

다양한 하중 조건에서 DP980 판재의 불안정성 및 파단점 결정시 DIC Frame Rate의 영향

노은솔¹ · 홍석무^{2, #}

Influence of DIC Frame Rate on Experimental Determination of Instability and Fracture Points for DP980 Sheets under Various Loading Conditions

E. Noh, S. Hong

(Received August 16, 2019 / Revised October 10, 2019 / Accepted October 24, 2019)

Abstract

The past recent years have seen an increasing use of high-strength steel sheets in the automotive industry. However, the formability and damage prediction of these materials requires accurate acquisition of necking and fracture strains. Digital image correlation (DIC) is used to accurately capture the necking and fracture strains during testing. The fact that single time points of capturing vary with frame rate makes the need for an investigation necessary. For the high-strength steel DP980, the frame-rate dependences of the final necking and fracture strains values are analyzed here. To eliminate the influence of gauge length, the strains were measured locally by DIC. Results for three specimen shapes obtained with frame rates of 1 and 900 fps (frames per second) were considered and based on them, triaxiality failure diagrams (TFD) are established. It was observed that after diffuse necking, the deformation path departed from the initially linear one, and the stress triaxiality grew with ongoing deformation. It was further revealed that the frame rate-dependence of the necking strain was rather low (< 2%), whereas the fracture strain could be underestimated by up to 8% when the lower frame rate of 1 fps was used (compared with 900 fps). In this study, this issue is investigated while taking into consideration the three different triaxialities. These results demonstrate the importance of choosing an appropriate frame rate for the determination of necking and fracture strains in particular.

Key Words : Digital Image Correlation, DP980 Sheet, Fracture Strain, Frame Rate, Onset of Instability, Triaxiality Failure Diagram

1. 서론

최근 자동차 산업에서는 온실가스 배출량 저감 및 연비 향상을 위해 자동차 경량화에 대한 연구가 많이 수행되고 있다. 기존에 자동차 관련 사용됐던

저강도 재료에 대해 연성 및 성형성을 유지하며 보다 강하고 얇은 재료로 대체하려는 움직임이 있다 [1, 2]. 이러한 이슈에 발맞춰 차체에 사용되던 연강을 대체할 Advanced high strength steel (AHSS) 제품군이 개발되었다. AHSS 제품에는 DP (dual phase) 강, TRIP (Transform Induced Plasticity) 강 및 CP (complex phase) 강 등이 있으며 이들 중 상대적으로 강도 및 성형성이 좋은 DP강의 사용량이 많이 증가했다.

DP강에 대한 연구로 Wu [3]등은 압연방향 및 클

1. 국립공주대학교 금형설계공학과

2. 국립공주대학교 기계자동차공학부

Corresponding Author : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Rep. of Korea,
E-mail: smhong@kongju.ac.kr, ORCID : 0000-0001-5569-6285

리어런스에 따른 전단특성에 대해 연구했다. 강판을 차체 형태로 성형할 때 다단 성형되며, 이때 성형이력은 차량 충돌 시 중대한 영향을 미친다. 일반적으로 금속 판재 파단한계는 일축 인장 시험에서 얻어지는 파단연신율로 결정하거나, Keeler [4]가 제안한 주/부방향의 변형률로 나타내어진 FLD (Forming Limit Diagram)를 기준으로 결정한다. 격자 또는 그리드가 인쇄된 판재시편을 장출시험 (Dome Height Test)을 이용해 인장시킨 후, 시편에 남아 있는 인쇄형상으로 FLD를 얻는다. 그러나 FLD는 변형률비가 변하지 않는 고정 변형률 비를 가정해 성형성을 평가하고 있다. 따라서 가공 중 변형 경로가 변경되는 경우 적용할 수 없다. 이 같은 한계를 뛰어 넘고자 변형이력을 알 수 있으며, 삼축 응력 상태를 고려해 성형성을 평가할 수 있는 TFD (Triaxiality Failure Diagram)를 이용한 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되었다. TFD는 횡축과 종축이 각각 삼축응력지수 (triaxiality index, η)과 파단시 유효 변형률 $\epsilon_{eq|frac.}$ 로 이루어지며 이때 η 는 평균 응력 σ_m 을 유효응력 σ_{eq} 로 나눈 무차원 값으로 정의된다. 특히 인장영역은 물론 압축 및 전단 영역을 포함한 전 응력상태에 대한 파단 예측을 가능케 하는 장점이 있다 (Fig. 1). Kim 등 [5]은 TFD 를 이용해 후판 성형시 발행하는 전단 파단에 대한 연구를 수행했다.

변형률 측정 시 신율계나 표점거리를 사용하면 국부 파단점의 변형률 측정이 불가능하므로, 변형률 측정을 위해 DIC를 사용하는 경우가 많아지고 있다. DIC를 이용한 DP강 관련 연구로, Anderson 등 [6]은 인장시험 및 FE 모델로 얻어진 TFD를 바탕으로 DP 780 판재의 파단한계를 제시했다. Kim 등 [7]은 실험적으로 얻어진 DP980 판재의 파단한계를 버링 테스트를 이용해 유효성을 검증했다. 이처럼 DIC 기반 DP강의 성형성 및 파단한계 관련 선행 연구들이 진행되었으나, 확산네킹 및 파단점에 대해 동시에 고려한 연구는 드물다. 무엇보다도 DIC는 기술특성상 이미지 포착개수 (프레임 속도)에 따라 국부점 변형 정도를 달리 판별하므로 이에 대한 의존성을 조사할 필요가 있다.

본 연구에서는 DP980 판재의 파단한계를 작성할 때 프레임 속도에 따른 변화를 살펴보고자 한다. 특성 삼축성을 나타내는 시편들 중, 판재 성형 시 가장 많은 변형 영역인 단축인장~평면변형응력 상태의 3가지 응력상태에 대한 TFD를 작성한다. 기존

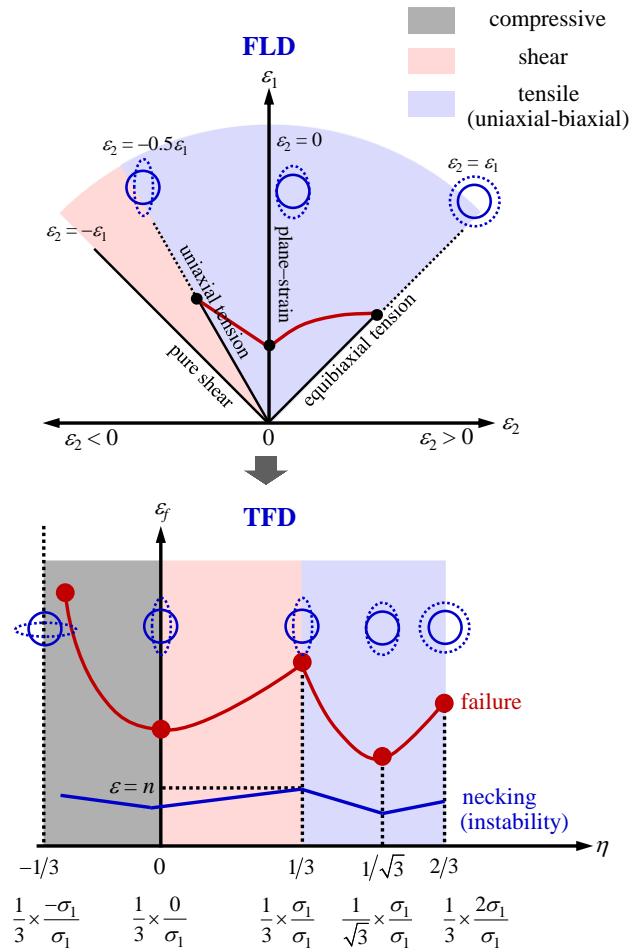


Fig. 1 Comparison of FLD and TFD

DIC 방법과 차별화를 두기 위해 촬영 시 프레임 속도에 따른 η 와 국부 파단점의 변형률 경로 변화를 확인한다. 일반적으로 판재성형은 평면 응력상태임을 감안하면 인장시험에서 얻어진 시편 표면의 주/부변형률 (ϵ_1, ϵ_2)로 ϵ_{eq} 및 σ_{eq} 으로 변환할 수 있다. 따라서 시편이 변형하는 동안에 걸쳐 η 를 계산할 수 있으며, η 변화를 통해 변형이력을 나타낼 수 있음을 실험적으로 보인다. 끝으로 프레임 속도에 따라 확산네킹점과 파단점의 ϵ_{eq} 편차를 분석해 변형양상 별 네킹 후 거동 특성 및 DIC의 프레임 속도 의존성을 도출한다.

2. 본론

2.1. Triaxiality Failure Diagram

TFD는 횡종축이 각각 삼축률 (η), 유효변형률 (ϵ_{eq})로 표현된다. 평균응력 (= 정수압력, σ_H)은 식 (1)

과 같고, 등방성 항복기준인 von Mises 항복 기준에서의 유효응력 (σ_{eq})은 식 (2)이다. η 는 σ_m 과 σ_{eq} 의 비인 스칼라 값으로 정의되며 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_m = \sigma_H \equiv \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} \quad (1)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2)$$

$$\eta \equiv \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}} \quad (3)$$

이때 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 각각 1, 2, 3 방향 주응력이다. η 는 하중경로를 나타내는 대표적인 응력 기반 표현이며, 변형경로와 무관하다. 최소 단면 반지름이 r , 원주 방향 노치 반경이 R 인 환봉 시편에서 η 를 확인하는 경우, 식 (3)은 식 (4)로 변환된다.

$$\eta = \ln\left(\frac{r}{2R} + 1\right) + \frac{1}{3} \quad (4)$$

그러나 환봉시편은 정확한 형상으로 제작하기에 어려움이 있어 식 (4)를 이용한 성형성 평가는 한계가 있다. 일반적으로, 판재 성형 시 평면응력 상태 ($\sigma_3 = 0$)가 되며, σ_1 과 σ_2 가 특별한 경우 응력상태를 손쉽게 계산할 수 있다. 예를 들어, 전단의 경우 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ 이므로 식 (3)에 의해 $\eta = 0$ 이 된다. 단축인장의 경우 $\sigma_1 = \sigma_{eq}, \sigma_2 = 0$ 이므로 $\eta = 1/3$ 이 되며, 평면변형의 경우 $\eta = 0.577$ 이다. 각 변형모드의 η 와 인장 시험으로 결정된 파단시 유효변형률 값을 연결하면 전체 응력 상태에서의 파단 예측곡선으로 활용할 수 있다. 한편 등방성 재료에서 유효변형률 ε_{eq} 은 식 (5)와 같다.

$$\varepsilon_{eq} \equiv \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (5)$$

이때 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 는 각각 1, 2, 3방향의 변형률이다. 재료가 소성 변형할 때 체적불변의 법칙 (volume conservation)에 의해 식 (6)이 성립하고 이를 식 (5)에 대입하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \rightarrow \varepsilon_3 = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2} \quad (7)$$

한편 α, β 를 각각 각각 주방향과 부방향의 응력비, 주방향과 부방향의 변형률비라고 정의하면 α, β 는 식 (8)과 같은 관계가 있다.

$$\beta \equiv \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \alpha \equiv \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \rightarrow \beta = \frac{2\alpha - 1}{2 - \alpha}, \alpha = \frac{2\beta + 1}{2 + \beta} \quad (8)$$

따라서 식 (3), (7), (8)을 이용하면 TFD를 실험으로도 얻을 수 있다. TFD를 구성하는 η 와 ε_{eq} 는 DIC로 얻어진 변형률만으로 나타낼 수 있다 [식 (9)].

$$\eta = \frac{\beta + 1}{\sqrt{3}\sqrt{\beta^2 + \beta + 1}}, \quad \varepsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_1 \sqrt{1 + \beta + \beta^2} \quad (9)$$

보다 다양한 η 에서의 파단변형률 ($\varepsilon_{eq|frac.}$)을 알고 있으면 파단 예측 곡선의 정확도가 증가한다. Bao와 Wierzbicki [8], Bai와 Wierzbicki [9] 등은 판재에 대해 단축인장시험, 노치 형상이 다른 시편 등을 사용해 판재의 TFD를 작성 했다. 본 연구에서는 선행연구 [7]에서 제안한 시편 형상을 바탕으로 인장시험기만으로 TFD를 작성 하고자 한다. TFD를 작성하기 위해서는 η 와 $\varepsilon_{eq|frac.}$ 를 획득해야 한다. 무엇보다도 국부 파단점의 변형률 측정이 가능해야 한다. 전통적 변형률 측정방법에서는 국부 파단점의 변형률 측정을 정확하게 할 수 없다. 이에 본 연구에서는 2.2에서 설명할 DIC를 이용해 시편 전면적의 변형률을 얻고자 한다. 이는 파단 시작점의 위치 및 파단 시점의 판별을 정확하게 할 수 있다.

2.2 Experiment

2.2.1 Digital image correlation

측정기술의 발전으로 인해 이전보다 정확한 변형

를 측정이 가능해졌다. 변형률 측정에 있어 계측하고자 하는 시편 및 물체에 변형 전/후를 사진 촬영하고 이미지들 사이의 상관관계를 분석하는 DIC 방법이 사용되고 있다. 이를 통해 전면적에 대한 계측을 손쉽게 할 수 있다 [10, 11]. 인장 시험에서 변형률 획득 범위는 신율계 사용 시 표점거리 기준으로 15% 내외이지만, DIC를 이용하면 이보다 2배 이상 높다. Yang 등 [12]은 DP 980판재에서 신율계와 DIC로 얻어진 파단 변형률을 비교했으며, 신율계에서 얻어진 파단 변형률 보다 약 2.6배 큰 파단 변형률을 얻을 수 있음을 보였다. DIC는 이미지에서 개별 픽셀이 갖는 명암차이로 변형률을 계산하게 된다. 명암비를 나타내는 방법은 여러 방법이 있지만, 일반적으로 시편 전체 표면에 흰색 페인트 또는 스프레이를 도포한 뒤 그 위에 검정색 점들을 무질서하게 도포하는 방법을 주로 사용하며 이 같은 형상을 스펙클 패턴이라 칭한다. Charge-coupled device (CCD) 카메라로 이미지를 촬영할 경우 화소 하나가 갖는 명암 값은 총 256단계로 나뉘어진다 [13]. 측정된 영상에서 시편 표면의 명암 차가 클수록 정확도가 높다. DIC의 기본원리를 Fig. 2에 나타냈다. 본 연구에서 사용한 시편에 스펙클 패턴을 입힌 것을 Fig. 3에 나타냈다. 시험에 사용한 재료는 압연방향 ($RD = 0^\circ$)에서 가공된 두께 $t = 1.0\text{mm}$ 인 DP980 판재이다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 판재 성형의 대부분을 차지하는 단축인장 에서부터 평면변형까지만을 다루기로 한다. 단축 인장시편은 ASTM [14] 규격을 따랐으며, 나머지 시편들의 형상은 기존 연구에서 [7] 제시한 것을 따랐다. 편의상 Fig. 3 (a)-(c)를 각각 uni, R_i , R_s 로 명명한다.

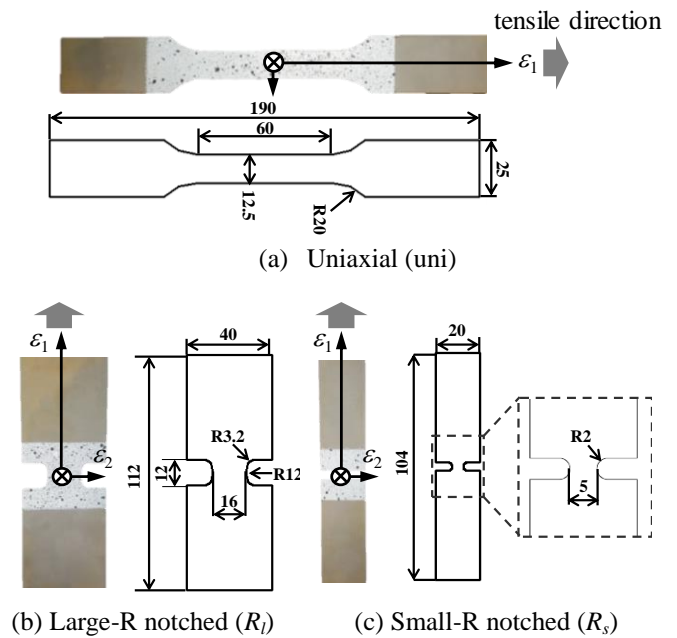


Fig. 3 Shape of specimens

2.2.2 Equipment

인장시험 진행 동안, 스테레오로 작동하는 카메라 2대를 사용해 이미지 기록이 가능하다. 본 연구에서는 프레임 속도에 따른 변형률의 변화를 확인하고자 일반카메라 1쌍과 고속 카메라 1쌍의 총 2가지 경우에 대해 DIC를 적용했다. 카메라의 상세 사양은 Table 1에 비교되어 있다. 각각의 경우에 대해 기록된 이미지를 바탕으로 상용 DIC 분석 소프트웨어인 GOM ARAMIS [15]를 사용해 이미지에 overlay된 가상의 신율계, 즉 스펙클 패턴의 변화를 통해 변형률 계산을 한다.

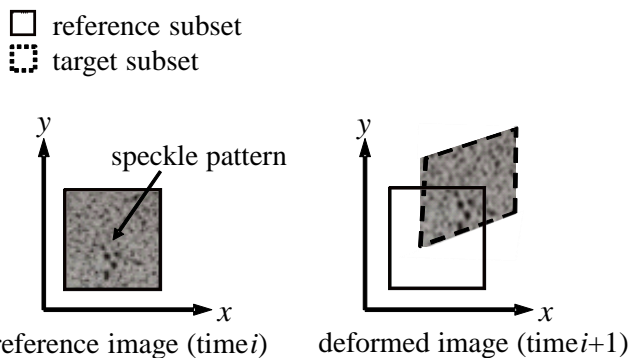


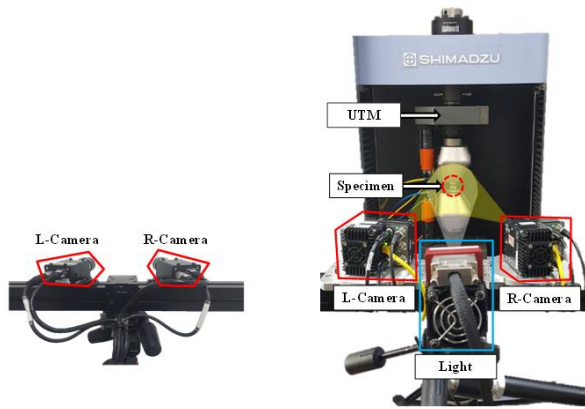
Fig. 2 Schematic diagram of DIC method

Table 1 Comparison of camera specification

	Conventional	High speed camera
Full resolution	2448×2050 pixel	1280×1024 pixel
Frame rate at full resolution	maximum 14 fps	maximum 915 fps
Minimum exposure	0.1 ms	5 μs
ISO (12232 SAT method)	mono	640D/640T color/ 2500D/5000T mono
Camera control	ARAMIS professional	Phantom camera control (PCC) Multi-cam software SDK available

Table 2 Machine parameters of UTM and tensile test conditions

SHIMADZU AG-X		
Load cell	capacity	5000N (50kN)
	resolution	1/5000
	accuracy	±0.1% of full scale
Testing speed		1mm/min
Crosshead measurement resolution		1/48 μm
Crosshead speed accuracy		±0.1%



(a) Conventional camera (b) High speed camera
Fig. 4 Experimental equipment

시험에 사용한 장비는 SHIMADZU AG-X이며 Table 2에 상세 사양 및 본 시험에 적용한 조건들을 나타냈다. 시편당 최소 3번 이상의 시험을 통해 반복성을 확인했으며, 일반 카메라와 고속 카메라에 대한 시험 장비의 실제 설정을 Fig. 4에 나타냈다.

2.3 Experimental result

2.3.1 Conventional camera

DP980의 각 시편 형상에 대해 파단점과 불안정 시작점에서 얻어진 TFD를 Fig. 5에 나타냈으며 이때 불안정 시작점과 파단점에서의 각 시편의 변형 상태를 Figs. 6, 7에 나타냈다. Fig. 5에 기록된 실험값들은 3번의 실험에서 얻어진 값들을 평균 내어 기록했고, 이때 η 와 $\epsilon_{eq|frac}$ 의 표준편차는 각각 0.026, 0.036이다. 파단 점은 시편이 끊어져 두 개로 분리되는 시점이며 불안정 시작점은 확산네킹이 시작되는 순간으로 하중-변위 곡선에서 최대 하중 점과 같다. η 의 시작 값을 이론적 값으로 설정하면 고려한

시편 모두 η 의 시작 값 (시험 전)과 끝 값 (시험 후)이 다르다. 이는 시편의 변형경로가 변하고 있음을 의미한다. 또한 파단점의 ϵ_{eq} 는 uni (0.496) → R_t (0.352) → R_s (0.289) 순서로 낮아진다.

이와 같이 평면변형으로 갈수록 파단점이 낮아지는 경향은 다른 선행연구들의 결과와 일치한다. 파단점은 단축인장 응력 상태일 때 가장 높지만, 불안정 시작점은 단축인장 상태와 평면변형 상태가 거의 비슷하다. 불안정 시작 이후 파단에 이르기까지, 즉 네킹 이후 변형을 견디는 정도는 평면변형 응력 상태에서 가장 짧다. 따라서 판재 성형시 평면변형은 성형성을 저하시키는 악성 모드로 작용한다.

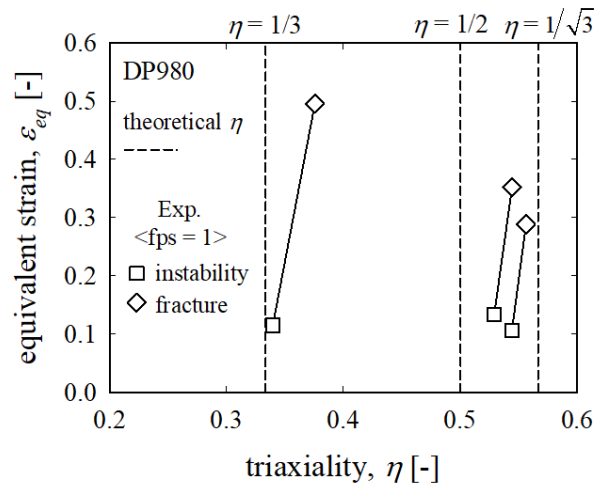


Fig. 5 TFD using conventional camera

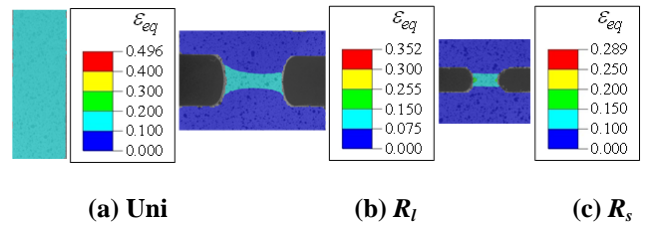


Fig. 6 ϵ_{eq} of different specimens at onset of instability

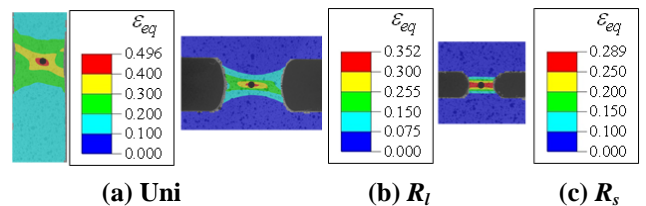


Fig. 7 ϵ_{eq} of different specimens at fracture

2.3.2 High speed camera

DIC를 이용해 국부 파단점의 변형률을 측정함에 있어 1초에 1장의 이미지를 촬영하면 인장속도가 준정적이더라도 실제 파단의 정확한 순간을 포착할 수 없다. 따라서 일반적 카메라 (conventional camera)로 DIC를 이용하면 파단한계를 보수적으로 판단할 수 밖에 없다. 보다 현실적인 파단한계를 확인하기 위해 1초에 900장의 이미지를 촬영하는 고속 카메라 (High speed camera)를 이용해 DP980 각 시편의 파단한계를 측정했다. 앞서 설명한 일반 카메라와 마찬가지로 3번의 실험에서 얻어진 값들을 평균 내어 TFD를 작성했고, 프레임 속도에 따른 불안정 시작점과 파단점에서 유효변형률의 평균값과 표준편차를 Table 3에 나타냈다. 이때 η 와 $\epsilon_{eq|frac.}$ 의 최대 표준편차는 각각 0.027, 0.032이다. 고속 카메라를 사용해 TFD를 작성하면 일반 카메라를 사용한 경우보다 파단점에서의 ϵ_{eq} 가 모두 커진다 (Fig. 8). 이러한 경향은 특히 단축인장에서 두드러지며 $\epsilon_{eq|frac.}$ 의 증가율은 uni에서 6.7%, R_l 에서 8.4%, R_s 에서 8.3%이다. 불안정 시작점의 변형률도 프레임 속도에 따라 차이가 있으나 파단점만큼 크게 차이가 나지는 않는다. 이는 상대적으로 하중-변위 곡선에서 프레임 속도에 따라 파단점의 하중차이가 크게 나타나기 때문이다.

앞서 언급한대로 국부 파단점의 변형률 측정에 있어서 파단 시점 이미지 포착이 매우 중요한 만큼 프레임 속도를 크게 할수록 정확한 파단한계를 얻을 수 있다.

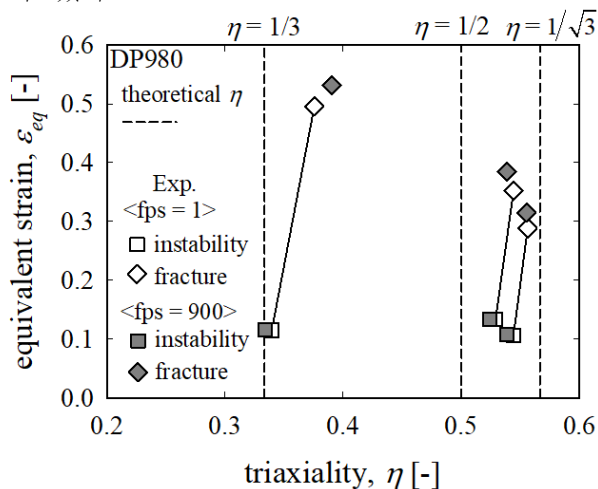


Fig. 8 Comparison of fracture strain between conventional camera and high speed camera

Table 3 ϵ_{eq} comparison according to frame rate

DP980		instability		
		CC *	HSC *	gap (%)
Uni	Avg	0.1150	0.1155	-0.4
	STDEV	0.0187	0.0214	
R_l	Avg	0.1331	0.1335	-0.3
	STDEV	0.0243	0.0205	
R_s	Avg	0.1060	0.1079	-1.8
	STDEV	0.0277	0.0185	
DP980		fracture		
		CC	HSC	gap (%)
Uni	Avg	0.4957	0.5315	-6.7
	STDEV	0.0228	0.0320	
R_l	Avg	0.3521	0.3845	-8.4
	STDEV	0.0361	0.0245	
R_s	Avg	0.2887	0.3149	-8.3
	STDEV	0.0283	0.0151	

*CC : conventional camera (1fps);

HSC : high speed camera (900fps)

3. 결론

본 연구에서는 DP980 판재에 대해 프레임 속도를 달리해 파단한계의 변화를 살폈다. 변형률 측정시 표점거리 길이의 영향을 제거하고자 DIC를 적용했다. 단축인장부터 평면변형 응력상태를 나타낼 수 있는 특정 시편들에 대해 시편 표면에서 얻어진 주/부변형률 만으로 TFD를 작성했다. DIC를 적용할 때 프레임 속도에 따른 변형률 변화를 확인하고자 초당 이미지 촬영 수를 달리해 (1장 및 900장) 시편 변형과정을 실시간으로 촬영했다. 실험 결과 확산 네킹점에서의 유효변형률은 시편 형상에 상관없이 즉, 삼축성에 관계 없이 프레임 속도 의존성이 낮다. 확산네킹 이후 파단에 이르기까지 국부 파단지점의 삼축성은 변형률과 함께 계속 증가한다. 프레임 속도에 따라 실험적으로 얻어진 TFD를 비교하면 파단 시점에서의 유효변형률은 고속 카메라 (fps = 900)를 사용한 경우 일반카메라 (fps = 1)보다 약 9% 크게 측정된다. 이는 판재 파단한계를 DIC로 결정할 때 프레임 속도가 실험 결과의 신뢰성, 특히 파단 변형률에 크게 영향을 미침을 보여준다. 다양한 fps에 대해서 인장응력 상태뿐만 아니라 전단, 압축 응력 상태에 대한 추가적인 실험을 바탕으로 DIC를 적용할 때의 적정 fps를 제안할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] Khan, M.S., Bhole, S.D., Chen, D.L., Boudreau, G., Biro, E., Deventer, J.V., 2009. Resistance spot welding characteristics and mechanical properties of galvanized HSLA 350 steel, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 48, No. 3, pp. 303~310.
- [2] Joost, W., 2012. Reducing vehicle weight and improving U.S. energy efficiency using integrated computational materials engineering, *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 64, No. 9, pp. 1032~1038.
- [3] Wu, X., Bahmanpoura, H., Schmid, K., 2012. Characterization of mechanically sheared edges of dual phase steels, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 1209~1224.
- [4] Keeler, S.P., 1965. Determination of forming limits in automotive stampings. SAE Technical Paper 650535, <https://doi.org/10.4271/650535>.
- [5] M. Kim, S. Hong, 2019, Simulation of Shear Fracture in Sheet Metal Forming of Thick Plates under Triaxial Stress States, *Journal of Mechanical Science and Technology*, in press.
- [6] Anderson, D., Butcher, C., Pathak N., Worswick, M.J., 2017. Failure parameter identification and validation for a dual-phase 780 steel sheet, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 124, pp. 89~107.
- [7] M. Kim, H. Lee, S. Hong, 2019, Experimental determination of the failure surface for DP980 high-strength metal sheets considering stress triaxiality and Lode angle, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 100, pp 2775~2784.
- [8] Bao, Y., Wierzbicki, T., 2004. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, pp. 81~98.
- [9] Bai, Y., Wierzbicki, T., 2010. Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture. *International Journal of Fracture*, Vol. 161, pp. 1~20.
- [10] Pan, B., Wu, D., Xia, Y., 2012. Incremental calculation for large deformation measurement using reliability-guided digital image correlation, *Optics and Laser in Engineering*, Vol. 50, pp. 586~592.
- [11] Kim, W., Hong, S., 2017. 2D image numerical correction method for 2D digital image correlation. *Korea Academy Industrial Cooperation Society*, Vol. 18, pp. 391~397.
- [12] L. Yang, L. Smith, A. Gotheekar, and X. Chen, 2010, Measure strain distribution using digital image correlation (DIC) for tensile tests, Department of Mechanical Engineering, Oakland University, Rochester, MI, United States.
- [13] Kim, W., Jo, J., Kim, D.S., Kim, D.G., Hong, S., 2016. Development of auto-spray system to improve the quality of 3D scanning quality. *Korea Academy Industrial Cooperation Society*, Vol. 17, pp. 100~105.
- [14] ASTM International. 2013. Standard test method for tension testing of metallic materials. *American Society for Testing and Materials E8/E8M-13*.
- [15] ARAMIS, 2011. User's Manual-Software v6.3.1. GOM-Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, Braunschweig, Germany