

무필름 물전사지를 활용한 강재댐퍼의 DIC패턴 적용 및 변형 분석

백승현¹ · 김동건^{2*}

¹석사과정, 동아대학교, ICT융합해양스마트시티공학과, ²정교수, 동아대학교, ICT융합해양스마트시티공학과

Application of DIC Pattern and Deformation Analysis of Steel Dampers Using Film-Free Water Decal Method

Back, Seung Hyeon¹, Kim, Dong Keon^{2*}

¹M.Sc.Student, Dept. of ICT Integrated Safe Ocean Smart City Engineering, Dong-A University, Busan, 49315, Korea

²Professor, Dept. of ICT Integrated Safe Ocean Smart City Engineering, Dong-A University, Busan, 49315, Korea

Abstract – This study aimed to analyze the nonlinear hysteretic behavior of steel dampers using the Digital Image Correlation (DIC) technique and to evaluate the effectiveness of deformation measurements employing a Film-Free Water Decal pattern. The displacements and strains obtained via DIC were compared with results from a universal testing machine (UTM), LVDT, and strain gauges. The differences between spray-patterned and film-free decal-patterned specimens were also investigated. The experimental results demonstrated that DIC-based deformation measurements accurately reproduced UTM outcomes with an error margin below 5.91 %, showing similar strain distributions to those from strain gauges. Particularly, the film-free decal pattern provided high contrast and durability, making it advantageous for detailed deformation analysis.

Keywords – Digital image correlation, Film-free water decal method, Steel damper, Cyclic load, Hysteresis curve, Strain

1. 서론

강재의 인장실험에서 재료 특성을 파악하기 위해 스트레인 게이지와 변위계(Extensometer)를 사용하는 것이 일반적이다. 또한, 기존 연구에서는 강재댐퍼의 성능을 평가하기 위해 만능시험기에서 발생한 하중과 함께 표면에 스트레인 게이지나 변위계(LVDT)를 부착하여 변형을 측정했다^[1]. 그러나 이러한 기계적 측정장치는 선형 변위 측정과 탄성 변위 내에서의 측정에 특화되어 있고, 환경 조건(온도, 습도 등)에 따른 센서 값의 오차와 시편 표면에 부착된 위치에 따라 오차가 발생할 수 있는 한계가 있다^[2]. 특히, 강재댐퍼에서는 반복적인 하중을 재하 할 때 비선형 거동을 보이므로, 이러한 제한사항을 극복하기 위해 디지털 이미지 상관기법

(Digital Image Correlation, DIC)을 활용하여 변형을 측정하고자 한다.

DIC는 1980년대 초반에 개발되었으며^[3], 기계, 재료 등 다양한 분야에서 활용되고 관련 연구에서 실험 결과를 분석하는 데 활용되고 있다. DIC를 활용하면 시험체의 사진을 통해 표면 변형을 추적할 수 있어, 변위 및 변형률을 접촉식 측정 장비를 사용하지 않고도 시각적으로 파악할 수 있다. 더불어, 이 기술은 균일하지 않은 시험체에 대해서도 필요한 부분의 변형률을 정확하게 계산할 수 있는 이점을 가지고 있다^[4].

Gu^[5]의 연구에서는 GFRP 보강근 콘크리트 보의 휨 시험에 DIC기법을 활용하여 콘크리트 보의 처짐의 변위와 변형률을 측정하고 압축 파괴의 특성을 파악하였다.

Wang *et al.*^[6]의 연구에서는 압력 활성화 접착 테이프 패턴을 활용하여 DIC기법으로 강철 교량의 구조적 상태를 모니터링하였다. 이 방식은 기존의 패턴 적용 방식보다 간편하고 경제적이며, 실시간으로 교량 구조 상태를 평가할 수 있다.

Sanchez와 Kim^[7]의 연구에서는 무필름 전사 방법을

Note.-Discussion open until June 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 08, 2024; revised November 28, 2024; approved on November 28, 2024. Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-200-7692 Fax. +82-51-200-7616

E-mail. dkkzone@dau.ac.kr

이용한 디지털 스펙클 패턴(Digital Speckle Pattern) 적용하고 강제 인장시험에서의 DIC 효율성 평가를 진행하였다. 무필름 물전사지는 고품질 스펙클 패턴을 제공하며, DIC와 스트레인 게이지 간의 변형 측정치가 높은 상관관계를 보였고, 소재 특성 또한 UTM으로 얻은 값과 유사한 결과를 확인하였다.

본 연구에서는 DIC기법을 활용하여 반복하중을 받는 강제뱀퍼의 비선형이력특성을 분석하기 위해 무필름 물전사지 패턴을 적용하고 이에 대한 변형을 분석하고자 한다. 이를 통해 얻은 변위와 변형율을 UTM, LVDT, 스트레인 게이지의 결과와 비교하고자 한다. 또한, 보편적으로 DIC 분석을 위해 사용되는 스프레이 패턴에 의한 결과와 비교하고자 한다.

2. 디지털 이미지 상관기법

디지털 이미지 상관기법은 두 개의 이미지 또는 영상에서 관련 정보를 추출하여 물체의 특성이나 환경의 변화를 이해하고 분석하는 데 사용된다. 특히 건축 분야에서는 재료에 하중을 가하고 변형이 발생하는 실험을 수행하며, 이러한 과정에서 카메라를 이용하여 동영상 또는 사진을 연속 촬영하고, 이를 통해 전후 이미지의 임의의 지점에서 변위를 분석하고, 재료의 물성을 정밀하게 측정하기 위해 사용된다^[8].

재료의 표면을 통해 연산하기 때문에 표면에 기준이 되는 지점들이 필요하다. 이를 위해 표면에 패터닝(patterning)을 실시하고, 패터닝의 방법으로는 표면에 도료를 이용해 작은 점들을 만드는 스펙클 패턴(speckle pattern)이나, 사각형의 일정한 흑백 그리드를 형성하는 격자 패턴(grid pattern)과 같은 방법이 사용된다. 이미지상의 변위를 패턴을 통해 측정하기 때문에 패턴의 품질이 DIC 결과에 큰 영향을 미치게 된다^{[9],[10]}.

2D-DIC는 하나의 카메라를 이용하여, 물체의 표면 내 변형을 측정한다. 카메라로 촬영된 이미지는 물체의 표면 정보를 0~255 사이의 명암 값으로 표현하게 된다. 전체 이미지에서 하나의 픽셀 지점과 같은 명암값을 가지는 지점이 무수히 많기 때문에 상관관계의 비교가 불가능하다. 디지털 이미지 상관기법은 이러한 점을 고려하여 변형 전, 변형 후 이미지에서 Fig. 1과 같이 서브셋(subset)을 생성한다.

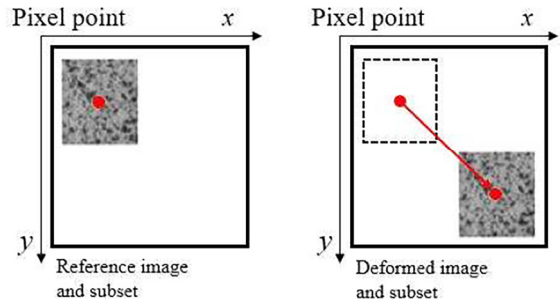


Fig. 1. Subset for digital image correlation^[11]

서브셋은 이미지에서 하나의 픽셀이 갖는 특징을 주변 픽셀들의 명암 값으로 표현하기 위해 생성하는 영역이다. 변형 전 이미지에서 변위량을 구하고 싶은 픽셀 $P(x_i, y_j)$ 를 기준으로 $(2M+1) \times (2M+1)$ 크기의 서브셋을 생성한다. M은 마스크(mask)로, 서브셋의 크기를 나타낸다. 서브셋의 크기는 촬영한 사진의 해상도에 따라 조절한다.

변형 전 이미지의 서브셋을 변형 후 이미지에서 매칭되는 서브셋을 찾는다. 변형 전 이미지에서 서브셋의 픽셀 중심 좌표 $f(x_i, y_j)$ 는 변형 후 서브셋의 픽셀 중심 좌표 $g(x'_i, y'_j)$ 로 매칭될 수 있다. 이때의 계산 식은 식 (1)로 계산된다.

$$\begin{aligned} x'_i &= x_i + u \\ (i, j) &= -M : M \\ y'_j &= y_j + v \end{aligned} \quad (1)$$

변형 전 이미지에서 $P(x_i, y_j)$ 를 중심으로 갖는 서브셋을 이용하여 Sum-Squared Difference(SSD) 기준을 적용하여 C_{SSD} 를 계산한다. 이때의 계산은 식 (2)로 계산된다.

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

변형 후 이미지에서 모든 지점의 서브셋과 계산된 C_{SSD} 를 비교하여 최소값을 갖는 지점이 매칭점이 된다. $f(x_i, y_j)$ 와 $g(x'_i, y'_j)$ 의 좌표 값의 차이인 (u, v) 가 변위량이 된다.

변형률 계산은 시편 사진에서 사각형 모양의 메쉬

(mesh)를 생성하여 메쉬의 변형률을 계산한다. 시편 이미지에서 일정한 픽셀 간격으로 메쉬를 생성하고, 사각형의 각 모서리인 4개의 픽셀 좌표에서의 변위량을 구한다. 이렇게 구한 4개의 픽셀의 변위량 간의 차이를 계산하여 메쉬의 변형률을 구할 수 있다^{[11]-[14]}.

3. 강재댐퍼의 정적가력실험

3.1 실험체 구성

실험에 사용된 실험체는 15 mm의 SS275 구조용 강재댐퍼로 항복강도 340.49 N/mm², 인장강도 451.27 N/mm²를 가진다. 실험체의 형상과 스트레인 게이지 위치를 Fig. 2에 나타내었다. DIC 기법에 의한 변형 측정을 위해 한쪽 표면에 백색안료를 일정거리에서 분사하여 시험편 표면에 균일하게 도포하고, 완전히 건조 후 다시 그 위에 패턴을 형성시켰다. 패턴은 총 4개의 실험체에 무필름 물전사지 스펙클(Film-free Pattern)과 스프레이 스펙클(Spray Pattern)을 각각 2개씩 적용하였다. Fig. 3는 스프레이 스펙클 패턴, Fig. 4는 무필름 물전사지 스펙클 패턴을 적용한 실험체 사진이다.

무필름 물전사지를 사용하면 높은 대조도와 내구성 있는 스펙클 패턴을 구현할 수 있다. 또한, 물전사지를 사용해 원하는 크기의 디지털 스펙클 패턴을 인쇄할 수 있어 실험에 필요한 세부적인 변형 분석에 유리하다^[7]. 사용 방법으로는 레이저 프린터를 이용해 디지털 스펙클 패턴을 인쇄하고, 물전사지를 물에 담가 필요한 표면에 접착제를 이용해 부착한다. 이후 헤어드라이어로 건조시키고 물전사지를 떼어내어 실험체에 패턴을 제작하였다.

3.2 실험 방법

각 댐퍼는 면외좌굴 방지를 위해 L타입 지그를 사용하여 Fig. 5와 같이 1,000 kN 용량의 만능시험기(UTM)에 설치하였다. 강재댐퍼의 변위와 DIC의 변위 오차를 측정하기 위해 변위 측정기인 LVDT를 플랜지 하부에 부착하고, 변형률을 측정하는 스트레인게이지를 응력이 집중되는 가력부 스트럿 단부 끝단으로부터 5 mm 떨어진 지점에 부착하였다.

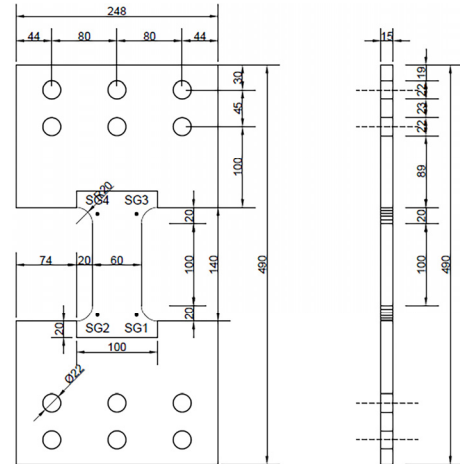


Fig. 2. Details of test specimen and strain gauge location (Unit: mm)



Fig. 3. Specimen of spray speckle pattern



Fig. 4. Specimen of film-free speckle pattern

정적가력방법은 KDS 41 17 00 : 2019 건축물 내진설계 기준^[15] 및 ASCE 7-16^[16]에서 제시한 가력방식을 사용하였다. Fig. 6와 같이 점증변위 반복가력은 총 3개의 Step으로 이루어져 있으며, Step 1에서 장치 최대변위의 0.33배로 10회, Step 2에서 0.67배로 5회, Step 3에서 1.0배로 3회 점증변위 반복가력을 진행하였다. 이때,

장치의 최대변위는 층고 3.0 m를 기준으로 내진 등급 중 특등급 허용층간변위에 해당하는 1 %로 설정하였다. 강제댐퍼의 반복하중에 의한 강도저하 및 파단형상을 분석하기 위해 Fig. 7과 같이 21 mm로 5회의 동일변위 반복가력을 진행하였다. 이때, 최대 변위는 층고 3.0 m를 기준으로 내진 등급 중 특등급 허용층간변위에 해당하는 1 %에서 내진설계되지 않은 학교 건물의 허용층간변위의 70 % 제한하여 설정하였다.

실험 중 촬영은 GOM ARAMIS 2D 시스템으로 진행

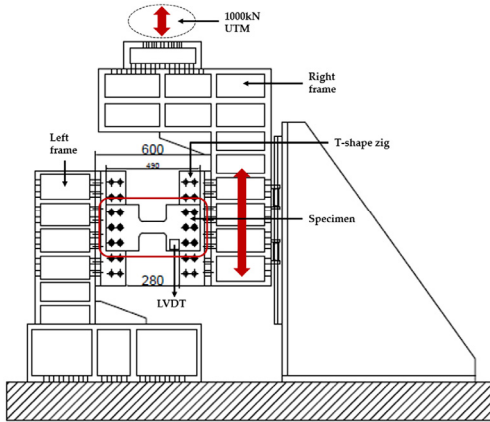


Fig. 5. Details of the UTM and specimen setup

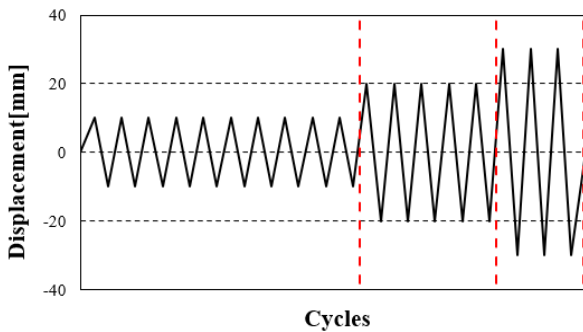


Fig. 6. Incremental displacement loading protocol

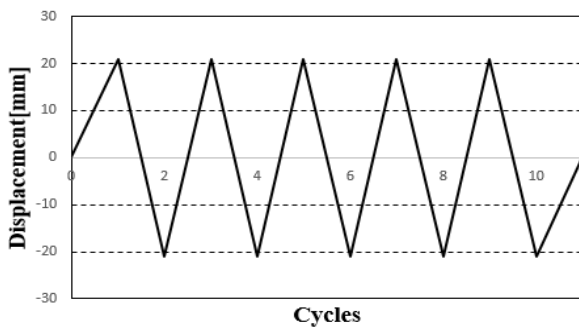


Fig. 7. Constant displacement loading protocol

하였다. 이 시스템은 삼각대, 카메라 렌즈(S50), 조명으로 구성되어 있으며 컴퓨터와 USB 연결을 통해 전력을 공급받고 데이터를 전송한다. 2D-DIC에서 렌즈와 실험체가 평행이 되지 않으면 이미지에 왜곡이 발생하므로 평행이 되도록 레이저 수평계를 활용하였다. Fig. 8은 실험체 셋업의 사진이다. 렌즈와 실험체의 거리는 FOV (Field of view)와 실험체의 최대 예측 변위에 맞추어 설정하였다. 촬영 용량은 컴퓨터의 Ram 용량에 비례하므로 용량과 예상 실험 시간에 따라 촬영 속도를 설정하였다. Table 1에 FOV와 촬영거리, 촬영속도를 나타내었다.



Fig. 8. Camera setup for DIC

Table 1. Information of camera setup for DIC

FOV	Distance	Speed
273 × 200 mm ²	1,190 mm	1/4 Hz

3.3 실험체명

강제댐퍼 실험체에 적용된 스펙클 패턴의 종류는 2가지로 스프레이 패턴(SP)와 무필름 물전사지 패턴(FP)가 있다. 또한, 점증변위 반복가력(K)과 동일변위 반복가력(A)이 있다. 이를 바탕으로 실험체명은 패턴 종류와 가력프로토콜의 종류에 맞추어 각각 SP-K, FP-K, SP-A, FP-A으로 명명하였고, 총 4개의 실험체로 실험을 진행하였다.

3.4 보간법

DIC기법을 활용하면 이미지를 통해 변위만 측정할 수 있으므로 하중 값은 실험 하중과의 동기화가 필요하다. 이를 위해 시간을 기준으로 DIC의 변위와 UTM의 하중을 3차 스플라인 보간법으로 보간하였다. 3차 스플라인 보간법은 큐빅 스플라인 보간법이라고도 불리며,

정의된 점 집합을 통과하는 부드러운 곡선을 만드는데 사용되는 적합 방법이다. $n+1$ 개의 데이터 점 (x_i, y_j) 이 $x_0 < x_1 < \dots < x_n$ 을 따를 때, 점 (x_{i-1}, y_{j-1}) 와 (x_i, y_j) 사이의 다항식 $S_i(x)$ 는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (3)$$

여기서 $S_i(x)$ 는 각 구간에서의 3차 다항식을 의미하며, a_i, b_i, c_i, d_i 는 각각의 계수이다. 이러한 계수들은 각 구간의 시작점과 끝점에서의 위치와 도함수를 기반으로 설정된다^[17].

4. 실험 결과

4.1 하중-변위 이력곡선

강재댐퍼의 정적가력실험에서 UTM, LVDT, DIC의 변위를 측정하여 얻은 각 실험체의 하중-변위 이력곡선을 Figs. 9-12에 나타내었다. 1 Cycle에서 항복점까지

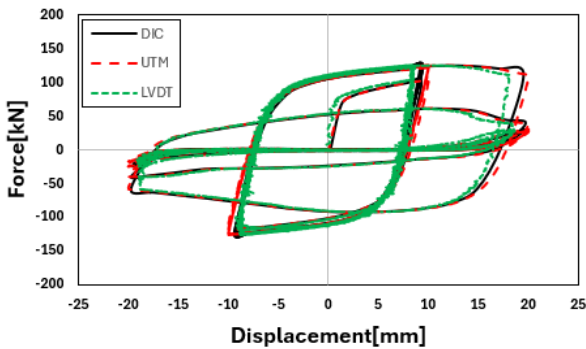


Fig. 9. Hysteresis curve of SP-K

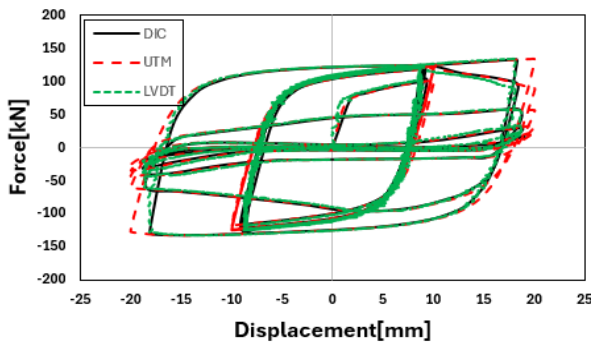


Fig. 10. Hysteresis curve of FP-K

선형적인 거동을 확인했으며, 내력저하까지 DIC와 LVDT가 모사할 수 있었다. Table 2는 UTM, LVDT, DIC로 측정된 최대·최소 변위와 오차율을 나타낸 것이다. 강재댐퍼의 특성 분석에 사용되는 UTM의 변위제

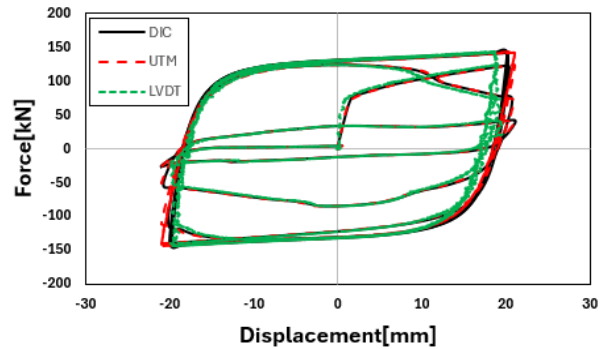


Fig. 11. Hysteresis curve of SP-A

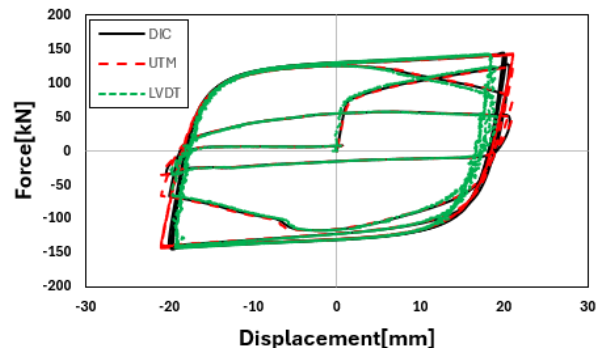


Fig. 12. Hysteresis curve of FP-A

Table 2. Maximum and minimum displacement

		Max Displacement [mm]	Error Ratio [%]	Min Displacement [mm]	Error Ratio [%]
SP-K	UTM	20.05	-	-20.01	-
	LVDT	18.64	7.57	-19.22	4.10
	DIC	19.75	1.55	-19.74	1.35
FP-K	UTM	20.06	-	-20.02	-
	LVDT	18.89	6.18	-18.81	6.42
	DIC	19.00	5.57	-18.90	5.91
SP-A	UTM	21.06	-	-21.02	-
	LVDT	19.55	7.69	-19.97	5.26
	DIC	21.13	0.35	-21.05	0.16
FP-A	UTM	21.04	-	-21.01	-
	LVDT	19.31	9.00	-19.85	5.88
	DIC	20.60	2.17	-20.31	3.43

어를 통해 실험을 진행하였다. 이를 기준으로 변위를 비교하면 LVDT의 오차율이 가장 크게 나타났다. 또한, 스프레이 패턴이 무필름 물전사지 패턴에 비해 오차율이 작은 것을 확인할 수 있다.

4.2 변형률 분석

강재댐퍼에서 응력집중이 발생하는 스트럿 단부의 변형률 추이를 확인하기 위해 스트럿 단부에 부착된 4개의 스트레인게이지에서 측정된 변형률과 DIC로 얻은 변형률을 Figs. 13–16과 같이 변위-변형률 그래프로

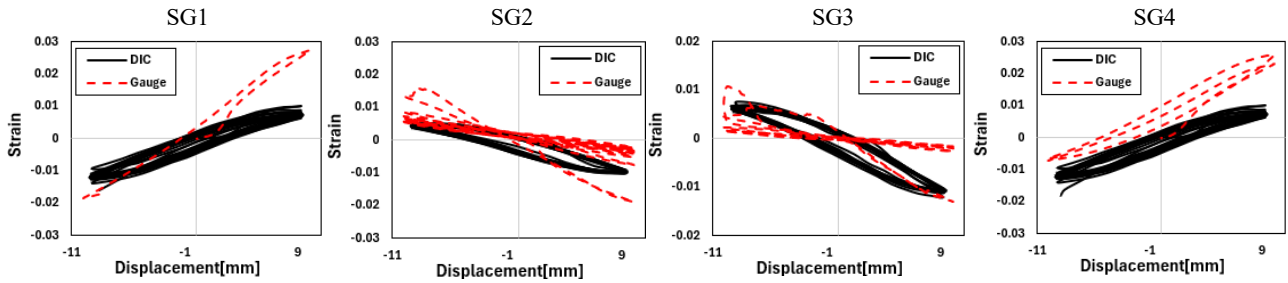


Fig. 13. Strain of SP-K

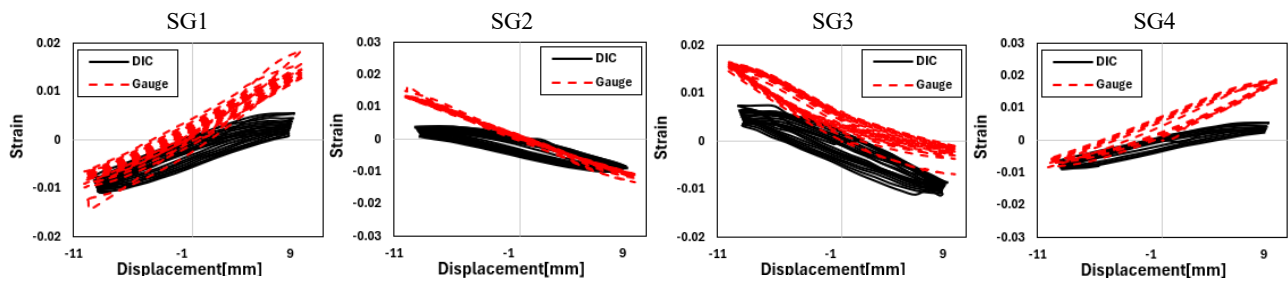


Fig. 14. Strain of FP-K

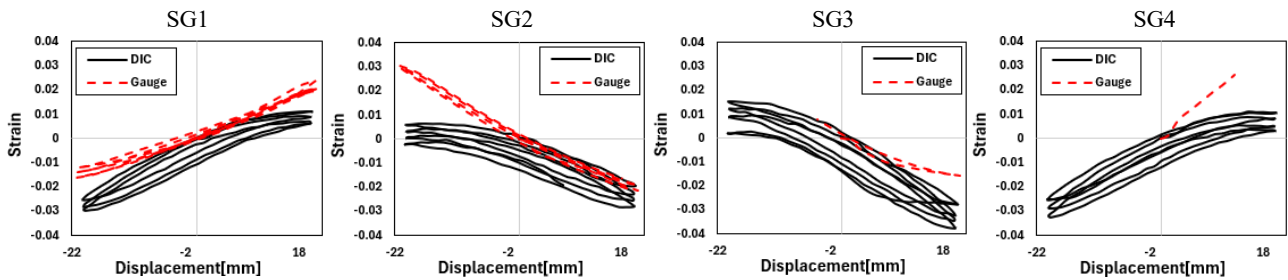


Fig. 15. Strain of SP-A

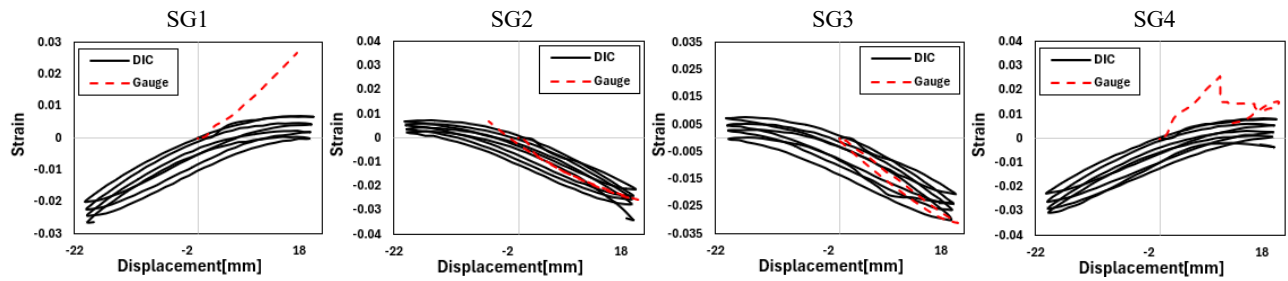


Fig. 16. Strain of FP-A

나타내었다.

스트레인 게이지의 변형률이 DIC로 얻은 변형률에 비해 더 큰 분포의 변형률을 보인다. 또한, 스트레인 게이지와 DIC의 변위-변형률 그래프의 추세가 유사하게 나타나는 것을 확인하였다.

스트레인 게이지는 한계범위 전까지 변형률을 초기 선형관계를 유지하며 측정할 수 있음을 확인하였다. 하지만, Fig. 6의 FP-A에서 볼 수 있듯이, 일부의 스트레인 게이지는 한계 범위를 조기에 도달하여 안정된 변형률을 측정하지 못하였다. 한편, DIC를 통해 얻은 변형률은 표면의 이미지를 통해 측정되므로 상대적으로 더 넓은 변위까지 안정된 변형률 측정 결과를 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 DIC기법을 활용하여 반복하중을 받는 강재댐퍼의 비선형이력특성을 분석하기 위해 스프레이 패턴과 무필름 물전사지 패턴을 적용하고 변형을 분석하였다. DIC기법을 통해 얻은 변위와 변형율을 UTM, LVDT의 값과 비교하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) DIC기법을 활용하여 강재댐퍼의 정적가력실험에서 변위를 측정했을 때, UTM의 변위와 5.91 % 이내의 오차율을 확인했으며, 전체 사이클 내에서 하중-변위 이력곡선을 모사할 수 있었다.
- (2) 하중-변위 이력곡선에서 UTM의 변위를 기준으로 변위의 오차율을 비교했을 때, LVDT는 최대 9.00 %를 보이는 반면, DIC는 최대 5.91 %의 오차율을 보였다.
- (3) 반복하중을 가력한 실험에서 스프레이 패턴의 경우 변위의 오차율이 1.55 % 내로 나타나는 반면, 무필름 물전사지 패턴의 경우 5.91 % 내로 나타났다.
- (4) DIC는 스트레인 게이지와 유사한 변형률 분포를 보이며, 변위-변형률 그래프의 추세 또한 유사함을 확인하였다. 상대적으로 스트레인 게이지보다 넓은 범위에서 안정된 변형률을 측정할 수 있음을 확인하였다.

향후 연구에서는 강재댐퍼의 스트럿 단부에 넓은 한계범위를 가진 스트레인 게이지를 부착하여 DIC기법과의 비교를 통해 변형률을 분석할 필요가 있다. 또한, DIC기법을 적용한 실험데이터를 기반으로 강재댐퍼에 대한 유한요소해석을 수행하여 강재댐퍼의 비선형이력특성을 분석할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2016R1A6A1A03012812)

참고문헌(References)

- [1] Kwon, W.K., and Kim, D.K. (2024) Evaluation of Hysteretic Behavior of Composite Steel Damper System Using the SPHC Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.3, pp.155-164 (in Korean).
- [2] Choi, S., Lim, B., Oh, C.K., and Joh, C. (2012) Technique for the Measurement of Crack Widths at Notched/Unnotched Regions and Local Strains, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol.24, No.2, pp.205-214 (in Korean).
- [3] Peters, W.H., and Ranson, W.F. (1982) Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis, *Optical Engineering*, Society of Photographic Instrumentation Engineers, Vol.21, No.3, 213427.
- [4] Kim, S.H. (2024) *Analysis of Yield Strength Anisotropy of Metallic Materials Using Continuous Indentation Test and Digital Image Correlation Technique*, Master's Thesis, Andong National University (in Korean).
- [5] Gu, J. (2024) *Experimental Study on the Flexural Performance of GFRP Reinforced Concrete Beam and Bonding Behavior of GFRP Rebar*, Master's Thesis, Gyeongsang National University (in Korean).
- [6] Wang, Y., Tumbava, M.D., Thrall, A.P., and Zoli, T.P. (2019) Pressure-Activated Adhesive Tape Pattern for Monitoring the Structural Condition of Steel Bridges via Digital Image Correlation, *Structural Control and Health Monitoring*, Wiley, Vol.26, No.8, e2382.

- [7] Sanchez, A.C., and Kim, D.-K. (2024) Assessment of the Film-Free Water Decal Method for Speckle Pattern Application in Digital Image Correlation, *Sensors*, MDPI, Vol.24, No.17, 5657.
- [8] Cho, Y., Lee, C., Yee, J.-J., and Kim, D.-K. (2021) Modeling of Ductile Fracture for SS275 Structural Steel Sheets, *Applied Sciences*, MDPI, Vol.11, No.12, 5392.
- [9] Jin, H., Haldar, S., Bruck, H.A., and Lu, W.-Y. (2011) Grid Method for Microscale Discontinuous Deformation Measurement, *Experimental Mechanics*, Springer, Vol.51, No.4, pp.565-574.
- [10] Zdziebko, P., Dworakowski, Z., and Holak, K. (2022) The Simulation-Based Approach for Random Speckle Pattern Representation in Synthetically Generated Video Sequences of Dynamic Phenomena, *Sensors*, MDPI, Vol.21, No.23, 9489.
- [11] Oh, J.H. (2022) *Measurement of Strain Fields Using Digital Image Correlation(DIC) with Structured Laser Patterning*, Master's Thesis, Sogang University (in Korean).
- [12] Blaber, J., Adair, B., and Antoniou, A. (2015) Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software, *Experimental Mechanics*, Springer, Vol.55, No.6, pp.1106-1122.
- [13] Liang, Z., Zhang, J., Qiu, L., Lin, G., and Yin, F. (2021) Studies on Deformation Measurement with Non-Fixed Camera Using Digital Image Correlation Method, *Measurement*, Elsevier, Vol.167, 108139.
- [14] Lv, Z., Xu, X., Yan, T., Cai, Y., Su, Y., and Zhang, Q. (2018) High-Accuracy Optical Extensometer Based on Coordinate Transform in Two-Dimensional Digital Image Correlation, *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, Vol.100, pp.61-70.
- [15] Architectural Institute of Korea (2019) *Structural Design Standards for Buildings*, KDS 41 17 00 : 2019, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
- [16] American Society of Civil Engineers (2016) *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI 7-16, ASCE, USA.
- [17] Zhang, E., Yang, S., and Zhang, L. (2024) General Waveguide Bend Design Based on Cubic Spline Interpolation and Inverse Design, *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, Vol.42, No.13, pp.4614-4625.

요약: 본 연구는 디지털 이미지 상관기법(DIC)을 활용하여 강재댐퍼의 비선형 이력 거동을 분석하고, 무필름 물전사지(Film-Free Water Decal) 패턴을 적용한 변형률 측정의 효용성을 평가하고자 하였다. DIC를 통해 측정된 변위와 변형률은 만능시험기(UTM), LVDT, 스트레인 게이지의 결과와 비교되었으며, 실험체 표면의 스프레이 패턴 및 무필름 물전사지 패턴에 따른 차이를 분석하였다. 실험 결과, DIC를 이용한 변형 측정은 5.91% 이하의 오차율로 UTM 결과를 정확히 모사할 수 있었고, 스트레인 게이지와 유사한 변형률 분포를 나타내었다. 특히, 무필름 물전사지 패턴은 높은 대조도와 내구성으로 세부 변형 분석에서 유리한 결과를 제공하였다.

핵심용어: 디지털 이미지 상관기법, 무필름 물전사지, 강재댐퍼, 반복하중, 하중-변위 이력곡선, 변형률
