工學碩士 學位論文

Al 인장시험편의 디지털 이미지상관관계를 이용한 변형율 측정에 관한 연구

2010 年 2 月

釜 慶 大 學 校 大 學 院

安 全 工 學 科

金 泰 庚

工學碩士 學位論文

Al 인장시험편의 디지털 이미지 상관관계를 이용한 변형율 측정에 관한 연구

指導敎授 權 五 憲

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2010 年 2 月

釜 慶 大 學 校 大 學 院

安 全 工 學 科

金 泰 庚

金泰庚의 工學碩士 學位論文을 認准함

2010 年 2月

主 審 工學博士 崔 載 旭 (印)

委 員 工學博士 愼 晟 佑 (印)

委 員 工學博士 權 五 憲 (印)

목 차

1. 서 론 ····· 1

2. 기 본 내 용 ····· 4

2.1 변형율 측정 방법 ····· 4

2.2 전기저항 스트레인 게이지에 의한 방법 ····· 5

2.3 DIC ····· 7

3. 시험편 및 실험방법 ····· 11

3.1 시험편 및 실험 재료 ····· 11

3.2 실험방법 ····· 14

4. 실험결과 및 고찰 ····· 16

5. 결 론 ····· 40

인 용 부 호 ····· 41

참 고 문 헌 ····· 43

Abstract ····· 46

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

1. 서 론

구조물의 변형 및 파손의 원인은 일반적으로 구조물의 설계나 운영에서의 부주의 또는 새로운 재료를 사용할 때 초래되는 예측하지 못한 결과와 같은 두가지 형태 가운데 하나에 속하는 경우가 대부분이다. 일반적으로 구조물이 하중을 받을 경우에는 위험성이 내포되고, 설비 및 기계 구조물의 파손 및 고장이 유발될 수 있다. 그러므로 새로운 설계나 재료는 광범위한 분석 후에 사용되어야 하며, 여러 가지 접근방법으로 변형 및 파손의 횟수를 감소시켜 나가야 할 것이다. 이러한 변형 및 파손에 영향을 미치는 변형율(strain)과 응력(stress)을 측정하기 위하여 스트레인 게이지(strain gauge)를 이용한 변형율 측정법, 수치 해석적 기법, 광탄성 실험[1], 모아레 간섭법(Moire Interferometry), ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)법[2] 및 디지털 이미지 상관관계(Digital Image Correlation : 이하 DIC라고 한다.)법 등의 상당한 신뢰성을 가지는 다양한 측정기법들이 연구되어져 왔다. 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 스트레인 게이지에 의한 변형율 측정은 작용하는 응력에 대한 게이지 저항이 달라지는 것을 이용한다. 스트레인 게이지는 구조적으로 취약하다고 판단되는 부위에 부착하고 구조시험을 수행한다. 이 때 변형정도에 따른 게이지 저항값의 변화를 측정기를 통해서 얻어진 전기 저항값을 이용한다. 그 결과를 해석결과와 비교하고 이를 설계에 반영하면 보다 더 안정된 결과를 얻을 수 있다. 하지만 스트레인 게이지법은 온도 및 습도에 민감하고, 사용되

는 전기 저항이 매우 약하기 때문에 오차가 생길 가능성이 많다. 또한 변화 신호가 작으므로 증폭부가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점의 보완을 위한 여러 가지 방법 중 DIC기법이 큰 가능성을 제시하고 있고, 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

DIC기법은 변형체의 내·외부에 발생되는 변위 및 변형율을 전 영역(full field)에서 평가할 수 있는 방법으로, 무작위로 분포되어 있는 그레이 세기 레벨(gray intensity levels)에 의해 디지털 이미지정보를 분석함으로써 변형 전·후 시험편의 변형율을 얻을 수 있는 방법이다.[3,4] 변형 전·후의 디지털 이미지 상관관계를 수학적으로 정의가 명확한 함수를 사용하여 규명함으로써 변형체의 관심 있는 전 영역에서 평가가 가능하다. 또한 디지털 이미지로써 시험편 표면의 스펙클 패턴(speckle pattern)을 CCD카메라에 의하여 얻을 수 있기 때문에 전형적인 시각적 측정과 비교하여 볼 때 훨씬 간편하여 자동적이고 비접촉 측정이 가능하다.[5,6] 게다가 균질하지 않은 전 영역의 변형율을 알 수 있는 장점을 가지고 있다.[7] 이러한 장점을 가진 DIC기법은 1982년에 Peters와 Ranson[8]은 변위와 변형율을 측정하기 위해 최초로 변형 전·후의 표면이미지 변형의 강도 패턴(intensity pattern)에 대한 상관관계를 규명하는 연구를 시도하였고, Sutton과 Wolters[9] 등은 DIC software를 개발하여 기존의 균질재에 대한 정적·동적 상태에서의 변형율을 측정하는 연구를 다수 수행하는 등 1980년대 이후 활발한 연구가 수행되어지고 있다. 하지만 이런 특징을 가지고 있는 DIC기법은 우리나라에서는 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 산업 현장에서 널리 사용되어지고 있는 알루미늄합금(Al 6061-T6)을 DIC기법과 스트레인 게이지를 통해 표면상의 변형율을 측정하여 유효성을 비교·평가하였다. 이를 통해 DIC기법이 재료 및 제품의 전 영역의 변형상태를 모니터링하고, 세부적인 손상 특징을 규명하는데 필요한 신뢰성과 효율성 평가에 기여할 것으로 판단된다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

2. 기본내용

2.1 변형율 측정방법

구조물의 안전을 확보하기 위해서는 결함, 변형율 및 응력이 어떤 부분에 존재하는가를 파악하는 것이 매우 중요하다. 변형율 측정은 기계나 구조물을 설계할 때 부재의 치수, 형상, 재료의 적절성을 판단하거나 제작된 기계나 구조물의 사용 중 파손, 변형되지 않도록 감시하는데 이용된다. 변형율 측정은 일반적으로 다음과 같은 방법[10~14]이 있다.

1) 광탄성 실험법

고분자 재료의 피굴절로부터 주응력차 및 주응력방향을 측정을 하는 방법으로 3차원 물체의 내부응력해석에 적합하며 전체응력분포를 한 눈에 알 수 있다. 또한 복잡한 물체의 내부 응력도 측정 가능하며 응력집중해석의 최적 방법이다. 하지만 단점으로는 장비가 고가이며 실험이 다소 난해하다는 점이 있다.

2) X선 응력측정법

금속결정체의 격자면 간의 거리 변화에 따라 응력을 측정하는 방법으로 실물의 잔류응력을 비파괴적으로 측정 가능하지만 표면에서만 측정이 가능하고

X선 이용에 따른 방사선 장해 가능성이 있고 고가라는 단점을 가지고 있다.

3) 모아레 간섭법

시료표면에 가는 선을 긋고 그 변형을 직접 또는 모아레 줄무늬로부터 변위를 측정하는 방법으로 실물 및 모델에서 측정이 가능하고 고온·저온 하에서도 측정이 가능하고 대변형도 측정가능하다. 하지만 감도가 낮고, 표면연마가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 이 방법은 전 분야에 사용되고, 금속의 융점부근까지는 소성스트레인 해석까지 가능하며, 재료시험에 좋으며, 미소영역 스트레인 해석이 가능하고 면 외 변형도 측정가능하다.

2.2 전기저항 스트레인 게이지에 의한 방법

전기저항 스트레인 게이지에 의한 방법[11~14]은 현재 가장 널리 이용되고 있는 변형률 측정법으로, 스트레인 게이지라 불리는 소자를 물체의 표면에 접착시켜 물체가 변형할 때와 동시에 변형하는 스트레인 게이지의 전기저항 변화를 측정하여 그 위치의 변형율을 구하는 방법이다. 이 방법의 원리는 금속선이 인장 될 때 길이와 단면적의 변화에 따른 저항의 변화를 이용하는 것으로, 이 저항의 변화량을 전기적으로 측정하여 금속선의 변형율을 알 수 있다. 이 금속선의 소자를 스트레인 게이지 또는 게이지라고 하며 크기가 상당히 작고, 두께가 얇기 때문에 부착이 간단하고, 시험체에 영향을 거의 주지 않는 장점

을 가지고 있다. 변형율을 측정하려고 하는 물체에 게이지를 접착시키면 금속선이 물체와 같은 변형을 받기 때문에 금속선의 전기량 변화로부터 물체의 변형율을 알 수 있다. 게이지 격자(grid)는 몇 회 되접혀져 있는 저항선으로, 이것이 재료의 변형에 따라 신축하여 그 저항값(R)이 변화한다. 저항변화량(ΔR)과 재료의 변형(Δl)과의 관계는, 재료의 원래길이를 l로 하면, 다음과 같이 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta \mathrm{R}}{\mathrm{R}} = \mathrm{K} \times \frac{\Delta \mathrm{l}}{\mathrm{l}} = \mathrm{K}\varepsilon \qquad (1)$$

여기서 K는 게이지율이라 하고, 일반적으로 K≒2 의 값을 가진다. 또 ε ($\varepsilon = \Delta l/l$)는 변형율을 나타낸다. 재료의 변형에 의한 게이지의 저항변화(ΔR)는 전압(e)으로 바뀌며, 그 뒤에 계기에서 증폭, 기록되어 데이터로 된다. 이 출력전압(e)과 재료의 변형(Δl)과의 관계는, 전원전압을 E라 하면 식(2)와 같다.

$$\mathrm{e} = \frac{1}{4} \times \frac{\Delta \mathrm{R}}{\mathrm{R}} \times \mathrm{E} = \frac{1}{4} \mathrm{K}\varepsilon \mathrm{E} \qquad (2)$$

2.3 DIC

DIC기법은 변형체의 내·외부에 발생되는 변위 및 변형율을 전 영역에서 평가할 수 있는 방법으로 시험편 표면의 변형 전·후의 스펙클 패턴의 움직임을 평가하여 변위장을 얻는다. 영상데이터의 스펙클 패턴으로부터 각 포인트의 변위에 대한 초기 추측치가 각 하중상태에서의 기준 영상데이터에 대한 대응 패턴을 선택하여 선정한다.[15,16] 초기 추측치로부터 기준 상태의 서브셋 pixel과 하중상태의 서브셋 pixel의 최적 매치상태를 얻음으로써 x축 방향의 변위 U와 y축 방향의 변위 V를 평가할 수 있다. 최적매치는 서브셋을 나타내는 그레이 수준항으로 주어지는 에러함수를 최소화되도록 조정함으로써 얻어진다.[17] 이 방법은 임의로 분포되어 있는 그레이레벨 세기를 분석하여, 변형이 진행 된 다른 시간대의 두 개의 디지털 이미지 사이의 그레이레벨 강도를 최적화하는 것이다. Fig. 1에서와 같이 2차원 변형 상태 하에 있는 평판을 가정하면, 변형이 일어나는 동안 $P_0(x_1, x_2)$는 $\overline{P_0}(y_1, y_2)$로 이동하게 된다. 서브셋 S는 점 P_0의 주위에서 균등한 변형이 일어나는 미소영역을 나타낸다. 이 때 S내의 $P(\overline{x_1}, \overline{x_2})$를 고려해 볼 때 식(3)을 얻을 수 있다.

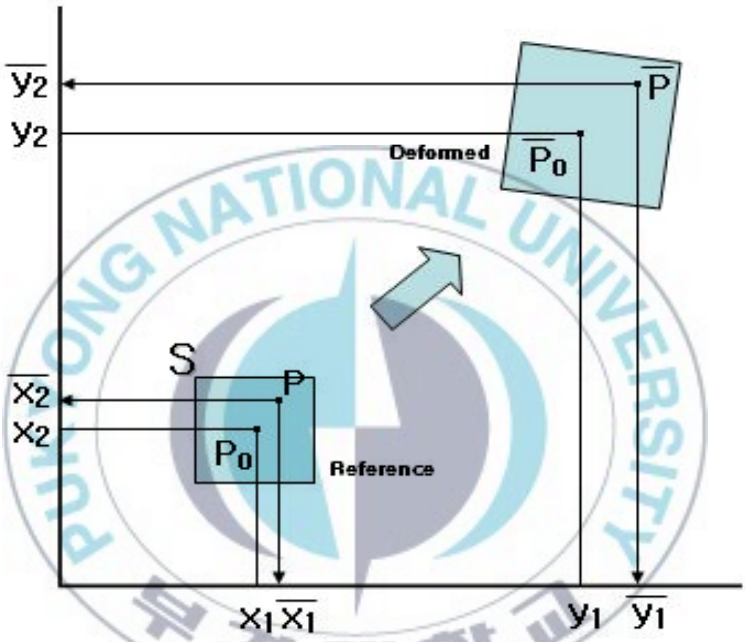


Fig. 1 The schematic local region deformation under the loading.

$$\overline{y_1} = \overline{x_1} + u_1 + u_{1,1}\Delta x_1 + u_{1,2}\Delta x_2$$
$$\overline{y_2} = \overline{x_2} + u_2 + u_{2,1}\Delta x_1 + u_{2,2}\Delta x_2 \qquad (3)$$

여기서 u_1과 u_2는 1, 2방향에서 $P_0(x_1, x_2)$의 변위를 나타낸다. $u_{\alpha,\beta}$ $(\alpha, \beta = 1, 2)$는 각각 $\partial u_\alpha / \partial x_\beta$ 와 $\Delta x_\alpha = \overline{x_\alpha} - x_\alpha$을 나타낸다. 표면의 변형 영역을 결정하기 위해서, 식(3)에서 나타나 있는 6가지의 파라미터 $u_1, u_2, u_{1,1}, u_{1,2}, u_{2,1}, u_{2,2}$를 얻음으로써 변형된 서브셋과 변형되지 않은 서브셋의 관심 영역(Region of Interest)에 대한 2차원적 디지털 이미지 상관관계를 적용한다.[18] 변형되지 않은 영역에서의 pixel은 변형된 영역에서의 non pixel 포인트 위치에 옮겨 질 수도 있기 때문에 변형된 이미지의 직사각형 영역에 놓여 있는 $P_0(y_1, y_2)$에서의 그레이레벨 세기를 얻어야 한다. 그레이레벨 세기의 계산은 변형된 이미지의 pixel 포인트에서 구한 세기값으로부터의 보간법을 통해서 행해진다. 보간함수는 선형(bilinear)적, 입방(bicubic)적이다. 보간법으로 계산되어진 후 변형된 이미지와 변형되지 않은 이미지 사이의 pixel 세기를 비교한다.

$f\{P(x_1, x_2)\}$와 $g\{\overline{P_0}(y_1, y_2)\}$는 각각 변형된 형태와 변형되지 않은 형태에서의 서브셋 S의 세기이다. 이를 비교하기 위해 최소영역에 대한 상관관계계수

C[19]는 다음 식(4)와 같이 나타낸다

$$C = \frac{\sum_{i,j=1}^{n} A(x_i, y_j) \sum_{i,j=1}^{n} B(x_i', y_j')}{\left[\sum_{i,j=1}^{n} A(x_i, y_j)^2 \sum_{i,j=1}^{n} B(x_i', y_j')^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

P점의 변위는 P점 주위의 미소 서브셋 면적에 있어서 상관관계계수를 최소화하거나 변형 전·후의 그레이스케일 세기의 상호상관계수를 최대화함으로써 얻을 수 있다. 그레이스케일 세기는 변형 전·후에 불변이기 때문에 상관관계는 P점의 원위치와 미지의 변형 파라미터 S벡터에 의존한다. S벡터는 다음 식(5)[5,19]와 같으며 오차함수를 최소화함으로써 최적의 S값을 얻을 수 있다.[20]

$$S = \left(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (5)$$

3. 시험편 및 실험방법

3.1 시험편 및 실험재료

본 연구에 사용 된 실험재료는 두께 1mm의 Al 6061-T6 알루미늄합금을 사용하였다. Table 1은 시험편 제작에 사용한 Al 6061-T6 알루미늄합금의 화학적 조성[21]을 나타낸다.

Table 1 Chemical Composition of Al 6061-T6 (mass %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.66	0.20	0.32	0.06	1.08	0.14	0.04	0.03	Bal.

인장실험 시 사용한 시험편은 8 × 100 mm로 제작하였다. 시험기의 그립으로부터 손상을 방지하기 위하여 시험편 양 끝단에 알루미늄 탭을 부착하였다. 인장실험을 할 경우, 탭 부위에는 응력집중에 의한 파손을 방지하기 위해 30°의 테이퍼각을 주었다. 또한 그립으로부터 시험편의 슬립을 방지하기 위하여 탭 표면은 엠보싱처리를 하였다. 제작 된 시험편은 알루미늄 탭을 부착한 후 전기로(국내 K사, HY-8000S)에서 80℃로 30분간 열처리를 수행하여 탭의 접

합강도를 강화시켜 시험편에서 탭이 슬립되는 것을 방지하였다. 제작된 시험편의 형상은 Fig. 2에서 나타내었다. 제작된 시험편은 변형율 측정을 위하여 정중앙에 스트레인 게이지를 부착하고, 이를 Amplifier에 연결하였다.

DIC기법에 의한 변형율 측정을 위해 스트레인 게이지를 부착한 반대쪽 표면에 백색 안료(KRYLON 미국 S사, FLAT type)를 일정거리에서 분사하여 시험편 표면에 균일하게 도포하고, 완전히 건조 후 다시 흑점 패턴을 형성시켰다. 또한 DIC기법을 통한 입체적인 변형율 측정을 위해 표면상의 변형율 뿐만 아니라 시험편 측면에도 동일한 방법으로 백색 안료를 균일하게 도포하고 다시 흑점 패턴을 형성시켰다. 완성된 패턴형상은 Fig. 3에 나타내었다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

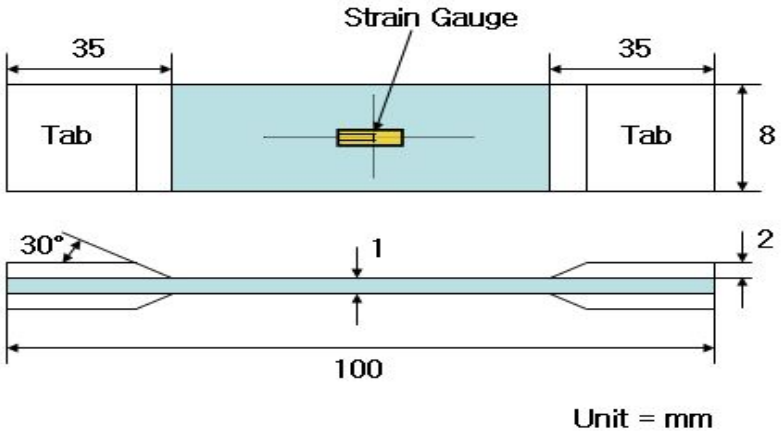


Fig. 2 Specimen configuration.

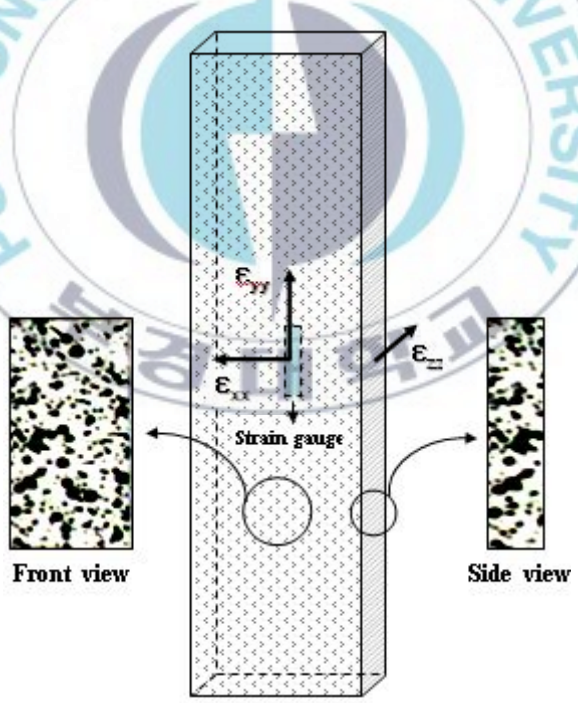


Fig. 3 Black speckle pattern for test.

3.2 실험방법

본 연구에 사용된 시험기는 소형재료시험기(T.O.사, 5kN)를 사용하였으며, 인장실험은 0.5, 1.0 및 3.0 mm/min의 변위제어로 상온에서 수행하였다. 스트레인 게이지를 이용한 변형율 측정을 위해 Model 5100B Scanner(V사)를 이용하였다. 이 때 얻어진 신호는 PC에 입력되고, 전용 변형율 해석 프로그램(Strain Smart)을 통하여 신호를 분석, 획득하였다.

DIC기법에 의한 변형율 측정에서 시험편의 정면에 나타나는 변위 및 변형율장의 측정을 위해 인장실험 중 광섬유 조명기를 광원으로 사용하고 1391×1039 pixel을 가지는 고해상도 CCD카메라(QICAM)로 변형영상을 일정간격으로 취득하였다.

기준 상태의 서브셋 pixel과 하중상태의 서브셋 pixel의 최적 매치 상태를 평가하는 기준이 되는 표준타켓의 이미지를 얻기 위해 표면에 원형의 점들이 2mm간격으로 9×12개로 구성되어 있는 타켓의 이미지를 시험편과 동일한 위치에서 시험편의 형상을 얻은 경우와 동일한 카메라 조건으로 취득하였다. 또한 시험편 측면에서 발생하는 변위 및 변형율장의 측정을 위해 시험편 정면에 나타나는 변형영상을 취득한 경우와 동일한 실험조건 하에서 측면에 나타나는 변형영상을 일정간격으로 취득하였다. 획득된 변형영상은 DIC해석프로그램을 이용하여 평가하였다. Fig. 4는 실험장치의 개략도를 나타낸다.

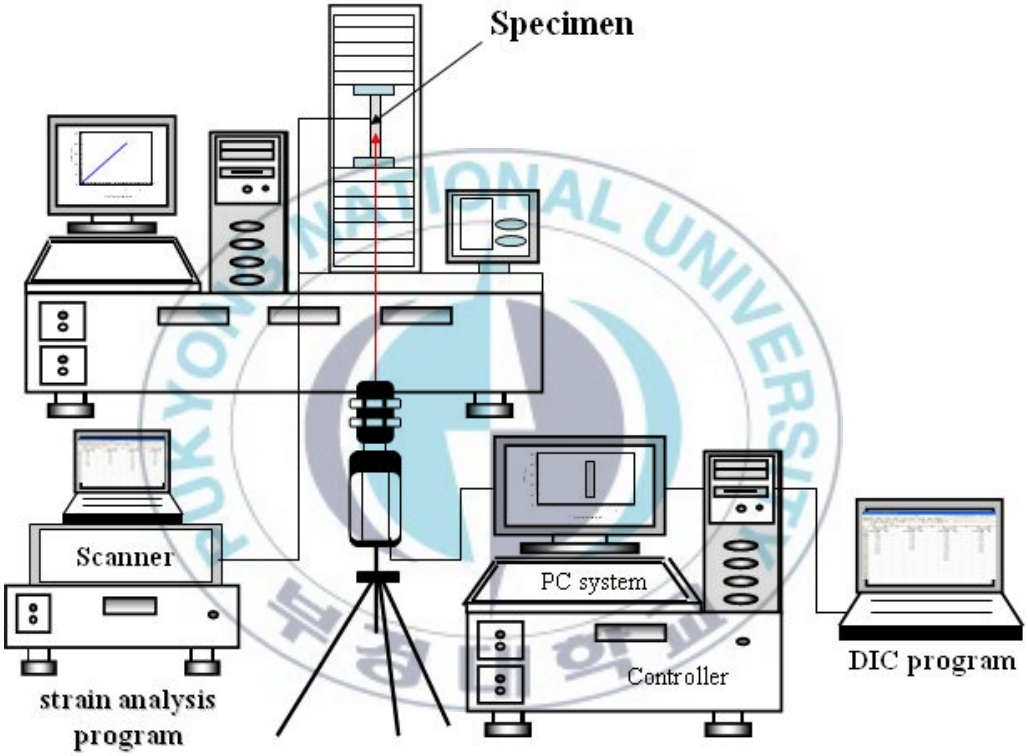


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus.

4. 실험결과 및 고찰

변위속도 0.5, 1.0 및 3.0 mm/min의 조건하에서 Al 6061-T6에 대한 단순인장 파괴실험 시 발생하는 변형율을 DIC기법과 스트레인 게이지를 통해 측정하여 비교한 결과를 Fig 5, 6, 7에 나타내었다. 여기서 얻어진 변형율 값은 시험편 정면의 중앙지점에서 발생한 ε_{yy}값을 나타낸다.

Fig. 5는 변위속도가 0.5 mm/min인 경우 스트레인 게이지와 DIC기법을 통해 얻어진 ε_{yy}값을 나타낸다. Fig. 5(Ⅰ)은 탄성구간에서의 ε_{yy}값을 비교한 결과를 나타낸다. 초기하중이 가해진 이후 스트레인 게이지를 통해 얻어진 ε_{yy}값은 선형적인 증가가 나타났다. 초기하중을 가한 후 응력값 220.14MPa인 경우 DIC기법을 통해 나타난 ε_{yy}값과 스트레인 게이지를 통해 얻어진 ε_{yy}값은 최대응력인 경우 발생하는 ε_{yy}값의 1.3% 차이가 나타났다. Fig. 5(Ⅱ)는 소성구간에서의 ε_{yy}값을 비교한 결과이다. 이 때 스트레인 게이지와 DIC기법을 통해 나타난 ε_{yy}값은 거의 일치하였다. 하지만 스트레인 게이지을 통해 얻어진 ε_{yy}값의 경우 비교적 큰 연신율을 가지는 알루미늄 합금의 특성상 응력값 294.1MPa, ε_{yy}값 15834με일 때까지 얻어졌으며 이 후로는 시험편으로부터 게이지가 분리되어 ε_{yy}값을 얻지 못했다. 하지만 DIC기법의 경우 초기하중부터 파단되기 직전의 ε_{yy}값 231626.82με까지 얻을 수 있었다.

Fig. 6은 변위속도가 1.0 mm/min인 경우 스트레인 게이지와 DIC기법을 통해 얻어진 ε_{yy}값을 나타낸다. Fig. 6(Ⅰ)는 탄성구간에서의 ε_{yy}값을 비교한 결

과를 나타낸다. 초기하중이 가해진 이후 스트레인 게이지를 통해 얻어진 ε_{yy} 값은 선형적인 증가가 나타났다. 초기하중을 가한 후 응력값 214.14MPa인 경우 DIC기법을 통해 나타난 ε_{yy}값과 스트레인 게이지를 통해 얻어진 ε_{yy}값은 최대응력인 경우 발생하는 ε_{yy}값의 1.1% 차이가 나타났다. Fig. 6(Ⅱ)는 소성구간에서 ε_{yy}값을 비교한 결과이다. 이 때 스트레인 게이지와 DIC기법을 통해 나타난 ε_{yy}값은 거의 일치하였다. 하지만 스트레인 게이지의 경우 응력값 294.69MPa, ε_{yy}값 10482με일 때까지만 얻어졌으며 이 후로는 시험편으로부터 게이지가 분리되어 ε_{yy}값을 얻지 못했다. 하지만 DIC기법의 경우 파단되기 직전의 ε_{yy}값 183000με까지 얻을 수 있었다.

Fig. 7은 변위속도가 3.0 mm/min인 경우 스트레인 게이지와 DIC기법을 통해 얻어진 ε_{yy}값을 나타낸다. Fig. 7(Ⅰ)는 탄성구간에서의 ε_{yy}값을 비교한 결과를 나타낸다. 초기하중이 가해진 이후 스트레인 게이지를 통해 얻어진 ε_{yy} 값은 선형적인 증가가 나타났다. 초기하중을 가한 후 응력값 252.67MPa인 경우 DIC기법을 통해 나타난 ε_{yy}값과 스트레인 게이지를 통해 얻어진 ε_{yy}값은 최대응력인 경우 발생하는 ε_{yy}값의 1.3% 차이가 나타났다. Fig. 7(Ⅱ)는 소성구간에서의 ε_{yy}값을 비교한 결과이다. 이 때 스트레인 게이지와 DIC기법을 통해 나타난 ε_{yy}값은 거의 일치하였다. 하지만 스트레인 게이지의 경우 응력값 310MPa, ε_{yy}값 13149με일 때까지만 얻어졌으며 이 후로는 시험편으로부터 게이지가 분리되어 ε_{yy}값을 얻지 못했다. 하지만 DIC기법의 경우 파단되기 직전의 ε_{yy}값 20197.27με까지 얻을 수 있었다. 이를 통해 DIC기법은 초기하중부터

파단시까지 변형율을 일괄적이고 연속적으로 평가할 수 있었다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

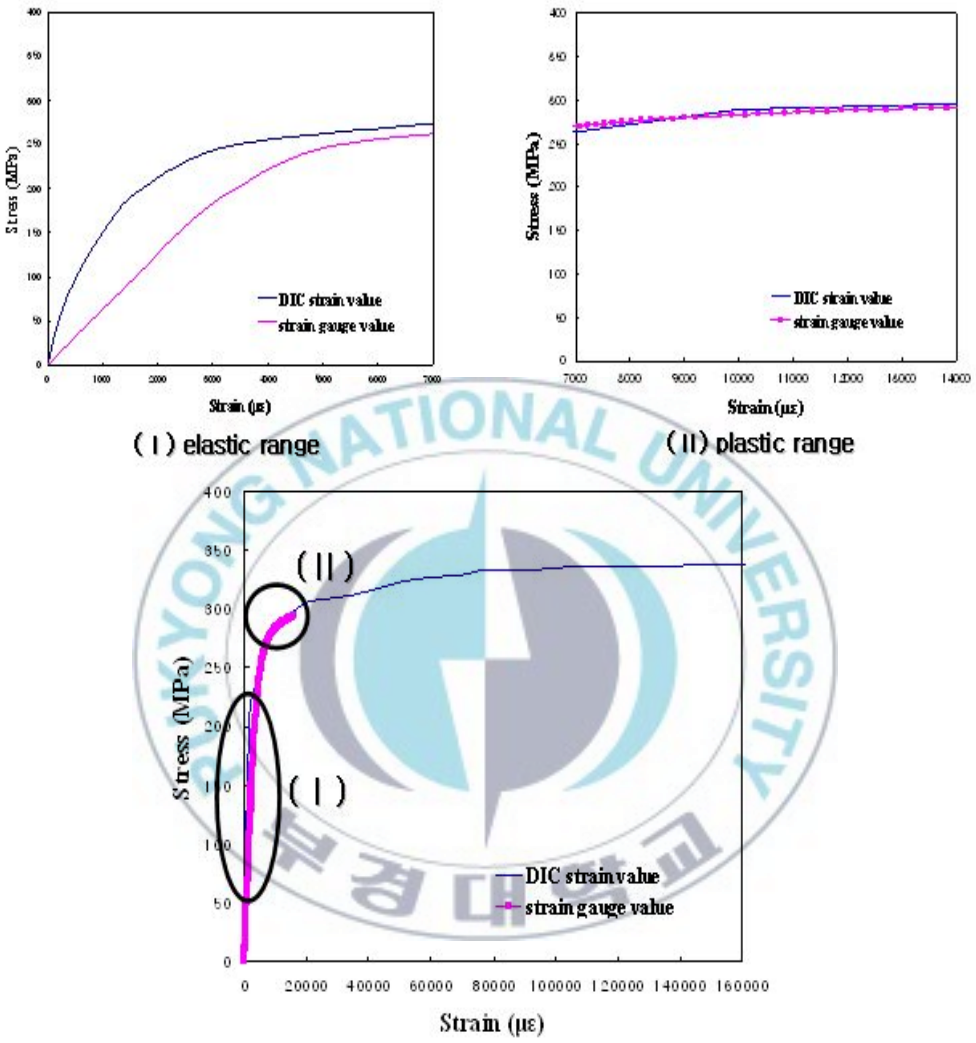


Fig. 5 The relationship of DIC and strain gauge values (u = 0.5 mm/min).

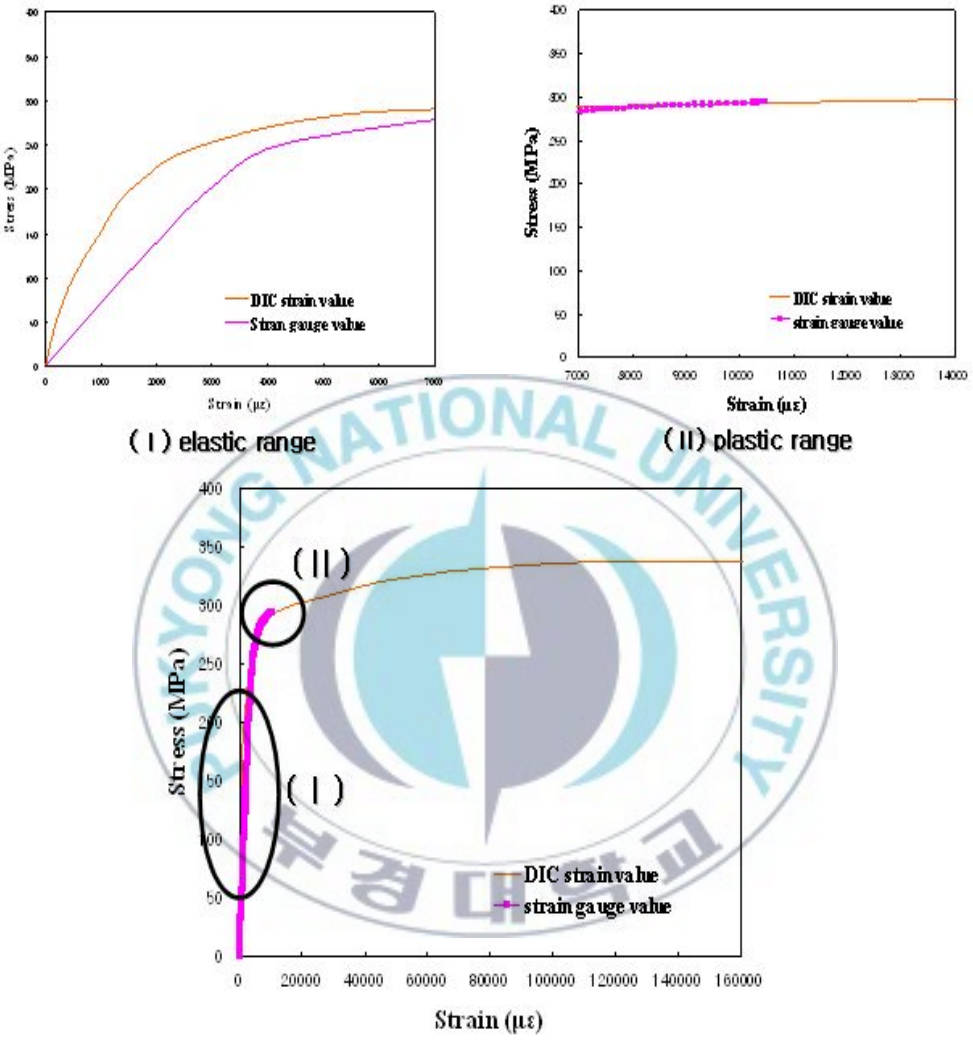


Fig. 6 The relationship of DIC and strain gauge values (u = 1.0 mm/min).

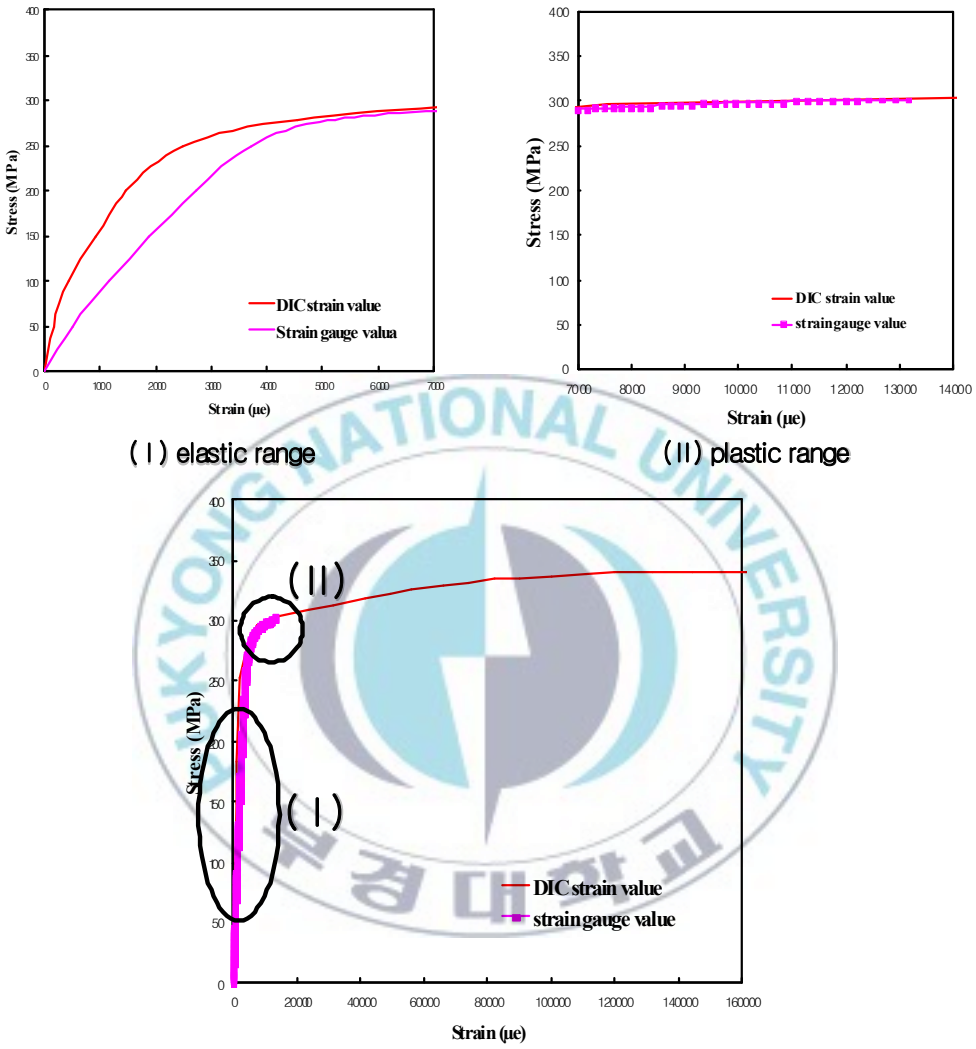


Fig. 7 The relationship of DIC and strain gauge values (u = 3.0 mm/min).

Fig. 8은 변위속도가 0.5 mm/min인 경우 시험편에 파단까지 하중을 가함에 따라 얻어진 ε_{yy}값의 등고선 분포를 나타낸다. 최대하중의 9.4%인 경우 시험편 중앙에서는 ε_{yy}값 201με, 17.3%인 경우 252.4με, 27.7%인 경우 458.2με, 41%인 경우 2209με, 65.2%인 경우 2011.6με, 95.9%인 경우 52011.7με, 98.9%인 경우 83315με 그리고 최대하중인 경우 152302.29με으로 나타났다.

Fig. 9는 변위속도가 1.0 mm/min인 경우 시험편에 파단까지 하중을 가함에 따라 얻어진 ε_{yy}값의 등고선 분포를 나타낸다. 최대하중의 5.9%인 경우 시험편 중앙에서 ε_{yy}값 86με, 10.2%인 경우 105.2με, 17.1%인 경우 659με, 26.3%인 경우 840.3με, 50.5%인 경우 1183.5με, 94.9%인 경우 44932.9με, 98.3%인 경우 79149με 그리고 최대하중인 경우 128545με으로 나타났다.

Fig. 10은 변위속도가 3.0 mm/min인 경우 시험편에 파단까지 하중을 가함에 따라 얻어진 ε_{yy}값의 등고선 분포를 나타낸다. 최대하중의 8.6%인 경우 시험편 중앙에서의 ε_{yy}값 177.1με, 25.9%인 경우 697.8με, 34.3%인 경우 989.5με, 86.8%인 경우 7547.3με, 90.72%인 경우 23857.4με, 97.5%인 경우 74217.2με, 99.1%인 경우 100201.8με 그리고 최대하중인 경우 131871.1με으로 나타났다. DIC기법은 대상의 전 영역에 나타나는 변형율 분포를 알 수 있어 위치에 따른 변형율의 차이를 알 수 있었다.

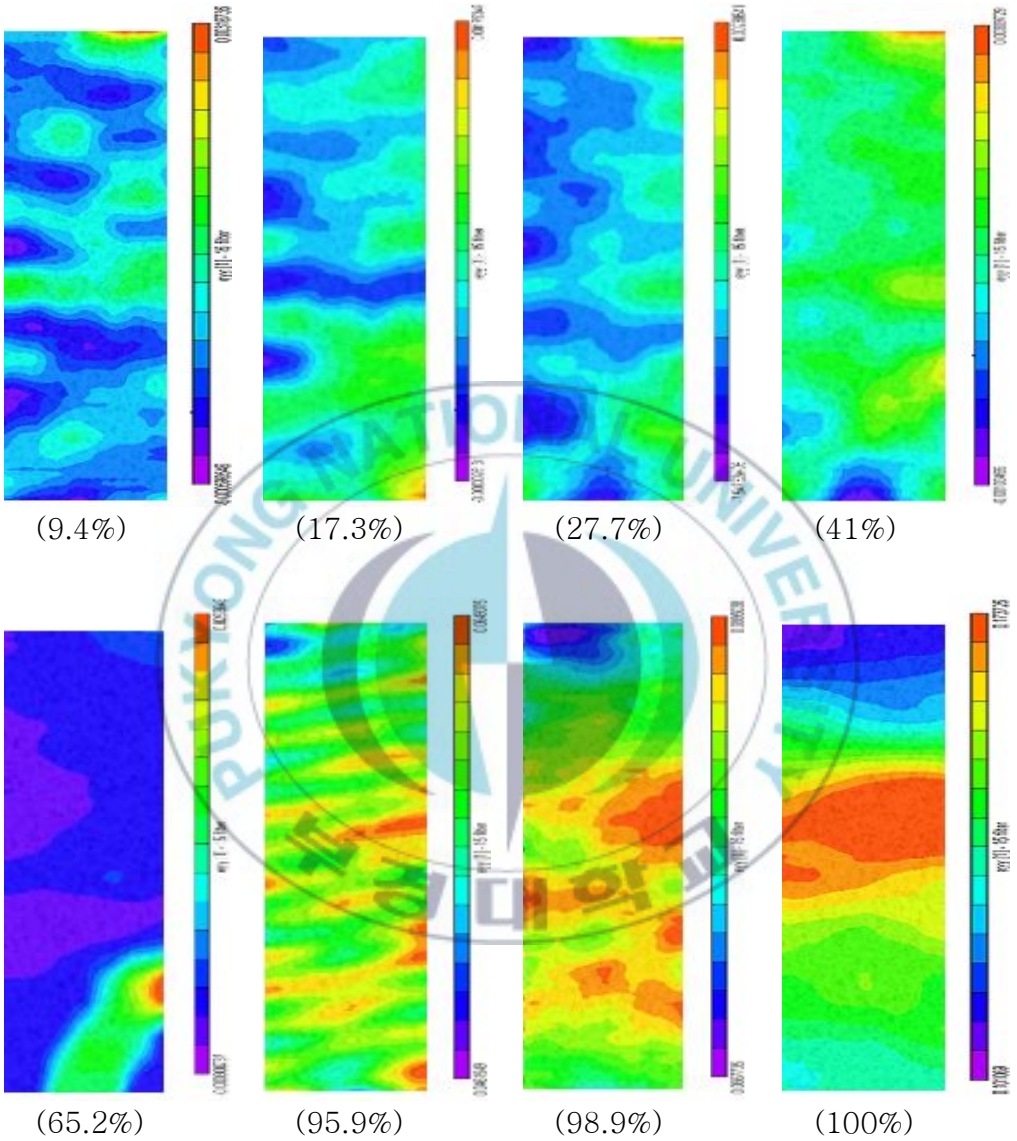


Fig. 8 Distributions of the ε_{yy} strain contour according to the applied loading rate(%) (u = 0.5 mm/min).

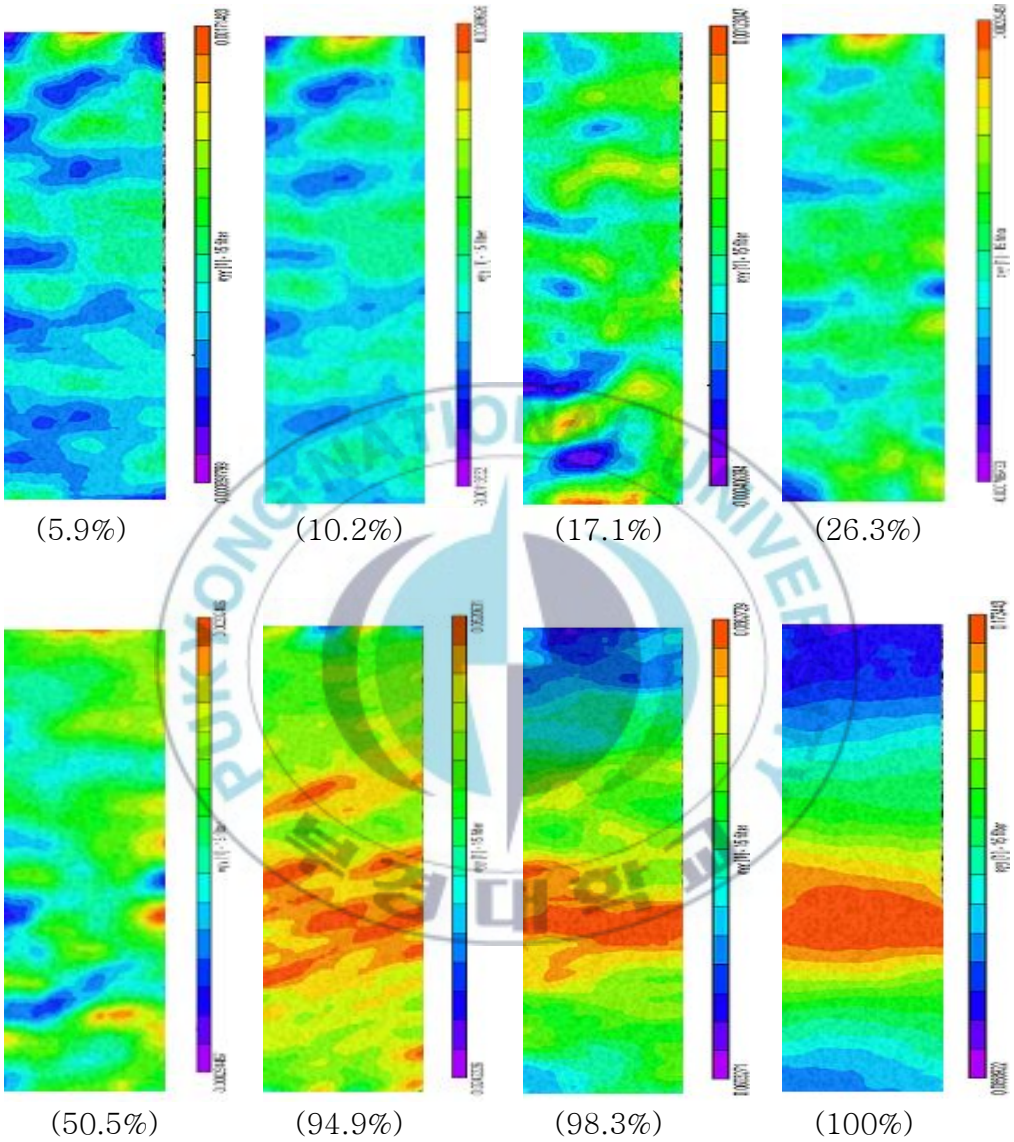


Fig. 9 Distributions of the ε_{yy} strain contour according to the applied loading rate(%) (u = 1.0 mm/min).

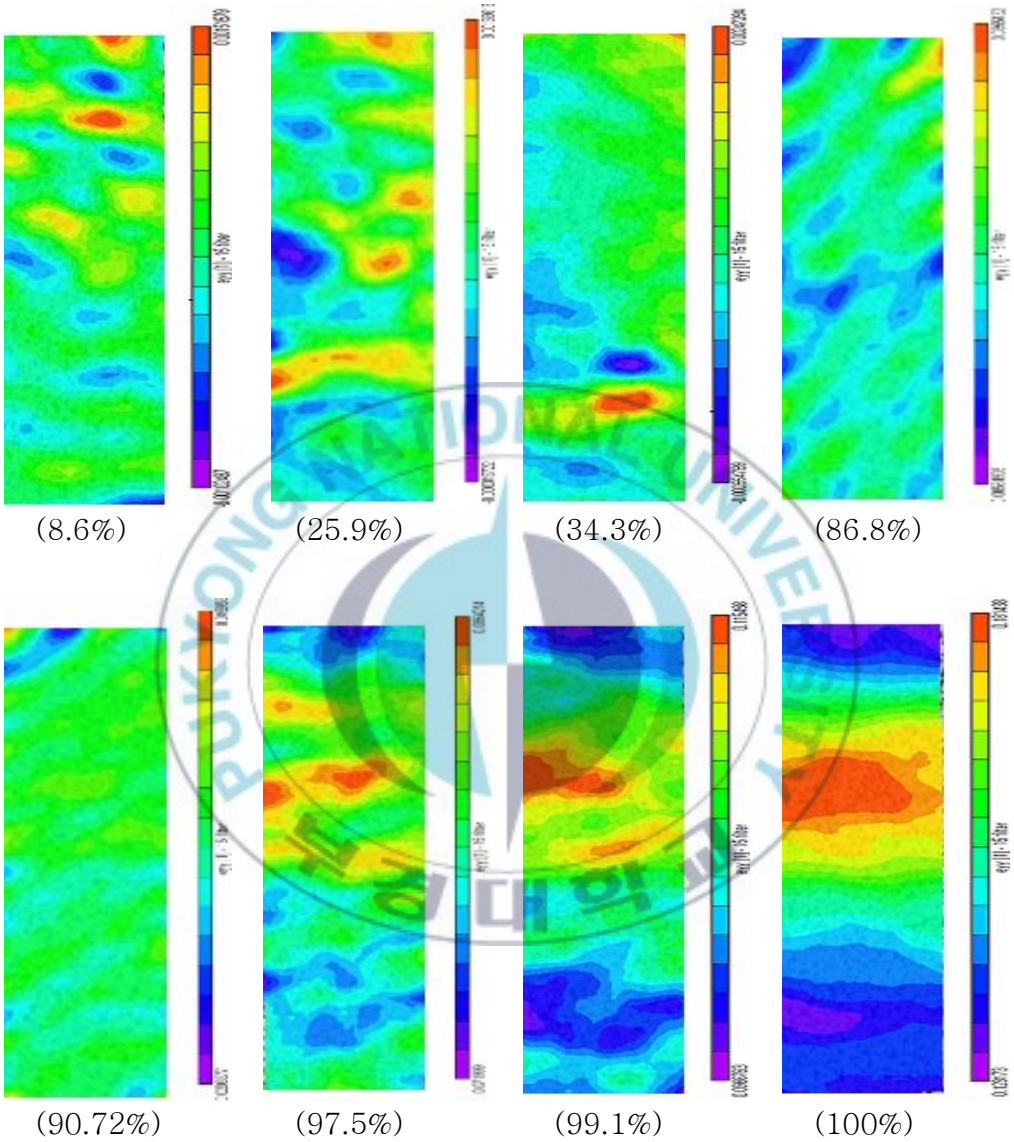


Fig. 10 Distributions of the ε_{yy} strain contour according to the applied loading rate(%) (u = 3.0 mm/min).

Fig. 11은 변위속도 0.5, 1.0 및 3.0 mm/min의 조건하에서 Al 6061-T6에 대한 단순 인장 파괴실험 시 발생하는 변형율을 DIC기법을 통해 측정하여 비교한 결과를 나타냈다. 여기서 얻어진 변형율 값은 시험편의 정면의 중앙지점에서 발생한 ε_{xx}값을 나타낸다. 변위속도가 0.5 mm/min인 경우 최대응력값 337.2MPa으로 나타났다. 이 때 ε_{xx}값 -52346.7με으로 나타났다. 이 후 파단시 응력값 304.2MPa이고, 파단되기 직전의 ε_{xx}값 -75852.9με으로 나타났다. 변위속도가 1.0 mm/min인 경우 응력값 337.7MPa의 최대값이 나타났다. 이 때 ε_{xx}값 -57933.6με으로 나타났다. 이 후 파단시 응력값 314.2MPa이고 파단되기 직전의 ε_{xx}값 -68400με으로 나타났다. 변위속도가 3.0 mm/min인 경우 응력값 340.2MPa의 최대값이 나타났다. 이 때 ε_{xx}값 -53537.1με으로 나타났다. 이 후 파단시 응력값은 314.71MPa 파단되기 직전의 ε_{xx}값 -69435.2με으로 나타났다.

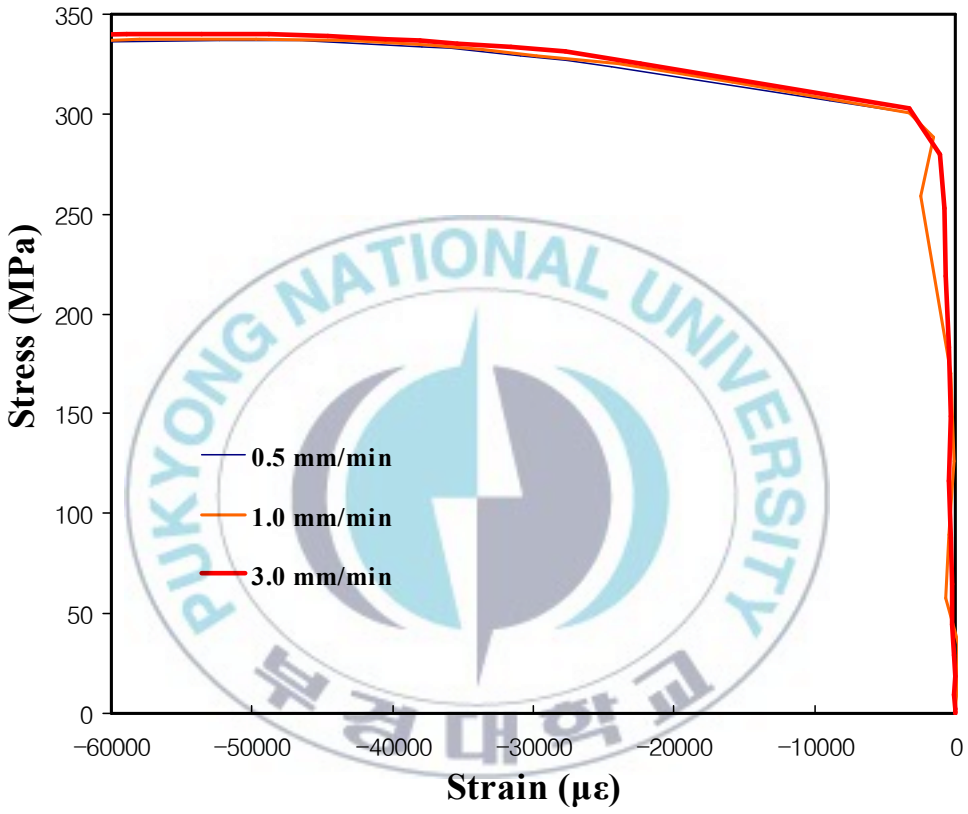


Fig. 11 The strain - stress curve

Fig. 12는 변위속도가 0.5 mm/min인 경우 시험편에 파단까지 하중을 가함에 따라 얻어진 ε_{xx}값의 등고선 분포를 나타낸다. 최대하중의 9.4%인 경우 시험편 중앙에서는 ε_{xx}값 -87.53με, 17%인 경우 -103.5με, 27.7%인 경우 -177.9με, 36.5%인 경우 -410.83με, 50.2%인 경우 -582.6με 82.7%인 경우 -2631.72με, 97.6%인 경우 -30901με 그리고 최대하중인 경우 -52346.7με 으로 나타났다.

Fig. 13은 변위속도가 1.0 mm/min인 경우 시험편에 파단까지 하중을 가함에 따라 얻어진 ε_{xx}값의 등고선 분포를 나타낸다. 최대하중의 5.9%인 경우 시험편 중앙에서의 ε_{xx}값 -12.69με, 17.1%인 경우 -208.7με, 26.3%인 경우 -450.8με, 37.4%인 경우 -760με, 63.4%인 경우 -1017.3με, 91.5%인 경우 -6648.4με, 98.3%인 경우 -22211.68με 그리고 최대하중인 경우 -57933.6με으로 나타났다.

Fig. 14는 변위속도가 3.0 mm/min인 경우 시험편에 파단까지 하중을 가함에 따라 얻어진 ε_{xx}값의 등고선 분포를 나타낸다. 최대하중의 8.6%인 경우 시험편 중앙에서의 ε_{xx}값 -83.53με, 13.2%인 경우 -187.7με, 25.9%인 경우 -366.8με, 43.8%인 경우 -432.8με, 82.3%인 경우 -1104.3με, 90.7με인 경우 -5823.7με, 98.2%인 경우 -31545.9με 그리고 최대하중인 경우 -53537.1με으로 나타났다. DIC기법은 시간이 지남에 따라 대상의 전 영역에 나타나는 변형율 분포 변화를 알 수 있었다.

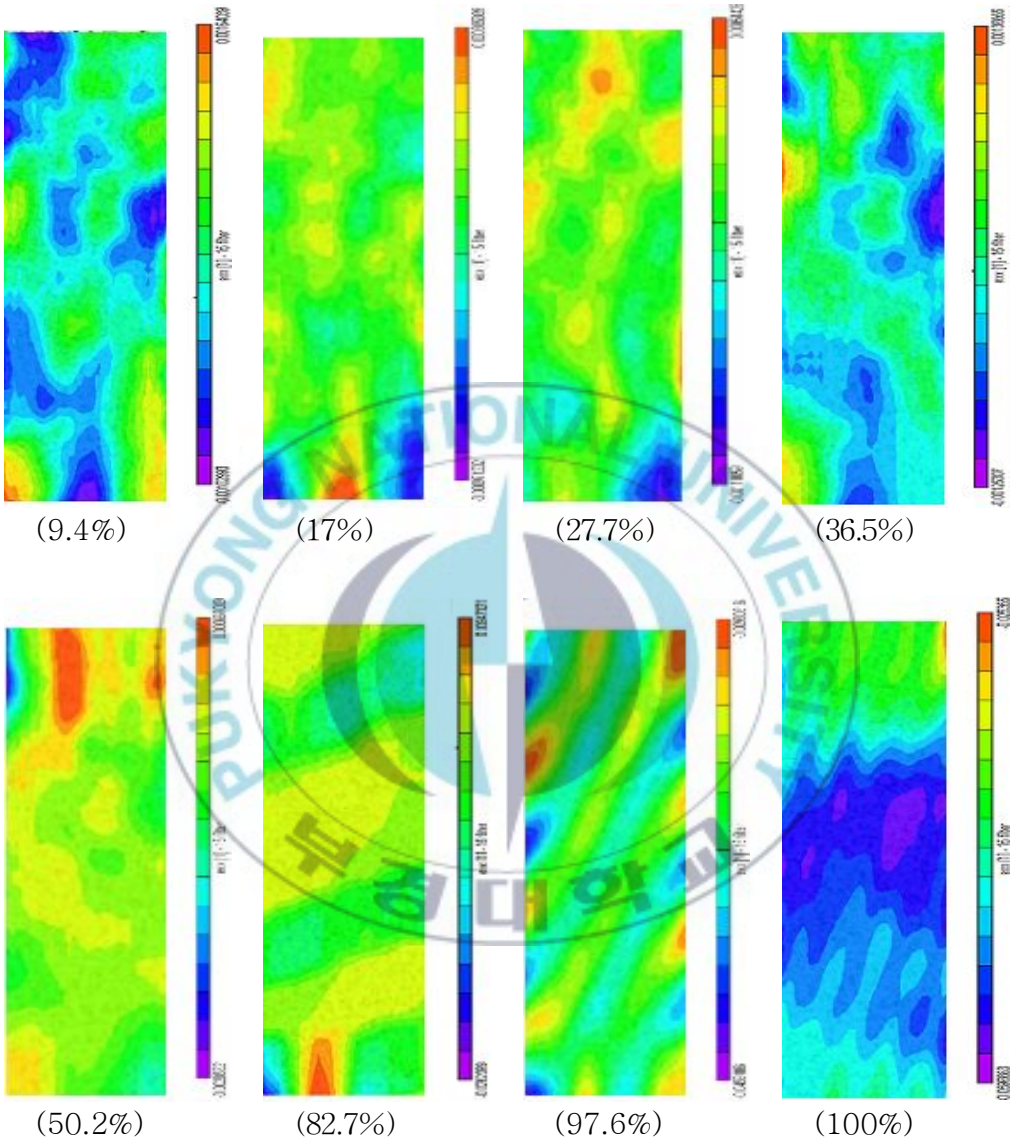


Fig. 12 Distributions of the ε_{xx} strain contour according to the applied loading rate(%) (u = 0.5 mm/min).

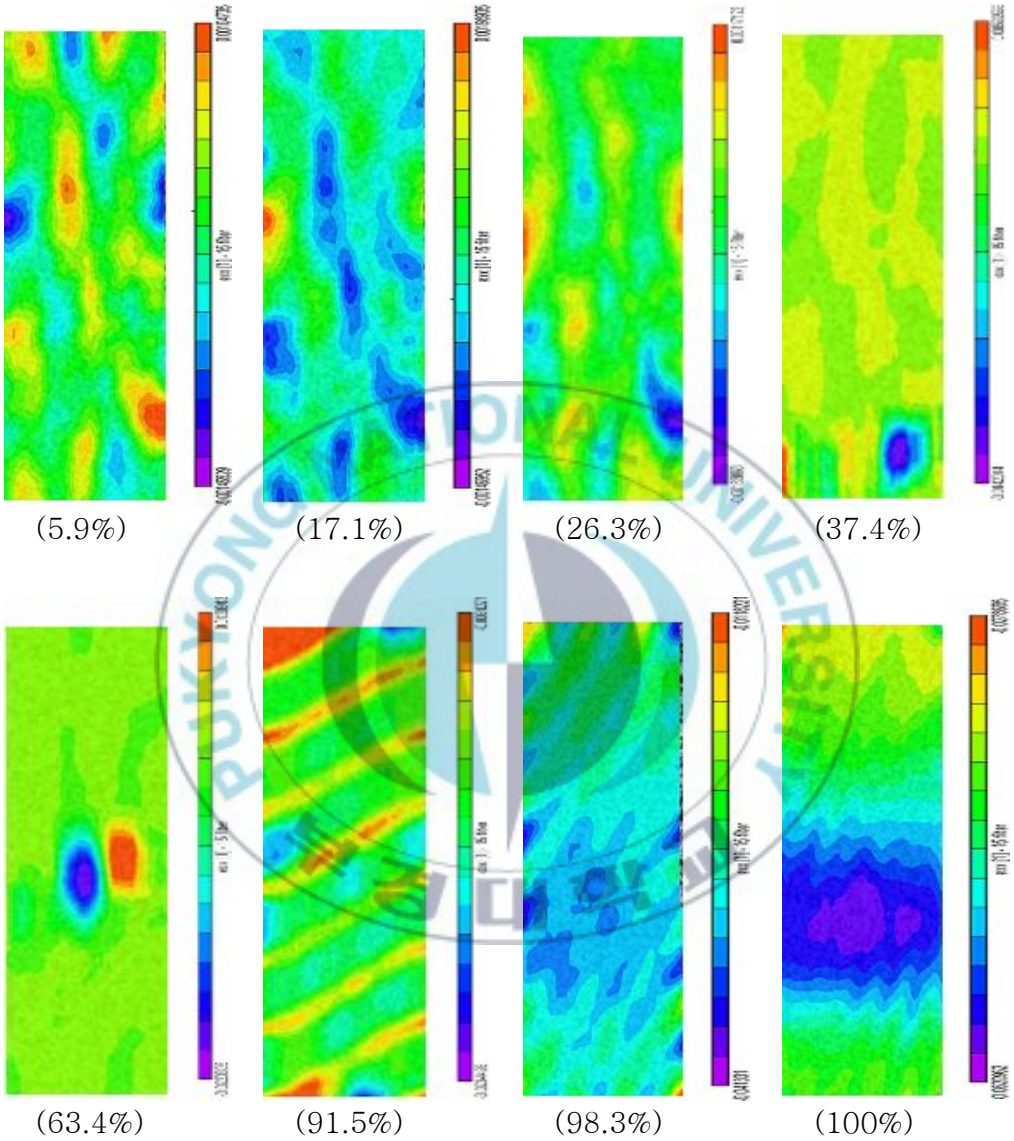


Fig. 13 Distributions of the ε_{xx} strain contour according to the applied loading rate(%) (u = 1.0 mm/min).

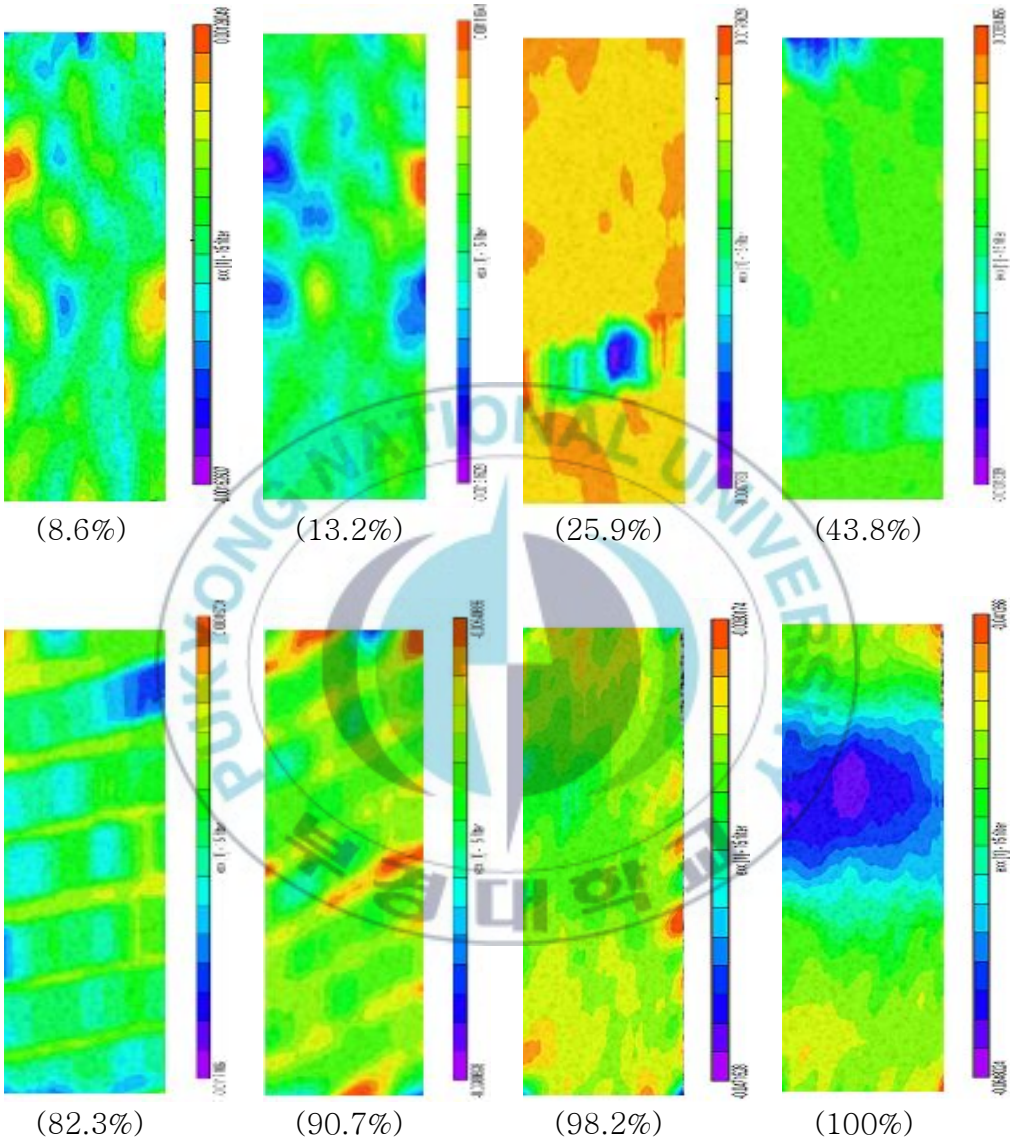


Fig. 14 Distributions of the ε_{xx} strain contour according to the applied loading rate(%) (u = 3.0 mm/min).

Fig. 15은 변위속도 0.5, 1.0 및 3.0 mm/min의 조건하에서 Al 6061-T6에 대한 단순 인장 파괴실험 시 발생하는 변형율을 DIC기법을 통해 측정하여 비교한 결과를 나타냈다. 여기서 얻어진 변형율 값은 시험편의 측면의 중앙지점에서 발생한 ε_{zz}값을 나타낸다. 변위속도가 0.5 mm/min인 경우 최대응력값 349.23MPa으로 나타났다. 이 때 ε_{zz}값 -58394.4με으로 나타났다. 이 후 파단시 응력값 338.2MPa이고 파단 되기 직전의 ε_{zz}값 -73584.7με으로 나타났다. 변위속도가 1.0 mm/min인 경우 응력값 346.7MPa의 최대값이 나타났다. 이 때 ε_{zz}값 -62628.8με으로 나타났다. 이 후 파단시 응력값 325.7MPa,이고 파단되기 직전의 ε_{zz}값 -80147.1με으로 나타났다. 변위속도가 3.0 mm/min인 경우 응력값 348.7MPa의 최대값이 나타났다. 이 때 ε_{zz}값 -61548.4με으로 나타났다. 이 후 파단시 응력값 343.7MPa이고 파단되기 직전의 ε_{zz}값 -68906.2με으로 나타났다.

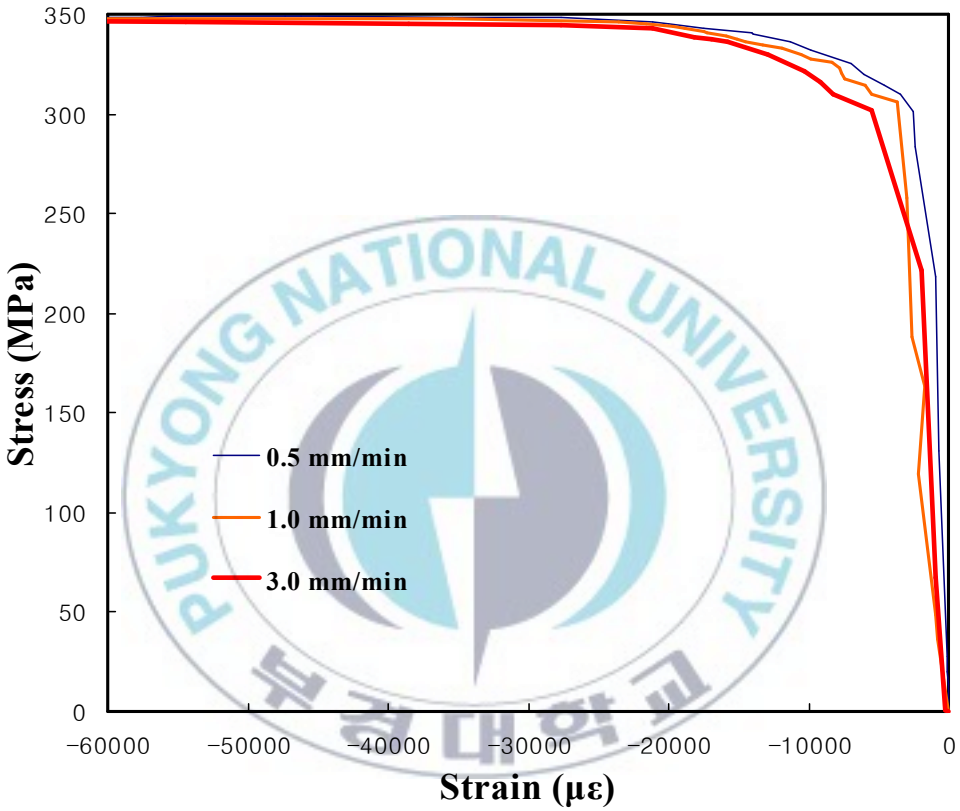


Fig. 15 The strain - stress curve.

Fig. 16는 변위속도가 0.5 mm/min인 경우 시험편에 파단까지 하중을 가함에 따라 얻어지는 ε_{zz}값의 등고선 분포를 나타낸다. 최대하중의 24.3%인 경우 시험편 측면 중앙에서의 ε_{zz}값 -471.11με, 37.4%인 경우 -694.03με, 52.1%인 경우 -1008.8με, 85.2%인 경우 -2508.3με, 97.6%인 경우 -14073.36με, 98.3%인 경우 -17465.39με, 99.7%인 경우 -27644.81με 그리고 최대하중인 경우 -58394.4με으로 나타났다.

Fig. 17는 변위속도가 1.0 mm/min인 경우 시험편에 파단까지 하중을 가함에 따라 얻어지는 ε_{zz}값을 나타낸다. 최대하중 54.3%인 경우 시험편 측면 중앙에서의 ε_{zz}값 -2639.99με, 74.5%인 경우 -2919με, 89.3%인 경우 -5534.33με, 93.2%인 경우 -7753.25με, 98.3%인 경우 -17200.7με, 98.8%인 경우 -18821.9με, 99.9%인 경우 -21545.3με 그리고 최대하중인 경우 -23565με으로 나타났다.

Fig. 18은 변위속도가 3.0 mm/min인 경우 시험편에 파단까지 하중을 가함에 따라 얻어지는 ε_{zz}값을 나타낸다. 최대하중의 12.9%인 경우 시험편 측면 중앙에서의 ε_{zz}값 -680.09με, 43.4%인 경우 -1162.2με, 73.8%인 경우 -1914.8με, 86.5%인 경우 -5500με, 88.8%인 경우 -8224.8με, 92.1%인 경우 -10254.6με, 97.1%인 경우 -18210.2με 그리고 최대하중인 경우 -68548.4με으로 나타났다.

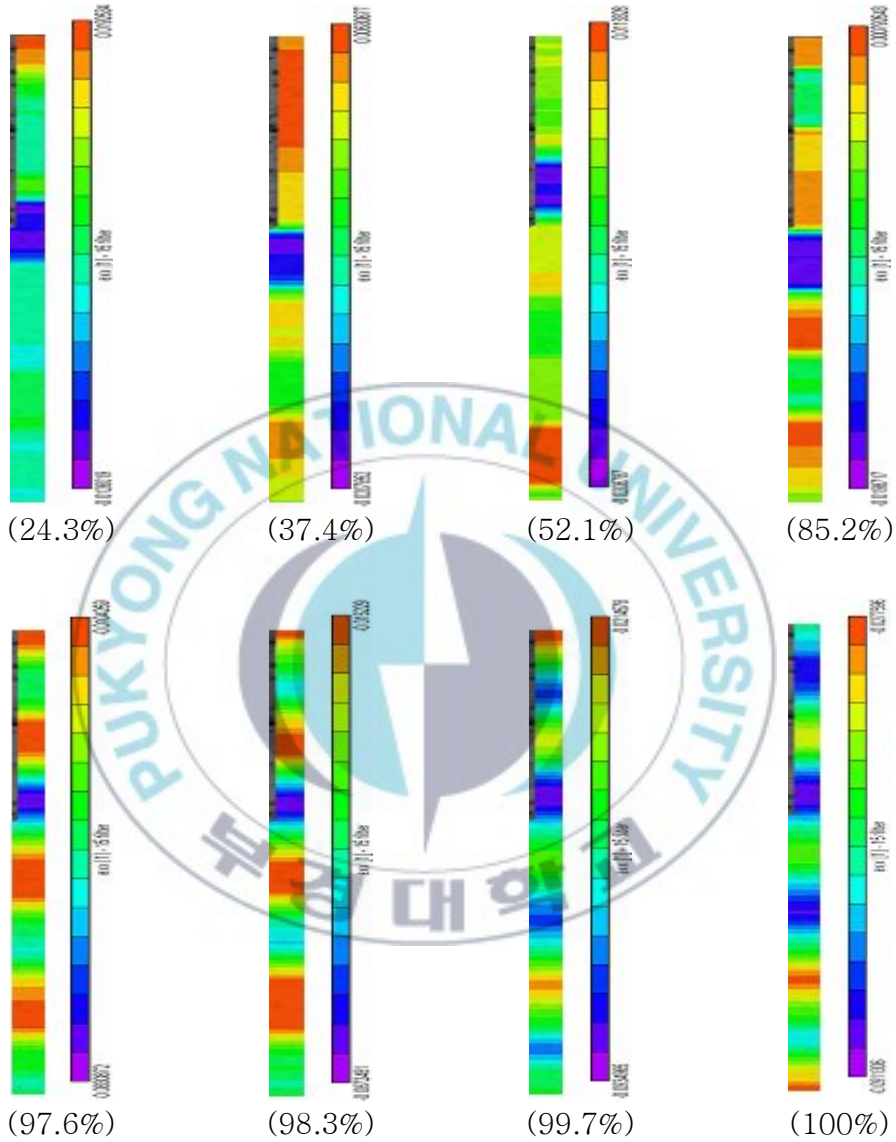


Fig. 16 Distributions of the ε_{zz} strain contour according to the applied loading rate(%) (u = 0.5 mm/min).

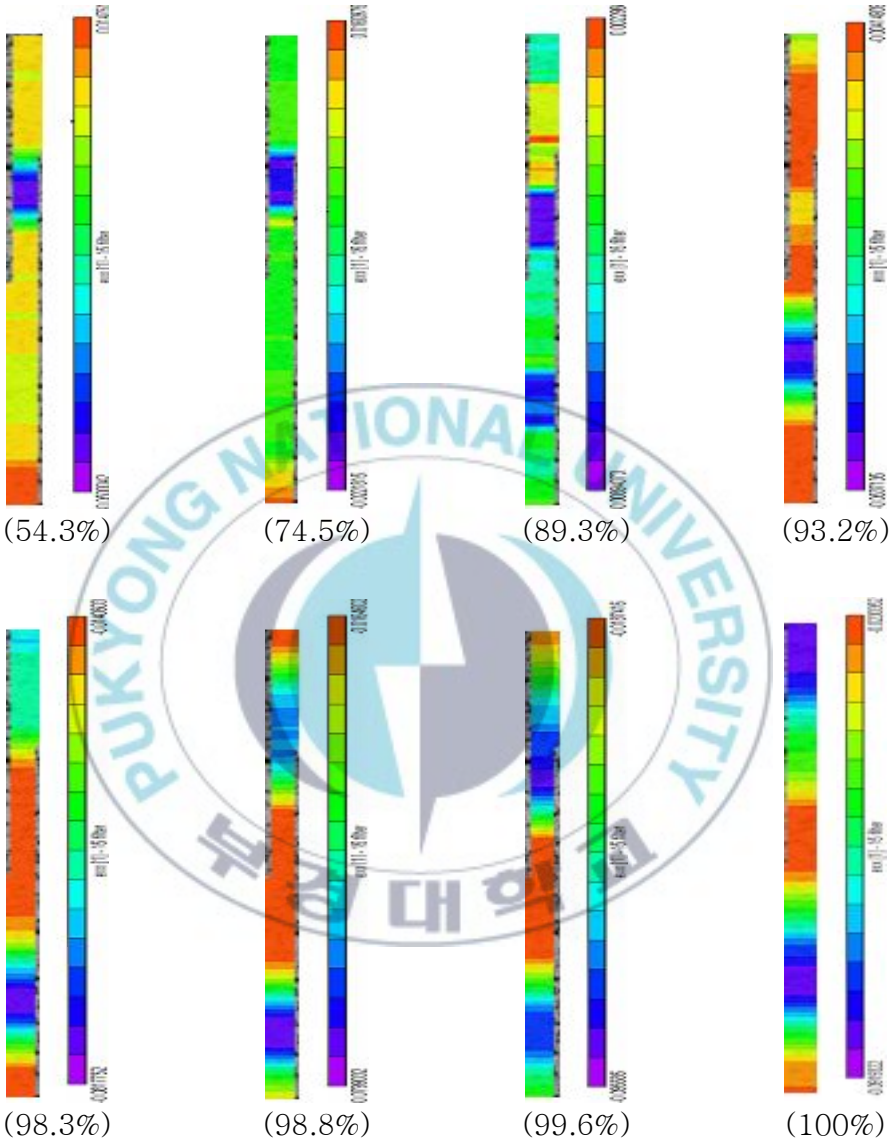


Fig. 17 Distributions of the ε_{zz} strain contour according to the applied loading rate(%) (u = 1.0 mm/min).

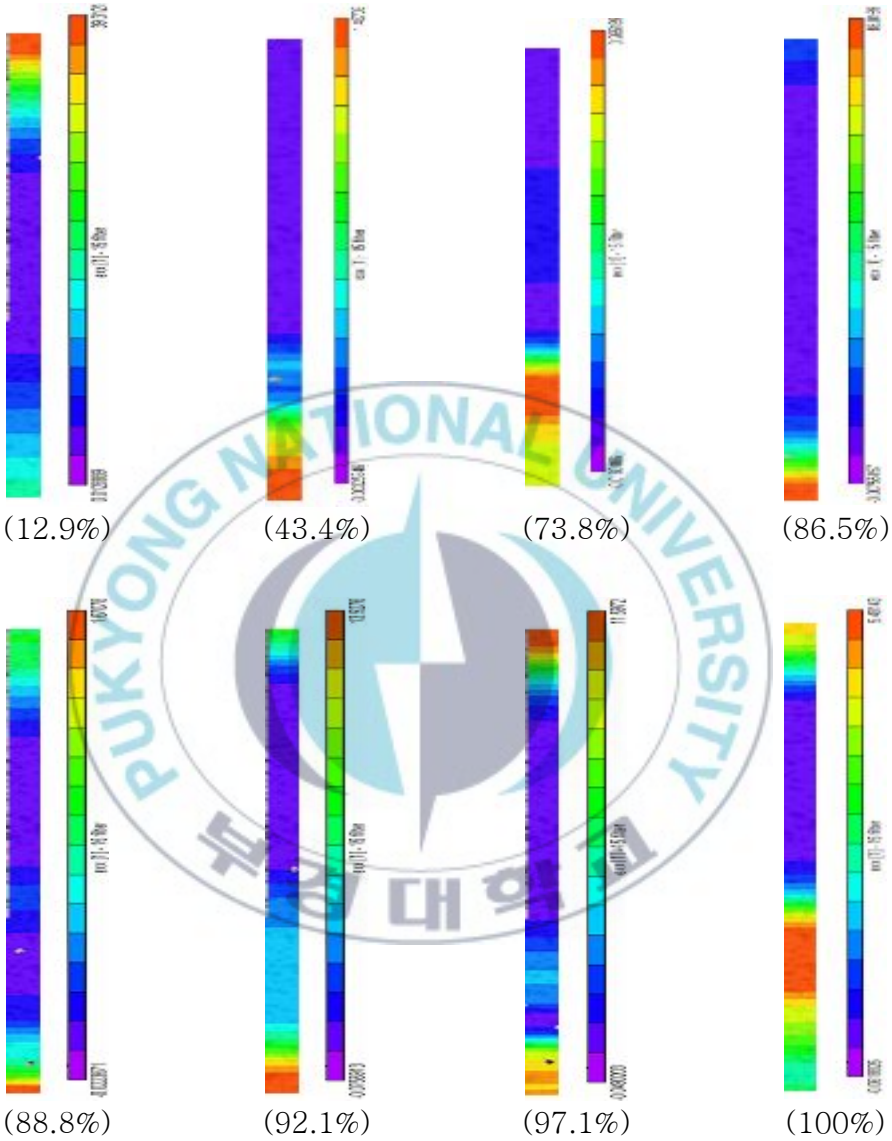
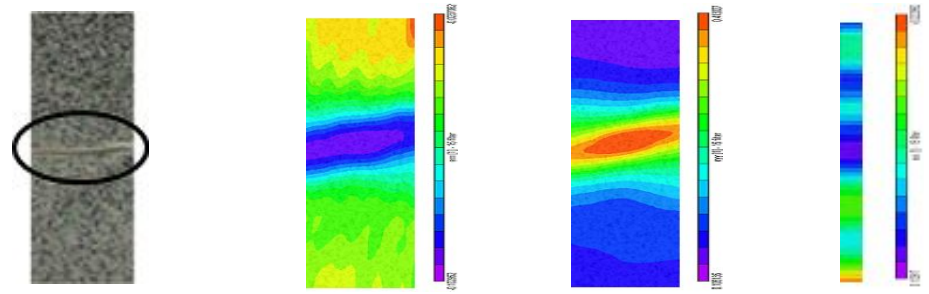


Fig. 18 Distributions of the ε_{zz} strain contour according to the applied loading rate(%) (u = 3.0 mm/min).

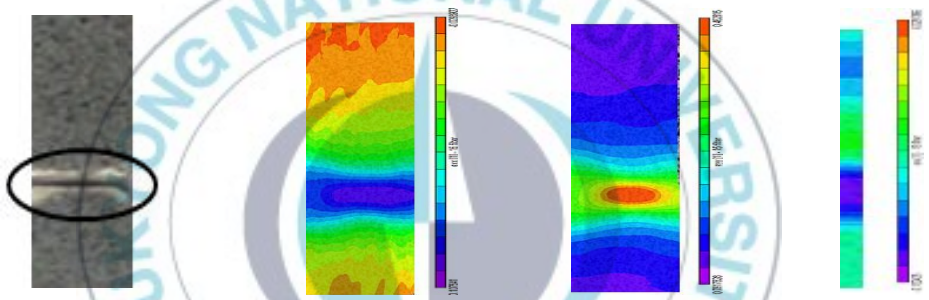
Fig. 19 (a)-(c)는 변위속도가 0.5, 1.0 그리고 3.0 mm/min인 경우 시험편이 파단 되기 직전에 DIC기법을 통해 얻은 ε_{xx}, ε_{yy} 그리고 ε_{zz}에 관한 변형율 등고선과 파단 된 후의 시험편 형상을 나타낸 그림이다. Fig.19 (a)는 변위속도가 0.5 mm/min인 경우 파단 되기 직전에서 얻어진 ε_{xx}, ε_{yy} 그리고 ε_{zz}값을 나타낸다. 파단 직전 응력값 338.23MPa일 때 ε_{xx}값 -75852.99με, ε_{yy}값 231626.82με 그리고 ε_{zz}값 -73584.77με으로 나타났다. 최대 변형율 위치와 시험편 파단위치와 잘 일치함을 알 수 있다. Fig.19 (b)는 변위속도가 1.0 mm/min인 경우 파단 되기 직전에서 얻어진 ε_{xx}, ε_{yy} 그리고 ε_{zz}값을 나타낸다. 파단 직전 응력값은 325.72MPa일 때 ε_{xx}값 -68400.00με, ε_{yy}값 189000.00με 그리고 ε_{zz}값 -80147.13με으로 나타났다. 최대 변형율 위치와 시험편 파단위치와 잘 일치함을 알 수 있다. Fig.19 (c)는 변위속도가 3.0 mm/min인 경우 파단 되기 직전에서 얻어진 ε_{xx}, ε_{yy} 그리고 ε_{zz}값을 나타낸다. 파단 직전 응력값은 343.73MPa일 때 ε_{xx}의 값 -69435.28με, ε_{yy}의 값 201897.27με 그리고 ε_{zz}의 값 -68906.38με으로 나타났다. 최대 변형율 위치와 시험편 파단위치와 잘 일치함을 알 수 있다. DIC기법은 시험편의 전 영역에 나타나는 변형율 분포를 알 수 있어 대상의 어느 부분에서 최대변형이 일어나는 지를 시각적으로 표현할 수 있어 최종파단의 위치를 예상할 수 있었다.

(fractured specimen) (strain contour)



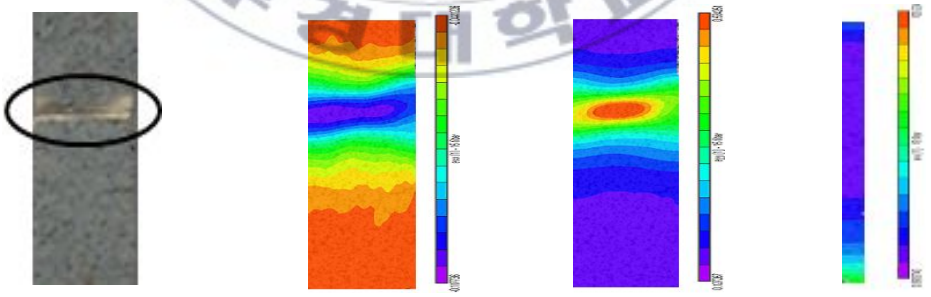
(ε_{xx}) (ε_{yy}) (ε_{zz})

(a) u = 0.5 mm/min



(ε_{xx}) (ε_{yy}) (ε_{zz})

(b) u = 1.0 mm/min



(ε_{xx}) (ε_{yy}) (ε_{zz})

(c) u = 3.0 mm/min

Fig. 19 The comparison of ε_{xx}, ε_{yy} and ε_{zz} strain contour just before fracture and a fractured specimen.

5. 결 론

DIC기법과 스트레인게이지를 이용하여 알루미늄합금(Al 6061-T6)의 표면상의 변형율과 변형율장을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스트레인 게이지를 통한 변형율 측정 시 소성변형 및 비교적 큰 변형을 수반하는 재료의 경우 시험편으로부터 게이지 분리현상이 발생하므로 변형율 측정에 불리한 점이 나타났다. 하지만 DIC기법의 경우 초기하중부터 파단 시까지 변형율을 일괄적이고 연속적으로 평가할 수 있으므로 변형율 측정에 대한 신뢰성과 유효성을 확인 할 수 있었다.

(2) DIC기법은 전 영역에 나타나는 변형율의 분포를 알 수 있어 대상의 어느 부분에서 최대변형이 일어나는 지를 시각적으로 표현할 수 있다. 이를 통해 위치에 따른 최대변형율 발생지점을 판단할 수 있었다.

(3) DIC기법은 시간이 지남에 따라 발생하는 변형율 변화를 파악 할 수 있어 파단이 발생 할 위치를 예측할 수 있다. 이를 실시간평가수법에 확장적용할 경우 재료 및 제품의 세부적인 손상 특징을 규명하는데 유용히 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

인 용 부 호

NOMENCLATURE

C	: correlation coefficient	[-]
E	: power supply electric pressure	[V]
e	: output of electric pressure	[V]
K	: gauge factor	[-]
l	: length	[mm]
Δl	: extension length	[mm]
S	: deformation parameter	[-]
R	: resistance	[Ω]
ΔR	: extension resistance	[Ω]

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

GREEK LETTERS

σ	: Stress	[MPa]
ε	: Strain	[-]

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

참 고 문 헌

(1) 황재석, “복합체 응력 해석의 광탄성 실험법”, Journal of the Korean society of mechanical engineers, Vol 31(3), pp. 276～292, 1991.

(2) 윤성운, 김경식, 조선형, 강기수, “Non-destructive Reliability Evaluation of Electronic Device by ESPI”, 비파괴 검사 학회지, Vol 21, pp. 630～633. 2001.

(3) Peters W.H, Ranson W.F, Sutton M.A, Chu T.C and Anderson J, "Application of digital image methods to rigid body mechanics", Opt. Eng, Vol 22(6), pp. 738～742, 1983.

(4) Sutton M.A, Woltwr W.J, Peters W.H, Ranson W.F and McNeil S.R, "Determination of displacement using an improved digital image correlation method", Image vision Computer; Vol 1(3), pp. 133～139, 1983.

(5) Olivier De Almeida, Fabienne Lagattu and Jean Brillaud, "Analysis by a 3D DIC technique of volumetric deformation gradients : Application to polypropylene/EPR/talc composites", Composites : Part A(applied science and manufacturing) Vol 39, pp. 1210～1217, 2007.

(6) Jeffrey D. Helm Stephen R, McVeill Michael A and Sutton M.A, "Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement", Opt. Eng. Vol 35(7), pp. 1911～1920, 1996.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

(7) 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”, Socity for Experimental Mechanics, 2007.

(8) Peter. W.H and Panson. W.F, “Digital Image techniques on experimental stress analysis”, Opt. Eng. Vol 21, 1982.

(9) Sutton M.A, Wolter. W.H, Panson. W.F and McNeill. S.R, “Determination of displacements using an improved digital image correlation method”, Image Vision Computer, 1983.

(10) 배성인, 한민구, “파괴역학실험법”, 원창출판사, 1995.

(11) C.H. JENKINS, Mechanical Testing of Composites Second Edition "Fundamental Strain-gauge Technology by M.E. Tuttle", SEM. Inc, pp. 25～34, 1998.

(12) Richard S. Figliola, Donald E. Beasley 원저, 곽문규 외 5명 공역, “기계계측공학 -이론과 설계-”, 시그마프레스, pp. 511～539, 1998.

(13) 박은수, 박익근, “비파괴검사개론”, 도서출판 골드, pp. 289～297, 2000.

(14) 한민구, 최병구, “비파괴검사법”, 형설출판사, pp. 240～245. 1998.

(15) Sutton M.A, Yan J.H. Tiwari V, Schreier H.W and Orteu J.J, "The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurement", Optics and Lasers in Engineering Vol 46 , pp. 746～

757, 2008.

(16) Verhulp E, van Rietbergen B and Huiskes R, "A three-dimensional digital image correlation technique for strain measurements in microstructures", Journal of Biomechanics Vol 37, pp. 1313~1320, 2004.

(17) R. Ambu, F. Aymerich and F. Bertolino, "Investigation of the effect of damage on the strength of notched composite laminates by digital image correlation", J. Strain Analysis Vol. 40 No. 5, 2005.

(18) Jorge Abanto-Bueno and John Lambros, "Investigation of crack growth in functionally graded materials using digital image correlation", Engineering Fracture Mechancs Vol 69, pp. 1695~1711, 2002.

(19) Sutton M.A, Mingqi Cheng, Peters W.H, Y.J. Chao and McNeill S.R, Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis, Butterworth & Co.(Publishers) Ltd, 1986.

(20) J. D. Helm, "Digital Image Correlation for Specimens with Multiple Growing Cracks", Society for Experimental Mechanics, 2007.

(21) Isamu Y, Tomohiko M, Katsunori Y and ZhengMing S, “Effect of loading rate on absorbed energy and fracture surface deformation in a 6061-T651 aluminum ally”, Engineering Fracture Mechanics, 2004.

A Study of the Strain Measurement by Digital Image Correlation for Al Tensile Specimen

Tae-Kyung Kim

Department of Safety Engineering, Graduate School,

Pukyong National University

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

Abstract

A digital image correlation (DIC) method is a whole-field measurement technique that acquires surface displacements and strains from images information which characterized a random speckle as intensity grey levels. Recently years, this DIC method is being developed and used increasingly in various reserch.

In this study, we tried to apply to aluminum alloy(Al 6061-T6) using DIC method and strain gauge. DIC results demonstrated the usefulness and ability to determine a strain.

The test specimen used in this study was an aluminum alloy(Al 6061-T6, thickness : 1mm). For a strain measurement, a strain gauge was attached at the center of a specimen. A specimen was lightly sprayed with a white paint and a black dot pattern was sprayed on its fully dried white surface to obtain

a random speckle.

The experimental apparatus used to perform the tensile test consisted of universal dynamic tester (5kN; T.O. Co.) under displacement speed of 0.5, 1.0 and 3.0 mm/min. A Model 5100B Scanner(V. Co.) used to obtain a strain. A CCDcamera connected to a PC uses to record the images of the specimen surface. After acquisition, the images were transferred to PC where the DIC software was implemented. An acquired image was evaluated by the DIC program.

The following conclusions could be drawn from this study.

(1) DIC method for displacement and strain was suggestes and it results show a good consistent remarkably. DIC results demonstrated the usefulness and ability to determine surface strain was better than by using classical mesurements.

(2) The strain field measurement using a DIC is so useful that it can be applied to map strain distributions at a full area.

(3) DIC method can evaluate a strain change so it can predict a location of fracture. The findings of the investigation suggest that the DIC method is an efficient and reliable tool for full-field monitoring and detailed damage characterization of materials.

감사의 글

2년의 학위과정동안 부족한 저를 무사히 마무리 할 수 있게 도와주신 주위의 여러 사람들에게 진심으로 감사드립니다.

저를 지도해 주신 권오헌 교수님의 가르침에 깊은 감사를 드립니다. 또한 바쁘신 중에도 논문을 면밀히 심사하시고 세밀한 검토와 조언으로 많은 가르침을 주신 최재욱 교수님, 신성우 교수님께 감사 드립니다. 그리고 학업과정동안 많은 가르침을 주셨던 목연수 교수님, 이내우 교수님, 박외철 교수님, 장성록 교수님, 이동훈 교수님, 이의주 교수님, 오창보 교수님에게 감사의 마음을 전합니다.

학위과정동안 논문의 위한 기초부터 많은 도움과 조언을 주신 윤유성 박사님과 학부생 때부터 학교생활에 흥미를 가질 수 있게 도와주시고 학위과정동안 많은 신경을 써 주신 강지웅 박사님께 깊은 감사의 마음을 전합니다. 그리고 진심어린 충고로 많은 도움을 주고 있는 송상민 형, 곽정훈 형, 유진규 형에게 고마움을 전합니다. 또한 처음 실험실 생활의 어려움을 극복하는데 많은 도움을 준 종현, 우용이와 실험을 하는데 많은 도움을 준 철준, 세진, 연진이에게 고맙다는 말을 전합니다. 또한 앞으로 실험실을 이끌고 나갈 우열이에게도 고맙다는 말을 전합니다.

학교생활에 정을 붙일 수 있도록 도와준 고경찬 박사님, 이종빈 박사님을 비롯한 FLY HIGH의 선·후배님들에게 감사의 마음을 전합니다. 앞으로도

기분좋게 어울려서 운동 할 수 있기를 바랍니다.

항상 퉁명스러운 동생 태용이에게도 영원히 함께 하자는 말을 전합니다. 마지막으로 장남인 저를 항상 믿어주시고 아낌없이 모든 것을 쏟아부어 주시는 아버지, 어머니에게 사랑하고 건강하시라는 말을 전합니다. 가족들이 있기에 제가 있는 것임을 알기에 저는 영원히 가족들과 함께 할 것을 다시 한번 약속합니다.

2010년 1월

김 태 경 올림