태로 나누어 카메라로 촬영한다. 스펙클 패턴은 표면의 변형과 함께 이동하며, 표면 전체에 걸쳐 밝기 대비가 무작위한 특성을 가지므로 변형 전후 이미지에서 특정 지점을 정확하게 추적할 수 있게 한다. 이 과정은 Fig. 1과 같다.

정확한 표면 변위 측정을 위해서는 표면에 형성된 스펙클 패턴의 특징점을 정밀하게 추적하는 것이 필수적이다. DIC는 두 이미지 간 밝기 차이를 최소화하는 최적화 과정을 수행하여 픽셀 단위의 세밀한 변위를 추출한다. 여기서 비용 함수(Cost function)로 사용되는 편차제

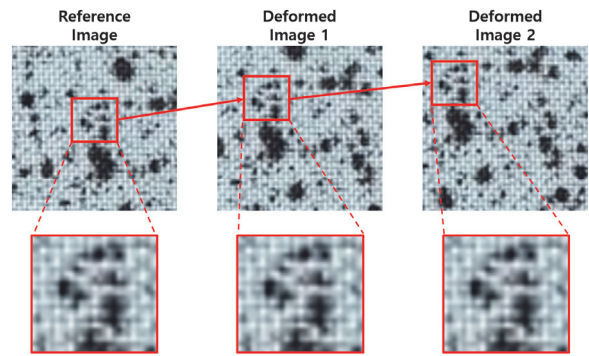


Fig. 1 Process of Digital Image Correlation(DIC)

곱합(Sum of Squared Difference, SSD), C_{SSD} 는 식 (1)로 표현된다.

$$C_{SSD} = \sum_i \sum_j [g(x'_i, y'_j) - f(x_i, y_j)] \quad (1)$$

여기서, g 는 변형 후(현재) 프레임을 나타내고, f 는 변형 전(기준) 프레임을 나타낸다. x_i, y_j 와 x'_i, y'_j 는 각각 프레임 내 이미지 좌표계를 나타내며, 식 (2)와 같이 비용 함수를 최소화하여 정확한 변위를 추정하게 된다.

$$\min_{\Delta x, \Delta y} C_{SSD} \quad (2)$$

이때 $\Delta x = x_i - x'_i, \Delta y = y_j - y'_j$ 로 표현된다. 즉, 이 최적화 과정을 통해 변형 후 이미지에서 특징점의 픽셀 이동량을 얻을 수 있다.

준정적 인장 시험과 같은 경우에는 프레임 간 실제 표면 변위가 수 마이크로미터 수준으로 매우 작다. 이러한 변위는 카메라 한 픽셀의 물리적 거리보다 훨씬 작은 값이기 때문에, 픽셀 단위보다 작은 변위를 측정하기 위한 서브 픽셀(Sub-pixel) 변위 계산 방법이 필수적이다. DIC에서는 서브 픽셀 단위 변위를 정확히 구하기 위해 보간(Interpolation) 기법을 사용한다.¹⁸⁾ 즉, 픽셀 간의 중간값을 보간하여 생성한 뒤 변위를 매칭함으로써 더 높은 해상도의 변위 측정이 가능하다.

시험 대상 표면에서 관심 영역(Region of Interest, ROI)을 설정하고 이 영역을 일정한 간격의 작은 구역으로 나누어 각 구역의 변위를 계산하면, 전체적인 변위장(Displacement field)을 얻을 수 있다. 변위장은 관심 영역 내 각 구역의 변위를 전역적으로 평가할 수 있도록 하며, 이를 이용해 변형률장(Strain field)을 계산할 수 있다. 변위장을 \mathbf{U} 라 할 때, 변형 구배 텐서(Deformation gradient tensor) \mathbf{F} 는 식 (3)과 같이 미분을 통해 얻을 수 있다.

$$F = I + \nabla U \quad (3)$$

얻어진 변형 구배 텐서로부터 Green-Lagrangian¹⁹⁾ 계산을 통해서 변형률장으로 변환할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2}(F^T F - I) \quad (4)$$

이러한 과정을 통해 DIC는 관심 영역 전체의 변형 정도를 정량적으로 평가하고 시각화할 수 있으며, 비디오 신율계(Video extensometer)와 같은 방식으로 연신율을 측정하거나, 대상 시편의 취약점을 확인하는 용도로 활용될 수 있다.

2.2 Global, Local DIC

DIC는 하위 집합(subset) 기반의 Local DIC²⁰⁾ 방법과 유한 요소(Finite element) 기반의 Global DIC^{21,22)} 방법으로 나뉜다. Local DIC는 관심 영역을 여러 개의 하위 집합으로 나누고, 형상 함수를 이용하여 각 하위 집합에서의 변형을 독립적으로 계산하는 방식이다. 반면, Global DIC는 관심 영역을 노드와 요소로 구성된 질점-요소 단위로 나누고, 노드에서의 변형을 통해 요소의 변형을 동시에 처리한다. 이 두 방식의 차이는 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

Local DIC는 Global DIC 방식에 비해 상대적으로 구현이 간단하며, 개별 지점에 대한 독립적인 최적화 과정을 거치므로 높은 정확도를 얻을 수 있다. 또한 병렬 처리를 통해 효율성을 크게 향상시킬 수 있는 장점을 지니기 때문에, 대부분의 상용 시스템 및 실제 응용 분야에서는 Local DIC가 널리 적용되고 있다. 그러나 Global DIC는 요소 기반 방법의 특성상 변위장의 연속성 확보에 강점을 가지며, 이에 따라 보다 우수한 결과를 제공할 수 있다는 연구 결과들도 보고되고 있다.²³⁾

본 연구에서는 Global DIC 방식을 활용하여 프로그램을 제작하였다. 특히 Python 기반의 오픈소스 Global DIC

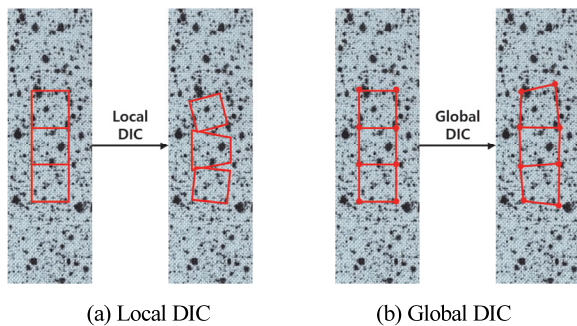


Fig. 2 Comparison between local DIC and global DIC

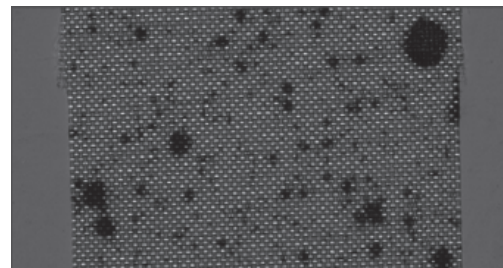
라이브러리인 μ DIC을 기반으로 하여, 이를 에어백 원단의 인장 시험 분석에 적합하도록 프로그램을 구성하였다.

3. 시스템 개발

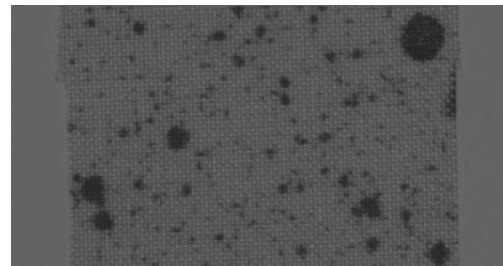
3.1 하드웨어 구성

DIC 분석을 수행하기 위해서는 스펙클 패턴의 이미지를 촬영할 수 있는 하드웨어 시스템이 필수적이며, 본 연구에서는 실험 조건과 환경을 고려하여 카메라와 렌즈를 선정하고 시스템을 구축하였다.²⁴⁾ 카메라는 5메가 픽셀(Mega pixel), 2448 × 2048의 해상도를 가지고, 최대 36 FPS(Frame Per Second)의 성능을 가진 U3-3280CP(IDS사, 독일)를 사용하였다. 카메라의 FPS는 에어백 원단의 준정적 인장 시험에서의 측정을 고려하였다. 렌즈는 12 mm의 고정 초점거리를 가진 M1228-MPW3(Computar사, 일본)를 채택하였다. 이 카메라와 렌즈의 조합을 통해, 카메라와 측정 대상 사이의 작업 거리(Working Distance, WD)를 300 mm로 설정하였을 때, 약 203 × 170 mm 크기의 시야각(Field of View, FOV)을 확보할 수 있다. 이는 한 픽셀에 약 0.083 mm의 해상도를 가져 에어백 원단의 국부 변형을 추정할 수 있다. 그리고 ISO 규격에 따른 섬유 시편 최대 길이 200 mm를 측정할 수 있음을 의미한다.

렌즈 끝단에는 조명 반사로 인한 측정 정확도 저하를 방지하기 위해 선형 편광 필터 PR032-M27(MidOpt사, 미국)을 장착하였다. 특히 에어백 원단은 표면의 빛 반사로



(a) Without polarizing filter



(b) With polarizing filter

Fig. 3 Effect of applying a polarizing filter on fabric specimen

인해 섬유 의 격자 구조가 이미지에서 두드러지게 나타나기 때문에 이미지 처리 과정에 방해가 될 수 있다. 편광 필터를 사용한 경우, Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 섬유 표면의 격자무늬가 효과적으로 제거되는 것을 알 수 있다.

추가적으로 삼각대와 조명을 활용하였다. 삼각대는 카메라를 견고하게 고정하고 외부 진동의 영향을 최소화할 수 있도록 안정성이 뛰어난 제품을 선정하는 것이 중요하므로, 본 연구에서는 알루미늄 합금으로 제작된 헤비듀티(Heavy-Duty) 삼각대를 사용하였다. 조명은 카메라의 노출 시간을 줄이고, 이미지와 스펙클 패턴 간 대비를 높이기 위해 필수적이다. 따라서 55 W 출력의 LED 조명을 삼각대와 결합하여 사용하였다. 전체 하드웨어 구성은 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

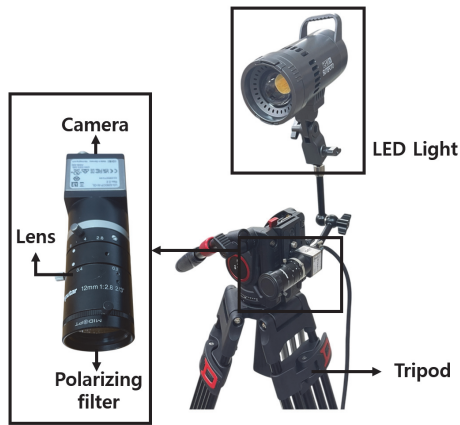


Fig. 4 Hardware configuration

3.2 GUI 소프트웨어 구성

본 연구에서는 Python 기반의 PyQt5와 μ DIC 라이브러리를 사용하여 DIC 분석을 위한 GUI(Graphic User Interface)를 제작하였다. PyQt5는 C++ 기반의 GUI 개발 프레임워크인 Qt를 Python 환경에서 활용할 수 있도록 지원하는 프레임워크로, 직관적이고 효율적인 GUI 제작 도구를 제공한다.

구성된 메인 윈도우는 Fig. 5와 같다. 윈도우 왼쪽 하단에서는 현재 이미지 세트를 확인할 수 있고, 왼쪽 상단에서는 분석 진행 상태와 변위/변형률 종류를 선택할 수 있다. 그리고 오른쪽 결과 화면에서는 각 프레임별 변위장과 변형률장을 시각적으로 표시하며, 사용자는 프레임임을 변경하면서 원하는 결과를 확인할 수 있다. 또한 관심 영역 내의 특정 부분을 클릭하면, 최초 프레임과 비교한 국소 변위 및 변형률 값을 즉시 확인할 수 있도록 구성하였다.

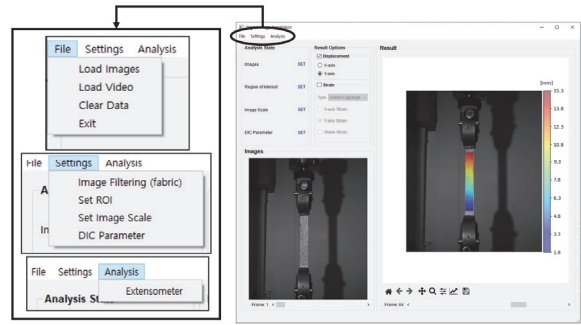


Fig. 5 Main window of DIC program

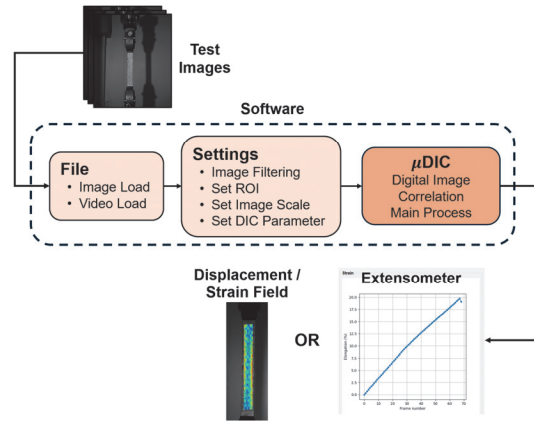


Fig. 6 Schematic of the developed DIC software

DIC 분석 과정은 메인 윈도우의 상단 메뉴바를 통해 단계적으로 수행되며, 그 과정은 Fig. 6과 같다. 왼쪽 메뉴에서부터 오른쪽 메뉴까지 순차적으로 진행하도록 설계하였다. 첫 번째 단계인 ‘File’ 탭에서는 이미지 또는 동영상 프레임 단위로 불러와 분석할 이미지 세트를 생성할 수 있다.

두 번째 단계인 ‘Settings’ 탭에서는 DIC 분석을 위한 세부 설정이 가능하다. 이미지 필터링 모듈에서는 원단의 격자 무늬와 같은 불필요한 광학적 노이즈를 제거하기 위해 가우시안 블러(Gaussian blur)를 적용하여 이미지 처리 효율을 높였다. ROI(Region of Interest) 설정 모듈에서는 분석 대상의 관심 영역을 지정하고, 요소 및 질점의 밀도와 분포를 정의할 수 있다. 이미지 스케일 지정 모듈에서는 픽셀 단위를 실제 길이 단위(mm)로 변환하는 이미지 스케일(mm/pixel)을 계산할 수 있으며, DIC 파라미터 지정 모듈에서는 분석 정확도를 높이기 위한 다양한 파라미터를 세부적으로 조정할 수 있다.

에어백 원단은 코팅된 표면으로 인해 빛이 반사되며, 이에 따라 이미지 처리 성능이 저하될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 이미지 필터링 모듈이 필요하다.

기존의 상용 소프트웨어에서는 수동으로 필터링 값을 설정할 수 없지만, 본 연구에서 개발한 소프트웨어는 가우시안 블러의 파라미터를 조절함으로써 필터링 정도를 사용자 요구에 맞게 변경할 수 있도록 설계되었다. 이미지 필터링 모듈의 사용자 인터페이스는 Fig. 7과 같다.

가우시안 블러 필터 적용이 에어백 원단 시편의 DIC 분석에 효과적인지 평가하기 위해, 해당 필터 적용 여부에 따른 변형률장 결과 차이를 비교하였다. Fig. 8(a)는 가우시안 블러를 적용하지 않은 이미지, Fig. 8(b)는 가우시안 블러를 적용한 이미지의 y방향 변형률장 결과이다. 두 변형률장 모두 동일 실험 영상의 동일 프레임의 결과를 나타낸다. 필터가 적용되지 않은 이미지에서는 빛 반

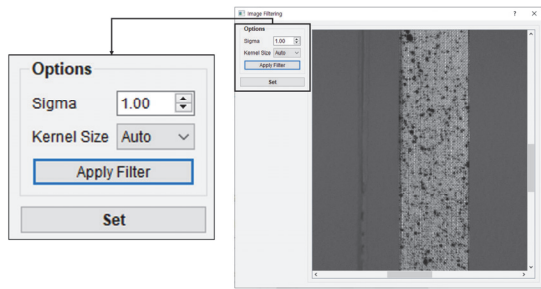
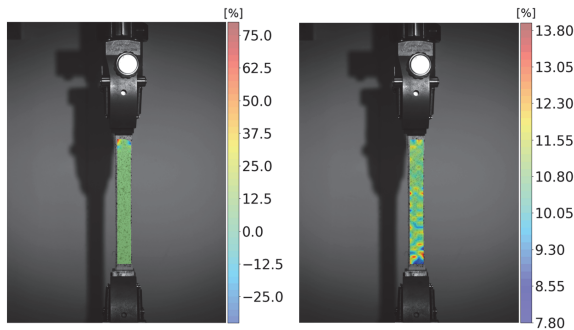


Fig. 7 Image filtering module interface



(a) Without Gaussian blur (b) With Gaussian blur

Fig. 8 Effect of Gaussian blur on DIC results

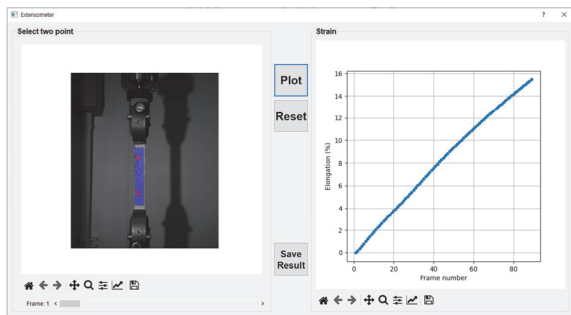


Fig. 9 Extensometer function in DIC program

사로 인해 변형률장이 정상적으로 생성되지 않은 것을 볼 수 있다. 이를 통해 가우시안 블러의 적용이 에어백 원단 시편의 분석 정확도와 안정성 향상에 기여함을 확인할 수 있었다.

마지막 단계인 ‘Analysis’ 탭에서는 계산된 DIC 결과 데이터를 기반으로 연신율을 측정할 수 있는 신율계 기능을 추가하였다. 사용자는 왼쪽의 이미지에서 관심 영역 내 두 지점을 선택하여 Plot 버튼을 누르면, 오른쪽 화면에서 프레임별 연신율 변화를 그래프로 확인할 수 있으며, 필요시 데이터를 CSV 파일 형태로 저장할 수 있다. 신율계 기능을 활용한 결과는 Fig. 9에서 확인할 수 있다.

4. 실험 및 결과 분석

4.1 에어백 원단 인장 실험

본 연구에서 개발한 DIC 시스템의 성능을 검증하기 위해 에어백 원단을 대상으로 인장 시험을 시행하고, 그 결과를 상용 DIC 장비와 비교하였다. 상용 DIC 장비로는 ARAMIS Adjustable 카메라 시스템과 전용 소프트웨어인 ZEISS INSPECT Correlate 2023으로 구성된 ZEISS 사(독일)의 ARAMIS 시스템을 사용하였다.

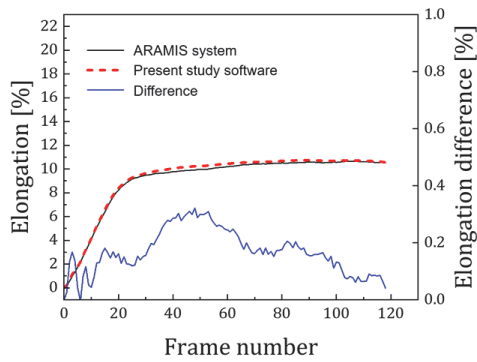
인장 시험은 E3000(Instron사, 미국) 인장 시험기를 이용하였으며, 시편을 기계식 미끄럼 방지 그리프를 통해 고정하여 시험하였다. 시편은 길이 250 mm, 폭 25 mm로 재단하고, 스트립법을 적용하여 인장 시험을 시행하였다. 이때 인장 속도는 100 mm/min으로 설정하였으며, 파지 거리는 150 mm로 지정하였다. 또한 시편 표면에는 검은 색 스프레이를 분사하여 스펙클 패턴을 형성하였다. 실험 환경은 Fig. 10과 같다.

에어백 원단을 처리하기 위해 가우시안 블러의 파라미터 σ 를 1.3으로 설정하였고, ROI를 가로 방향으로 5개,

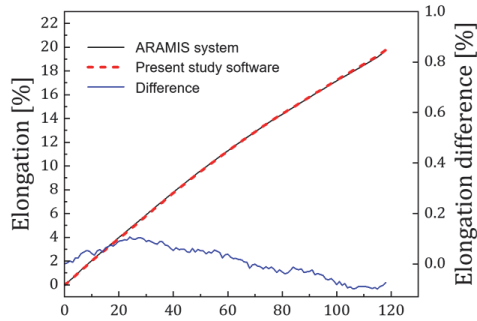


(a) Present study (b) ARAMIS system

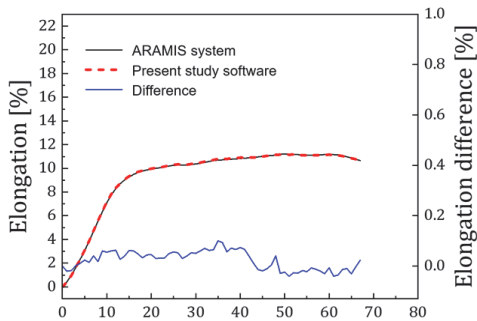
Fig. 10 Experimental setup for airbag specimen test



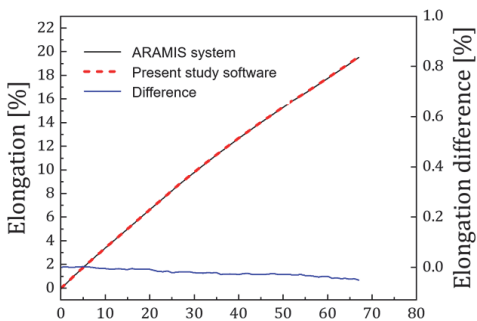
(a) Present study system (x-axis)



(b) Present study system (y-axis)



(c) ARAMIS system (x-axis)

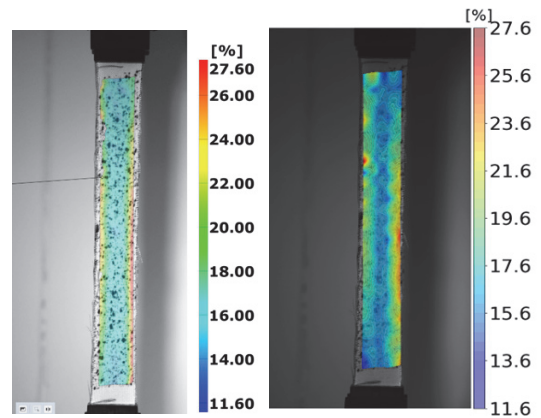


(d) ARAMIS system (y-axis)

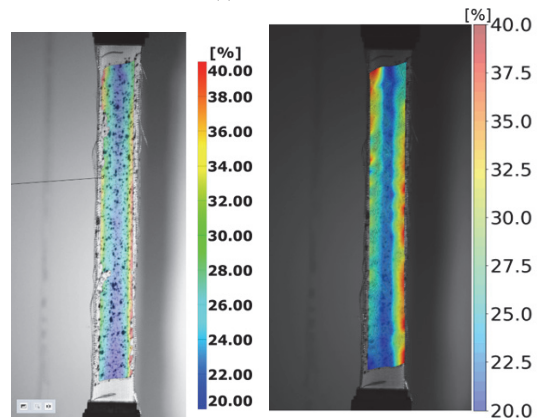
Fig. 11 Comparison of elongation results in airbag specimen test

세로 방향으로 35개의 요소를 갖도록 하여 총 175개의 요소로 설정하였다. ARAMIS 시스템의 파라미터 중 서브셋(Subset)의 크기는 19픽셀로 설정하였고, 서브셋의 간격은 16픽셀로 설정하였다. 두 소프트웨어 모두 큰 변형을 계산할 수 있도록 직전 프레임과의 상관을 통해 변위를 계산하였다.

Figs. 11(a), (b)는 본 연구의 하드웨어로 촬영한 영상을 이용하여 개발한 소프트웨어와 ARAMIS 시스템의 소프트웨어를 통해 분석한 결과를 비교한 것이다. 또한, Figs. 11(c), (d)는 ARAMIS 시스템으로 촬영한 영상을 두 소프트웨어로 분석한 결과이다. 두 비교 실험 모두 각 소프트웨어의 신율계 기능을 이용하여 동일한 시편 상 두 지점 간의 연신율을 측정하였다. x축 방향(시편 폭 방향)과 y축 방향(시편 길이 방향) 모두 측정하여 검증하였다. Figs. 11(a), (b), (c), (d)에서 각각 평균 0.17, 0.05, 0.04, 0.02 %의 차이를 확인하였고, 이를 통해 제작한 소프트웨어와 하드웨어의 교차 검증을 하였다. Fig. 12는 ARAMIS 시스템의 촬영 영상을 기반으로 각 소프트웨어



(a) 50th frame



(b) 67th frame

Fig. 12 Strain field comparison in airbag specimen test: ARAMIS system(left) and present study(right)

에서 얻은 y방향 변형률장을 비교한 것으로, 두 소프트웨어에서 거의 유사한 변형률장 결과를 확인할 수 있었다. 상용 소프트웨어의 알고리즘을 구체적으로 알 수 없으므로 정확한 비교는 어려우나, 픽셀 설정의 차이나 데이터 형식 및 소수점 처리 방식의 차이로 인한 오차로 판단된다. 따라서 본 연구에서 개발한 DIC 시스템의 하드웨어와 소프트웨어가 기존의 상용 DIC 시스템에 준하는 높은 정확성을 가짐을 검증하였다.

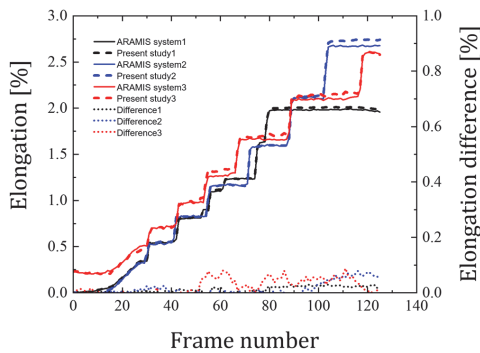
4.2 금속 시편 인장 실험

본 연구에서 개발한 DIC 프로그램의 범용성과 실제 물성 측정 성능을 평가하기 위해 알루미늄 금속 시편을 이용한 인장 시험을 추가로 시행하였다. 시편은 두께 5 mm의 알루미늄 판재를 사용하였으며, 시편의 파지 거리는 270 mm, 폭은 40 mm로 설정하였다. 인장 시험은 MINOS-100S(MTDI사, 한국) 인장 시험기를 이용하였으며, 인장 속도는 3 mm/min으로 설정하였다. 에어백 원단 시험과 동일하게 금속 시편의 표면에도 검은색 스프레이를 분사하여 스펙클 패턴을 형성하였다.

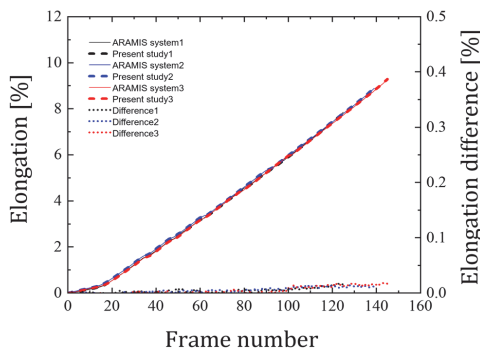
금속 인장 시험에서는 가우시안 블러를 통한 필터 처

리가 필요하지 않기 때문에, 가우시안 블러를 제외하고 4.1의 에어백 원단 실험에서 사용한 소프트웨어의 파라미터를 그대로 사용하였다.

총 세 번 인장 시험을 진행하였고, 각 인장 실험을 두 장비로 동시에 촬영하였다. Fig. 13은 개발한 카메라로 촬영한 동일한 영상에 대해 본 연구의 소프트웨어와 ARAMIS 시스템의 소프트웨어로 각각 측정된 x축 방향, y축 방향의 연신율 결과를 비교한 그래프이다. 두 소프트웨어 모두 시편에서 동일한 두 지점을 선택하여 연신율을 측정하였으며, 동일한 색의 선은 같은 실험 영상임을 나타낸다. Fig. 13(a)는 x축 방향의 연신율 측정 결과이고, 각 소프트웨어는 평균적으로 0.06 %의 연신율 차이를 갖는다. Fig. 13(b)는 y축 방향의 연신율 측정 결과이고, 마찬가지로 평균 0.01 %의 연신율 차이를 갖는다. Fig. 14는 두 번째 인장 시험의 각 소프트웨어에서 얻은 y방향 변형률장을 비교한 것이다. 이 결과들을 통해 금속 소재의 시편에서도 본 연구에서 개발한 DIC 프로그램이 높은 정확도를 나타냄을 확인하였다.

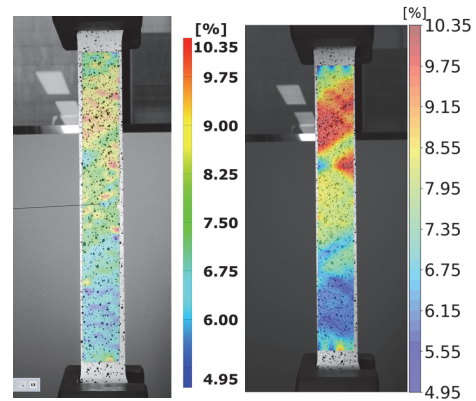


(a) Result of x-axis

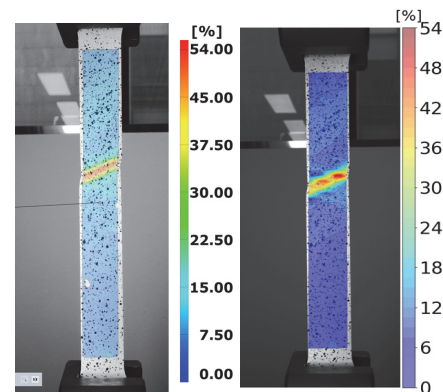


(b) Result of y-axis

Fig. 13 Comparison of elongation results in aluminum specimen test



(a) 121st frame



(b) 138th frame

Fig. 14 Strain field comparison in aluminum specimen test: ARAMIS system(left) and present study(right)

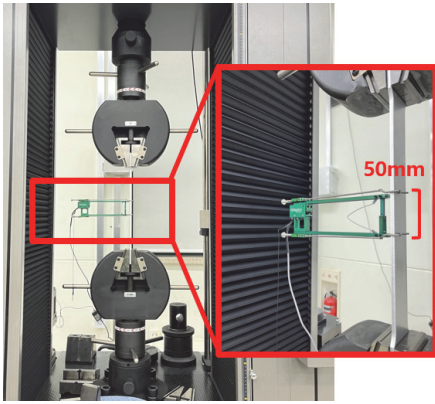


Fig. 15 Experimental setup for using extensometer

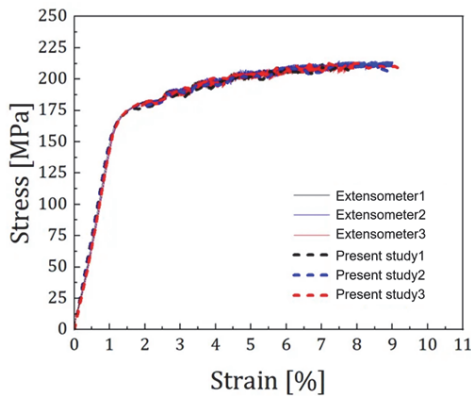


Fig. 16 Comparison of strain-stress curve

추가로 물성 측정 정확성을 검증하기 위해 기존의 접촉식 신율계를 이용한 응력-변형률 곡선(stress-strain curve)과 본 연구의 DIC 프로그램 신율계 기능을 이용한 응력-변형률 곡선을 비교하였다. 기존 접촉식 신율계로는 Model 3542L(Epsilon사, 미국)을 사용하였으며, 시험 조건은 앞선 실험과 동일하게 유지하였고, 접촉식 신율계의 표점 거리는 50 mm로 설정하였고, 실험 환경은 Fig. 15와 같다. 세 번의 인장 실험을 추가하여 접촉식 신율계의 데이터를 얻은 뒤, 앞선 DIC 실험 결과와 비교하였다. 각 방법으로 얻은 변형률 측정 결과를 이용하여 작성한 응력-변형률 곡선을 비교한 결과는 Fig. 16과 같다. 개발한 DIC 프로그램으로 얻은 곡선이 기존 접촉식 신율계와 동일한 경향성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 개발한 DIC 프로그램이 다양한 재료의 물성 측정에도 신뢰성 있게 활용될 수 있음을 검증하였다.

5. 결론

본 연구에서는 에어백 원단의 인장 시험 분석을 위한

DIC 프로그램을 개발하고, 이를 실험적으로 검증하였다. 개발에 앞서 DIC의 원리와 분석 과정을 설명하고, 대표적인 두 가지 방식인 Local DIC와 Global DIC의 차이점을 비교하였다.

하드웨어 구성에서는 산업용 카메라 및 렌즈 시스템을 설계하였으며, 천 원단 표면의 격자 구조로 인한 빛 반사 문제를 해결하기 위해 선형 편광 필터를 적용하였다. 이를 통해 변형 추적 성능 저하를 방지하고 분석 정확도를 향상시킬 수 있었다.

소프트웨어 측면에서는 Python 기반의 개발 환경에서 μ DIC 오픈소스 라이브러리를 활용하여 DIC 프로그램을 구현하였으며, 사용자의 편의성을 고려하여 PyQt 기반의 GUI도 함께 설계하였다. 본 프로그램은 Global DIC 알고리즘을 채택하여 연속적인 변위장 추출이 가능하도록 하였으며, 이미지 전처리 기능, ROI 설정, 분석 결과의 시각화 기능 등 실험 대상에 따른 다양한 분석 기능을 포함하였다.

개발한 시스템의 정확성을 검증하기 위해 에어백 원단과 금속 시편을 대상으로 인장 실험을 수행하였다. 실험 결과, 에어백 원단의 경우 상용 DIC 장비와 비교하여 x축 방향에서는 0.11 %, y축 방향에서는 0.03 %의 연신율 차이를 보여, 개발된 시스템의 신뢰성과 정밀성을 확인할 수 있었다. 금속 시편에서는 x축 방향에서 평균 0.06 %, y축 방향에서 평균 0.01 %의 연신율 차이를 보여, 다양한 재료에 대한 시스템의 범용성을 입증하였다. 그리고 기존 접촉식 신율계와 응력-변형률 곡선 분석을 통해 물성치 추정 능력을 검증하였다.

향후 본 연구는 3D-DIC 시스템으로의 확장, 초고속 카메라를 활용한 고속 변형 계측 등으로 발전될 수 있으며, 실제 산업 현장에서의 적용 가능성을 높이기 위한 다양한 응용 연구로 이어질 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00406796, 2025년 산업혁신인재성장지원사업).

References

- 1) S. Yang, J. Yim, S. Kim and S. Chae, "A Study on Shape Design of the Passenger Airbag for Efficiency Improvement," Transactions of KSAE, Vol.25, No.2, pp.242–249, 2017.
- 2) S. Park, "Variation Study of Trim Parts Tolerance During Curtain Airbag Static Deployed Test,"

- Transactions of KSAE, Vol.30, No.6, pp.491–498, 2022.
- 3) C. Bastien, M. V. Blundell, D. Stubbs, J. Christensen, J. Hoffmann, M. Reisinger and R. Van Der Made, “Correlation of Airbag Fabric Material Mechanical Failure Characteristic for Out of Position Applications,” In Proceedings of ISMA, pp.1679–1683, 2010.
 - 4) G. De Pasquale and A. Mura, “Accelerated Lifetime Tests on E-Textiles: Design and Fabrication of Multifunctional Test Bench,” Journal of Industrial Textiles, Vol.47, No.8, pp.1925–1943, 2018.
 - 5) S. E. Zacharski, Nonlinear Mechanical Behavior of Automotive Airbag Fabrics: An Experimental and Numerical Investigation, Ph. D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver, 2010.
 - 6) E. D’Amato, “Nonlinearities in Mechanical Behavior of Textile Composites,” Composite Structures, Vol.71, No.1, pp.61–67, 2005.
 - 7) F. Chen, J. L. Bouvard, D. Sawada, C. Pradille, M. Hummel, H. Sixta and T. Budtova, “Exploring Digital Image Correlation Technique for the Analysis of the Tensile Properties of All-Cellulose Composites,” Cellulose, Vol.28, No.7, pp.4165–4178, 2021.
 - 8) N. Amraish, A. Reisinger and D. Pahr, “A Novel Specimen Shape for Measurement of Linear Strain Fields by Means of Digital Image Correlation,” Scientific Reports, Vol.11, No.1, pp.1–13, 2021.
 - 9) W. H. Peters and W. F. Ranson, “Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis,” Optical Engineering, Vol.21, No.3, pp.427–431, 1982.
 - 10) B. Pan, K. Qian, H. Xie and A. Asundi, “Two-Dimensional Digital Image Correlation for In-Plane Displacement and Strain Measurement: A Review,” Measurement Science and Technology, Vol.20, No.6, Paper No.062001, 2009.
 - 11) P. F. Luo, Y. J. Chao, M. A. Sutton and W. H. Peters, “Accurate Measurement of Three-Dimensional Deformations in Deformable and Rigid Bodies Using Computer Vision,” Experimental Mechanics, Vol.33, pp.123–132, 1993.
 - 12) J. D. Helm, S. R. McNeill and M. A. Sutton, “Improved Three-Dimensional Image Correlation for Surface Displacement Measurement,” Optical Engineering, Vol.35, No.7, pp.1911–1920, 1996.
 - 13) T. Siebert, T. Becker, K. Spilthof, I. Neumann and R. Krupka, “High-Speed Digital Image Correlation: Error Estimations and Applications,” Optical Engineering, Vol.46, No.5, Paper No.051004, 2007.
 - 14) M. N. Helfrick, C. Niezrecki, P. Avitabile and T. Schmidt, “3D Digital Image Correlation Methods for Full-Field Vibration Measurement,” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.25, No.3, pp.917–927, 2011.
 - 15) H. W. Schreier, D. Garcia and M. A. Sutton, “Advances in Light Microscope Stereo Vision,” Experimental Mechanics, Vol.44, pp.278–288, 2004.
 - 16) T. A. Berfield, J. K. Patel, R. G. Shimmin, P. V. Braun, J. Lambros and N. R. Sottos, “Micro-and Nanoscale Deformation Measurement of Surface and Internal Planes via Digital Image Correlation,” Experimental Mechanics, Vol.47, pp.51–62, 2007.
 - 17) S. N. Olufse, M. E. Andersen and E. Fagerholt, “ μ DIC: An Open-Source Toolkit for Digital Image Correlation,” SoftwareX, Vol.11, Paper No.100391, 2020.
 - 18) L. Luu, Z. Wang, M. Vo, T. Hoang and J. Ma, “Accuracy Enhancement of Digital Image Correlation with B-Spline Interpolation,” Optics Letters, Vol.36, No.16, pp.3070–3072, 2011.
 - 19) E. Verhulp, B. Rietbergen and R. Huiskes, “A Three-Dimensional Digital Image Correlation Technique for Strain Measurements in Microstructures,” Journal of Biomechanics, Vol.37, No.9, pp.1313–1320, 2004.
 - 20) C. Q. Davis and D. M. Freeman, “Statistics of Subpixel Registration Algorithms Based on Spatiotemporal Gradients or Block Matching,” Optical Engineering, Vol.37, No.4, pp.1290–1298, 1998.
 - 21) P. Cheng, M. A. Sutton, H. W. Schreier and S. R. McNeill, “Full-Field Speckle Pattern Image Correlation with B-Spline Deformation Function,” Experimental Mechanics, Vol.42, pp.344–352, 2002.
 - 22) Y. Sun, J. H. Pang, C. K. Wong and F. Su, “Finite Element Formulation for a Digital Image Correlation Method,” Applied Optics, Vol.44, No.34, pp.7357–7363, 2005.
 - 23) B. Wang and B. Pan, “Subset-Based Local vs. Finite Element-Based Global Digital Image Correlation: A Comparison Study,” Theoretical and Applied Mechanics Letters, Vol.6, No.5, pp.200–208, 2016.
 - 24) E. M. Jones and M. A. Iadicola, “A Good Practices Guide for Digital Image Correlation,” International Digital Image Correlation Society, Vol.10, pp.1–110, 2018.