

유압별지실험을 이용한 순 티타늄 판재의 소성유동곡선 평가(제2보)

김영석^{1*}, 김진재²
¹경북대학교 기계공학부, ²경북대학교 대학원

Evaluation of plastic flow curve of pure titanium sheet using hydraulic bulge test

Young-Suk Kim^{1*}, Jin-Jae Kim²

¹Kyungpook National University,
²Graduate School of Kyungpook National University

요 약 본 논문에서는 대형 선박의 판형 열교환기 등에 널리 이용되고 있는 순 티타늄 판재의 소성변형을 유한요소해석하기 위한 기초 데이터로서 순 티타늄 판재의 유동곡선을 평가하였다. 순 티타늄 판재의 프레스 가공 시에 판재에는 국부적으로 큰 소성변형이 발생하고 있다. 그러나 기존의 단축 인장실험에서 얻을 수 있는 소성변형률이 낮아서 티타늄 판재의 가공공정 설계를 위한 유한요소해석의 정밀도를 떨어뜨리는 경우가 있다. 본 연구에서는 큰 소성변형률 까지 안정적으로 성형이 가능한 유압별지실험을 수행하여 재료의 소성변형에서 가공경화특성을 나타내는 유동곡선으로써 진응력-진변형률 선도를 구하였고 그 결과를 인장실험 결과와 비교하였다. 순 티타늄 판재의 유압별지실험에서 재료의 변형률은 3D 디지털 영상 상관법을 이용한 ARAMIS 시스템으로 실시간 측정된다. 이 유압별지실험으로부터는 소성 변형률이 0.65 이상 까지도 안정적으로 재료의 소성유동곡선을 얻을 수 있었으며 그 결과는 Kim-Tuan 이 문헌 [Y.S. Kim, J.H. In, Korean Acadmia-Ind. Coop. Soc.,(be in print), 2016] 의 연구에서 제안한 가공경화식으로 잘 핏팅됨을 알 수 있었다.

Abstract In this study, the plastic flow curve of commercially pure titanium sheet (CP Ti) actively used in the plate heat exchanger etc., was evaluated. The plastic flow curve known as hardening curve is a key factor needed in conducting finite element analyses (FEA) for the forming process of a sheet material. A hydraulic bulge test was performed on the CP Ti sheet and the strain in this test was measured using the DIC method and ARAMIS system. The measured true stress-true strain curve from the hydraulic bulge test (HBT) was compared with that from the tensile test. The measured true stress-true strain curve from the hydraulic bulge test showed stable plastic flow curve over the strain range of 0.7 which cannot be obtained in the case of the uniaxial tensile test. The measured true stress-true strain curve from the hydraulic bulge test can be fitted well by the hardening equation known as the Kim-Tuan model.

Keywords : ARAMIS, Digital Image Correction (DIC), Hydraulic bulge test, Kim-Tuan hardening equation, Uniaxial tensile test

1. 서 론

판형 열교환기는 고효율 · 고밀도 열교환기로 냉동 ·

공조산업 및 낙농과 식품분야, 화학, 석유, 의약품 산업, 조선 등에 거의 모든 산업분야에 응용되고 있다. 판형열 교환 장치(plate heat exchanger, PHE)에 사용되고 있는

이 논문은 2014학년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: 2014R1A2A2A01005903).

²Corresponding Author : Young-Suk Kim(Kyungpook National University)
Tel: +82-10-4772-1956 email: caekim@knu.ac.kr

Received March 16, 2016
Accepted April 7, 2016

Revised March 29, 2016
Published April 30, 2016

티타늄 전열판은 열교환 면적을 극대화하고 판재의 강도와 강성을 높이기 위하여 다양한 굴곡형태(ridge, corrugation)의 패턴(washboard pattern, herringbone pattern 등)을 가지며 유압프레스로 가공하여 제조된다.[1]



Fig. 1. Shape of titanium plate heat exchanger showing various pattern shape and gasket [1]

Fig. 1은 프레스 가공된 티타늄 PHE 전열판(heat transfer plate)의 형상을 나타낸 것이다. 판형 열교환기의 구조는 Fig. 1과 같은 전열판이 순서대로 배열되어 적층한 판 사이에 유로가 형성되고 이 유로를 통해 가열 유체와 피가열유체가 서로 교대로 흘러 열교환이 이루어지게 된다.

순 티타늄 판재는 동소체 금속(allotropic metal)으로 결정학적으로 낮은 온도에서는 조밀육방격자구조(hexagonal closed packed crystal structure, HCP)를, 880°C 이상에서는 체심입방격자구조(body-centered cubic structure, BCC)를 갖는다. 한편 소성슬립계가 매우 제한적이며 영률(Young's modulus)이 낮고 면내 이방성(in-plane anisotropy)이 강한 특징이 있어서 통상의 철강재와 비교하면 프레스 가공이 어려운 소재이다. [2, 3] 또한 티타늄 판재의 소성변형은 주로 변형쌍정(twin deformation)에 의해 일어나며 압연방향과 평행한 방향으로의 인장과 압축에서 응력-변형률 곡선이 명확히 다른 강도차이(strength differential, SD)효과가 존재하는 것으로 알려져 있다.[4, 5]

본 연구에서는 PHE로 가공되는 순 티타늄 판재에 대한 프레스 성형성 평가 금형개발을 목표로 설계된 금형에 대한 유한요소해석(finite element analysis, FEA)의 정밀도를 높이기 위해 티타늄 판재에 대한 정확한 소성유동곡선(plastic flow curve)을 확보하는 것을 목적으로 한다.[6, 7, 8]

일반적으로 유한요소해석기술을 이용하여 비선형 거

동을 보이는 소성가공공정을 해석하기 위해서는 공정의 CAD 모델링, 경계조건(구속조건, 마찰조건 등), FEA 해석 SW 및 재료의 가공화특성을 나타내는 진응력-진변형률 선도(유동곡선이라고 부름)에 대한 정보가 요구된다.

판재 재료의 유동곡선은 통상 규격화된 시편과 실험 방법에 의거한 인장실험에 의해 구해진다. 그런데 인장 실험 중에는 최대 하중을 지나서 시편에 넥이 발생하여 파단되기 때문에 소성가공용으로 널리 이용되는 재료의 경우에 인장실험으로 구할 수 있는 최대 소성변형률은 약 40% 전후로 제한된다.

한편 최근에 판재에 국부적인 공구의 가압을 가하여 판재를 소성변형시키는 점진판재성형(incremental sheet forming, ISF)이나 프레스 가공에서 등2축 인장변형을 받는 경우에는 재료의 소성변형률이 100%를 넘는 경우도 있기 때문에 단축인장에서 넥 발생이후(post-necking)의 대변형까지도 평가할 수 있는 실험방법에 대한 연구가 요구되고 있다.[9]

대표적인 방법이 판재 재료의 한쪽 면에 액체(또는 점성물질)를 매개로 하여 균일한 압력을 가하여 확장시키는 벌지실험(bulge test)이다. [10-16]

본 연구에서는 유압벌지실험(hydraulic bulge test, HBT)을 통해 티타늄 판재의 등2축인장 상태 하에서의 소성유동곡선을 평가하고 그 결과를 인장실험 결과와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 인장실험

두께 0.5mm의 PHE용 순 티타늄 판재의 기계적특성을 평가하기 위해 ASTM E8 (KS 0801 13B 상당) 규격의 시편을 채취하여 KS B 0802: 2003 실험방법에 따라 1mm/min의 인장속도로 인장실험을 수행하였다. Table 1에 주요 화학성분을 나타내었고 [17], Table 2에 압연 방향에 대해서 0도, 45도, 90도 방향의 인장특성을 나타내었다. Fig. 2에는 90방향으로 채취한 인장시편을 변형률 2.5%, 5%, 10%, 15%, 20% 까지 인장실험한 후의 시편 형상을, Fig. 3에는 방향별 공학응력-공학변형률 선도를 나타내었다.

Table 2와 Fig. 3으로부터 알 수 있듯이 순 티타늄 판

재는 강한 면내 이방성을 가진다. 즉, 순 티타늄 판재는 압연방향에서 직각방향으로 갈수록 항복응력 YS와 이방성계수 R값이 크게 증가하며, 반면에 파단까지의 전연신률 El은 상대적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

한편 Fig.3의 공학응력-공학변형률 선도에서 알 수 있듯이 0도 방향의 경우에는 재료가 인장됨에 따라 공칭응력도 더불어 증가하고 있는데 반해 45도와 90도 방향의 경우는 최대 하중점에 도달한 후에 재료의 변형에 따라 응력이 감소하는 특이한 현상을 나타내고 있다. 0도 방향에서는 최대 하중점을 약간 지난 위치(변형률 0.37)에서, 45도 방향과 90도 방향에서는 최대 하중점을 훨씬 지난 위치인 0.25와 0.23에서 각각 국부 넥 발생(Fig.3에서 역삼각형 위치)이 시작되었다.

Fig. 4에는 0도, 45도, 90도 방향의 인장시험에서 구한 진응력-진변형률 선도를 나타내었다.

Table 1. Chemical composition in wt %

Oxygen	Hydrogen	Nitrogen	Carbon	Iron	Residual (max)
0.18	0.015	0.03	0.08	0.20	0.1(0.4)

Table 2. Mechanical properties of pure titanium sheet

Tensile direction	YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)	Anisotropic coefficient,R
0°	162.9	288.2	42.9	1.8
45°	185.1	235.3	42.3	3.8
90°	211.2	258.8	34.2	5.7

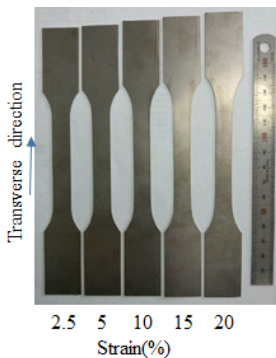


Fig. 2. Deformed specimens after tensile tests along the transverse direction (90-degree direction)

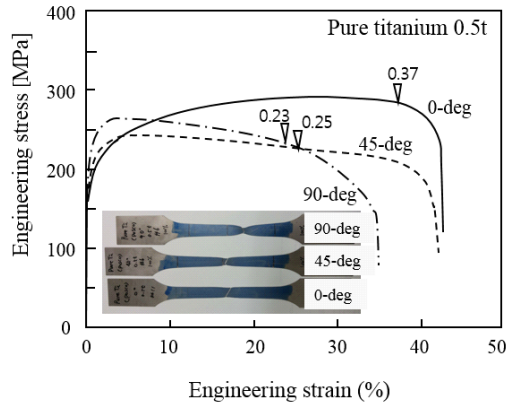


Fig. 3. Engineering stress-engineering strain curves for titanium sheet along the 0, 45, 90 - direction to rolling directions

2.2 벌지시험

압력을 매개로 하는 판재의 유압벌지시험에 대해서 Hill [10]에 의해 처음으로 제안된 유동곡선을 구하는 방법을 이하에 설명한다.

판재가 벌지반경과 비교하여 매우 얇아서 벌지변형 중에 판의 굽힘응력을 상대적으로 무시할 수 있는 경우에 ($t/R_d \approx 0$) 판재에 작용하는 응력은 막이론(membrane theory)으로 다룰 수 있다. 즉, 벌지변형 중에 응력 평형조건식은 다음과 같다.

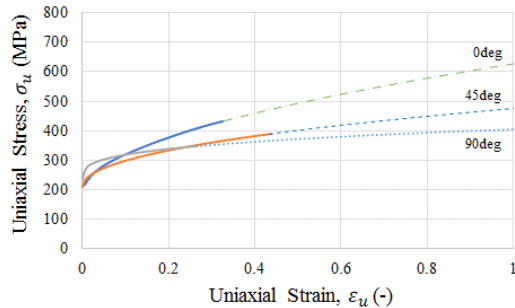


Fig. 4. True stress-true strain curves of pure titanium sheet and for the 0, 45, 90-directions to the rolling direction

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{t} \tag{1}$$

여기서 σ_1, σ_2 는 판의 표면에 작용하는 주응력이고 R_1, R_2 는 대응하는 곡률반경이고 p 와 t 는 각각 판재에 작용하는 압력과 판재의 두께이다.

벌지변형이 축 대칭변형이라고 하면 Fig.4의 막 변형을 고려하면 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_b, \sigma_t \approx 0, R_1 = R_2 = R_d$ 가 되며 따라서 Eq. (1)로부터 등축 인장응력 σ_b 는 다음과 같이 구해진다.

$$\sigma_b = \frac{pR_d}{2t_d} \quad (2)$$

여기서 t_d 는 벌지성형된 시편의 정점에서의 두께이다.

벌지실험 중에 시편의 높이 h_d 는 레이저 간섭계(laser interferometer)나 구면계(spherometer)를 이용하면 쉽게 측정할 수 있다. 변형된 시편의 형상이 구형(sphere)이라고 가정하면 시편의 높이와 곡률반경의 관계식은 다음과 같이 나타내진다. [11]

$$R_d = \frac{\{(d_c/2) + R_c\}^2 + h_d^2 - 2R_ch_d}{2h_d} \quad (3)$$

여기서 R_c 는 펀치어깨 반경, d_c 는 상형다이의 직경이다. 한편 시편의 두께는 재료의 가공경화지수 n 을 고려하여 다음과 같이 나타내진다. [11, 16]

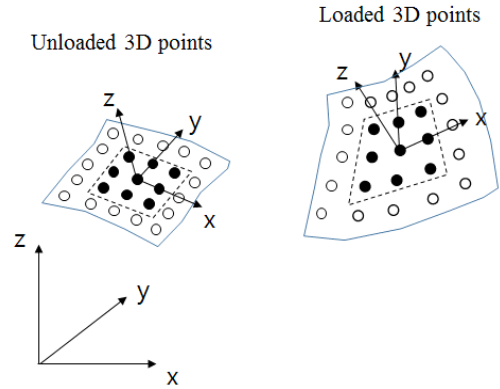
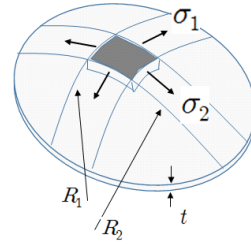


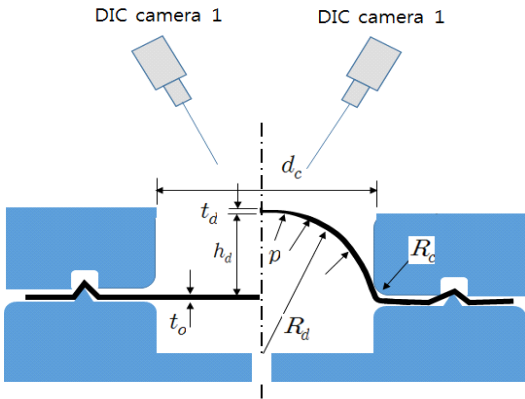
Fig. 5. Scheme of the hydraulic bulge test and surface biaxial strain calculation via DIC method.

$$t_d = t_o \left\{ \frac{1}{1 + (2h_d/d_c)^2} \right\}^{2-n} \quad (4)$$

유압벌지실험은 100톤 용량의 복동식 유압프레스에서 수행되었다. 이 장치는 시편을 체결하는 상하다이, 유압발생을 위한 유압장치, 그리고 시편의 벌지변형을 실시간으로 측정할 수 있는 비접촉 3차원 광학(재료변형) 측정 시스템 ARAMIS [18-20]으로 구성되어 있다. 유압에 의한 벌지 실험은 변형률 속도 $0.007s^{-1}$ 로 수행되었다.(Fig. 5)

벌지성형 중에 등2축으로 인장되고 있는 시편 정점부위에서의 변형률은 Eq.(4), (6)으로부터 정점의 높이 h_d 를 측정하면 구할 수 있다.

그러나 본 연구에서는 독일 GOM 사가 제공하는 ARAMIS 시스템의 3D 디지털 영상 상관법(digital image correction, DIC)을 이용하여 정점 부위의 변형률을 측정하는 방법을 사용하였다. DIC 기법은 디지털 카메라로 촬영된 재료의 변형 전의 영상에서 분리한 서브셋 영상(reference subset)과 변형 후의 영상에서 분리한 서브셋 영상(deformed subset)을 측정하여 두 영상 간



의 상관관계를 분석하여 재료의 변위 및 변형률을 비접촉으로 측정하는 방법이다. [18, 19, 21]

이 방법을 사용하면 기존의 접촉식 게이지에 비하여 측정 물체의 형상, 표면상태, 온도 및 습도에 영향이 거의 없는 장점이 있으며, 또한 대상으로 하는 물체 전체 영역의 변형을 원격으로 측정할 수 있어 외력에 의한 결합의 진진 모드 및 응력 분포를 계측할 수 있는 장점이 있다. 그리고 두 대의 CCD(couple charge device) 카메라를 사용하여 3차원 디지털 영상 상관법을 구현하면 재료의 면내 변형 뿐만 아니라 면외 변형도 측정할 수 있다.

3차원 형상 재료의 측정 정확도를 높이기 위해서는 두 카메라를 정확히 교정하여야 하며 이를 위해 두 카메라의 간격, 각도, 카메라와 피사체 사이의 거리, 조리개, 초점 등을 정밀하게 선택하여야 한다.

본 연구에 사용한 ARAMIS 시스템은 최대 200,000 콤마/초의 고속샘플링과 변형률 측정에서 0.01%의 정밀도를 갖고 있어 실시간으로 재료의 미세한 변형을 비접촉으로 측정할 수 있다.

별지 실험을 통해 등2축 인장응력 σ_b 와 두께변형률 ϵ_z 을 구하면 등가소성일의 원리로부터 다음 식이 성립한다.

$$dW^p = \sigma_1 d\epsilon_1^p + \sigma_2 d\epsilon_2^p = \sigma_b (d\epsilon_1^p + d\epsilon_2^p) = \sigma_b (-d\epsilon_3^p) \quad (5)$$

$$= \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}^p$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 은 등가응력, $\bar{\epsilon}^p$ 은 등가소성변형률이고($=\sqrt{(2/3)}\epsilon_{ij}\epsilon_{ij}$, ϵ_{ij} 는 변형률텐서의 성분), 변형률 ϵ_1 과 ϵ_2 는 각각 Fig.5의 응력 σ_1 과 σ_2 에 대응하는 주 변형률이다. Sigvant 등이 점성유압별지실험(viscous pressure bulge test, VPB)과 단축압축실험에서 구한 유동곡선을 등가응력-등가변형률 곡선으로 피팅하기 위한 방법[16]을 이용하면 위 식으로 부터 등가응력 $\bar{\sigma}$ 과 등가소성변형률 $\bar{\epsilon}^p$ 을 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.[16]

$$\bar{\sigma} = \sigma_b / k_b \quad (5)$$

$$\bar{\epsilon}^p = -k_b \epsilon_3^p \quad (\epsilon_b = -\epsilon_3^p) \quad (6)$$

한편 단축인장실험의 경우에 식 (5)에서 $\bar{\sigma} = \sigma_1 = \sigma_Y$ 이므로 k_b 는 단축인장응력과 등2축 인장응력의 비 $k_b = \sigma_b / \sigma_Y$ 가 된다. k_b 는 실제 단축인장실험에서 구한 유동곡선($\sigma_u - \epsilon_u$ 선도)으로부터 임의의 변형률까지(또는 최대 변형률까지)의 소성일과 유압별지실험에서 구한 유동선도($\sigma_b - \epsilon_b$)에서의 소성일이 동일하도록 결정된다. 본 연구에서는 k_b 값은 변형률 크기에 따라 달라지기 때문에 전 변형률에 걸쳐 평균을 취한 방법을 적용하였다.[16]

2.3 순 티타늄 판재의 소성유동곡선

Fig. 6은 별지시험 전에 시편 표면에 무작위의 미세한 패턴(stochastic dot pattern 또는 speckle pattern)을 입힌 시편에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 순 티타늄 판재는 별지 실험에서 압연방향에 수직인 방향(90-deg)으로 크랙이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 90도 방향에서 상대적으로 재료의 연신률이 가장 낮기 때문이다.

Fig. 7에 액체 압력의 증가에 따른 시편 돔부(dome)의 높이 증가선도를 나타내었다. 순 티타늄 판재는 액체 압력의 증가에 따라 거의 선형적으로 돔부 높이가 증가하다가 파단한계 근처에서 압력이 크게 증가하기 시작하는 소성불안정이 발생하여 파단에 이른다는 것을 알 수 있다. 본 순 티타늄 판재의 경우에 최대 파단압력은 6.6MPa, 최대 파단 돔 높이는 35.5mm 이었다

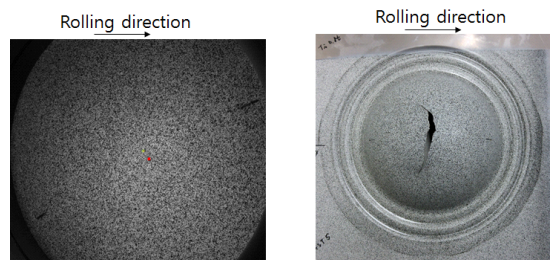


Fig. 6. Undeformed speckle pattern(left) on the surface of the specimen and the bursted sheet(right)

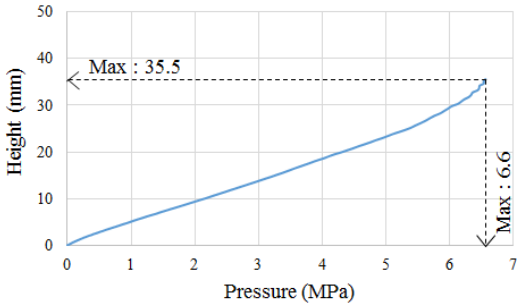


Fig. 7. Experimental bulge pressure versus dome height for CP Ti sheet

Fig. 8에 비접촉 3차원 광학측정 시스템 ARAMIS를 이용하여 촬영한 시편의 별지형상을 나타내었다. 순 티타늄 판재는 돔부 근처에서 축대칭 형상으로 변형되고 있음을 알 수 있다. Fig. 9에 돔부에서 대각선으로 절단한 단면에서의 단면 형상을 나타내었다.

Fig.10에 돔부의 높이에 따른 돔부의 두께감소를 나타낸 것이다. 티타늄 시편은 초기 두께 0.50mm에서 압력부가에 따라 돔부의 높이가 증가할수록 점차 증가하여 최대 약 0.26mm 까지 두께가 감소한다. 따라서 두께변형률은 $\epsilon_t = \ln(t/t_o) = -0.65$, 등가소성변형률은 $\bar{\epsilon}^p = \epsilon_t = -0.65$ 이다.

Fig.11에 Fig.8의 돔부의 중앙단면에서 직각 방향으로 측정된 주, 부 변형률 분포를 나타내었다. 주, 부 변형률 분포에서 약간의 차이는 있으나 전 영역에 걸쳐서 거의 등2축인장의 별지 변형상태에 있음을 알 수 있다. 돔부의 중심에서는 주 변형률이 약 0.34, 부 변형률이 약 0.32정도로 평가되고 있음을 알 수 있다.

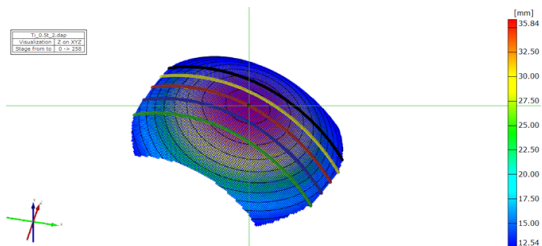


Fig. 8. Contour of bulged dome height measured by GOM-ARAMIS® system

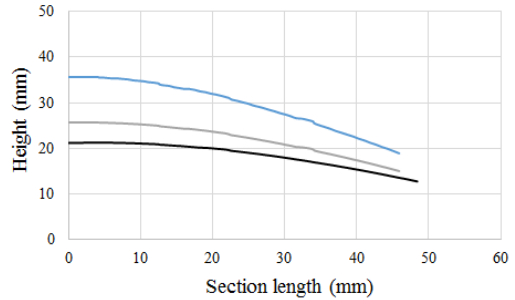


Fig. 9. Section over sheet material measured by GOM-ARAMIS® system

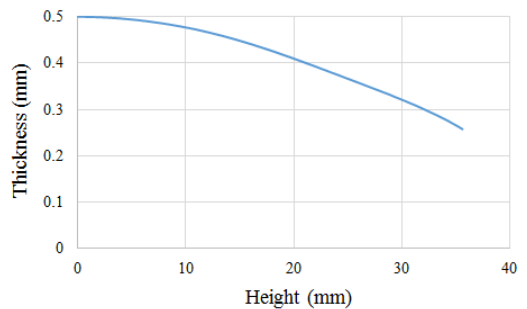


Fig. 10. Thickness at the top of the dome versus dome height

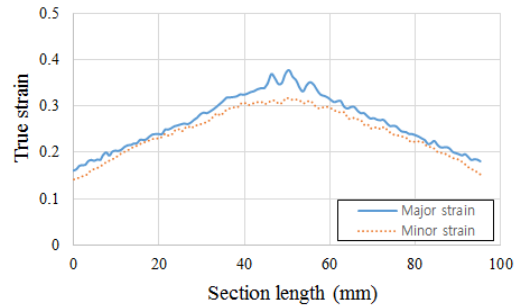


Fig. 11. Measured major and minor strain distributions of the surface over the arc length

이론적으로 돔부에서의 등2축인장 변형률, ϵ_b , 는 두께변형률의 0.5배(0.325에 해당)이어야 한다.

Fig. 12에 본 유압별지실험을 통해 구한 등2축인장 응력과 변형률 관계를 나타낸 것이다. 순 티타늄 판재의 별지 변형 초기에는 판재를 전체적으로 소성변형시키기 위해 일시적으로 높은 압력이 작용하지만 판에 소성변형이 생기기 시작하면 압력의 증가에 따라 판이 별지변형

하면서 소성변형에 따른 가공경화가 안정적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig.13에 Eq.(5)와 Eq.(6) 그리고 문헌 [16]에 의한 방법을 적용하여 구한 순 티타늄 판재의 등가응력-등가변형률 선도(유동곡선)를 인장실험에서 얻어진 결과와 함께 나타내었다. 유압벌지실험을 통해 구해진 유동곡선을 인장실험에서 구한 유동곡선과 비교하면, 소성변형 초기에는 유압벌지실험을 통해 구한 유동곡선이 인장실험을 통해 구한 유동곡선보다 높게 평가되고 있지만 변형이 진행될수록 양자는 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig.13에서 인장실험의 경우는 0도 방향에 대한 데이터를 이용하였으며 이때 최대 진 변형률은 0.356이다. 한편 유압벌지실험에서는 인장실험에서 넥 발생 전까지 구한 진 변형률을 넘어서 최대 진 변형률이 0.65 이상까지 안정적으로 유동곡선을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

통상 재료의 유동곡선은 인장실험에서 최대하중까지의 진응력-진변형률 데이터를 가지고 피팅하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 인장실험에서 구한 데이터를 가장 잘 피팅할 수 있는 방법으로 알려진 Kim-Tuan이 제안한 가공경화식 [17]을 이용하여 넥 발생 이후의 영역 (post-neck region)에서의 유동곡선을 다음과 같이 도출하였다.

$$\sigma = 162.94 + 432.74(0.002 + \epsilon^p)^{0.590} \{1 - e^{-492.69\epsilon^p}\} \quad (7)$$

그 결과를 Fig.13에서 최대 하중까지의 선도(실선) 이후에 점선으로 나타내었다. 본 Kim-Tuan의 가공경화식은 넥 발생 이후 영역에서 순 티타늄 판재의 유압벌지실험에서 구한 가공경화특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

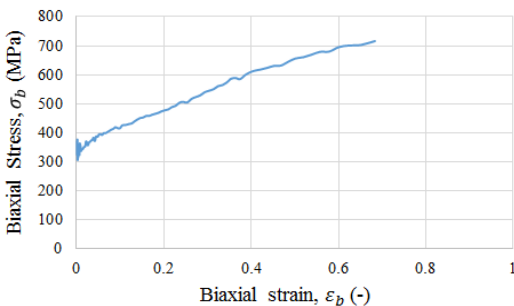


Fig. 12. Biaxial strain and biaxial stress relation obtained from bulge test for CP Ti sheet

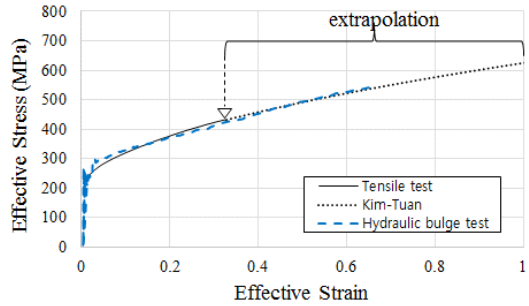


Fig. 13. Comparison of flow curves obtained from bulge and uniaxial tensile tests

3. 결론

본 연구논문에서는 판형 열교환기 등에 널리 이용되고 있는 순 티타늄 판재의 프레스 성형공정 해석에 필요한 판재의 소성유동곡선(plastic flow curve)을 평가하였다. 이를 위해 기존의 인장실험의 한계를 극복하고 큰 변형률 까지도 안정적으로 재료의 가공경화특성을 평가할 수 있는 유압벌지실험을 수행하였으며, 유압벌지실험 공정에서의 판재의 등2축인장 변형률을 ARAMIS 시스템의 3D 디지털 영상 상관법을 이용하여 구하였다. 본 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) CP Ti 판재의 유압벌지실험 공정에 DIC 기법을 적용하여 측정된 결과, 소성변형률 0.65 까지 안정적인 유동곡선을 확보할 수 있었다.
- (2) 유압벌지실험을 통해 구해진 유동곡선은 인장실험에서 구한 유동곡선과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.
- (3) 또한 인장실험에서 넥이 발생하는 최대 하중까지의 진응력-진변형률 데이터 값을 Kim-Tuan의 경화식으로 피팅하여 넥 발생 이후까지 예측한 유동곡선은 유압벌지실험을 통해 구한 유동곡선과 잘 일치함을 알 수 있다.

후 기

본 연구에서 유압벌지실험은 POSCO 박기철박사의 협조를 얻어 수행하였기에 이에 감사드립니다.

References

[1] J.H.Park, Characteristics and Applications of Plate Type Heat Exchanger, J. Korean Soc. Marine Engng., 33(6), 801-811, 2009
DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2009.33.6.801>

[2] A. Fujita, Y. Itsumi, T. Nakamoto, K. Yamamoto, Pre-coated titanium sheet with excellent press formability, Kobelco Tech. Review, 30, pp.19-23, 2011.

[3] M. Usuda, Press formability of commercially pure titanium sheets, Nippon Steel Technical Report, 85(1), pp.24-30, 2002

[4] S. Ishiyama, S. Hanada, O. Izumi, Orientation dependence of twinning in commercially pure titanium, The Japan Inst. Metals, 54(9), pp.976-994, 1990

[5] M. Ishiki, T. Kutabara, Y. Hayashida, Measurement and analysis of differential work hardening behavior of pure titanium sheet using spline function, Int. J. Form., 4 pp.193-204, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-010-1024-5>

[6] A. L. Port, F. Toussaint, R. Arrieux, Finite element study and sensitive analysis of the deep-drawing formability of commercially pure titanium, Int. J. Mater. Form., 2(2), pp.121-129, 2009.

[7] Y.S. Kim, Engineering plasticity and its application, Sigma Press, Korea, pp.532-574, 2014.

[8] Q. Cao, Q. Zhang, X. Zhang, Anisotropy of mechanical behavior in commercially pure titanium sheets, J. Harbin Inst. Tech., 22(1), pp.63-67, 2015

[9] S. Coppieters, D. Yanaga, K. Denys, T. Kuwabara, Identification of post-necking strain hardening behavior of pure titanium sheet, Proc. SEM 2015 Annual Conf. Soc. Exp. Mech. Series, Costa Mesa, USA, pp 59-64, 2015

[10] R. Hill, A theory of plastic bulging of a metal diaphragm by lateral pressure. Philosophical Magazine 41(322), pp.1133 - 1142 , 1950
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14786445008561154>

[11] J. Chakrabarty, J.M. Alexander, Hydrostatic bulging of circular diaphragms, J. Strain Analysis, 5, pp.155-161, 1970.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/03093247V053155>

[12] R.F. Young, J.E. Bird, J.L. Duncan, An automated hydraulic bulge tester, J. Appl. Metal Work. 2(1-11), pp. 11-18, 1981.

[13] C. Vial, W.F. Hosford, Yield loci of anisotropic sheet metals, Int. J. Mech. Sci., 25(12), pp.899-915, 1983.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0020-7403\(83\)90020-6](http://dx.doi.org/10.1016/0020-7403(83)90020-6)

[14] M. Atkinson, Accurate determination of biaxial stress-strain relationships from hydraulic bulging test of sheet metal, Int. J. Mech. Sci., 39, pp.761-769, 1997
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7403\(96\)00093-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7403(96)00093-8)

[15] G. Gutscher, H-C. Wu, G. Ngaile, T. Altan, Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test, J. Mater. Proc. Technol., 146, pp.1-7, 2004.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00838-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00838-0)

[16] M. Sigvant, K. Mattiasson, H. Vegter, P. Thilderkvist, A viscous pressure bulge test for the determination of a plastic hardening curve and equibiaxial material data, Int J. Mater. Form. 2, pp.235-242, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-009-0407-y>

[17] Y.S. Kim, J.H. In, Evaluation of press formability of pure titanium sheet (I), Korean Acadmia-Ind. Coop. Soc.,(be in print), 2016.

[19]. J. Tyson1, J. Psilopoulos1, E. Schwartz1, K. Galanulis, Advanced material properties measurements with optical metrology,<http://www.trilion.com/wp-content/uploads/2012/09/Advanced-Materials-Measurements.pdf>

[18] <http://www.gom.com/3d-software/gom-system-software.html>

[20] B. Pan, K. Qian, H. Xie, A. Asundi, Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review, Measure. Sci. Technol., 20 (6), Paper no. 062001, 2009

[21] I.Y. Choi, Y.J. Kang, K.M. Hong, H.S. Lee, S.J. Kim, Study on the development of the displacement and strain distribution measurement algorithm to the open hole tension test by using the digital image correlation, J. Korean Soc. Precis. Eng., 33 (2), pp.121-128, 1026

김 영 석(Young-Suk Kim) [정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 대학원 기계설계학과 (공학석사)
- 1986년 4월 : 일본 Kobe 대학교 기계공학 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1994년 2월 : 포항 산업과학연구원 연구실장
- 1994년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>
생산공학, 소성역학, 나노/마이크로역학, FEM 및 Biomechanics

김 진 재(Jin-Jae Kim) [준회원]



- 2015년 2월 : 금오공과대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 경북대학교 기계공학과 (석사과정)

<관심분야>
생산공학, 소성역학, 나노/마이크로역학