

2차원 DIC 기법 적용을 위한 2D 이미지 보정 수치 해석 기법

김원섭¹, 홍석무^{2*}

¹국립공주대학교 일반대학원 기계공학과, ²국립공주대학교 금형설계공학과

2D Image Numerical Correction Method for 2D Digital Image Correlation

Wonseop Kim¹, Seokmoo Hong^{2*}

¹Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju National University

²Department of Metal-Mold Design Engineering, Kongju National University

요 약 최근의 DIC (Digital Image Correlation) 기술은 인장 시험 중 동적 변형을 측정하는 데 사용되고 있다. 표준 인장 시험 방법은 진응력 - 진변형 곡선을 계산하기 위해 두 표점 거리 간 측정된 평균 변위를 사용한다. 따라서, 진응력 곡선은 균일 연신 구간, 즉 네킹 변형 시작점까지만 유효하다. 반면에, DIC를 사용한다면, 전체 측정 영역에서 국부 변형을 측정할 수 있기 때문에 변형률 및 변형률 속도의 유효한 범위가 인장 시험이 중단될 때까지 확장될 수 있다. 이러한 장점 때문에 연구 및 산업 분야에서 많은 광학 3D 측정 시스템이 도입되고 사용되었지만 기존의 3D 측정 시스템은 측정하기에 너무 비싸고 시간이 많이 소요된다. 또한 장비 크기로 인해 휴대가 불편한 단점이 존재한다. 본 논문에서는 기존의 스마트 폰을 이용한 2D DIC 측정 방법과 수치 해석 기법을 사용하여 2D 측정 영상 데이터의 오차를 개선한 2D 영상 보정 방법을 수행 하였다. 2D DIC 수정 제안 된 방법의 결과는 3D 측정 장비의 정확도에 비해 더 높은 정확도를 보였다. 결론적으로, 제안 된 2D DIC 및 보정 방법이 정확하고 신속한 측정 결과를 제공한다는 것이 입증되었다.

Abstract Recently, digital image correlation (DIC) techniques have been used to measure dynamic deformation during tensile testing. The standard tensile test method measures the average displacement of the relevant specimen to calculate the true stress-strain curve. Therefore, the validity of the true stress curve is restricted to the stress incurred within the uniform stretching interval, i.e., the maximum stress corresponds to the starting point of the necking deformation. Alternatively, if DIC is used, the effective range of the strain and strain rate can be extended to the breaking point of the tensile specimen, because of the feasibility of measuring the local strain over the entire area of interest. Because of these advantages, many optical 3D measurement systems have been introduced and used in research and industry. However, the conventional 3D measurement systems are exceedingly expensive and time consuming. In addition, these systems have the disadvantage of a very large equipment size which makes their transport difficult. In this study, a 2D image correction method employing a 2D DIC measurement method in conjunction with a numerical analysis method is developed using a smartphone. The results of the proposed modified 2D DIC method yielded higher accuracy than that obtained via the 3D measurement equipment. In conclusion, it was demonstrated that the proposed 2D DIC and calibration methods yield accurate measurement results with low time costs.

Keywords : DIC(Digital Image Correlation), Image correction, Tensile test, Least square method

*Corresponding Author : Seokmoo Hong(Kongju National University)

Tel: +82-10-2252-7544 email: smhong@kongju.ac.kr

Received January 10, 2017

Revised (1st February 17, 2017, 2nd February 20, 2017)

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

1. 서론

최근 DIC(Digital Imaging Correlation)기법은 움직이는 제품 또는 하중을 받고 있는 제품의 동적 거동 및 변형률을 측정하는데 많이 사용되고 있다[1-5]. 특히 인장 시험에 이 기술이 많이 적용되고 있는데, 기존 인장시험의 경우 정해진 표점 거리 내에서 변형은 평균적으로 같다는 가정하여 측정을 진행하고 변형률 값을 선형 extensometer를 통해 측정한다[6]. 이러한 경우, 인장 시험 도중 균일 연신 영역을 지나 국부 변형이 시작되는 네킹(necking) 이 후에는 사용이 불가하다. 따라서 네킹 이후에는 균일 연신까지의 데이터를 활용하여 외삽(extrapolation) 또는 Ludwig 또는 Swift 등의 수학적 모델함수를 사용하여 네킹 이후의 거동을 예측하여 사용한다. 그러므로 국부 변형으로 인한 파단시점의 예측이나 변형 거동은 예측이 불가능한 단점이 있다. 반면에, DIC를 활용할 경우 네킹 이후의 국부 변형률도 측정 전체 영역(Full field)을 통해 측정하고 변형률을 계산할 수 있기 때문에 파단 시점의 예측이나 Damage 모델 연구에 많이 활용되고 있다[7-10]. Fig. 1은 DIC 기법의 원리를 보여주고 있는데, 특수 스프레이 패턴이 입혀진 인장시험편의 인장시험 도중 2대의 스테레오 카메라에서 움직이는 물체를 이미지로 획득하고 각 시간별로 각각의 이미지를 분석하여 전체 패턴 면적의 변위 계산이 가능하다. 이 후 시간과 변위의 관계를 활용하여 변형률을 계산하여 소프트웨어로 그 결과가 제공된다.

Fig. 2에서는 3D 측정 장비의 구성을 보여주고 있다. 3D 측정 장비는 2대의 스테레오 카메라를 통해 물체의 3차원 거리를 측정한다. 따라서 3D 측정을 위한 화각의 확보를 위해서 물체로부터 적절한 거리로 떨어져 있어야 한다. 때문에 공간적인 제약이 있다. 또한 2대의 카메라와 물체가 삼각형을 이루는 지점에서 정확한 측정이 이루어지는 관계로 측정 영역이 제한적이다. 이와 같은 공간적 제약뿐만 아니라, 3D 측정의 이미지 보정을 위해서는 수십 장의 측정 이미지 보정을 통해 이루어지므로 최소 30분 이상의 측정 셋업 시간이 필요하다. 3D DIC 측정 장비의 대표적인 회사는 독일 GOM사의 ARAMIS[11], 미국 Correlated Solutions사의 VID-3D[12]가 있으며, 장비의 가격은 적용된 카메라 해상도 및 측정 가능 면적 등에 따라 다르지만, 고가의 장비이기 때문에 학교나 연구 기관이 아닌 일반 중소기업체에서는 DIC를 희망하지

만 금전적으로 매우 부담스러운 것이 현실이다. 이러한 공간적, 시간적, 금전적 제약을 극복하기 위해 휴대폰을 사용한 2D 이미지를 활용한 DIC 기법 적용에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 스마트폰을 통해 얻은 2D 이미지의 왜곡을 개선하기 위해 간단한 이미지 보정 방법을 제안하였다. 최종적으로 3D 측정 결과와 비교 분석하여 그 유용성을 확인하였다.

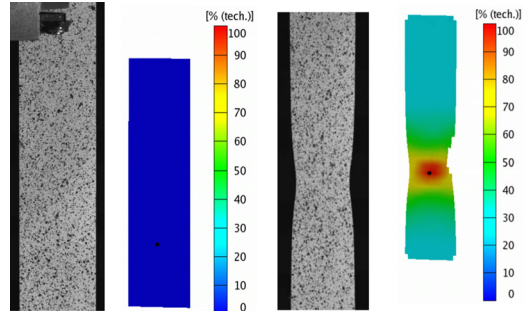


Fig. 1. Strain distribution from 3D DIC result during tensile test (left: initial stage, right: deformed stage)

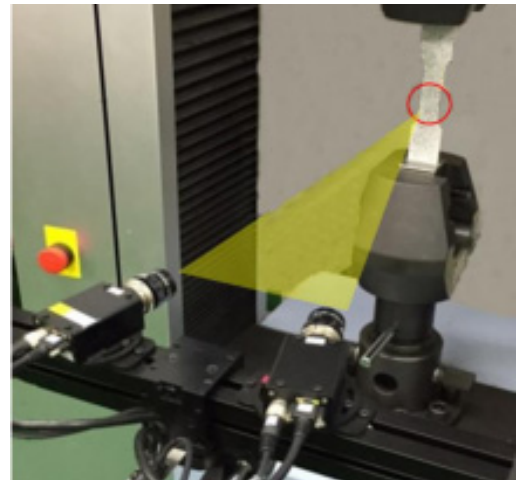


Fig. 2. Configuration of 3D measurement system combined universal tensile test machine and the limit of measurement area of 3D measurement(red circle)

2. 본론

2.1 2D DIC 이론

Fig. 3에 2D DIC의 간단한 원리를 설명하였다. 임의

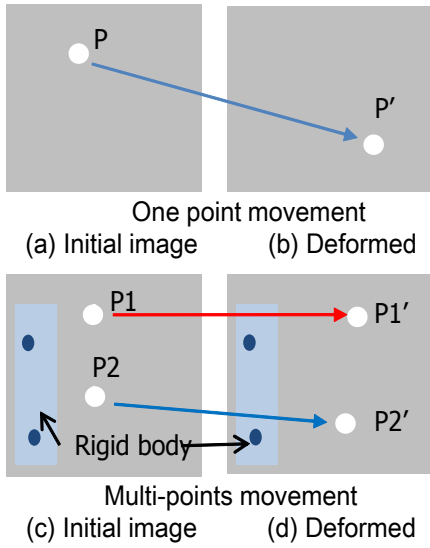
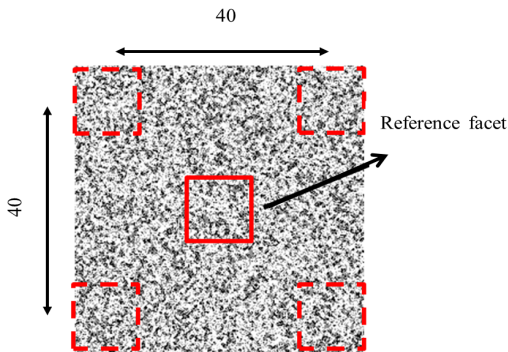
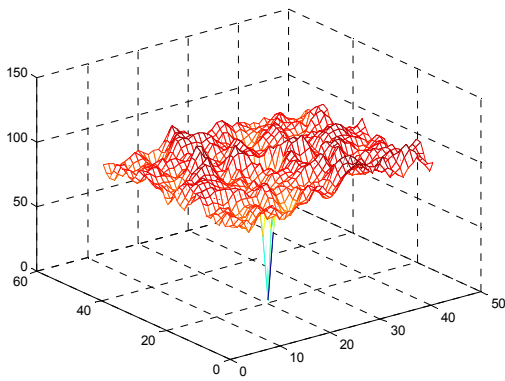


Fig. 3. Basic Principal of 2 dimensional DIC



(a) Calculation on the Pixel area(70x70) and Reference facet(31x31)



(b) Calculation result by SSD method

Fig. 4. Pattern analysis of 2 dimensional DIC

의 P점의 이동 경로를 쉽게 이미지로 인식 하기 위해서 흰색 바탕에 검정색 패턴이 사용 된다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 하나의 점이 이동 시 초기와 이동 후 사진 이미지를 보여주고 있다. 이 때 DIC 측정 카메라는 움직이지 않고 고정된 정지 상태에서 촬영하여 서로 다른 이미지의 픽셀을 비교하여 이동경로를 확인할 수 있다. 만약 Fig. 3의 (c)와 (d)에서 보여지는 바와 같이 2개 이상의 측정 점을 가지고, 또한 카메라가 고정된다면 이동 경로 뿐만 아니라 길이 변화 또한 측정이 가능함을 보여주고 있다. 이때 비 거동 강체(rigid body)가 존재한다면 스케일링을 통해 정확한 측정 길이의 계산도 가능하다. 일반적인 랜덤 패턴을 이용한 DIC의 원리는 Fig. 4에서 설명 되어진다. 이 때 물체 표면에는 특수 스프레이 등을 이용하여 패턴이 적용되어 있어야 한다[10]. 일반적인 DIC의 계산은 식 (1)과 같은 SSD(Sum of Squared Difference correlation)방법을 주로 사용하며 주변의 밝기 변화와 표면의 패턴의 선명도에 따라 응용하여 계산한다. 식 (1)에서 f 는 변형전의 표면에 분포하는 그레이 값(gray value)이며, g 는 변형 후의 표면에 그레이 값의 분포이다. 파셋(Facet)은 일반적인 DIC계산에서 기본으로 계산되어지는 요소를 의미하며, 70x70픽셀의 영역에서 파셋의 크기를 31x31픽셀로 계산하는 경우, 파셋의 중심에 계산된 데이터 점이 하나씩 생성되어 픽셀의 영역 내에는 40개의 데이터 포인트가 생성된다. 기준 파셋 중심을 (20, 20)으로 하여 식 (1)의 방법으로 계산하게 되면 데이터 포인트에서도 동일하게 중심점(20, 20)이 계산됨을 알 수 있다[11].

$$C_{SSD} = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n [g(x'_i, y'_i) - f(x_i, y_i)]^2 \quad (1)$$

2.2 2D DIC 측정 절차

2D DIC 측정 절차는 Fig. 5에 보인다. 2D DIC 적용 가능 여부를 확인하기 위해서 사용하고 있는 모바일 폰을 이용하여 2D 이미지를 획득하고 정확한 3D 측정 결과를 비교하기 위해 상용 DIC측정 장비인 ARAMIS Professional을 활용하여 그 결과를 비교하였다. 2D와 3D의 측정 결과를 분석하고 이를 보정하기 위해서 LSM regression method (Least Square Method)를 활용해 오차를 최소화하는 예측함수를 구성하였다. 예측함수의 구성 식은 2.3절에서 자세히 설명하도록 한다. 최종 예측

함수를 통해 보정된 이미지 데이터 결과와 상용 3D DIC 측정 결과와 비교 분석하였다.

본 연구에 사용된 모바일 폰은 미국 Apple사의 Iphone5이며 소니 엑스모어 CMOS 이미지 센서가 사용되었고, 화소는 1.4um 800만 화소이다. 기준이 되는 3D DIC 측정 장비인 ARAMIS 시스템의 경우 6M stereo CCD카메라와 독일 Schneider사의 렌즈를 장착하고 있다. 보정에 사용된 S/W는 GOM사의 GOM Correlate Professional을 사용하였다.

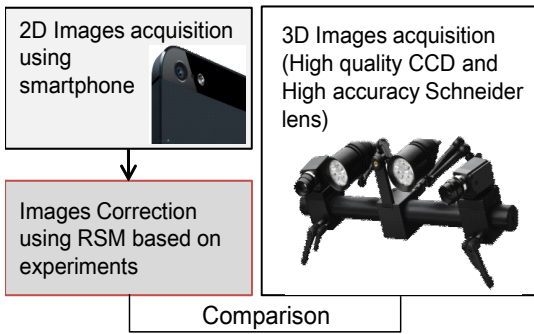


Fig. 5. Process of 2D DIC and Image correction

2.3 2D Image 분석

저가형 2D DIC 측정을 위해 아이폰5를 이용하여 측정의 정밀도를 확인하였다. 30cm의 철자를 측정하였다. 이때 FOV(Field Of View)가 120cm 가 되도록 촬영하였다. 이후, 영상을 분석하여 거리 계산을 수행하였다. 3D 측정 결과와 비교하기 위해 획득된 2D 이미지를 GOM correlate professional S/W로 불러 들여 영상 분석을 수행하였다.

Fig. 6에서는 실제 30cm 자를 벽에 붙이고 스마트폰으로 이차원 영상을 획득하는 장면과 이를 상용 S/W에서 불러들여 계산한 결과를 보여주고 있다. 그 결과를 각 기준 길이별로 그려보면 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 일반적인 광학장치로 2D 영상을 획득하였을 때 이미지 왜곡이 생기게 된다. 참고 거리에 비해 최대 0.209mm의 오차를 가짐을 알 수 있다. 인장시험에서 왜곡된 이미지로 인해 2D 이미지로 변형나 변형을 측정 결과를 획득한다면 정확한 변형을 결과를 보장할 수 없게 된다. 따라서 이러한 이미지 왜곡에 의한 2D 스케일 오차를 최소화 하여야 하고, 이를 위해서 데이터 보정 단계가 필요하다.

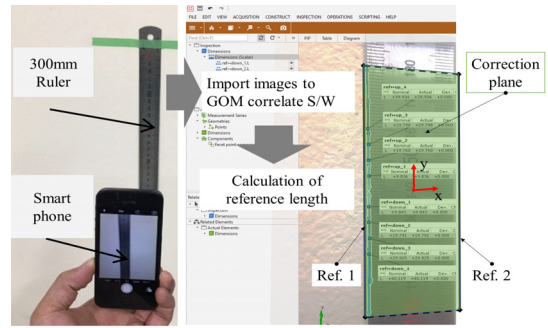


Fig. 6. 2D DIC and the distance results of a ruler of 30cm

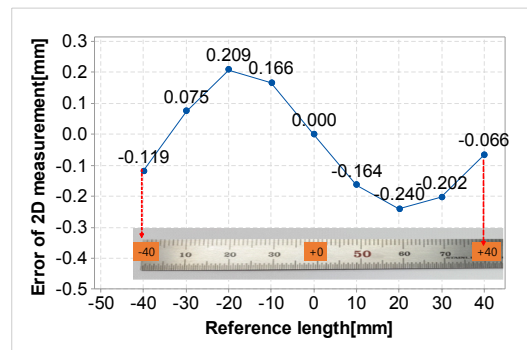


Fig. 7. 2D Image distortion according to ruler distance

이러한 오차는 횡방향 그리고 종방향에 따라 다른 오차를 가질 수 있으므로, x축과 y축을 갖는 평면에서 동시 보정법이 필요하다. 이를 위해서 Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 Ref. 1과 Ref. 2의 두 직선을 포함하는 사다리꼴 평면에서 보정 평면(correction plane)을 정의하였다. 2D와 3D의 측정 결과를 분석하고 이를 보정하기 위해서 RMS regression method (Root Mean Square)를 활용하여 오차를 최소화하는 3차 다항식의 예측함수를 식 (2)과 같이 구성하였다. 초기 5차 다항식으로 예측함수를 구성하였으나, 4차 이상의 고차항의 계수가 소숫점 8자리(1E-08)이하가 되어 고차항을 제외하고 식(2)과 같이 예측함수를 설계하였다. 이러한 고차항 보간법의 경우 계수에 민감하며 보간 영역 최외각에서 많은 오차를 가질 수 있고, 오히려 저차항의 곡선을 사용한다면 진동 없이 예측 곡선이 효과적이라고 알려져 있다[10].

3차 다항식의 계수, a, b, c, d, e는 식(3)의 최소자승법(Least Square Method)을 사용하여 예측과 측정값의 오차 $f(x)$ 가 최소가 되는 계수를 결정하였다.

$$error_{predict} = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (2)$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (error_{measure,i} - error_{predict,i})^2 \quad (3)$$

여기서, $error_{measure}$ 는 초기 측정에서 왜곡된 오차 값을 의미하고, $error_{predict}$ 는 예측 식에 따라 예측한 오차 값을 의미한다. 최소자승법으로 결정된 예측함수의 계수는 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Coefficients predicted from least squared method

a	b	c	d
9.62E-06	-6.2E-05	-0.01448	0.00471

결정된 예측함수의 계수를 가지고 2D 측정 시 발생하는 오차를 Fig.7에 나타내었다. 예측함수는 실험오차를 정확히 반영하고 있으며, 예측 신뢰도를 나타내는 결정 계수 값 R^2 은 0.9922로 신뢰할 만한 수준으로 판단된다.

Fig. 8의 그래프에서는 보정 전 오차 값과 보정 후 오차 값을 보여주고 있다. 보정을 통해 실제 기준거리를 정확히 표현하고 있으며 보정 전 최대 0.209mm 오차를 갖는데 비해서, 보정 후 최대오차는 0.048mm로 보정을 통하여 약 76% 오차가 감소되었다. 같은 방법으로 횡방향에 대해서도 동일하게 적용하였고 정사각형 면적에서는 동일 스케일의 오차 함수를 가짐을 확인하였다. 따라서 종방향과 횡방향의 예측된 오차 값을 보정하여 문제가 되었던 2D DIC의 측정 정확도를 개선되었다.

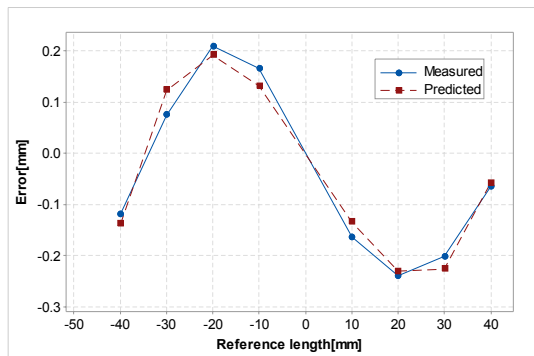


Fig. 7. Prediction of 2D image error

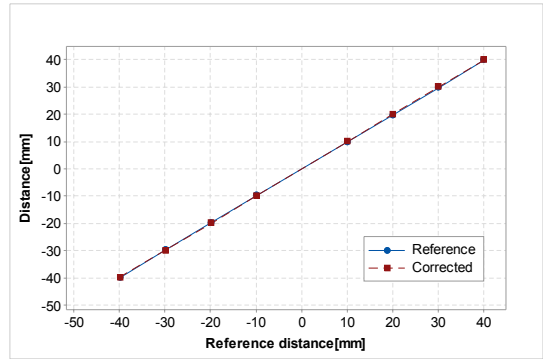


Fig. 8. Distance of 2D image correction after correction

2.4 3D Image 분석

Fig. 9에서는 3차원 측정 장비의 구성을 보여주고 있다. 3차원 측정 장비는 2개의 스테레오 카메라와 이를 제어하는 PC와 이미지 추출 및 보정 작업을 하는 소프트웨어(GOM ARAMIS correlate)로 구성되어 있다. 준비된 3차원 측정 장비로부터 동일한 기준자의 측정을 수행하고, 2D 이미지의 보정된 결과와 비교 분석한 그림을 Fig. 10에 제시하였다. 결론적으로 2D 이미지 보정을 통해 얻어진 이미지 왜곡(Image error)는 상용 full 3D 측정 장비로부터 얻은 왜곡과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 평면상에서만 변형(In-plane deformation)이 발생하는 판재타입의 인장시험의 변형 측정에서는 2D 측정 이미지와 이를 보정한 결과 데이터를 활용하여도 충분히 정확한 DIC 결과를 얻을 수 있게 됨을 확인하였다.

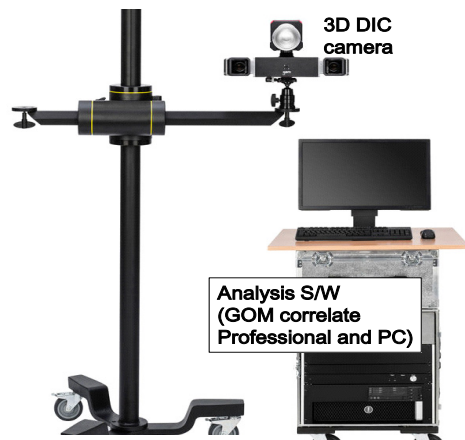


Fig. 9. Configuration of 3D DIC measurement system and software GOM Correlate Professional

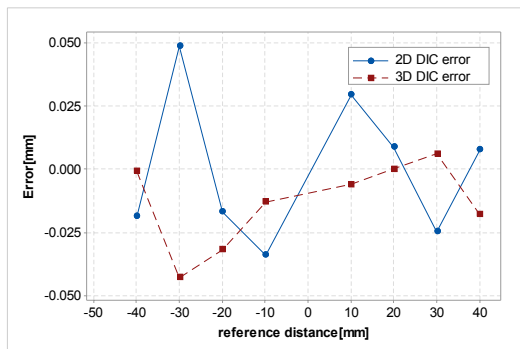


Fig. 10. Comparison of error between correction of 2D image and the calculated error from 3D measurement

3. 결론

DIC(Digital Imaging Correlation)기법을 적용하기 위해 사용되는 3D 측정 장비와 유사한 측정 정밀도를 갖는 2D 측정 기술과 이미지 보정 방법에 대해 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 아래와 같다.

- (1) 스마트폰 이미지를 활용함으로써 해서 고가의 3D 측정 카메라의 구성과 동기화 장치 등 없이 DIC 측정이 가능함을 확인하였고, 2D 측정으로 공간 제약과 측정 면적의 제약을 극복하였다. 따라서 전체 인장 시편의 거동을 동시에 분석이 가능하였다.
- (2) 3D 측정과 달리 2D 측정은 측정 이미지의 보정이 특히 중요하며 2D 측정 이미지 데이터의 오차를 개선하기 위해 수치적 보간 기법을 개발하여 적용하였다.
- (3) 최종 초기 3D 측정에 비해 2배 셋업 시간을 단축하였으며, 초기 2D이미지에 비해 10배 이상 향상된 오차를 단축하였다. 또한 3D 측정 결과와 0.005mm로 오차가 작음을 확인하였다.

References

[1] B. Pan, D. Wu, Y. Xia, "High temperature deformation field measurement by combining transient aerodynamic heating simulation system and reliability-guided digital image correlation", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 48, pp. 841-848, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2010.04.007>

[2] L. C. Shiau, S. Y. Kuo, C. Y. Chen, "Thermal bulking behavior of composite laminated plates", *Composite Structures*, Vol 92, pp. 508-514, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.08.035>

[3] R. Brault, T. Djilali, M. Fazzini, S. Mistou, "Bi-axial fatigue analysis by stereo-correlation measurement", *EPJ Web of Conference* 6, 16005, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20100616005>

[4] R. Moslemian, C. Berggreen, L. A. Carlsson, R. Aviles, "Failure investigation of debonded sandwich columns - An experimental and numerical study", *Journal of mechanics of materials and structures*, Vol 4, no. 708, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.2140/jomms.2009.4.1469>

[5] S. H. Tung, M. C. Weng, M. H. Shih, "Measuring the in situ deformation of retaining walls by the digital correlation method", *Engineering Geology*, vol. 166, pp. 116-126, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.09.008>

[6] j. Lim, S. Kim, H. Huh, S. Kwon, S. Park, "High Speed Tensile Tests of Steel Sheets for an Auto-body at the Intermediate Strain Rate", *Journal of KSME*, pp. 89-92, 2004.

[7] K. Wang, J. E. Carsley, B. He, J. Li, L. Zhang, "Measuring forming limit strains with digital image correlation analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, pp. 1120-1130, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.01.001>

[8] H. Hoffmann, S. Hong, "Tensile Test of very thin Sheet Metal and Determination of Flow Stress Considering the Scaling Effect", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 55, pp. 263-266, 2006.

[9] B. Pan, D. Wu, Z. Wang, Y. Xia, "High-temperature digital image correlation method for full-field deformation measurement at 1200°C", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 22, pp. 11, 2011.

[10] T. Jin, "A study on Measuring Thermal Deformation of Metallic and Composite Material Structures using Digital Image Correlation Technique", *Konkuk University*, 2014.

[11] GOM ARAMIS User Manual, 2014.

[12] CORELLATE VIC-3D Manual v7, 2015.

김원섭(Won-Seop Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 한남대학교 물리학과 (학사)
- 2004년 2월 : 한남대학교 대학원 물리학과 (석사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (박사과정)
- 2001년 12월 ~ 현재 : OMAGOM, 메트론폴로지연구팀, 기술이사

<관심분야>

응용광학 및 3차원 스캐너, DIC, 유한요소해석

홍 석 무(Seokmoo Hong)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (기계공학학사)
- 2001년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2007년 3월 : Technical University of Munich, Germany, Department of Mechanical Engineering (기계공학 박사)

- 2007년 4월 ~ 2015년 2월 : 삼성전자 GTC, 수석연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 공주대 금형설계공학과 교수

<관심분야>

금속 판재 성형 및 단조, 유한요소해석, 최적 설계