

순 타이타늄 인장 물성에 미치는 표면 거칠기의 영향에 대한 유한요소해석

백승미¹ · 문지현¹ · 김형섭[#]

Finite Element Analysis on the Effect of the Surface Roughness on the Tensile Properties of Pure Titanium

S. M. Baek, J. H. Moon, H. S. Kim

(Received December 7, 2016 / Revised February 15, 2017 / Accepted February 15, 2017)

Abstract

Titanium based implants are known to improve their osseointegration by controlling surface roughness from nanometers to micrometers. Implants continuously and/or repeatedly receive irregular loads in the human body, and require a deeper understanding of the tensile and fatigue properties that can determine the fracture characteristics of the materials. In this study, the plastic deformation behavior which depends on the surface geometry of the materials during tensile tests was analyzed using the finite element method. As a result, the tensile properties were greatly decreased with increasing the sharpness of the surface. On the other hand, the average roughness had no significant effect on tensile properties. This investigation shed a light on developing titanium implants with improved osseointegration by surface treatments.

Keywords: Finite Element Method, Roughness, Kurtosis Parameter, Tensile Properties

1. 서 론

벌크 재료에서 표면이 차지하고 있는 비율은 매우 적고, 대부분의 표면 거칠기로 인한 응력 집중이 무시될 만한 수준이어서 재료의 표면 거칠기는 인장 물성에 영향을 거의 주지 않는다고 알려져 있다. 그러나 Sun 등[1]은 선택적 전자빔 소결(selective electron beam melting)로 제작된 시편의 표면 거칠기가 재료의 기계적 물성에 미치는 영향을 알아보기 위해 다양한 거칠기 조건에서 실험을 진행하였고, 봉상 시편의 반지름이 2.5mm일 때, 평균 표면 조도 값이 38.9 μm 인 조건에서 인장 물성이 크게 저하되는 것을 확인했다.

금속 생체재료는 반영구적으로 인체 내 경조직을

대체할 수 있는 재료이기 때문에, 장기간 사용 시의 파괴 특성이 매우 중요하다[2]. 특히 임플란트의 경우 지속적이고 반복적으로 불규칙한 외부 하중이 가해지므로 재료의 파괴 특성을 결정지을 수 있는 인장 및 피로 특성에 대한 깊은 이해가 요구된다. 이러한 이유로 인하여 금속 생체재료의 인장 및 피로 특성을 향상시키기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다[3~5]. 타이타늄계 임플란트의 거친 표면은 골과 임플란트 계면의 접촉 표면적을 증가시켜 골유착(osseointegration)을 향상시키는 것으로 알려져 있다[6]. 상용화된 임플란트는 다양한 거칠기를 지니고 있으며, 나노미터에서부터 마이크로미터 단위까지의 표면 거칠기가 골세포에 주는 영향과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다[7~9]. 그러나 표면

1. 포항공과대학교 신소재공학과

Corresponding Author: Department of Materials Science and Engineering, POSTECH, E-mail: hskim@postech.ac.kr

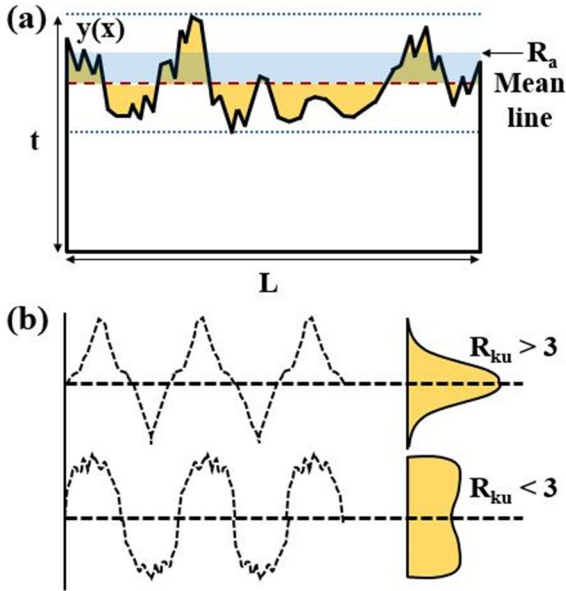


Fig. 1 Schematic of rough surface and definitions of (a) arithmetic average roughness (R_a) and (b) kurtosis (R_{ku}) parameter

거칠기가 기계적 물성을 저하시킬 수 있는 가능성이 있음에도 불구하고[1], 다양한 표면 형태가 기계적 물성 변화에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 진행되고 있지 않았다.

유한요소법은 시간적, 자원적 비용을 줄이면서도 다양한 표면 거칠기 조건에서 재료의 소성변형 거동을 재현하기에 적합한 전산모사 기법이다. 따라서, 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 인장 시험에서 재료의 표면 거칠기와 형태에 따라 달라지는 타이타늄의 소성변형 거동을 해석하고, 인장 물성을 저하시키지 않는 표면 조건 설정에 대한 지표를 마련하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 거칠기 매개 변수

평균 거칠기(Average roughness; R_a)는 가장 대표적인 거칠기 매개 변수로, Fig. 1(a)와 같이 중심선에서 표면까지 길이의 절대값들을 평균으로 구한 값이다. 그러나, 평균 거칠기 값을 통해 높이에 대한 변화는 알 수 있지만 표면 형태에 대한 정확한 정보는 알 수 없다. 산술적으로 평균 거칠기 R_a 는 다음과 같이 정의할 수 있다[10].

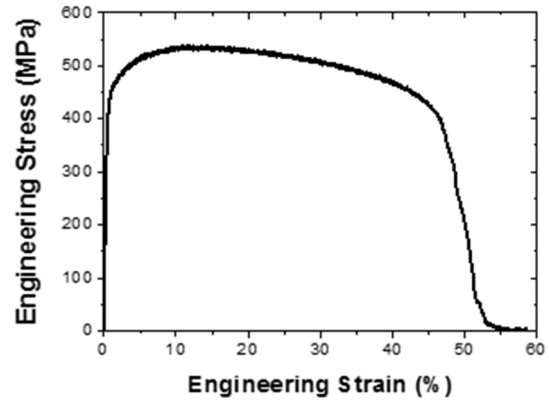


Fig. 2 Engineering stress-strain curves of pure titanium

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (1)$$

여기서 L 은 기준 길이, $y(x)$ 는 중심선에서 표면 곡선까지의 거리이다.

제곱 평균 거칠기(Root mean square roughness; R_q)는 표면 높이 분포에 대한 표준 편차 값을 고려할 수 있는 매개 변수로, 거칠기가 큰 표면에서는 평균 거칠기보다 민감도가 높다. 산술적으로 정의된 제곱 평균 거칠기는 다음과 같다.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \{y(x)\}^2 dx} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}, \quad (2)$$

표면 거칠기 매개 변수 중에서 형태를 알 수 있는 매개 변수는 첨도(Kurtosis; R_{ku})이다. 첨도는 표면의 골(Valley)이나 산(Peak)의 예리한 정도를 나타낼 수 있는 매개 변수로, Fig. 1(b)와 같이 진폭 분포 곡선이 평균값으로 집중되는 정도를 나타내는 값이다. 산술적으로 첨도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \int_{-\infty}^{\infty} y^4 p(y) dy = \frac{1}{NR_q^4} (\sum_{i=1}^n y_i^4), \quad (3)$$

첨도는 제곱 평균 거칠기 값과 각 지점(i)의 높이로 표현될 수 있다. 첨도의 값은 3을 기준으로 값이 3보다 작으면 예리하지 않은 골이나 산의 분포를 지니며, 그 값이 3보다 클 때에는 예리한 골이나 산의 분포를 지녔다고 할 수 있다. 첨도는 단위가 없는 매개 변수이다.

Table 1 Surface roughness conditions analyzed in this paper

Samples	R_a/t ratio (%)	Parameters	
		R_a (μm)	R_{ku} (μm)
Initial	0	0	0
R1	1	2.5	1.8
R2	2	5	1.8
R4	4	10	1.8
$R_{ku}10$	2	5	10
$R_{ku}20$	2	5	20
$R_{ku}30$	2	5	30

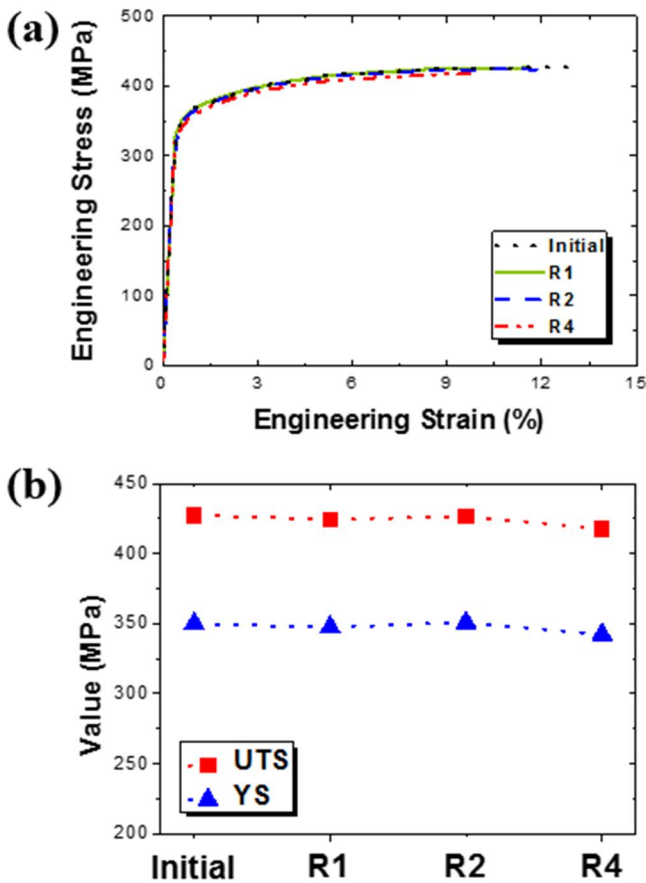


Fig. 3 (a) Simulated engineering stress-strain curves and (b) ultimate tensile strength (UTS) and yield strength (YS) values of the initial, R1, R2, and R4 specimens

2.2 유한요소해석

본 연구의 유한요소해석에 이용된 재료는 순 타 이타늄이며 응력-변형률 선도(engineering stress-strain curve)는 Fig. 2와 같다. ABAQUS standard를 이용한 유한요소법을 통해 인장 시편의 두께 0.5mm, 표점 간거리 5mm인 시편에 대해 2차원 인장 시험을 모 사하였으며 대칭 조건을 이용하여 전체 시편의 1/2 을 모사하였다. 사용된 요소 크기를 변화시켜 가며 계산을 수행하여 요소 크기 민감도를 평가하였다. 요소 크기가 작아짐에 따라 계산시 충분히 결과 값 (국부적인 응력, 변형률)이 수렴할 수 있도록 요소 간의 거리를 0.01mm로 설정하였고, 이는 시편의 두께 방향으로 25개의 요소에 해당한다. $t = 0.25\text{mm}$, $L = 5\text{mm}$ 로 가정하여 표면의 평균 거칠기와 침도에 따라 형상화한 표면 조건은 Table 1과 같다. R1, R2, R4 는 같은 침도 조건에 평균 거칠기만 변화를 주어 시편 두께 대비 평균 거칠기인 R_a/t 비율이 각각 1, 2, 4%가 되도록 구성하였다. $R_{ku}10$, $R_{ku}20$, $R_{ku}30$ 은 침도만 변화를 주었으며 R_a/t 비율은 2%로 고정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 표면의 평균 거칠기에 따른 인장 물 성 변화

시편 표면의 침도가 동일한 조건에서 평균 거칠기만 변화를 주었을 때의 인장 물성 변화는 Fig. 3(a)와 같다. 평균 거칠기 차이에 따라 인장 물성에서 도출한 인장강도(ultimate tensile strength; UTS)와 항복 강도(yield strength; YS) 변화를 Fig. 3(b)에서 살펴보면, 모두 유사한 값을 가지는 것을 알 수 있다. 평균 거칠기가 가장 큰 R4의 경우에도 인장강도 값이 418 MPa로, 428MPa의 인장강도 값을 지닌 초기 시편의 경우보다 소폭 감소한 것을 확인하였다. 균일 연신 율도 평균 거칠기가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 4는 인장 전, 후의 응력 분포를 각 시편당 동일한 변형률에서 나타낸 것이다. 초기 시편의 경우 시편 전체에 균일하게 응력이 분포되어 있으나, 표면 거칠기가 존재하는 R1, R2, R4 시편의 경우 표면의 골에 응력 집중 현상이 나타났다.

Suh 등[11]은 인장 시편의 표면 거칠기가 있을 때 알루미늄의 인장강도가 감소할 수 있다는 것을 유한요소법을 통해 확인했다. R_a/t 비율이 높을수록 인

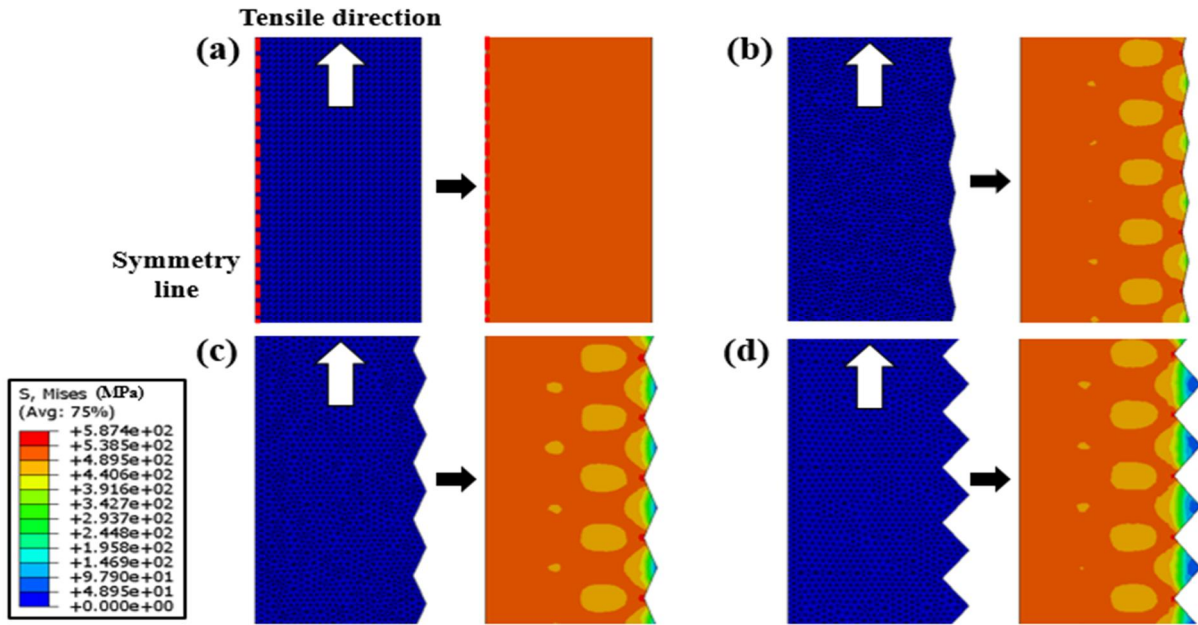


Fig. 4 Stress distributions before and after the tensile test of (a) initial, (b) R1, (c) R2, and (d) R4 specimens

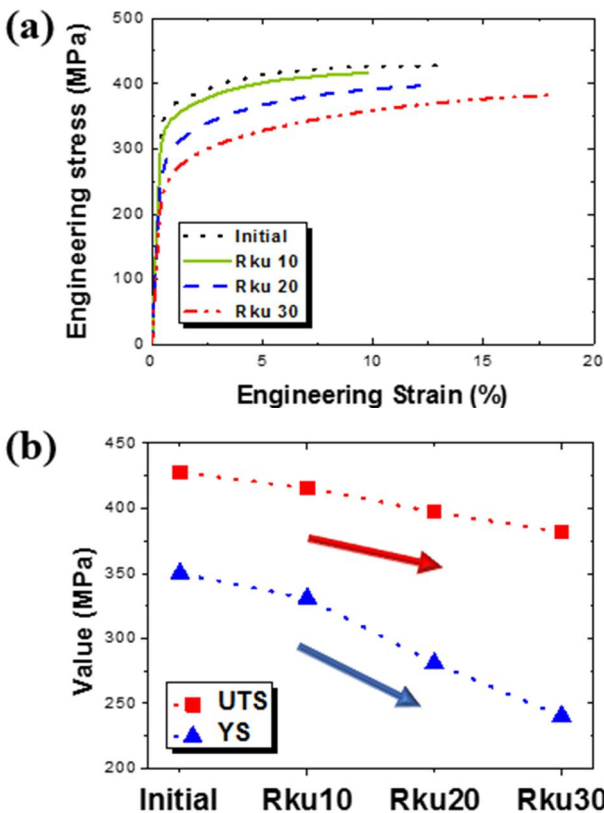


Fig. 5 (a) Simulated engineering stress-strain curves and (b) ultimate tensile strength (UTS) and yield strength (YS) values of the initial, R_{ku10} , R_{ku20} , and R_{ku30} specimens

장강도가 감소하는 정도가 증가하였는데, 1.58과 0.4mm 두께의 시편의 경우 R_a/t 비율이 각각 0.01, 0.38%였으며 표면 거칠기가 있을 때 인장강도가 각각 1, 6MPa씩 감소하였다. 그러나 인장강도가 감소한 폭이 매우 작고 연신율의 경우에도 차이가 매우 미미했다. 본 연구에 이용된 조건에서도, R_a/t 비율이 1, 2, 4%로 높아질수록 인장강도가 감소하고 균일 연신율도 감소하였으나 큰 폭의 감소는 일어나지 않았다. 또한, 표면 거칠기가 있는 조건에서 표면의 골에 응력 집중 현상이 일어나는 것을 확인하였지만 그것이 큰 폭의 인장 물성 하락으로 이어지는 않았다. Sun 등[1]은 R_a/t 비율이 1.56%일 때 UTS가 약 100MPa 정도 감소하는 것을 확인했다. 따라서 표면 거칠기가 있을 때 인장 물성을 감소시키는 주된 요인이 평균 거칠기가 아닐 것이라 추측된다.

3.2 표면의 첨도에 따른 인장 물성 변화

시편 표면의 R_a/t 비율이 2%로 동일한 조건에서 첨도만 변화를 주었을 때의 인장 물성 변화는 Fig. 5(a)와 같다. 첨도 차이에 따른 인장강도와 항복강도 변화를 Fig. 5(b)를 통하여 살펴보면, 첨도가 증가할수록 인장강도와 항복강도가 크게 감소하였다. 표면 거칠기가 없는 초기 시편의 경우 인장강도가 428 MPa에 항복강도가 350MPa이고, 균일 연신율이 약 13.3%였다. 첨도가 10, 20, 30으로 증가할수록 인장강도와

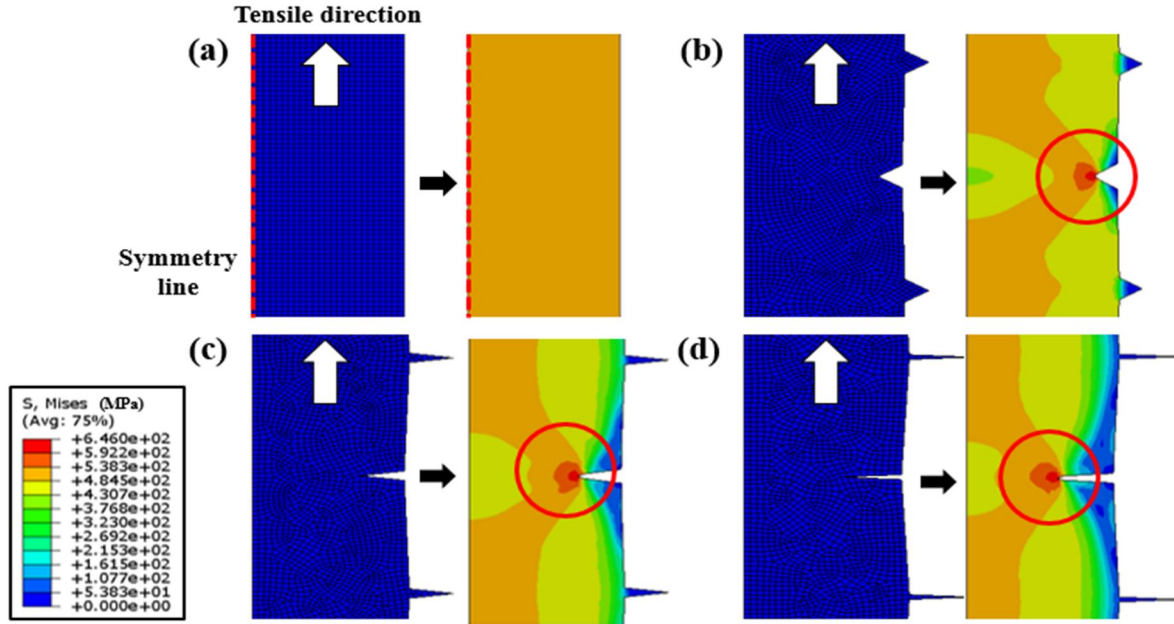


Fig. 6 Stress distributions before and after the tensile tests of (a) initial, (b) R_{ku10} , (c) R_{ku20} , and (d) R_{ku30}

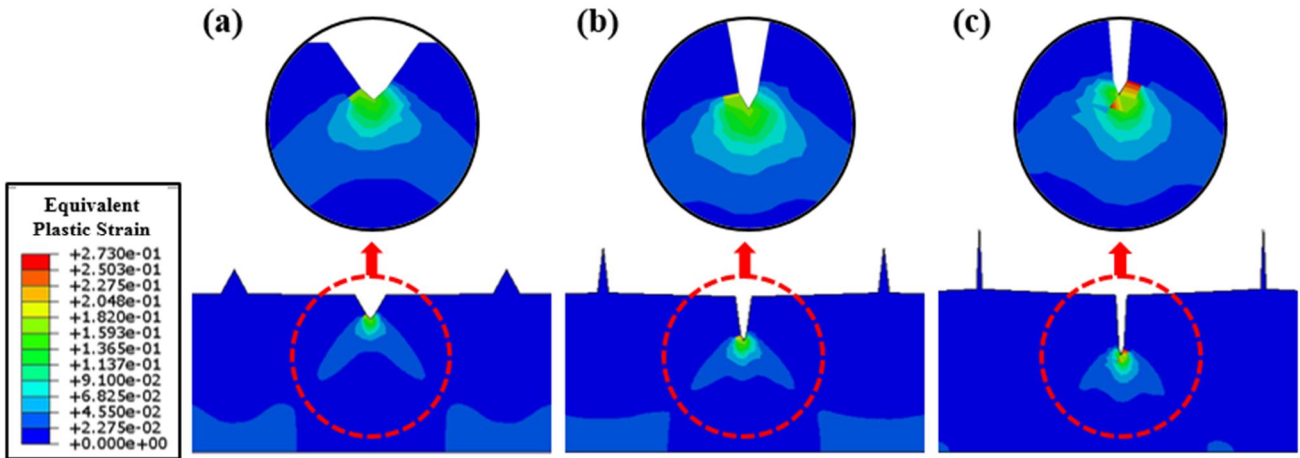


Fig. 7 Equivalent plastic strain distributions of the (a) R_{ku10} , (b) R_{ku20} , and (c) R_{ku30} specimens

항복강도는 각각 12~46, 19~110MPa의 폭으로 감소하였으며 균일 연신율은 침도가 10, 20일 때 감소하였다가 30일 때 증가하였다.

Fig. 6은 인장 전, 후의 응력 분포를 각 시편당 동일한 변형률에서 나타낸 것이다. 초기 시편의 경우 시편 전체에 균일하게 응력이 분포되어 있으나, 표면 거칠기가 존재하는 경우 표면의 골에 응력 집중 현상이 나타났다. 특히, 평균 거칠기의 변화를 준 경우(Fig. 4)에는 골에 집중된 응력과 시편 내부의 응력 차이가 적은 편이었으나 침도 변화를 준 경우에는 그 차이가 비교적 큰 것을 확인할 수 있었다.

초기 시편과 달리 침도가 큰 시편일수록, 골의 끝 방향으로 응력이 집중되어 변형이 일어나기 때문에 소성 변형에 대한 저항성이 낮아져서 초기 시편의 값보다 비교적 낮은 항복강도 값에서 항복이 일어나게 된다. 항복 이후, 소성 변형이 진행됨에 따라 응력 집중이 침도가 클수록 잘 일어나게 되고 낮은 응력으로도 골에서의 국부변형이 많이 일어나게 된다. 이러한 이유로 침도가 큰 시편일수록 초기 시편보다 낮은 힘으로 네킹(necking) 유발이 가능하고, 따라서 낮은 인장강도 값을 가지게 된다. 침도 차이에 따른 골 주변부에서의 국부변형

은 Fig. 7을 통해 확인할 수 있으며, 침도가 가장 큰 R_{ku30} 시편에서 등가 소성 변형률이 가장 큰 것을 알 수 있었다.

시편 표면의 R_a/t 비율이 2%로 동일한 R2 시편의 경우 침도가 3보다 이하의 값인 1.8을 지닐 때 Fig. 3(a)와 같이 초기 시편과 유사한 인장 물성을 보였다. 반면, 침도가 3보다 이상의 값을 지니는 R_{ku10} , R_{ku20} , R_{ku30} 시편들은 초기 시편의 인장 거동과 다른 거동을 보이며 침도가 클수록 인장 물성이 저하하는 경향을 보였다. 따라서 인장 물성을 저하시키지 않는 표면 형태를 고려할 때에는 평균 거칠기보다는 표면의 침도를 주된 요인으로 고려해야 함을 알 수 있다.

이번 유한요소해석을 통해 표면 형태가 인장 물성에 미치는 영향에 대해 의미 있는 결과를 얻을 수 있었으나 파단(fracture)을 고려하지 않아 정확한 총연신율의 값을 고려하기 어려운 점이 있었다. 파단이 고려되는 실제 실험에서는 표면 형태에 따른 인장 물성의 감소 폭이 더 클 것으로 판단되며, 특히 파단을 모사하는 유한요소해석의 후속연구가 기대되는 바이다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 표면 평균 거칠기와 침도가 순 타이타늄의 인장 물성에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

초기 시편에 비해 표면의 침도가 증가할수록 인장 물성이 크게 감소한 반면, 평균 거칠기의 변화는 인장 물성에 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다. 재료 표면의 침도는 변형 시 응력 집중을 통해 국부 변형을 유발하여 인장 물성에 영향을 줄 수 있으므로, 인장 물성을 저하시키지 않는 표면의 형태를 고려할 때에는 표면의 침도를 주된 요인으로 고려해야 한다. 본 연구를 통하여 추후 타이타늄 임플란트의 개발에 있어서 표면조건 조절의 방향을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2016년도 한국연구재단의 지원(NRF-2015K2A1B8068481)을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] Y. Y. Sun, S. Gulizia, C. H. Oh, D. Fraser, M. Leary, Y. F. Yang, M. Qian, 2016, The Influence of as-built Surface Conditions on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Additively Manufactured by Selective Electron Beam Melting, JOM, Vol. 68, No. 3, pp. 791~798.
- [2] M. Niinomi, 1998, Mechanical Properties of Biomedical Titanium Alloys, Mater. Sci. Eng., A, Vol. 243, No. 1, pp. 231~236.
- [3] S. Bagherifard, R. Gheichi, A. Khademhosseini, M. Guagliano, 2014, Cell Response to Nanocrystallized Metallic Substrates Obtained Through Severe Plastic Deformation, ACS Appl. Mater. Inter., Vol. 6, No. 11, pp. 7963~7985.
- [4] A. V. Sergueeva, V. V. Stolyarov, R. Z. Valiev, A. K. Mukherjee, 2001, Advanced Mechanical Properties of Pure Titanium with Ultrafine Grained Structure, Scripta Mater., Vol. 45, No. 7, pp. 747~752.
- [5] I. P. Semenova, G. V. Klevtsov, N. A. Klevtsova, G. S. Dyakonov, A. A. Matchin, R. Z. Valiev, 2016, Nanostructured Titanium for Maxillofacial Mini-implants, Adv. Eng. Mater., Vol. 18, No. 7, pp. 1216~1224.
- [6] L. Le Guehennec, A. Soueidan, P. Layrolle, Y. Amouriq, 2007, Surface Treatments of Titanium Dental Implants for Rapid Osseointegration, Dent. Mater., Vol. 23, No. 7, pp. 844~854.
- [7] A. Wennerberg, T. Albrektsson, 2009, Effects of Titanium Surface Topography on Bone Integration: a Systematic Review, Clin. Oral. Impl. Res., Vol. 20, No. s4, pp. 172~184.
- [8] R. A. Gittens, T. McLachlan, R. Olivares-Navarrete, Y. Cai, S. Berner, R. Tannenbaum, Z. Schwartz, K. H. Sandhage, B. D. Boyan, 2011, The Effects of Combined Micron-/submicron-scale Surface Roughness and Nanoscale Features on Cell Proliferation and Differentiation, Biomater., Vol. 32, No. 13, pp. 3395~3403.
- [9] J. Park, Y. Kim, C. H. Park, D. Lee, Y. G. Ko, J. Jang, C. S. Lee, 2009, Enhanced Osteoblast Response to an Equal Channel Angular Pressing-processed Pure

- Titanium Substrate with Microrough Surface Topography, *Acta Biometer.*, Vol. 5, No. 8, pp. 3272~3280.
- [10] E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa, H. H. Soliman, 2002, Roughness Parameters, *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 123, No. 1, pp. 133~145.
- [11] C. H. Suh, Y. Jung, Y. S. Kim, 2010, Effects of Thickness and Surface Roughness on Mechanical Properties of Aluminum Sheets, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 24, No. 10, pp. 2091~2098.