



응력 삼축성과 및 변형 경로를 고려한 ASTM 인장 시험편의 유효 두께 평가

윤준섭^a, 채유진^a, 박진수^b, 김민기^{a,*}

Evaluation of Valid Thickness in ASTM Standard Tensile Specimen Considering Stress Triaxiality and Strain Path

Junseop Yun^a, Yujin Chae^a, Jinsoo Park^b, Minki Kim^{a,*}^a Flexible Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology^b Department of Mechanical Engineering, Inha University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	28	June	2025
Revised	10	July	2025
Accepted	11	July	2025

Keywords:

Uniaxial tension
ASTM standard specimen
Stress triaxiality
Strain path
Thickness
Finite element method

ABSTRACT

This study investigates the valid thickness range for ASTM E8 tensile specimens under plane-stress uniaxial tension conditions. Finite element simulations were performed on specimens with varying thicknesses, and stress triaxiality and strain path were analyzed as the primary evaluation criteria. An ideal uniaxial tension state was defined by a stress triaxiality of approximately 0.333 and strain path of -0.5. The results indicate that specimens with a thickness of up to 8.0 mm satisfy both these conditions. Outside this range, notable differences in stress triaxiality and strain path between the surface and mid-thickness were observed, indicating a departure from the intended uniaxial tension state. Thus, this study provides a guideline for determining the appropriate specimen thickness to ensure accurate tensile testing under plane-stress uniaxial tension conditions. The proposed methodology may also be applied to evaluate the validity of tensile specimens in other mechanical testing conditions.

1. 서론

금속 판재의 인장 거동을 정확히 규명하려면 시편 전체의 응력과 변형 상태를 균형 있게 파악해야 한다. 이를 위하여 디지털 이미지 상관법(digital image correlation, DIC) 시스템과 비디오 신율계(video extensometer)와 같은 비접촉식 계측 기술이 널리 보급되면서 시험 중 시편 표면에서 고해상도의 변위 및 변형률 데이터를 손쉽게 얻을 수 있게 되었다^[1]. 그러나, 이러한 표면 기반 데이터가 두께 중앙부를 포함한 시편 전체를 대표한다고 단정할 근거는 제시되지 않았다. 그럼에도 불구하고 산업 및 학술 연구에서는 이러한 표면 데이터를 전체 재료 거동을 대표하는 값으로 사용하

는 사례가 많다. 특히, 인장 시험에서 많이 활용되는 ASTM E8 표준은 폭 12.5 mm, 표점 거리 50 mm의 시험편에 대해 두께 19 mm 이하의 시편을 권장하지만, 이것에 대한 근거는 명시되어 있지 않다^[2]. 그 결과, 산업 현장과 연구실 모두에서 특정 두께 시험편의 표면에 국한된 변형률 데이터를 그대로 사용해도 되는지 판단하기 어려운 실정이다.

본 연구는 ASTM E8이 제안한 폭 12.5 mm, 표점 거리 50 mm 규격의 판재 인장 시험편에 대해 단축 인장 상태를 유지하는 유효 두께의 범위를 규명하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 두께 증가에 따른 시편 내부의 응력 상태와 변형 경로를 정량적으로 분석하였다. 본 연구는 표면 계측 데이터의 대표성 문제를 해결하기

* Corresponding author. Tel.: +82-32-850-0335

E-mail address: mkim@kitech.re.kr (Minki Kim).

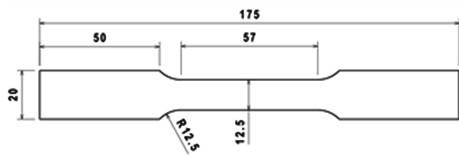


Fig. 1 Dimension of ASTM standard tensile specimen

Table 1 Material properties from the tensile test

E [GPa]	ρ [g/cm ³]	ν [-]
188.7	7.85	0.3

위하여 두께 0.7 mm에서 21 mm까지 다양한 판재 시편에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 실제 변형률 5%, 10%, 15% 구간마다 폭 중앙 위치에서 표면과 두께 중앙부의 응력 삼축성(triaxiality)을 비교하고 전체 변형 구간에서 표점 거리 중앙 지점과 끝 지점의 응력 삼축성 변화를 추적하였다. 또한, 시험편 표면과 두께 중앙부에서 변형경로(strain path)를 분석하여 시편 두께가 변함에 따른 표면과 내부의 변형 상태 차이를 정량적으로 평가하였다. 이렇게 얻은 응력 삼축성과 변형경로의 결과를 바탕으로 두께 증가에 따른 표면과 중앙부 간 차이가 오차 범위를 넘어서는 임계 두께를 도출하였다.

따라서, 본 연구는 표면에서 얻은 비접촉식 변형 데이터를 그대로 전체 물성의 대푯값으로 사용할 수 있는 두께를 제시한다. 이러한 분석은 두께 방향 불균일성이 유의미해지는 지점을 명확히 구분함으로써 향후 인장 시험 방법의 신뢰성을 높이고, 두꺼운 판재의 물성 평가 표준화에 기여할 것으로 기대된다.

2. 단축 인장 해석 모델링

2.1 인장시험 및 해석 적용 물성

본 연구에서는 두께 1.6 mm의 SPHC 강재를 대상으로 단축 인장 시험을 수행하였으며, 시험편은 압연 방향(rolling direction, RD)을 기준으로 가공되었다. 시편 형상은 Fig. 1과 같이 ASTM E8 규격을 준용하여 설계하였다. 시험은 Shimadzu의 범용 인장 시험기(Universal Testing Machine)를 사용하였으며, 변형률 속도는 0.001 mm/s로 고정하였다. 변형 측정에는 디지털 이미지 상관법을 적용하였고, 시편 전면부에 스펙클 패턴을 도포한 후 해당 패턴의 변위를 추적함으로써 전면 변형을 정밀하게 계측하였다. 이러한 시험조건 하에서 획득한 데이터를 바탕으로 물성을 도출하였으며, 해당 값들은 Table 1에 정리하였다. 도출된 물성은 유한요소해석에 적용되었으며, 재료의 경화식은 식 (1)의 경화 모델을 기반으로 구성하였다^[3].

$$\sigma = a\{\sigma_0 + R(1 - e^{-C\epsilon^p})\} + (1 - a)\{K(\epsilon^p + \epsilon_0)^n\} \quad (1)$$

Table 2 Parameters of the hardening model

σ_0 [MPa]	R [MPa]	C [-]	K [MPa]	ϵ_0 [-]	n [-]	a [-]
0.00	1680	42.5	567	0.015	0.253	0.047

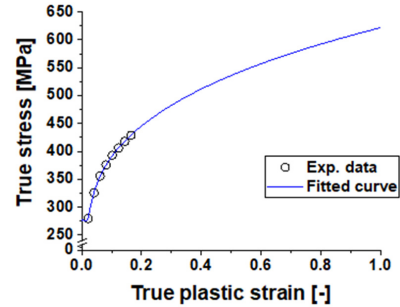


Fig. 2 Hardening curve from the tensile test

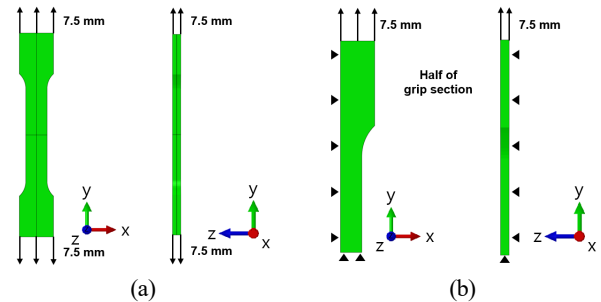


Fig. 3 Geometry and boundary conditions: (a) full model and (b) 1/8 symmetric model

여기서, ϵ^p 은 소성 변형률, $\sigma_0, R, C, K, \epsilon_0, n, a$ 는 실험 데이터를 기반으로 비선형 회귀 분석을 통해 최적화된 매개변수이다. SPHC 소재의 소성 변형률 초반 구간에 일어나는 항복점 연신(yield point elongation) 특성을 고려하여 이를 경화 모델에 반영하였다. 경화식에 사용된 매개변수는 Table 2에 제시하였으며, 최적화된 결과를 적용한 경화 곡선은 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 인장시험 구조해석 모델링

본 연구에서는 다양한 두께를 가진 ASTM 표준 인장 시험편의 인장 거동을 수치적으로 모사하기 위해 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS CAE / Implicit을 활용하여 시편 모델링 및 유한요소해석을 수행하였다. 해석 대상은 두께 0.7 mm부터 21 mm까지의 총 13가지 조건으로 구성되었으며, 각각 ASTM E8 규격을 기준으로 한 인장 시험편 형상으로 모델링하였다.

Fig. 3은 표준 시편 형상을 기반으로 모델링된 전체 형상 모델과 해석 효율을 고려하여 구성한 1/8 대칭 모델을 나타낸다. 1/8 모델은 전체 모델을 폭, 두께, 길이 방향으로 각각 절반씩 절단하여 총 세 면에 수직 대칭 조건을 부여하였고, 이를 통해 계산 효율을 높인 1/8 모델로 해석을 수행하였다. 1/8 모델의 각 절단면에 수직하

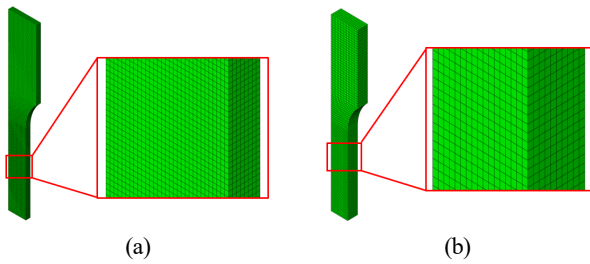


Fig. 4 Examples of mesh configurations of (a) 3.2T and (b) 12.5T of 1/8 symmetric model

방향으로 대칭 조건을 부여함으로써 전체 모델과 동일한 물리적 거동을 모사하였다. 그립부는 실제 시험에서 시편의 그립부 절반이 장비의 지그에 의해 고정된다는 조건을 반영하기 위해 모델상의 그립부 길이는 원래 규격(30 mm)의 절반인 15 mm로 설정하였다. 시편의 인장 하중은 시편 그립부의 윗면을 y축 방향으로 7.5 mm의 변위를 부여하는 방식으로 적용하였다. 이는 전체 모델에서 표점거리 50 mm를 기준으로 30%의 공학 변형률에 해당하며, 실제 실험에서 최대 인장 강도(ultimate tensile strength, UTS) 도달 시의 변형률이 약 20%임을 고려하여 해석이 해당 구간을 포함하고 소성 거동 전반을 재현할 수 있도록 하기 위함이다. 본 연구에서는 유한요소해석에서 두께마다 요소의 크기와 개수를 고려하여 각 시편의 두께에 따라 두께 방향 기준으로 서로 다른 요소 개수를 적용하였다. 두께가 0.7 mm, 1.0 mm, 1.6 mm인 경우에는 전체 모델을 기준으로 두께 방향에 총 10개의 요소를 배치하였다. 또한, 2.6 mm, 3.2 mm, 4.0 mm, 5.0 mm 시편은 16개의 요소, 그리고 7.5 mm 이상 (7.5, 10.0, 12.5, 16.0, 19.0, 21.0)의 경우에는 20개의 요소를 배치하였다. 요소의 크기는 식 (2)로 정의된다.

$$l = \frac{t}{n} \quad (2)$$

여기서, l 은 요소 하나의 크기, t 는 시편 두께, n 은 요소 개수를 의미한다. Fig. 4(a)의 3.2 mm 두께의 시편은 0.2 mm 두께의 요소로 구성하였고, Fig. 4(b)와 같이 두께가 7.5 mm인 경우, 0.375 mm 두께의 요소로 구성하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 유한요소해석 결과

Fig. 5는 각 두께 조건에 대한 유한요소해석 결과를 나타낸 것이다. 대표적 예시로 2.6 mm, 10.0 mm, 19.0 mm의 해석 결과를 최대 응력(ultimate tensile strength) 구간에서 제시하였다. 인장 방향(y축) 응력의 상태를 분석하기 위해 해당 방향에 작용하는 응

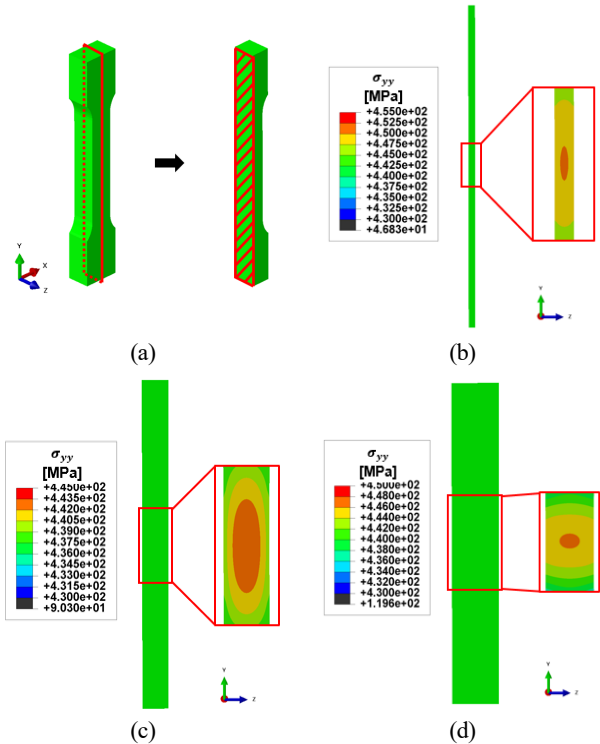


Fig. 5 Stress distribution in tensile direction: (a) observed region, (b) 2.6T, (c) 10.0T, (d) 19.0T

력 성분인 σ_{yy} 를 기준으로 응력 분포를 시각화하였다. 두께 방향으로 응력 분포를 명확히 분석하기 위해 Fig. 5(a)에서는 폭 방향 중앙 위치를 기준으로 설정한 단면상에서 σ_{yy} 의 분포를 나타냈다. Fig. 5의 결과에 따르면, 모든 두께의 경우에서 공통적으로 시편 두께 중심부에 응력이 가장 높게 분포하는 것을 볼 수 있다. 이것은 인장 방향의 응력이 중앙에 집중되어 응력이 균일하지 않게 분포한다는 것을 의미하며, 단축 인장 조건에서 이상적으로 기대되는 균일 응력 분포와 차이가 있을 수 있음을 의미한다. 두께에 따라 집중되는 정도와 영역의 크기가 상이하기 때문에 어느 두께까지 단축 인장 상태로 간주할 수 있는지에 대한 기준 설정이 필요하다. 본 연구에서는 이를 기반으로 유효 두께 판단에 활용하고자 한다.

3.2 두께에 따른 응력 삼축성의 변화

응력 삼축성은 재료가 받는 정수압 응력 성분 σ_m 과 등가 응력 σ_{eq} 의 비를 의미하며, 식 (3)으로 정의된다.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \quad \left(\sigma_m = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} \right) \quad (3)$$

여기서, η 는 응력 삼축성, σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} 는 각각 주축 방향에서 전단응력이 없는 수직응력을 의미한다.

단축 인장 조건에서는 인장 방향을 제외한 나머지 두 방향으로

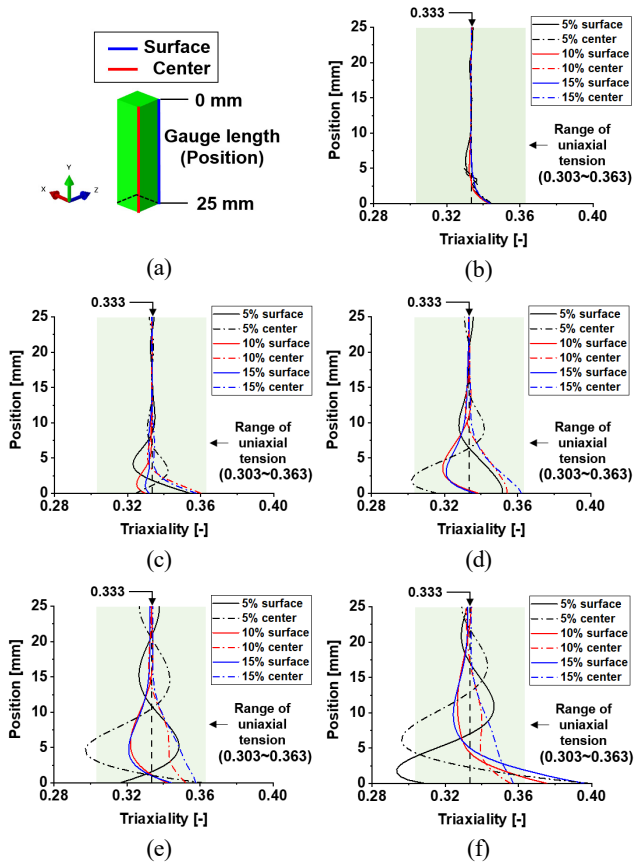


Fig. 6 Triaxiality at true strain of 5%, 10%, and 15% along the gauge length: (a) analyzed region, and results with thicknesses of (b) 0.7T, (c) 5.0T, (d) 10.0T, (e) 16.0T (f) 21.0T

는 응력이 작용하지 않는다고 가정하므로 해당 방향의 응력을 0으로 설정하면 응력 삼축성은 1/3이 된다. 따라서, 단축 인장시험에서 이론적인 삼축성 값은 약 0.333이다. 그러나, 실제 실험 환경에서는 치수 측정 오차, 시험편 형상, 측정 장비의 정밀도 등의 영향으로 인하여 응력 삼축성 값에도 일정 수준의 오차가 생기는 것이 불가피하다. 이에 따라 여러 선행 연구에서는 이러한 현실적인 편차를 반영하여 삼축성 값이 ± 0.03 의 범위 내에 있을 경우 단축 인장 상태로 간주하였다^[4-6]. 따라서, 본 연구에서는 이론적 기준 값인 1/3을 중심으로 오차 폭을 반영하여 $0.303 \leq \eta \leq 0.363$ 을 단축 인장 영역으로 정의하고 분석을 진행하였다.

Fig. 6(a)는 1/8모델에서 인장 시험편 표면과 두께 중심부에서 표점 거리를 나타낸 것이다. 시험편의 두께에 따른 응력 삼축성 변화를 정량적으로 분석하기 위해 표면과 두께 중심부에서 설정된 표점거리 내 위치들을 기준으로 실제 변형률 5% 간격으로 응력 삼축성을 산출하였다. 각 두께 조건에 대해 계산된 응력 삼축성 분포는 Fig. 6(b), (c), (d), (e), 및 (f)에 제시하였다. 각 두께에서 측정된 삼축성은 이론적인 단축 인장 상태를 나타내는 값인

Table 3 Maximum deviation from ideal triaxiality

Thickness [mm]	0.7	5.0	10.0	16.0	21.0
Δ_{\max}^{η} [-]	0.011	0.027	0.032	0.038	0.064

Table 4 Largest difference between surface and mid-thickness at same position

Thickness [mm]	0.7	5.0	10.0	16.0	21.0
D_{\max}^{η} [-]	0.003	0.030	0.048	0.051	0.091

0.333과 비교되었고, 0.333으로부터의 최대 편차는 식 (4)와 같이 정의되며, 각 두께에서 값은 Table 3에 정리하였다.

$$\Delta_{\max}^{\eta} = |0.333 - \eta_i|_{\max} \quad (4)$$

여기서, Δ_{\max} 는 0.333으로부터 최대 편차이고, η_i 는 표점 거리 내 각 위치에서의 응력 삼축성을 의미한다. 또한, 동일한 표점 거리에서 표면과 중심부 간의 최대 차이는 식 (5)와 같으며, Table 4에 기재하였다.

$$D_{\max}^{\eta} = |\eta_i^s - \eta_i^c|_{\max} \quad (5)$$

여기서, D_{\max}^{η} 는 동일 표점 거리에서 표면과 중심부 간의 응력 삼축성 최대 차이, η_i^s 는 각 위치에서 표면의 응력 삼축성, η_i^c 는 각 위치에서 두께 중심부의 응력 삼축성을 의미한다. 0.7 T의 경우, 0.333과 가장 큰 편차를 가진 값은 0.344로 ± 0.03 의 허용 범위 내에서 단축 인장 상태에 해당되었으며, 표면과 중심부 간의 최대 차이는 0.003으로 매우 작게 나타났다. 반면, 가장 큰 두께인 21.0 T의 경우, 응력 삼축성은 최대 0.397로 0.333으로부터의 차이가 0.064로 나타났고, 동일 표점 거리에서 표면과 중심부 간 최대 차이는 0.091로 크게 나타났다. 전반적으로, 두께가 증가할수록 삼축성 값은 0.333으로부터 점차 멀어지는 경향을 보였으며, 표면과 중심부의 차이 또한 증가하는 추세를 나타냈다. 이는 두께가 증가함에 따라 시험편 내 각 위치에서 인접한 위치의 기계적 영향을 더 크게 받게 되어, 응력 및 변형의 분포가 비균일해지기 때문으로 해석된다.

Fig. 7(a)는 특정 변형률 구간이 아닌 전체 소성 변형 구간에서 응력 삼축성의 변화를 관찰할 위치를 나타내며, 표점거리의 중간 (25 mm)과 끝(0 mm)에서 표면부와 두께 중심부로 설정하였다. 해당 위치에서의 응력 삼축성 변화는 Fig. 7(b), (c), (d), (e), 및 (f)에 나타내었다. 전체 변형 구간에서의 응력 삼축성 추이를 확인할 수 있으나, 여러 선행 연구에서 보고된 바와 같이 항복점 연신 구간에서는 시험편 내부의 변형이 무작위로 일어나면서 응력 삼축성에 급격한 변화가 일어나 산포가 크게 증가하는 현상이 발생한

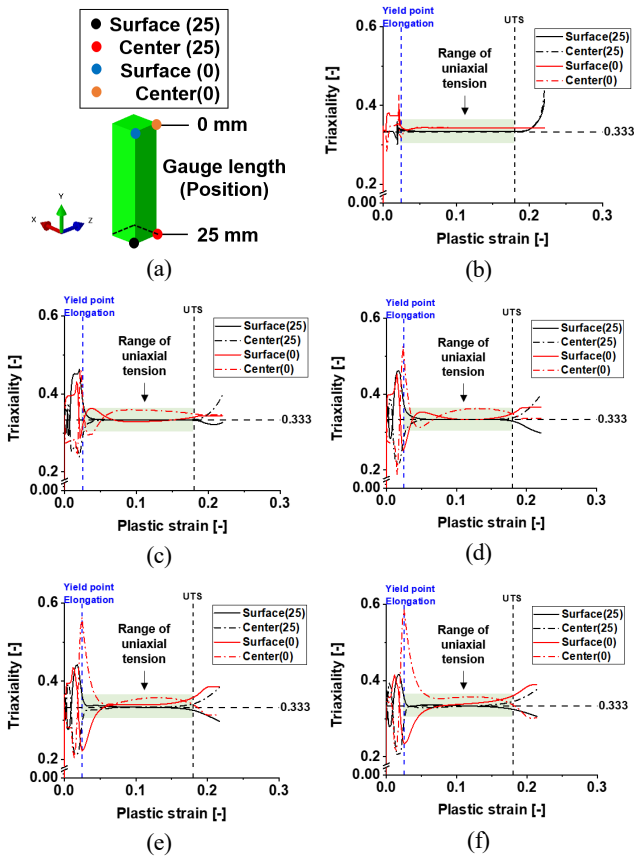


Fig. 7 Triaxiality at the specific points: (a) analyzed points, and results with thicknesses of (b) 0.7T, (c) 5.0T, (d) 10.0T, (e) 16.0T (f) 21.0T

다^[7,8]. 실제로 Fig. 7에서도 항복점 연신 구간에서는 삼축성 값의 산포가 큰 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 항복점 연신 구간을 분석 범위에서 제외하였다. 단축 인장 실험에서 항복점 연신 이후부터 최대 인장 강도에 도달하기까지 구간은 일반적으로 경화가 진행되는 구간이며, 이 구간에서의 응력 상태는 단축 인장 조건을 유지해야 한다. Fig. 7의 결과에서도 확인할 수 있듯이, 항복점 연신 이후 구간에서도 두께가 증가할수록 삼축성이 0.333으로부터 차이가 점차 늘어나는 것을 확인하였다. 또한, 두께 중심부의 표점거리 끝(0 mm) 부분에서 공통적으로 소성 변형률 5% 미만 구간에서 편차가 가장 크게 나타났다.

3.3 두께에 따른 변형경로의 변화

단축 인장 조건에서는 소성 체적 보존 원리에 따라 폭 방향 소성 변형률(minor plastic strain)이 길이 방향 소성 변형률(major plastic strain)의 음의 절반이 되며, 이에 따라 단축 인장에서 이론적인 변형경로(strain path, β)는 -0.5로 나타난다. 변형경로는 식 (6)으로 정의되며, 폭 방향과 길이 방향 소성 변형률의 비를 의미한다.

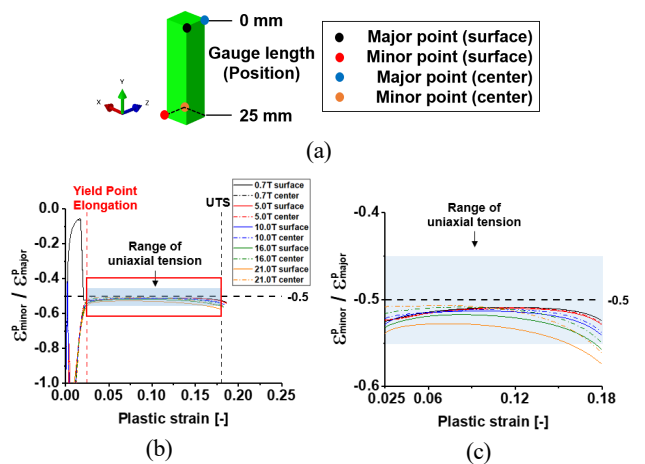


Fig. 8 Strain path at surface and mid-thickness: (a) analyzed points, and (b) the results with thicknesses of 0.7T, 5.0T, 10.0T, 16.0T, 21.0T, and (c) magnified view of the red box in (b)

Table 5 Maximum deviation between the ideal strain path and that of each thicknesses

Thickness [mm]	0.7	5.0	10.0	16.0	21.0
Δ_{max}^{β} [-]	0.025	0.030	0.044	0.058	0.075

$$\beta = \frac{\epsilon_2^p}{\epsilon_1^p} \quad (6)$$

여기서, β 는 변형경로, ϵ_1^p 은 길이 방향 소성 변형률, ϵ_2^p 은 폭 방향 소성 변형률을 의미한다. 실제 실험이나 유한요소해석에서는 시편 형상, 재료 이방성, 경계 조건 등 다양한 요인으로 인해 변형경로가 -0.5에서 다소 벗어나는 경우가 많다. 여러 선행 연구에서는 변형경로의 허용 오차 범위에 대해 언급해 왔으며, 약 -0.45에서 -0.55 사이의 값을 단축 인장 상태라고 간주하는 보고가 있었다^[9]. 이러한 기준을 바탕으로 본 연구에서는 변형경로가 -0.45에서 -0.55 사이에 존재하는 경우를 단축 인장 조건으로 정의하여 각 두께에 대한 유효성을 평가하였다.

Fig. 8은 소성 변형률을 측정할 위치와 5가지 두께에서의 양상을 나타낸 것이다. 앞서 언급한 항복점 연신에서 불안정한 변형을 이유로 변형률 분석도 항복점 연신 구간을 제외하여 항복점 연신이 끝나는 구간과 최대 인장 강도 구간 사이를 분석 구간으로 설정하였다. Fig. 8(b)와 Fig. 8(c)에서 볼 수 있듯이 전반적으로 두께가 증가할수록 그리고 최대 응력 구간에 가까워질수록 -0.5에서 멀어지는 것을 확인할 수 있다. 공통적으로 두께 중앙부보다 표면부에서 -0.5로부터 더 큰 편차를 가졌다. 각 두께의 시편이 갖는 -0.5로부터 최대 편차는 식 (7)로 정의되며, Table 5에 정리하였다.

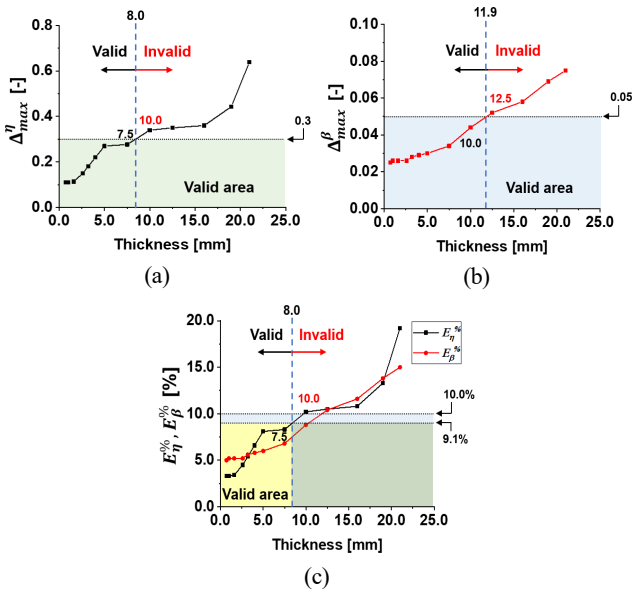


Fig. 9 Valid area and maximum deviation from (a) ideal triaxiality and (b) strain path by various thicknesses, and (c) percentage deviation of two values

$$\Delta_{\max}^{\beta} = |-0.5 - \beta_i|_{\max} \quad (7)$$

여기서, Δ_{\max}^{β} 는 -0.5로부터의 최대 편차, β_i 는 각 소성 변형 구간에서의 변형경로를 의미한다. 0.7 mm의 경우, -0.5로부터 최대 편차는 -0.525로 위에서 설정한 허용 범위 내 단축 인장 상태에 있는 것을 확인할 수 있다. 10.0 mm의 경우에도 -0.544의 값을 가져 -0.5로부터의 편차가 0.044이므로 설정한 허용 범위 내의 단축 인장 상태를 유지하는 것을 알 수 있다. 그러나, 21.0 mm는 -0.575로 -0.5보다 작은 값으로 나타나고, -0.5로부터의 편차가 0.075로써 단축 인장의 범위에서 벗어나는 것으로 나타났다.

3.4 ASTM 표준 인장 시험편 유효 두께 평가

본 연구에서는 다양한 두께 조건에 대해 인장 해석을 수행하고 응력 삼축성과 변형경로를 각각 분석하였다. 각각의 평가는 이론적인 단축 인장 조건을 기준으로 그로부터 편차를 정량적으로 비교하였다.

최종적으로 두 변수의 결과를 통합하여 유효한 인장 조건을 만족하는 두께 범위를 시각적으로 판단하기 위해 Fig. 9(a)는 응력 삼축성, Fig. 9(b)는 변형경로의 유효 범위, Fig. 9(c)에 백분율 오차로 통합하여 나타내었다. x축은 두께 조건, y축은 각 변수에 대한 편차와 기준 만족 여부로 구성하였다.

응력 삼축성과 변형경로 각 기준을 만족하는 영역을 각 그래프 상에서 영역으로 표시하였으며, 응력 삼축성은 허용 오차가 약 허용 범위 기준 $\pm 9.1\%$, 변형경로는 $\pm 10.0\%$ 이고, Fig. 9(c)에 각각 유효 범위 영역을 나타냈다. 두 영역이 겹치는 구간(노란색 영역)

Table 6 Maximum percentage deviation in triaxiality and strain path by thicknesses

Thickness [mm]	$E_{\eta}^{\%}$ [%]	$E_{\beta}^{\%}$ [%]
0.7	3.3	5.0
1.0	3.3	5.2
1.6	3.4	5.2
2.6	4.5	5.2
3.2	5.4	5.6
4.0	6.6	5.8
5.0	8.1	6.0
7.5	8.3	6.8
10.0	10.2	8.8
12.5	10.5	10.4
16.0	10.8	11.6
19.0	13.3	13.8
21.0	19.2	15.0

을 본 연구에서 제안하는 유효 두께로 정의하였다. 평가 지표는 앞서 언급한 식 (4)와 식 (7)에 있는 이론적인 값으로부터의 최대 편차를 사용하였으며, 백분율 오차로 표현하였고, 각각 식 (8)과 식 (9)로 정의된다.

$$E_{\eta}^{\%} = \left| \frac{\Delta_{\max}^{\eta}}{0.333} \right| \times 100 \quad (8)$$

여기서, $E_{\eta}^{\%}$ 는 0.333의 응력 삼축성으로부터 최대 백분율 오차, Δ_{\max}^{η} 는 식 (4)에서 정의된 최대 편차를 의미한다.

$$E_{\beta}^{\%} = \left| \frac{\Delta_{\max}^{\beta}}{(-0.5)} \right| \times 100 \quad (9)$$

여기서, $E_{\beta}^{\%}$ 는 -0.5의 변형경로로부터 최대 백분율 오차, Δ_{\max}^{β} 는 식 (6)에서 정의된 최대 편차를 의미한다. 두께가 다른 13가지 시험편의 모든 평가 지표를 Table 6에 나타냈다.

평가 결과, 선정한 13가지 두께의 모델 중에서 최대 7.5 mm의 ASTM 표준 인장 시험편이 유효 단축 인장 범위 내에 들어왔으며, 단축 인장 유효 두께 범위의 임계점은 8.0 mm인 것으로 확인하였다. 변형경로 기준의 범위가 응력 삼축성 기준의 범위보다 크기 때문에 두 조건을 모두 만족하기 위해서는 응력 삼축성의 기준으로 유효 범위를 결정하였다. 따라서, 두 기준을 모두 고려하여 13가지 두께 중 8.0 mm 이하 두께의 시험편이 유효한 것을 확인했다.

4. 결론

본 연구에서는 ASTM E8 기준 폭 12.5 mm, 표점거리 50 mm

의 표준 인장 시험편을 다양한 두께 조건으로 모델링하여 이론적인 평면 응력 단축 인장 조건(응력 삼축성 $\approx 1/3$, 변형경로 ≈ -0.5)을 만족하는 유효 두께 범위를 규명하고자 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과, 시편의 두께가 7.5 mm 이하일 경우에는 응력 삼축성 기준에서의 단축 인장 상태를 만족하였으며, 이 조건의 임계 두께는 8.0 mm인 것으로 확인하였다. 변형경로 기준의 경우에는 10.0 mm 이하에서 단축 인장 상태를 충족하였으며, 임계 두께는 11.9 mm로 나타났다. 두 조건을 모두 종합적으로 고려하였을 때, ASTM E8 표준 인장 시험편에서 단축 인장 조건이 유효하게 유지되는 최대 두께는 8.0 mm인 것으로 판단된다. 이 범위를 벗어난 두께에서는 시편의 표면과 중심부에서 응력 삼축성이 단축 인장의 허용 범위에서 벗어나고, 국소적인 응력 집중이 발생하여 단축 인장 조건이 유지되지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 이 보다 두꺼운 두께의 판재의 단축 인장 조건을 충족하기 위해서는 폭 12.5 mm 이상 시험편 규격의 적용이 필요하다고 판단된다.

이러한 결과는 인장시험에서 시편 두께가 응력 상태에 결정적인 영향을 미침을 시사하며, 시험편 설계 시 두께 조건을 신중히 고려해야 함을 보여준다. 본 연구에서 제시한 방법론은 평면 응력 조건을 만족하는 시편을 설계하기 위한 실용적인 기준을 제공하며, 시험의 신뢰성을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 본 시뮬레이션 결과에 대한 실험적 검증, 재료 특성 및 시편 형상이 유효 두께 범위에 미치는 영향을 분석함으로써 다양한 금속 소재 및 시험 조건으로 본 접근법을 확장하고자 한다.

후 기

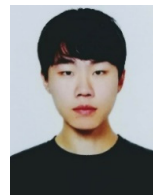
이 연구는 한국생산기술연구원 내부과제(No. KITECH JE-25-0006)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Wang, Y. H., Jiang, J. H., Wanintrudal, C., Du, C., Zhou, D., Smith, L. M., Yang, L. X., 2010, Whole Field Sheet-Metal Tensile Test Using Digital Image Correlation, *Experimental Techniques*, 34:2 54-59, <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2009.00483.x>.
- [2] ASTM, 2013, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM E8/E8M-22, ASTM International, West Conshohocken, PA, https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-22.
- [3] Yun, J., Chae, Y., Lim, S., Park, J., Kim, M., 2025, Optimization of Cam-Forming Process for Side Bead Considering

Springback, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 34:3 129-136, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2025.34.3.129>.

- [4] Djebien, S., Nohara, S., Nishida, M., Marth, S., Häggblad, H.-Å., 2024, Strain Rate and Notch Radius Effects on Evaluating the Stress-Strain Relations Using the Stepwise Modeling Method, *J. Dynamic Behavior Mater.*, 10:1 26-39, <https://doi.org/10.1007/s40870-023-00397-4>.
- [5] Stockburger, E., Wester, H., Jegatheeswaran, V., Dykiert, M., Behrens, B. A., 2023, Improved Failure Characterisation of High-Strength Steel Using a Butterfly Test Rig With Rotation Control, *Materials Research Proceedings*, 28 737-746, <https://doi.org/10.21741/9781644902479-80>.
- [6] Choi, S., Park, T., Kim, H., Nam, B., Ye, B., Kim, D., 2024, Ductile Fracture Prediction in Thin-Walled Structures Through a Novel Damage Model, *Heliyon*, 10:23 e40849, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40849>.
- [7] Brlic, T., Debruyne, D., Lava, P., Reskovic, S., Jandjrlc, I., 2019, Identification of Luders Bands Using Digital Image Correlation, *Holistic Approach Environ.*, 9:1 8-11, <https://doi.org/10.33765/thate.9.1.2>.
- [8] Sun, H. B., Yoshida, F., Ma, X., Kamei, T., Ohmori, M., 2003, Finite Element Simulation on the Propagation of Luders Band and Effect of Stress Concentration, *Material Letters*, 57:21 3206-3210, [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00036-3](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00036-3).
- [9] Lian, J., Liu, W., Gastanares, X., Juan, R., Mendiguren, J., 2022, Plasticity Evolution of an Aluminum-Magnesium Alloy Under Abrupt Strain Path Changes, *Int. J. Mater. Form.*, 15 40, <https://doi.org/10.1007/s12289-022-01692-6>.



Junseop Yun

Student Researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Metal Forming.
E-mail: sana408@kitech.re.kr



Yujin Chae

Researcher (M. S.) in Korea Institute of Industrial Technology. Her research interests are Material Testing & Modeling.
E-mail: cyj253@kitech.re.kr



Jinsoo Park

Ph. D. Student in the Department of Mechanical Engineering, Inha University. His research interest is Metal Forming.

E-mail: pjs0000822@naver.com



Minki Kim

Senior Researcher (Ph. D.) in Korea Institute of Industrial Technology. His research interests are Plasticity, Material Testing & Modeling, Experimental Mechanics.

E-mail: mkim@kitech.re.kr