[논문] 한국소성가공학회지, 제 27 권 제 5 호, 2018
Transactions of Materials Processing, Vol.27, No.5, 2018
https://doi.org/10.5228/KSTP.2018.27.5.301

순 티타늄 판재의 변형 특성 및 성형성 평가

인정훈[1#] ·정기조[2] ·이현석[2] ·김정한[3] ·김진재[4] ·김영석[#]

A Study on Plastic Deformation Characteristics and Formability for Pure Titanium Sheet

J.H. In, K.C. Jeong, H.S. Lee, J.H. Kim, J.J. Kim, Y.S. Kim
(Received April 20, 2018 / Revised July 12, 2018 / Accepted September 21, 2018)

Abstract

In this paper, tensile test was performed on pure titanium sheet (CP Ti sheet) with HCP structure in each direction to evaluate mechanical and surface properties and analyze microstructural changes during plastic deformation. We also evaluated forming limits of Ti direction in dome-type punch stretching test using a non-contact three-dimensional optical measurement system. As a result, it was revealed the pure titanium sheet has strong anisotropic property in yield stress, stress-strain curve and anisotropy coefficient according to direction. It was revealed that twinning occurred when the pure titanium sheet was plastic deformed, and tendency depends differently on direction and deformation mode. Moreover, this seems to affect the physical properties and deformation of the material. In addition, it was revealed the pure titanium sheet had different surface roughness changes in 0 degree direction and 90 degree direction due to large difference of anisotropy, and this affects the forming limit. It was revealed the forming limit of each direction obtained through the punch stretching test gave higher value in 90 degree direction compared with forming limit in 0 degree direction.

Key Words : Pure Titanium Sheet, Twinning, Plastic Anisotropy, Surface Roughness, Forming Limit Curve

1. 서 론

순 티타늄 판재(commercially pure titanium, CP Ti sheet)는 4.504g/cm³의 비중을 지닌 경금속으로 타 소재에 비하여 경량성(lightweight)이 좋고, 비강도(specific strength)가 높고, 내식성(corrosion resistance)이 매우 우수하여, 화학장치산업, 해양구조물 및 생체의료분야에서 널리 사용되고 있다. 특히 순 티타늄 판재 Grade 1의 경우, 프레스 가공성(press formability) 이 우수하여 헤링본 형태(herringbone pattern)와 같이 다양한 굴곡형태로 프레스 가공된 판형열교환기의 전열판에 널리 사용되고 있다[1][2].

순 티타늄 판재는 상온에서 조밀육방격자구조(hexagonal closed packed crystal structure, HCP) 를 갖고 있어 소성슬립계(plastic slip system)가 매우 제한적이고, 영률(young's modulus)이 낮고, 면내이방성(in-plane anisotropy)이 강한 특성이 있기 때문에 일반 철강재와 비교하면 프레스 가공이 어려운 재료로 알려져 있다[3]. Usuda 등[4]은 Ti 판재의 면내이방성 특성에 의해서 압연방향과 압연방향에 수직인 방향의 성형한계(forming limit)가 다른 것을 실험적으로 제시한 바 있다. 또한 Chen 과 Chiu 등[5]은 순 티타늄 판재에 대하여 방향별로 인장특성이 다르고, 이방성 특성이 재료의 딥 드로잉에서의 성형성에 영향을 미친다는 것을 밝혔다.

1. 화신정공 기술연구소 연구원
2. 포항산업과학연구원 수석, 책임연구원
3. 국립한밭대학교 교수
4. 경북대학교 대학원 기계공학과 박사과정
Corresponding Author : Young Suk, Kim (Kyungpook National University), 교수, E-mail:caekim@knu.ac.kr

Taylor [6]에 의하면 슬립(slip)에 의한 재료의 소성변형 시에는 최소 5개의 소성슬립계(plastic slip system)가 필요하지만, FCC나 BCC 결정구조의 재료와 달리 HCP 결정구조의 소성슬립계는 총 3개이기 때문에 쌍정(twinning)을 통해 부족한 슬립계를 대신하여 소성변형이 이루어진다고 하였다. 안광현, 허훈, 윤종헌 등[7]은 쌍정이 티타늄의 변형률 경화 특성에 미치는 영향에 대해서 실험적으로 제시하고, 쌍정의 영향을 표현할 수 있는 물성 모델을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 순 티타늄 판재에서의 이방성 특성이 기계적 특성 및 소성변형특성에 미치는 영향을 분석하기 위해서 압연방향을 기준으로 0도, 45도, 90도 방향에 대해서 단축인장시험을 수행하여 기계적 특성과 변형중의 마이크로 조직변화, 그리고 표면 거칠기 형상의 변화를 분석하였다. 또한 파단 직후의 인장시편에 대하여 변형 및 파단 특성을 전계방출형주사전자현미경을 통하여 관찰하여 이방성특성의 차이를 명확히 하였다. 또한 이방성 특성이 성형한계에 미치는 영향을 분석하기 위해서 돔형 펀치를 이용한 장출성형시험을 수행하여 압연방향과 압연방향에 수직한 방향에서 성형한계도를 측정하였다.

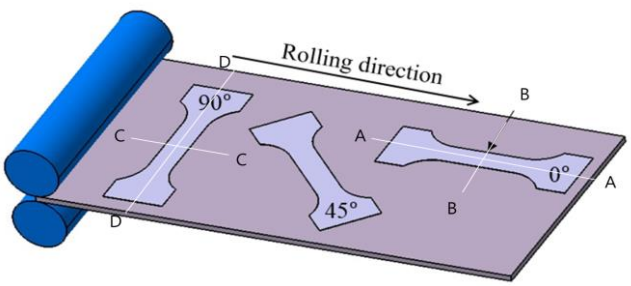


Fig.1 Tensile test specimens according to tensile directions

2. 인장시험 및 변형특성

2.1 단축인장시험

순 티타늄 판재의 방향에 따른 기계적 특성을 평가하기 위해서 두께 0.5mm의 순 티타늄 판재 Grade 1 을 KS B 0801 13B의 규격에 따라 Fig.1 과 같이 압연방향의 0도, 45도, 90도 방향에 대하여 제작하였다. 실제 판형열교환기 등의 제조에서는 매우 낮은 프레스 속도로 순 티타늄 판재를 가공하고 있다. KS B 0802 의 실험방법에 따라 변형속도(strain rate) 0.0003/s (장비속도 : 1mm/min) 로 단축인장시험을 수행하였다. 변형률은 디지털이미지상관법(digital image correlation, DIC)를 이용하여 측정하였다.

Table 1에 단축인장시험을 통하여 얻은 순 티타늄 판재의 각 방향별 기계적 특성을 나타내었고, Fig.2에 각 방향별 공칭응력-공칭변형률 선도를, Fig. 3에 진응력-진변형률 선도를 나타내었다. 여기서 K, n 은 Holloman 식 $\sigma = K\varepsilon^n$ 에서 소성강도계수와 가공경화지수이다.

Table 1 Mechanical properties of CP Ti sheets

Tensile direction	E [GPa]	YS [MPa]	TS [MPa]	EL [%]	K [MPa]	n
0°	104.8	191.7	311.8	56	538.3	0.22
45°	110.9	206.2	270.9	65	407.6	0.13
90°	110.1	232.7	288.7	45	384.1	0.08

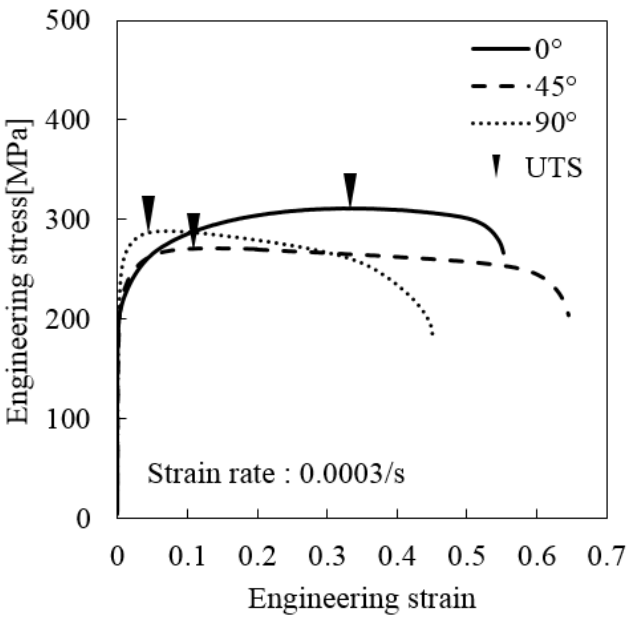


Fig.2 Engineering stress-strain curve of CP Ti sheets for three different tensile directions

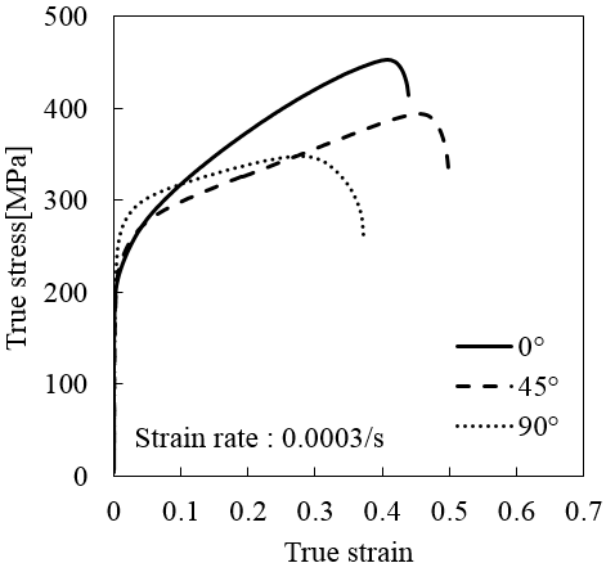


Fig.3 True stress-strain curve of CP Ti sheets for three different tensile directions

순 티타늄 판재는 Table 1 과 같이 각 방향별로 기계적 특성의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 즉, 0도 방향에서 90도 방향으로 갈수록 항복응력 값이 점점 증가하고, 연신율은 0도 방향에서 45도 방향으로 갈수록 증가하다가 90도 방향으로 갈수록 감소하였다. 반면 인장강도는 0도 방향에서 45도 방향으로 갈수록 감소하고, 90도 방향으로 갈수록 다시 증가하였다. 또한 0도 방향에서는 Fig.3과 같이 재료가 인장됨에 따라 응력이 지속적으로 천천히 증가하다가 최대하중점(공칭변형률 0.33)에 도달한 후 빠르게 파단되는 현상이 나타났으나, 45도와 90도 방향에서는 재료가 인장되면서 빠르게 최대하중점(45도의 공칭변형률 0.13, 90도의 공칭변형률 0.07)에 도달한 후 응력이 지속적으로 천천히 감소하면서 파단까지 이어지는 특이한 현상을 보였다.

Fig.3에서 0도 방향(rolling direction, RD)에 비하여 90도 방향(transverse direction, TD)에서 가공경화(work hardening)가 적은 것을 관찰할 수 있다. 두 데이터를 조금 더 가시적으로 관찰하기 위해서 0도 방향과 90도 방향에 대한 소성 변형률에 따른 가공경화율을 Fig.4와 같이 나타내었다. Fig.4(a)에서와 같이 변형률 약 0~0.02 범위의 변형 초기에는 90도 방향에서 가공경화율이 0도 방향의 경우보다 높지만, 변형률이 약 0.02 이후에는 0도 방향의 가공경화율에 비하여 90도의 가공경화율이 낮은 경향을 보인다. 한편 진응력에 따른 가공경화율을 보면, 변형 초기(약 0~290MPa 범위) 가공경화율은 0도에 비하여 90도 방향에서 높은 경향을 보였으며, 이후 가공경화율이 0도에서는 천천히 지속적으로 감소하는 반면, 90도 방향에서는 급격히 감소하였다.

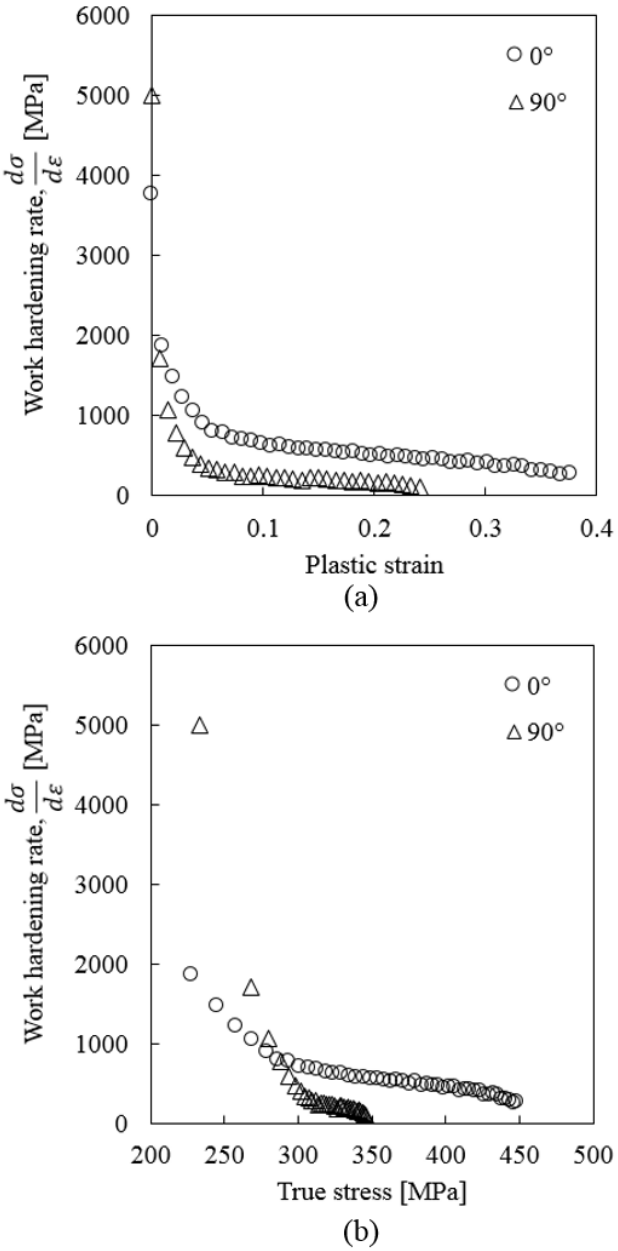


Fig.4 Work hardening rate of CP Ti sheets according to (a)plastic strain and (b)true stress

이와 같이 0도 방향과 90도 방향에서 가공경화율 변화가 다른 현상은 변형쌍정(twin deformation)의 영향인 것으로 판단된다[8].

S. Wronski 등은 티타늄 T40에 대하여 0도 방향에 따라 인장 변형된 샘플에 비하여 90도 방향에 따라서 인장 변형된 샘플에서 더 많은 변형쌍정이 발생한다고 보고한 바 있다[9]. 본 연구에서는 순 티타늄 판재의 단축인장시험 시 발생하는 쌍정의 발생정도를 확인하기 위해 각 방향의 인장시편에 대해서 후방산란전자회절분석(electron backscatter diffraction, EBSD)을 이용하여 각 결정립의 방위분포와 결정 방위차이를 관찰하였다.

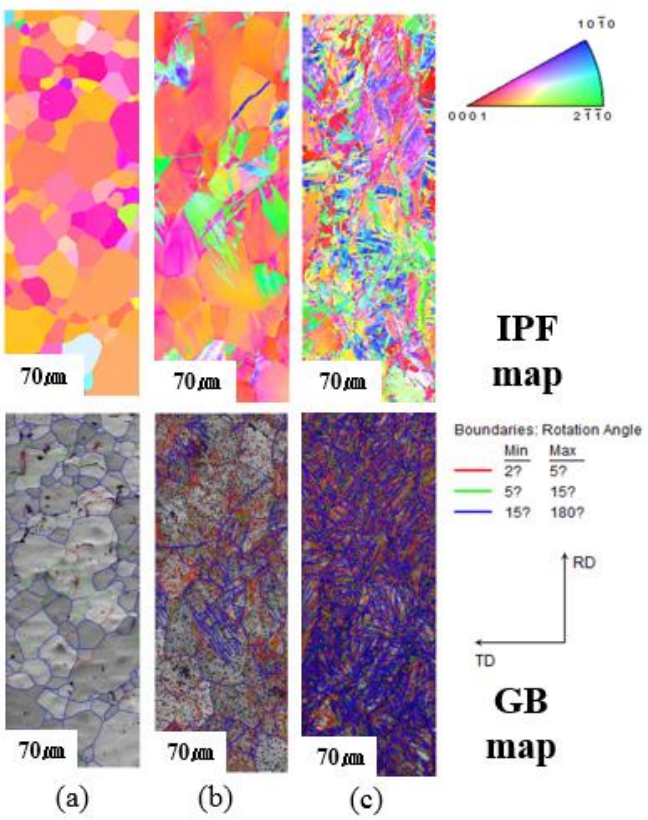


Fig.5 IPF map and GB map result of CP Ti sheets
(a) As-received material
(b) After fractured specimen for 0˚
(c) After fractured specimen for 90˚

Fig.5는 0도 방향과 90도 방향의 원소재 시편과 파단시편(파단 연신율 0도 방향 : 56%, 90도 방향 : 45%)을 Fig.8에 사각으로 표시한 위치에서 측정한 EBSD 분석 결과로써 IPF(inverse pole figure) 맵과 GB(grain boundary) 맵이다. IPF 맵을 보면, 원소재에 비하여 0도 방향에서는 일부 영역에 한해서 재료의 방위회전이 발생한 것을 알 수 있었고, 90도 방향에서는 모든 영역에서 재료의 방위회전이 발생한 것을 관찰할 수 있었다. 또한 GB map을 보면, 결정 간의 방위각을 관찰할 수 있는데 이 또한 0도 방향에 비하여 90도 방향에서 방위회전이 더 많이 발생함을 관찰할 수 있었다.

재료의 방위회전과 결정 간의 방위차이가 크다는 것은 90도 방향에서 쌍정의 발생빈도가 높다는 것을 의미한다. 즉 90도 방향에서 단축인장변형 시 쌍정이 많이 발생함을 의미한다. 물론 두 시편에 대하여 같은 변형률에서 측정하는 것이 맞으나, 시편이 파단된 이후의 기준으로 측정할 결과로서, 0도 방향이 더 많은 단축인장변형을 받았음에도 불구하고, 90도 방향에 비하여 쌍정의 발생빈도가 적었다.

또한 EBSD의 결과로부터 전체적인 평균 결정립 크기를 관찰한 결과를 Fig.6에 나타내었다. 원소재에서는 50㎛, 0도 방향에서 변형 후에는 53㎛, 90도 방향에서 변형 후에는 12㎛ 이었다. 0도 방향에서는 쌍정 발생이 적어 평균 결정립의 크기가 증가한 것은 표준편차에 의한 오차값으로 생각된다. 90도에서는 다수의 쌍정이 발생함으로써 평균 결정립의 크기가 감소된 것을 관찰할 수 있었다. 안광현, 허훈, 윤종헌 [7] 등은 압축변형에 의한 소성변형 시에 쌍정의 발생이 평균 결정립의 크기를 감소시키는 효과에 대하여 실험적으로 제시한 바 있다. 본 연구에서도 인장변형에 의해 발생된 쌍정이 평균 결정립의 크기를 감소시키는데 기여하는 것에 대하여 실험적으로 증명하였다. 본 연구에서는 0도 방향의 인장변형에서 변형쌍정이 적게 발생하고, 90도 방향의 인장변형에서 변형쌍정이 많이 발생한 것을 관찰할 수 있었다. 이는 0도 방향에서는 전위이동에 의한 슬립을 통하여 많은 가공경화가 발생하였으나, 90도 방향에서는 초기에 슬립보다는 많은 쌍정이 발생하여 큰 가공경화가 발생한 이후에 가공연화가 발생한다는 Fig.2의 인장응력-변형률 곡선의 형태를 뒷받침한다. 본 실험 결과는 최종 파단 시편에 대한 결과이지만, 이후 변형률에 따른 영향, 실험 속도에 따른 영향 등의 분석이 필요할 것으로 사료된다.

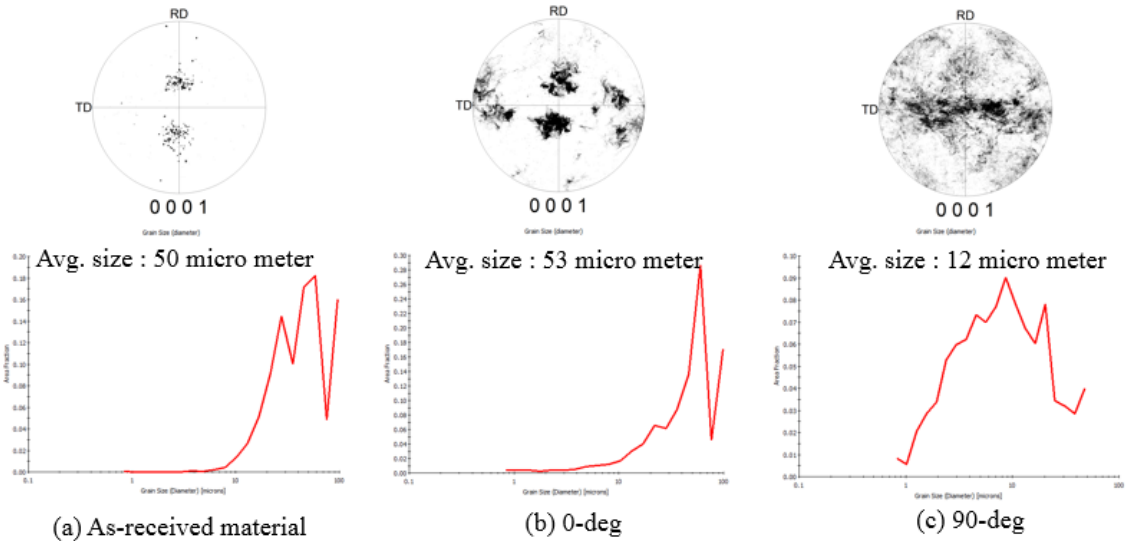


Fig.6 IPF map and GB map result of CP Ti sheets
(a) As-received material (b) After fractured specimen for 0˚ (c) After fractured specimen for 90˚

2.2 소성 이방성 계수

본 연구에서는 두께 0.5mm의 순 티타늄 판재에 대하여 압연방향 0도, 45도, 90도 방향으로 단축인장 시험을 수행하고 DIC 기법을 이용하여 두께방향 변형률에 대한 폭방향 변형률의 비로 정의되는 소성 이방성 계수(coefficient of plastic anisotropy, R-value) [10]를 측정하였다.

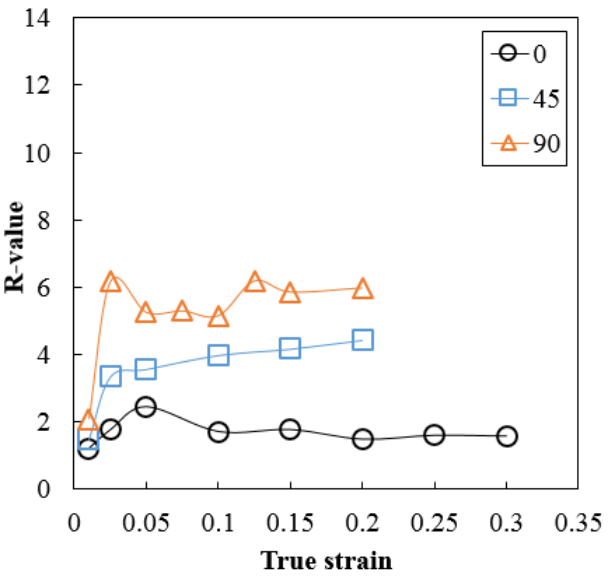


Fig.7 Variation of R-value along true strain

0도, 45도, 90도 방향에서의 평균 소성 이방성 계수는 각각 1.7, 3.7, 5.7으로, 기존에 알려진 순 티타늄 판재의 소성 이방성 계수[11]에 비하여 조금 높게 평가되었다. (Fig.7) 한편 소성변형이 진행될수록 초기에는 낮은 소성 이방성 계수를 갖지만 점차 증가하여 평균 값으로 점근하고 있음을 알 수 있다.

2.3 변형특성 및 파단특성

판재의 이방성은 판재의 기계적 특성과 변형 특성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[12]. 본 연구에서는 인장시험에 사용하였던 0도와 90도 방향의 단축인장시편에 대하여 변형 및 파단 형상을 관찰하였다. 파단된 인장시편에 대하여 Fig.8과 같이 시편의 중앙부의 파단영역에서 변형 형상을 관찰한 결과, 0도 방향에서는 시편의 중앙부에 확산 넥이 발생된 후 일부 영역에서 변형이 국소화되어 전단 밴드에 의한 파단이 발생하였다. 반면 90도 방향에서는 0도 방향에 비해 폭방향으로 더 많이 변형된 후 연성에 의해 파단이 발생하였다. 이는 90도 방향에서 재료가 0도 방향에서보다 상대적으로 높은 이

방성 계수를 갖기 때문으로 판단된다. Fig.8에 0도 방향과 90도 방향의 파단된 단축인장 시험편에서의 변형 형상을 나타내었다.

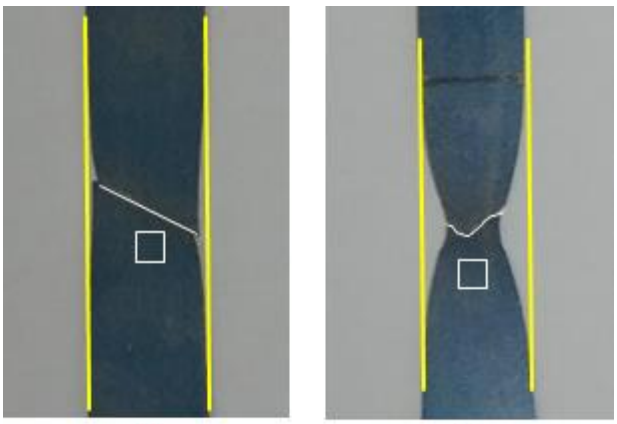
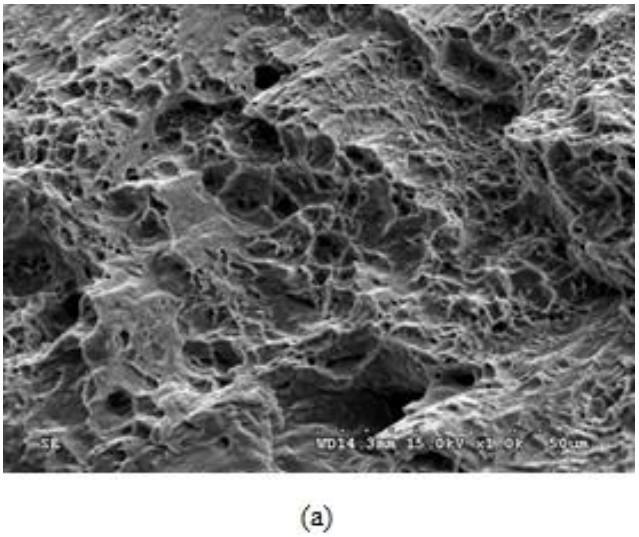


Fig.8 Deformation shape of modified specimens of CP Ti sheets (a) 0° (b) 90°

단축인장시편의 파단형상을 전계방출형주사현미경(field emission scanning electron microscope, FE-SEM)을 이용하여 관찰한 결과를 Fig.9에 나타내었다. 0도 방향에서는 전단에 의한 전형적인 벽개파괴현상(cleavage fracture)이 발생했고, 90도 방향에서는 딤플(dimple)이 관찰되는 전형적인 연성파괴현상이 발생하였음을 알 수 있다.



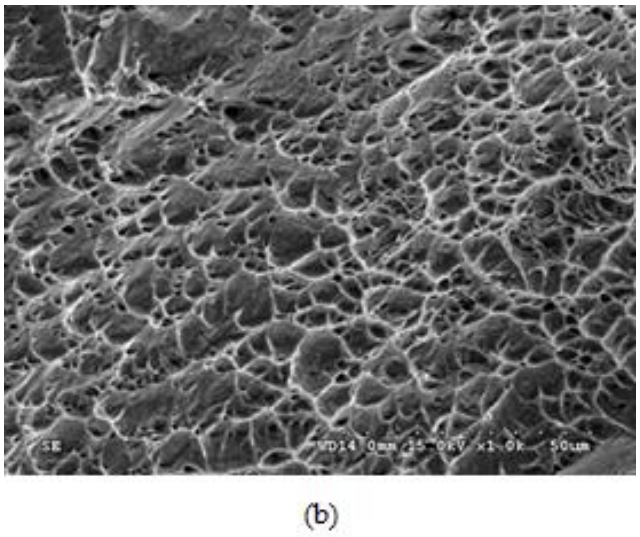


Fig.9 SEM images in the fracture surfaces of modified specimens of CP Ti sheets (a) 0° (b) 90°

2.4 두께방향 변형 특성(표면특성)

판재 시편이 인장 하의 소성변형을 할 때 시편은 인장방향으로의 연신과 함께 체적불변의 법칙에 이해 두께방향으로의 변형도 수반된다. 두께방향으로 변형은 판재 표면의 표면거칠기의 변화를 수반하며 거칠기가 과다해지면 Fig.10과 같이 거칠기의 골 부근에서 변형이 집중되어 판재가 파단에 이르게 된다[13]. 비록 파단에 도달하지 않더라도 과다한 표면거칠기의 변화는 프레스 가공중의 마찰특성의 변화뿐 아니라 성형된 제품의 표면품질을 떨어뜨리는 결과를 초래한다.

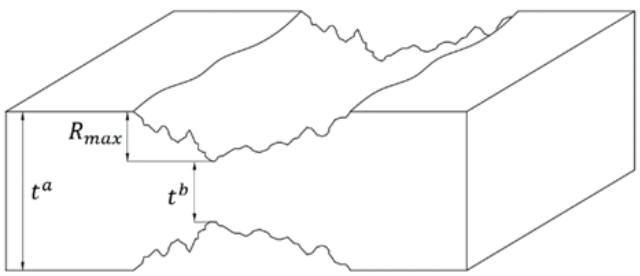


Fig.10 Schematic of thickness measurement for sheets

본 연구에서는 표면거칠기의 변화 특성을 관찰하기 위한 방법으로 z방향으로 0.5㎛ 분해능을 갖는 공초점레이저주사현미경(confocal laser scanning microscope)를 이용하여 인장 소성변형률에 따른 표면 형상의 변화를 관찰하였다.

본 연구에서는 0도 방향과 90도 방향으로 단축인장시험을 수행하고, 그 시편의 중앙부 300㎛X300㎛²의 범위 내에서 변형률에 따른 3차원 표면형상(3D surface morphology)와 3차원 표면거칠기(3D surface roughness)를 측정하였다[14][15].

순 티타늄 판재의 변형에 따른 표면거칠기의 변화를 관찰하기 위해서 0도와 90도 방향시편에 대해 각각 파단변형률인 56%와 40%까지 연신하고, 그 시편에 대해 측정한 3차원 표면형상을 Fig.11에 나타내었다.

파단변형률이 56%인 0도방향시편에 비하여 파단변형률이 40%인 90도 방향시편에서 표면형상의 높낮이 차이, 즉 두께방향 변형이 많이 발생하였음을 알 수 있다. 3차원 표면형상으로부터 2차원 단면에 대한 표면형상 데이터를 추출하여 Fig.12에 나타내었다.

Fig.12(a)의 0도 방향시편에서는 단면 A-A'와 단면 B-B'의 변형에 따른 형상 변화는 다른 양상을 띄고 있음을 알 수 있다. 단면 A-A'에서는 변형률 30% 이후로 최대거칠기 산과 최저거칠기 산의 높이차인 peak-to-valley 가 5㎛이상으로 상승하는 현상이 발생했으나, 단면 B-B'에서는 변형률 10%부터 이 현상이 발생하였다. 단면 B-B'의 표면형상 변화 즉, 두께방향 변형이 먼저 발생하는 현상은 낮은 이방성계수의 영향인 것으로 판단된다.

Fig.12(b)의 90도 방향시편에서는 0도 방향시편과 달리 변형에 따른 표면거칠기의 변화가 방향성을 보이지 않았고, 변형률 20% 이후부터 peak-to-valley 가 5㎛ 이상으로 상승하였다. 이는 높은 이방성계수의 영향으로 변형률 20%까지는 두께방향 변형이 적게 발생하다가 그 이후 두께방향으로 변형이 가속화되면서 파단이 발생한 것으로 판단된다. 수치적인 데이터를 확보하기 위해서 본 연구에서는 3차원 표면형상으로부터 3차원 형상높이를 추출한 후 이를 표면거칠기 평가에 이용하였다.

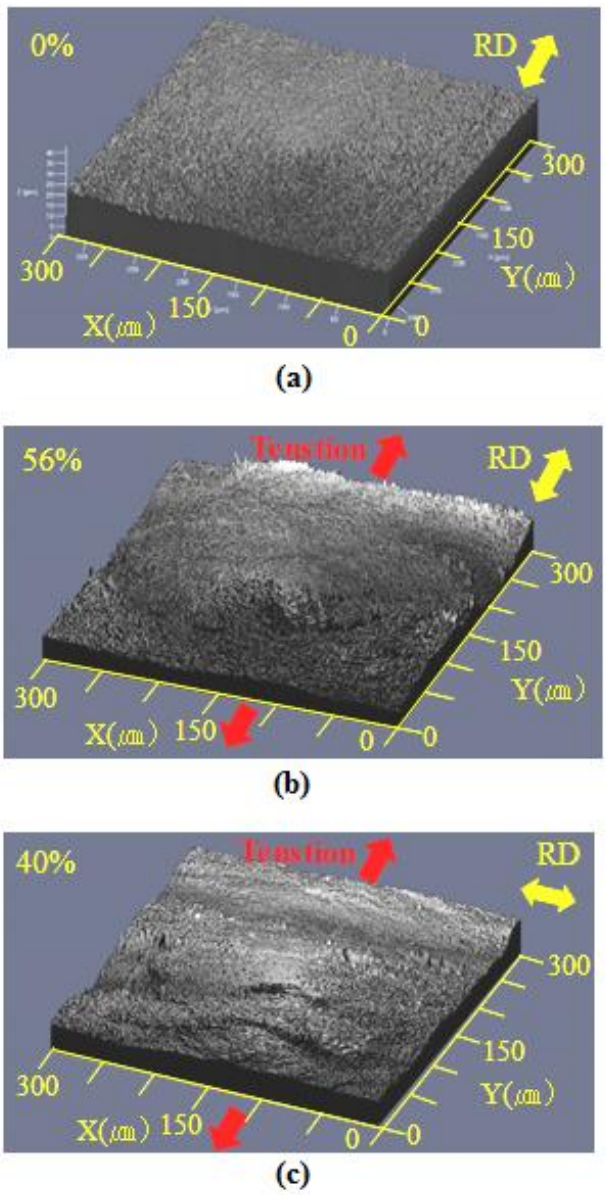


Fig.11 3D surface morphology of modified CP sheets
(a) As-received material
(b) After performed specimen for 0°
(c) After performed specimen for 90°

표면거칠기를 평가하는 대표적인 방법으로는 산술평균(arithmetic mean deviation)에 의해서 구해진 *Ra*, 제곱평균제곱근(quadratic mean deviation)에 의해서 구해진 *Rq*, 최대높이조도(maximum roughness depth)인 *Rmax* 가 있다. 이를 2차원 단면이 아닌 3차원 표면데이터 로부터 얻어진 값을 각각 *RSa*, *RSq*, *RSmax* 라

고 한다. *RSa*, *RSq*, *RSmax* 는 아래와 같이 나타낼 수 있다[16].

$$RS_a = \frac{1}{N_x N_y}\sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y}[z(x_i, y_j) - RS_c] \quad (1)$$

$$RS_q = \sqrt{\frac{1}{N_x N_y}\sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y}[z(x_i, y_j) - RS_c]^2} \quad (2)$$

$$RS_{max} = Max\ (z_{max1} - z_{min1}, z_{max2} - z_{min2}, \ldots) \quad (3)$$

$$RS_c = \frac{1}{N_x N_y}\sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y} z(x_i, y_j) \quad (4)$$

여기서 Nx, Ny는 x와 y방향으로 측정한 픽셀수이며, z는 거칠기산 높이, *RSc*는 거칠기산 평균 높이이다.

본 연구에서는 *RSa*와 *RSmax*를 이용하여 표면거칠기의 평가에 활용하였다. 식 (1)와 식 (3)에 의해서 계산된 0도와 90도 방향시편의 중앙부에서의 3차원 표면거칠기 데이터를 각각 Table 2 와 Table 3에 나타내었다. 또한 등가변형률(equivalent strain)에 따라 나타낸 표면거칠기 데이터를 Fig. 13에 나타내었다.

0도 방향시편에서는 변형이 진행됨에 따라 표면거칠기 *RSa* 는 일정한 기울기를 가지고 파단까지 선형적인 증가하였으며, *RSmax* 또한 유사하게 증가하였고, 최대 *RSmax* 값은 34.89㎛ 였다. 반면 90도 방향시편의 경우 0도 방향시편과는 다른 현상을 보였다. 변형률 20%까지는 0도 방향시편에 비하여 표면거칠기 *RSa* 값이 낮고 일정한 기울기를 가지며 선형적인 증가를 보였다.

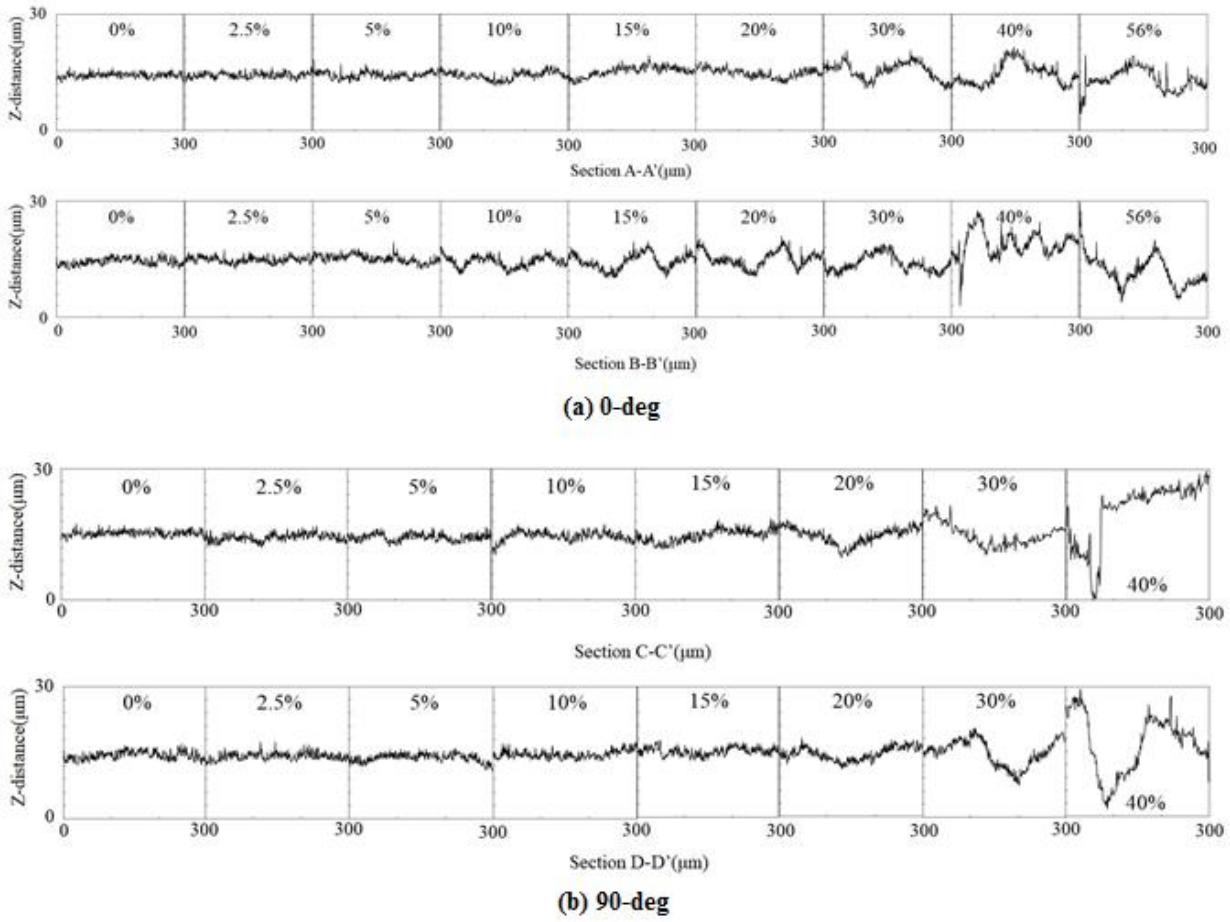


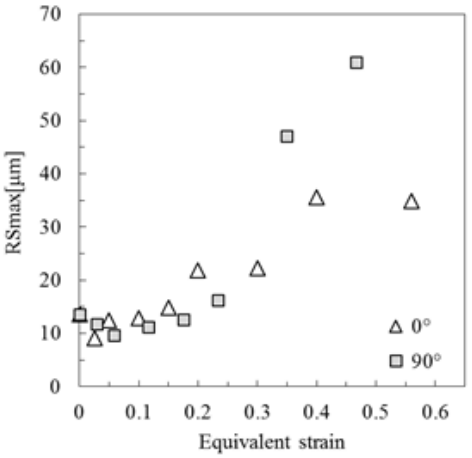
Fig.12 2D surface morphology of modified CP sheets according to uniaxial deformation

Table 2 Surface roughness data of CP Ti sheets for 0-degree according to uniaxial deformation

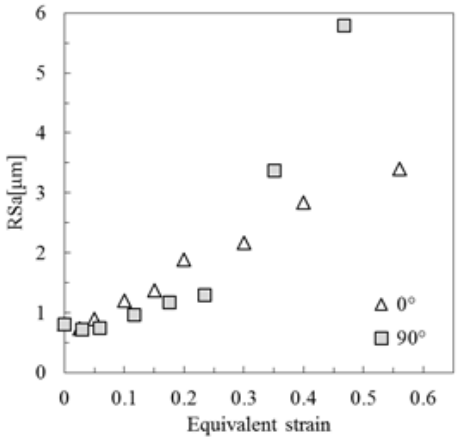
Strain	0	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.56
Equivalent strain	0	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.56
RSa	0.81	0.74	0.89	1.2	1.37	1.89	2.17	2.84	3.4
RSmax	13.49	9.08	12.38	12.81	14.78	21.85	22.22	35.59	34.89

Table 3 Surface roughness data of CP Ti sheets for 90-degrees according to uniaxial deformation

Strain	0	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4
Equivalent strain	0	0.029	0.058	0.117	0.175	0.234	0.35	0.467
RSa	0.81	0.72	0.75	0.97	1.18	1.30	3.38	5.80
RSmax	13.49	11.69	9.57	11.19	12.55	16.24	47.01	61.01



(a) RSmax



(b) RSa

Fig.13 Development of surface roughness during stretching of CP Ti sheets

변형률 20% 이후에는 *RSa* 값이 구간별로 2㎛ 이상의 큰 증가폭을 보이면서 파단에 도달하였다. *RSmax* 값 역시 변형률 20% 이후에 30㎛ 이상의 큰 증가폭을 보였고, 최대 *RSmax* 값은 61.01㎛ 였다.

이 사실로부터 0도 방향시편에서는 이방성의 영향을 받지 않고, 일정한 변형특성을 가지는 한편, 90도 방향시편에서는 이방성의 영향으로 변형률 20%까지는 두께방향의 변형보다는 폭방향의 변형을 더 많이 받아서 두께방향의 변형이 적은 한편, 변형률 20% 이후에는 두께방향으로의 변형이 집중되면서 0도 방향시편에 비하여 표면거칠기가 높게 평가된 것으로 판단된다.

변형률 0%에서 5% 사이의 구간에서 변형이 진행됨에 따라 표면거칠기가 증가하는 것이 아니라 감소하는 특이한 현상을 관찰할 수 있었다. 기존의 스타일러스를 이용한 접촉식 표면거칠기 측정방법과는 달리 공초점레이저주사현미경을 이용한 측정방법에서는 분해능이 좋기 때문에 관찰할 수 있는 결과이다. 이는 판재가 인장변형에 의해 변형될 때 변형 초기에는 압연롤의 거칠기가 전사되어 형성된 판재의 원 표면거칠기의 산과 골이 인장력에 당겨지는 효과에 의해서 소성변형의 초기에 표면거칠기가 감소한 것으로 판단된다.

$$t^b = t^a - 2R_{\max} \tag{5}$$

Table 4 Surface roughness data of CP Ti sheets for 0-degree according to uniaxial deformation

Strain	0	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.56
Equivalent strain	0	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.56
0-deg thickness [mm]	0.473	0.481	0.475	0.474	0.470	0.456	0.455	0.429	0.430
90-deg thickness [mm]	0.473	0.477	0.481	0.477	0.475	0.467	0.405	0.378	

식 (5)와 같이 기존 두께 값에서 *Rmax* 값을 제외하여 변형 후의 최소 두께 값을 구하는 방법[12]과 Table 2 와 Table 3에서 도출된 각 시편에 대한 표면거칠기를 이용하여 판재의 변형된 두께에 대해서 Table 4 에 나타내었다.

표면거칠기를 비교한 데이터와 같이 Table 4 에서도 역시 변형률 20%까지는 0도 방향시편의 두께 0.456mm, 90도 방향시편의 두께 0.467mm로 0도 방향에서 두께방향으로 더 많은 변형이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그 이후에는 변형률 40%를 기준으로 0도 방향시편에서는 0.429mm, 90도 방향시편에서는 0.378mm로 90도 방향시편의 두께방향 변형이 더 많아짐을 알 수 있었다. 이 또한 이방성의 영향으로 변형률 0%에서 변형률 20%까지는 90도 방향에서 폭방향 변형이 많고, 두께방향 변형이 적게 발생하고, 그 이후 이방성의 영향보다 두께방향 변형에 의한 영향이 더 커지면서 두께방향 변형이 가속화되어 시편의 중앙부에 넥 발생으로 이어져 시편이 파단되는 현상을 잘 설명해준다.

3. 성형성 평가

3.1 성형한계도

순 티타늄 판재의 성형한계선(forming limit curve)을 평가하기 위한 방법으로 Hecker [17] 에 의해 제안된 돔형 펀치에 의한 장출성형시험(hemispherical punch stretching test)를 수행하였다.

시편은 ASTM E2218-02 [18]에 따라서 Fig.14와 같이 제작하였고, 성형한계 변형률 측정은 Fig.15와 같이 시편의 변형을 실시간으로 측정할 수 있는 비접촉 3차원 광학 측정 시스템 ARAMIS system 을 이용한 디지털이미지상관법(DIC, digital image correlation)으로 측정하였다.

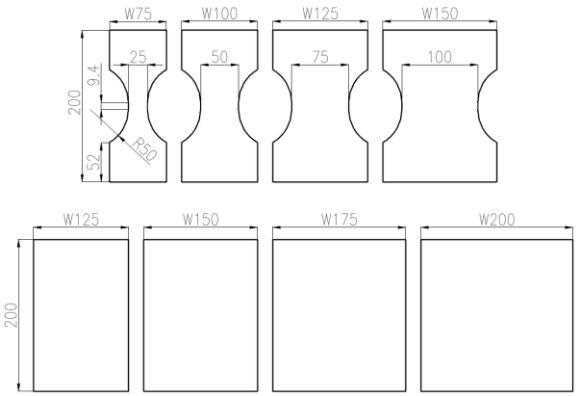


Fig.14 Punch stretching test specimens according to ASTM E2218-02

순 티타늄 판재는 방향별 기계적 특성이 다르기 때문에 성형한계도 또한 방향별로 달라질 것으로 예상하고, 본 연구에서는 압연방향시편과 압연방향의 직각방향인 시편에 대해서 장출성형시험을 수행하였다. 기존 ASTM E2218-02 방법과 달리 모든 시편에서 윤활상태를 유지하기 위해서 판재와 펀치 사이에 고체 윤활제와 폴리우레탄 판재를 삽입하여 실험을 수행하였다.

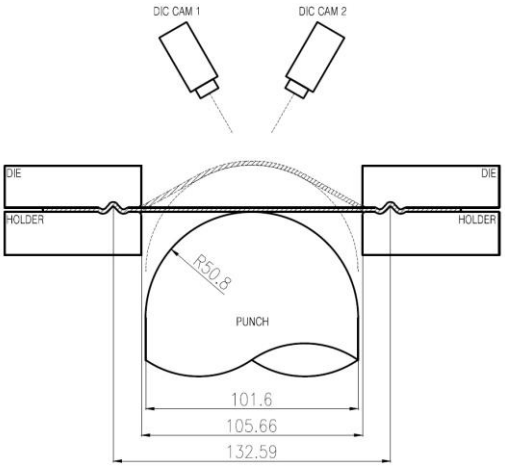
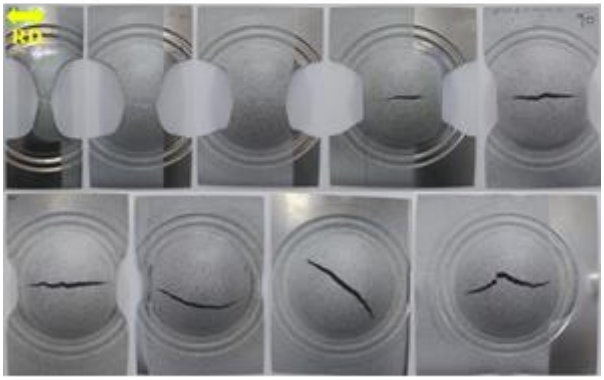


Fig.15 Schematic of punch stretching test using DIC

장출성형시험을 수행한 순티타늄 판재의 0도와 90도 방향시편을 Fig.16에 나타내었다.

(a) 0-deg

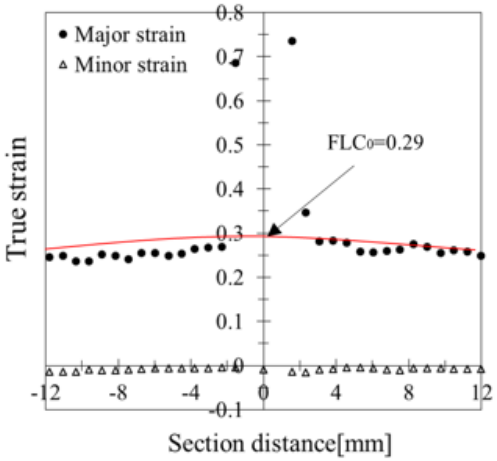


(b) 90-deg

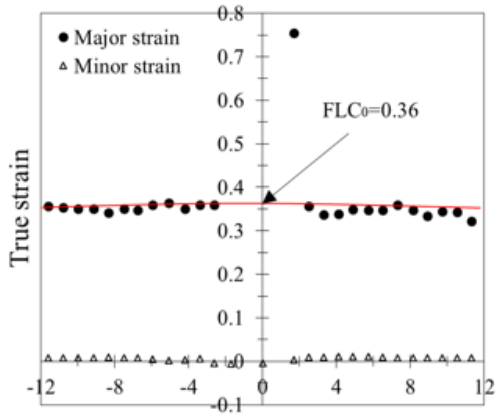
Fig.16 Modified punch stretching test specimens of CP Ti sheets

단축인장과 평면변형인장 시편을 보면 0도 방향에 비하여 90도 방향시편에서 폭방향으로 변형이 더 많이 진행된 것을 관찰할 수 있다. 이는 0도 방향에 비하여 90도 방향에서 이방성계수가 높기 때문에 폭방향 변형이 많이 발생함을 알 수 있다.

Fig.17은 장출성형시험을 수행한 대표적인 시편, 시편 폭이 125mm인 평면변형 시편의 중앙부에서 길이방향 단면에서 파단 직전의 주변형률과 부변형률을 측정한 데이터이다. 순 티타늄 판재의 평면변형에서의 성형한계는 0도 방향에서 약 0.29, 90도 방향에서 약 0.36으로 평가되었다.



(a) 0-deg(plane strain)



(b) 90-deg (plane strain)

Fig.17 Major-minor strain for the longitudinal section of the plane strain specimen of CP Ti sheets

DIC 시스템을 이용하여 단면에 대한 주변형률을 비교해본 결과, 0도 방향의 경우는 시편의 외각영역에서 중앙부로 갈수록 변형률이 높게 형성되었지만, 90도 방향의 경우는 0도 방향과 비교하여 중앙부에서 변형이 집중되지 않고, 중앙부와 외각영역 모두에서 같은 변형률로 변형이 진행되는 것을 관찰할 수 있었다.

장출성형시험에서는 펀치가 상승하면서 윤활로 인하여 펀치가 가장 먼저 닿는 부분이 변형이 가장 많이 발생하게 된다. 따라서 0도 방향에서는 펀치 높이에 따라서 각 부분의 변형률이 달라진다. 따라서 펀치 높이가 가장 낮은 외곽 영역에서 펀치 높이가 가장 높은 중앙부까지 변형률이 점점 높아지

는 효과를 보였다. 하지만 90도 방향에서는 높은 이방성 계수로 인하여 펀치가 상승하면서 재료의 유입도 같이 발생하여 중앙부에서 변형이 집중되지 않고, 넓은 영역에서 같은 변형률로 변형이 진행된 후 파단 직전에 시편의 중앙부에 변형이 집중되면서 파단에 이른 것으로 생각된다.

이 현상을 앞선 두께방향의 변형 특성과 연관하여 고려해보면 0도 방향에서는 두께방향 변형이 지속적으로 진행되므로 펀치가 상승할 때 펀치가 닿는 부위부터 두께방향 변형이 지속적으로 이루어지고 체적일정의 법칙에 의해서 주변형률 또한 상승된다. 반면 90도 방향에서는 높은 이방성 계수의 영향으로 두께방향 변형이 적고, 이로 인하여 일정 값의 변형률까지 주변형률 방향으로 변형이 집중이 되고, 또한 재료의 유입에 의해서 주변형률 방향으로의 변형이 0도 방향에 비해서 많이 진행된다. 하지만 두께방향 변형 특성과 같이 일정 값의 변형률이 지난 후에는 갑자기 두께방향 변형이 집중되므로 파단 직전에 중앙부에서 변형이 가속화되고 파단이 발생한 것으로 판단된다.

장출성형시험에서 구한 0도 방향과 90도 방향의 성형한계도를 Fig.18과 같이 주변형률과 부변형률 좌표 상에 나타내었다. 등이축변형을 제외한 모든 경우에서 0도 방향에 비하여 90도 방향에서 성형한계값이 높게 평가되었다. 이러한 현상은 90도 방향의 이방성계수가 0도 방향에 비하여 높은 값을 갖기 때문이다. 또한 0도 방향에서는 최저 성형한계가 평면변형에 가깝지만, 90도 방향에서는 등이축변형에 가깝게 평가되고 있다. 이 현상은 90도 방향의 평면변형 구간에서 높은 이방성 계수의 영향으로 성형한계가 높게 평가되었지만, 등이축 변형에 가까워지면서 블랭크홀딩에 의한 재료의 드로잉이 줄어들면서 성형한계가 낮아지기 때문으로 판단된다.

한편 90도 방향의 경우, 성형한계선도의 왼쪽 영역(부변형률이 음을 갖는 경우)에서는 변형률 경로가 직선경로의 비례부하가 아니고, 초기에는 거의 평면변형 모드로 일정한 변형률(최대 약 0.2)까지 변형한 후에 직선 경로를 따라 변형 후 파단에 이르는 것을 알 수 있다. 성형한계선도의 왼쪽 영역에서 90도 방향의 변형경로의 변화가 판재의 성형한계선의 향상에 기여한 것으로 생각된다.

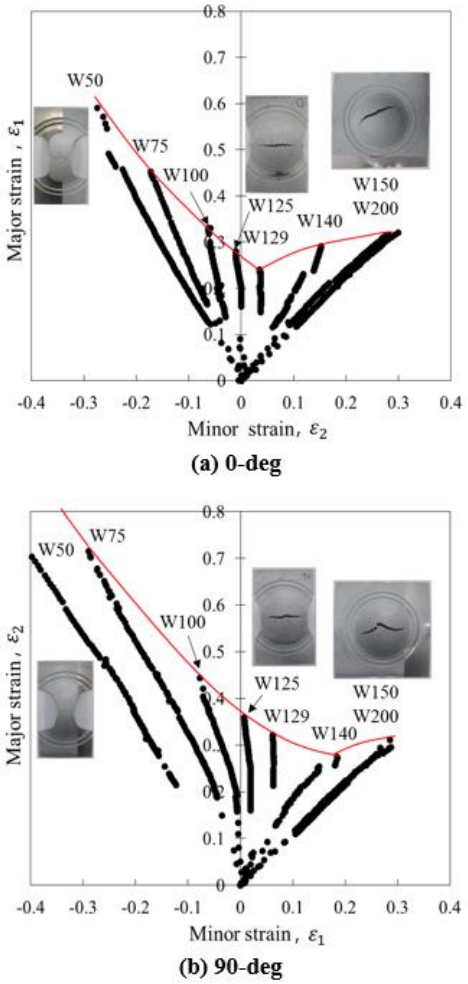


Fig.18 Forming limit diagram of CP Ti sheets

4. 결 론

본 연구에서는 순 티타늄 판재의 변형 특성과 성형성을 평가하기 위해 다양한 실험을 통하여 단축인장모드에서의 변형 특성 및 파단 특성을 관찰하였고, 장출성형시험을 통한 성형한계도 평가방법을 이용하여 성형성을 평가하였다.

1. 단축인장시험을 통하여 순 티타늄 판재의 방향에 따른 기계적 특성을 살펴본 결과, 방향별로 기계적 특성이 상이했으며, 특히 0도에 비하여 90도에서 항복응력이 높으며, 변형이 거듭될수록 가공경화가 적게 발생하는 것을 관찰할 수 있었다.
2. 순 티타늄 판재의 0도 방향과 90도 방향으로 인장된 시편에 대하여 EBSD를 통하여 각 결

정립을 관찰할 결과, 0도에 비하여 90도에서 쌍정이 많이 발생하였으며, 평균 결정립의 크기가 작아짐을 할 수 있었다.

3. 순 티타늄 판재는 방향별로 재료의 특성이 다르기 때문에 0도 방향과 90도 방향으로 인장된 시편에 대하여 넥의 형상과 파단 형상이 상이함을 알 수 있었다.
4. 순 티타늄 판재는 방향에 따라서 소성 이방성 계수의 차이가 크기 때문에 0도와 90도 방향에서의 인장모드에서 표면 거칠기 변화(두께 방향의 변형특성)가 상이하며. 이것이 성형한계에 영향을 미치는 것임을 알 수 있었다.
5. 장출성형시험을 통하여 방향별 성형한계도를 구하여 0도 방향에 비하여 90도 방향에서 더 높은 성형한계를 가짐을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 산업통상자원부 산업기술거점 기관지원사업 (대구튜닝지원센터, R0003356)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

[1] J.H. In, Y.S. Kim, 2017, Proc. 2017 Japan Spring Conf. Technol. Plast., J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Japan, pp. 55-56.

[2] J.H. Park, 2009, Characteristics and applications of plate type heat exchanger, J. Korea Soc. Marine Eng., Vol. 33, No. 6, pp. 801-811.

[3] Y.S. Kim, J.H. In, 2016, Evaluation of press formability of pure titanium sheet, J. Kor. Academia-Industrial Coop. Soc., Vol. 17, Issue 3, pp. 380-380.

[4] Matsuo USUDA, 2002, Press formability of commercially pure titanium sheets, Nippon steel technical report, No. 85, pp. 24-30.

[5] Fuh-Kuo Chen, Kuan-Hua Chiu, 2005, Stamping formability of pure titanium sheets, J. Mater. Process. Technol., Vol. 170, pp. 181-186.

[6] G.I. Taylor, 1938, Plastic strain in metals, J. Inst. Met., Vol. 62, pp.307-324.

[7] K.H. Ahn, H. Huh, J.H. Yoon, 2012, Effect of deformation twinning on strain hardening in Titanium, Proc. KSAE Spring Conf., Trans. Kor. Soc. Auto. Eng., pp. 1300-1309.

[8] S. Ishiyama, S. Hanada, O. Izumi, 1990, Orientation dependence of twinning in commercially pure titanium, J. Jpn. Inst. Metals., Vol. 54, No. 9, pp. 976-984.

[9] S. Wronski, 2016, Microstructure evolution of titanium after tensile test, Mat. Sci. Eng. A, 656, pp. 1-11.

[10] Y.S. Kim, 2017, *Engineering plasticity and its application*, Sigma Press, Korea.

[11] M. Ishiki, T. Kuwabara, Y. Hayashida, 2011, Measurement and analysis of differential work hardening behavior of pure titanium sheet using spline function, Int. J. Mater. Form., No. 4, pp. 193-204.

[12] J.W. Won, K.T. Park, S.G. Hong, C.S. Lee, 2015, Anisotropic yielding behavior of rolling textured high purity titanium, Mat. Sci. Eng. A, Vol. 637, pp. 215-221.

[13] J.W. Feng, L.H. Zhan, Y.G. Yang, 2016, The establishment of surface roughness as failure criterion of Al–Li Alloy stretch-forming process, Metals, Vol. 6, Issue 1, pp. 1-10.

[14] G. Udupa, 2000, Characterization of surface topography by confocal microscopy: I. Principles and the measurement system, Meas. Sci.Technol., Vol. 11, No. 2000, pp. 305-314.

[15] J.H. In, Y.S. Kim, 2016, A study on the surface characteristics by tensile deformation in pure titanium sheet, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., Korea, pp. 98-99.

[16] ZEISS, 2009, *LSM 710 and Confocor 3 – Operating Manual*, Germany.

[17] Hecker, 1972, A simple forming limit curve technique and results on aluminium alloys, sheet metal forming and formability, in 7th Biennal Conf. IDDRG, Amsterdam, pp. 5.1-5.8.

[18] ASTM E2218-02, 2008, Standard test method for determining forming limit curves, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.01, ASTM International, West Conshohocken, Pa.