

3D Printer로 제작된 인공뼈 구조에 대한 기계적 특성에 관한 연구

허영준^{*,**}, 최성대^{*,#}

^{*}금오공과대학교 기계시스템공학과, ^{**}구미전자정보기술원 ICT융합연구본부

A Study on the Mechanical Properties of Artificial Bone Structure Fabricated Using a 3D Printer

Yeong-Jun Heo^{*,**}, Seong-Dae Choi^{*,#}

^{*}Department of Mechanical Engineering System, KIT UNIV.,

^{**}Gumi Electronics & Information Technology Research Institute

ICT Convergence Research Division, Digital Health Care Research Center

(Received 12 July 2020; received in revised form 4 August 2020; accepted 5 August 2020)

ABSTRACT

The structure of the femur bone was analyzed. Moreover, the mechanical strength of the bone was determined by considering two parameters, namely, the outer wall thickness and inner filling density to realize the 3D printing of a cortical bone and spongy bone by using a fused deposition modeling type 3D printer and ABS material. A basic experiment was conducted to evaluate the variation trend in the mechanical strength of the test specimens with the change in the parameters. Based on the results, the parameters corresponding to the highest mechanical strength were selected and applied to the artificial bone, and the mechanical strength of the artificial bones was examined under a load. Moreover, we proposed an approximation method for the 3D printing parameters to enable the comparison of the actual bones and artificial bones in terms of the strength and weight.

Key Words : Artificial Bone(인공뼈), 3D Printing(3차원 프린팅), Mechanical Properties(기계적 성질), Bending Test(굽힘 시험), Bone Structure(뼈 구조)

1. 서 론

현재 3D Printing 기술은 재료의 낭비가 적고 시제품 제작의 비용과 시간을 줄일 수 있다는 이점을 가지고 있어 많은 분야에서 연구·활용되고 있는 기

술이며 의료 기술 분야를 살펴보면 현재 골절 환자에게는 골절이 심한 경우에는 티타늄을 이용하여 골절된 뼈를 고정 시켜주는 치료 방법을 활용하고 있지만 강한 하중이 가해지거나 격한 운동이 제한되는 등의 한계가 있다^{1), 2)}.

따라서 본 연구에서는 뼈의 구조를 3D Printing의 설정값에 매칭하여 시험편을 출력하고 시험을 통해 인공뼈를 제작하는 3D Printing의 설정값에 따라 변

Corresponding Author : sdchoi@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7396, Fax: +82-54-478-7319

하는 기계적 강도 값의 경향성을 찾고 이를 바탕으로 실제뼈와 인공뼈를 비강도적인 측면에서 접근하여 강도적으로는 우수하고 신체의 균형을 위한 중량과 형상은 같은 인공뼈를 출력하는 3D Printing의 설정값에 대한 접근법을 제시하였다^[3].

2. 실험방법

2.1 시험편 제작

실제뼈와 같은 형상을 가지는 3D Printing 출력물의 기계적 강도 시험을 하기에 앞서 3D Printing의 설정값에 따라 변하는 시험편의 강도적인 경향성을 알아보기 위해 ABS 필라멘트를 재료로 사용하는 FDM 방식의 3D Printer에서 익스트루더에 240℃의 열을 가해 압출하여 시험편을 제작 하였으며, 굽힘 시험편의 형태는 원기둥 형태로써 실제뼈의 구조인 피질골과 해면골에 매칭하기 위해 출력 설정값인 외벽 두께와 내부채움밀도에 변화를 주어 제작을 하였으며 3D Printing 특성 상 적층 방향에 따라 하중 방향에 의한 기계적 강도값이 달라지는데 3점 굽힘 시 시험편을 길이 방향으로 놓힌 상태에서 수직 방향인 -Z축 방향으로 Tool에 의해 힘을 가하기 때문에 시험편을 출력할 때의 적층 방향은 ABS 필라멘트를 눕혀쌓기로 적층 하여 Parameter에 따른 시험편의 기계적 강도 값을 측정 하였다^[4].

이는 시험편의 3점 굽힘 시험 결과를 굽힘 응력, 굽힘 응력에 시험편의 중량을 나눈 값, 처짐량에 대한 하중의 증가 값, 처짐량에 대한 하중의 증가 값에 시험편의 중량을 나눈 값을 얻어 비교·분석하여 가장 우수한 강도값을 갖는 3D Printing 설정값을 찾고자 하는 기초 시험 Data이다^[5].

시험편의 시험을 통해 3D Printing 설정값을 선정하여 실제뼈와 같은 형상을 갖는 인공뼈를 제작하고자 하였으며 그 절차는 실제뼈를 CT-Scan하여 얻는 Slice Data들을 3D Printing 가능한 STL 형식으로 변환시키고 이를 G-Code로 변환하는 과정을 거쳐 제작한다^[6].

Fig. 1의 (a)는 시험편의 3D Printing 적층 모식도를 나타내며 빨간색으로 표시된 부분이 외벽두께 부분이며 노란색으로 표시된 부분은 내부채움밀도를 나타내며 (b)는 시험편의 치수를 나타낸다.

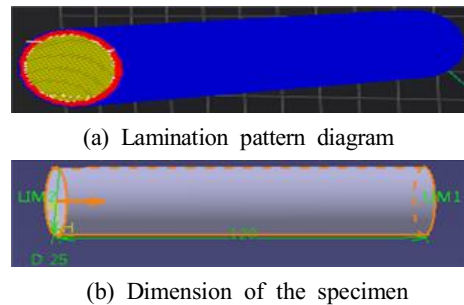


Fig. 1 Lamination and dimensions of specimen

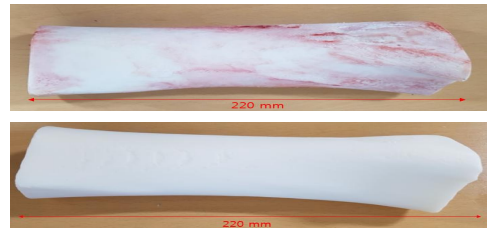


Fig. 2 Actual bone and artificial bone

Table 1 Internal filling density(%) and Outer wall thickness(mm) of the specimen

	B302	B306	B3010	B502	B506	B5010
Internal filling density	30	30	30	50	50	50
Outer wall thickness	2	6	10	2	6	10
	B702	B706	B7010	B1002	B1006	B10010
Internal filling density	70	70	70	100	100	100
Outer wall thickness	2	6	10	2	6	10

Fig. 2는 실제 소의 넓다리뼈와 실제뼈와 같은 형상으로 출력된 인공뼈를 나타내며 실제 치수를 측정한 결과 실제뼈와 인공뼈의 크기와 형상은 같았다.

Table 1은 시험편 Parameters의 값을 나타내며 내부채움밀도가 30, 50, 70, 100% / 외벽두께가 2, 6, 10mm 일 때의 굽힘 강도값을 알아보기 위한 시험편을 3D Printing 하고자 하였다.



Fig. 3 Bending test setting

2.2 굽힘 시험

만능재료시험기 (UTM, AG-10TG, SHIMADZU)를 이용하여 굽힘 강도를 측정하기 위해 두 지점간의 거리를 60mm, 하중속도 2mm/min으로 수직하중을 가하여 최대 굽힘 강도를 측정 하였다.

시험편의 굽힘 응력에 대한 경향성을 찾기 위해 응력값을 그래프로 나타내었으며, 비강도적인 경향성을 알아보고자 신체의 균형을 위해 중요한 요소인 중량을 측정하여 굽힘 응력값에 시험편의 중량을 나누어 그래프로 나타내었다⁷⁾. 또한 뼈는 소성영역을 지나 파단이 일어나면 제 역할을 못한다고 판단하여 탄성영역에서의 처짐량과 하중값을 나타내는 그래프에서 기울기를 비교 하였으며 마찬가지로 비강도적인 측면에서의 기울기 값의 경향성을 찾기 위해 기울기에 중량을 나누어 그래프로 나타내어 각 Parameter에 따른 값을 비교하고자 하였다⁸⁾.

Fig. 3은 만능재료시험기와 3점 굽힘 시험의 Setting을 나타내며 3D Printing 설정값인 시험편의 내부채움밀도와 외벽두께를 다르게하여 12개의 시험편을 제작하고 만능재료시험기를 이용하여 3점 굽힘 시험을 진행 하였다.

2.3 파단면 관찰

Digital USB Microscope (Digital Microscope, CVAGV-K260)을 이용하여 실제 출력된 시험편의 단면에서 외벽두께와 내부채움밀도를 측정하여 3D Printing 설정 값과의 차이점을 확인하고 실제 출력 굽힘 시험 후 파단된 시험편의 단면을 관찰하고자 하였다⁹⁾.

Table 2 Weight of specimen and bone

	B302	B306	B3010	B502	B506	B5010
Weight (g)	28	42	50	36	47	49
	B702	B706	B7010	B1002	B1006	B10010
Weight (g)	45	48	53	53	54	54
	Actual bone			Artificial bone		
Weight (g)	605			300		

3. 실험결과 및 고찰

3.1 중량 측정 결과

각 시험편의 3D Printing 설정값의 변화에 따라 변하는 시험편의 중량과 변화폭을 알아보고 기계적 강도를 측정하기 위한 시험의 결과 값에 중량을 나누어 비강도적인 측면에서 접근하기 위하여 전자저울을 이용하여 시험편의 중량을 측정 하였으며 Table 2에 시험편과 실제뼈, 인공뼈의 중량을 나타내었다.

3.2 굽힘 응력 측정

Fig. 4에서는 3D Printing 설정값에 따라 출력한 시험편의 굽힘 응력 측정 결과 값을 그래프로 나타내고 있다. 내부채움밀도 값이 낮을수록 외벽두께에 대한 굽힘 응력 값의 차이가 넓은 범위를 보였고 해당 범위는 굽힘 응력 값이 범위 안에 존재하는 시험편을 출력하기 위한 3D Printing 설정값을 찾아 낼 수 있음을 의미한다. 또한 내부채움밀도 30%, 외벽두께가 2mm일 때 굽힘 응력 값이 2.08kgf/mm^2 으로 가장 낮은 값을 보였으며 내부채움밀도 100%, 외벽두께가 10mm일 때 굽힘 응력 값은 7.46kgf/mm^2 으로 가장 높은 값을 보였다.

시험편의 3점 굽힘 시험을 통해 얻은 굽힘 응력값을 통해 Parameters에 따른 굽힘 응력의 경향성을 파악하여 우수한 기계적 강도 값을 가질 것이라고 예상되는 Parameters를 선정하여 실제뼈와 같은 형상을 가지는 인공뼈를 출력하였으며 Fig. 5에서 인공뼈와 실제뼈의 굽힘 응력 차이를 그래프로 나타내었다. 이 그래프에서 하중은 3점 굽힘

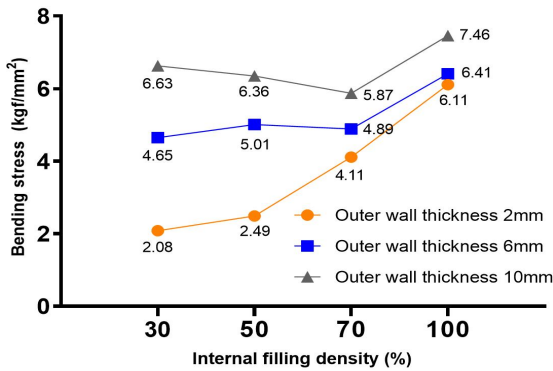


Fig. 4 Bending stress comparison graph

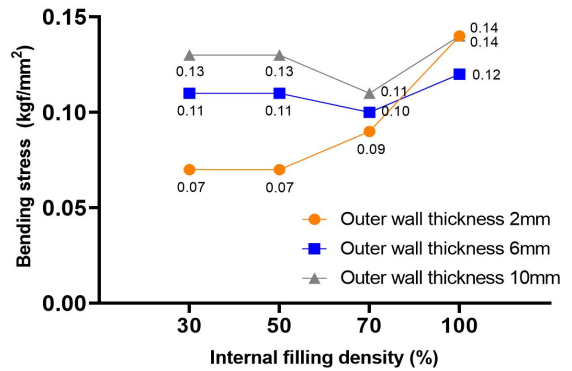


Fig. 6 Bending stress/weight comparison graph

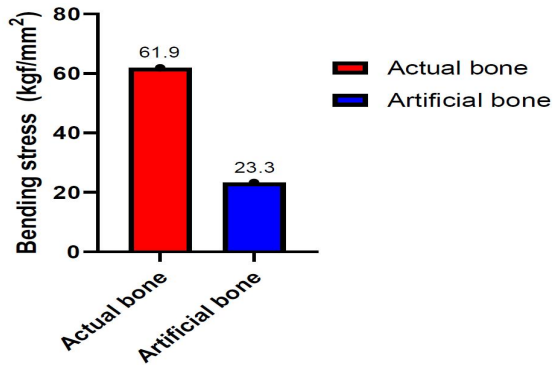


Fig. 5 Bending stress of actual bone and artificial bone

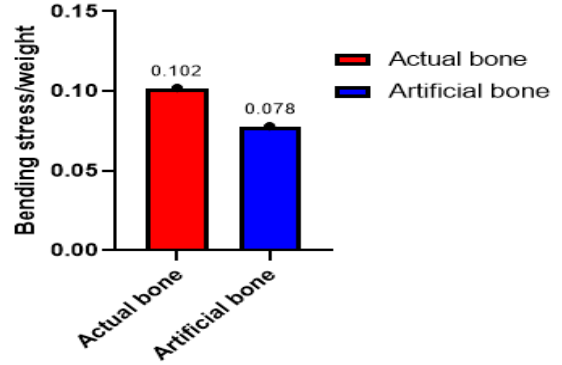


Fig. 7 Bending stress/weight of actual bone and artificial bone

인공뼈에 가해진 최고 하중을 대입 하였으며, 실제뼈와 인공뼈의 파단이 일어난 부분을 모델링하여 면적을 구해본 결과 파단면의 면적은 $972mm^2$ 으로 계산 되었으며 3점 굽힘 Jig간의 거리는 뼈의 길이를 고려하여 140mm를 대입하여 계산한 굽힘 응력 값을 그래프로 나타내었고 실제뼈의 굽힘 응력은 $61.9kgf/mm^2$, 인공뼈의 굽힘 응력은 $23.3kgf/mm^2$ 으로써 단순 굽힘 응력을 비교 하였을 때 2.65배의 차이를 보였다.

3.3 굽힘 응력에 대한 중량의 비

인공뼈는 실제뼈와 무게가 같아야 신체의 균형이 맞기 때문에 강도뿐만 아니라 인공뼈의 무게 또한 중요한 요소가 될 수 있다. 따라서 굽힘 응력 값에 시험편의 중량을 나눠 시험편의 무게가

같은 때의 강도를 비교하기 위한 값인 비강도를 비교하고자 Fig. 6에서 시험편의 굽힘 응력 값에 무게를 나눈 그래프를 나타내었으며 시험편의 굽힘 응력 그래프와 비슷한 양상을 보였지만 내부채움밀도 100%, 외벽두께가 2mm일 때의 값이 내부채움밀도 100%, 외벽두께 10mm일 때의 값보다 높게 상승 하였다. 이는 비강도적인 측면에서 관찰 하였을 때 같은 무게일 때 내부채움밀도 100%, 외벽두께가 2mm일 때의 값이 가장 높다는 것을 의미한다.

마찬가지로 실제뼈와 같은 형상을 가지는 인공뼈의 굽힘 시험 진행 후 구해진 굽힘 응력에 중량을 나눈 결과를 Fig. 7에 나타내었으며 비강도적인 측면에서 굽힘 응력 값을 비교 하였을 때 실제뼈가 인공뼈보다 1.3배 높은 값을 보였다.

3.4 처짐량에 대한 하중값의 증가

3D Printing 설정값에 따른 시험편을 탄성계수 측면에서 비교하기 위해 3점 굽힘 시험 후 얻어진 처짐량/하중 그래프에서 탄성영역의 기울기 값을 비교한 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 내부채움밀도가 100%일 때 기울기가 159.09로 가장 높은 값을 보였다. 이는 내부채움밀도가 높아질수록 조밀하게 채워지는 내부의 격자가 하중이 가해지는 만능재료시험기의 Tool의 하중을 견뎌주기 때문에 나타나는 현상이라고 고찰하였다.

실제뼈와 인공뼈의 탄성계수를 비교하는 그래프를 Fig. 9에 나타내었으며 실제뼈의 탄성계수는 543.388, 인공뼈의 탄성계수는 115.307로 실제뼈가 인공뼈보다 4.71배 높은 결과를 보였으며 실제뼈와 인공뼈의 단순 굽힘 응력이 2.65배 차이 난 것과 비교하면 훨씬 많은 차이를 보이고 있으며 실제뼈가 하중이 가해졌을 때 더 높은 하중을 견디는 것이 재료의 강도적인 차이와 탄성계수의 차이에서 오는 것이라고 고찰 하였다.

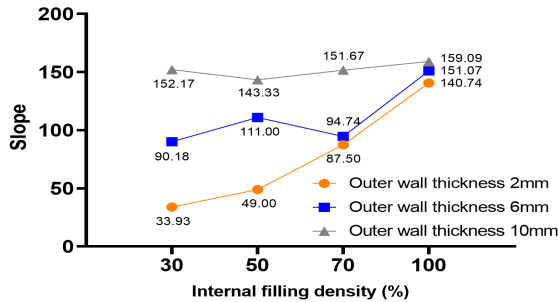


Fig. 8 Load/displacement slope comparison graph

3.5 처짐량과 하중 값에 대한 중량의 비

3D Printing 설정값에 따른 시험편을 탄성계수 측면에서 비교하기 위해 굽힘 시험 후 얻어진 처짐량/하중 그래프에서 탄성영역의 기울기를 구하여 중량을 나눠준 값을 비교한 그래프를 Fig. 10에 나타내었다. 외벽두께가 2mm일 때 내부채움밀도가 높아질수록 탄성계수에 중량을 나눠준 값이 증가하였으며 외벽두께가 10mm일 때는 반대로 내부채움밀도가 높아질수록 감소하였고 외벽두께가 6mm일 때는 증감 폭이 일정하지 않았으며 내부채움밀도가 100%일 때 탄성계수에 중량을 나눠준 값이 2.95로 가장 높았다.

실제뼈와 같은 형상을 갖도록 출력된 인공뼈와 실제뼈의 탄성계수에 중량을 나눠준 값을 비교한 그래프를 Fig. 11에 나타내었으며 실제뼈의 경우 0.898, 인공뼈의 경우 0.384로 실제뼈의 탄성계수/중량의 값이 2.34배 높았으며 이는 실제뼈와 인공뼈의 재료 차이에서 오는 것으로써 실제뼈가 인공뼈보다 인성이 좋다고 볼 수 있다.

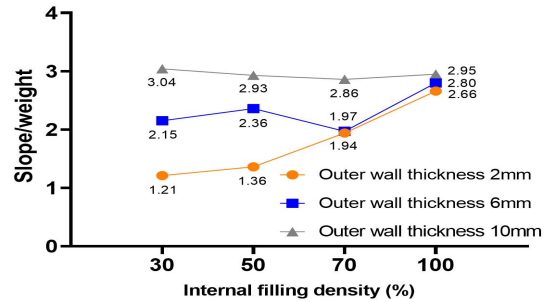


Fig. 10 Slope/weight comparison graph

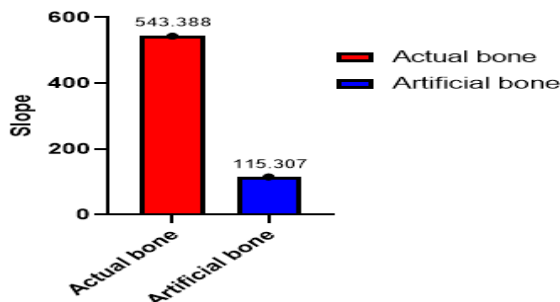


Fig. 9 Modulus of elasticity actual bone and artificial bone

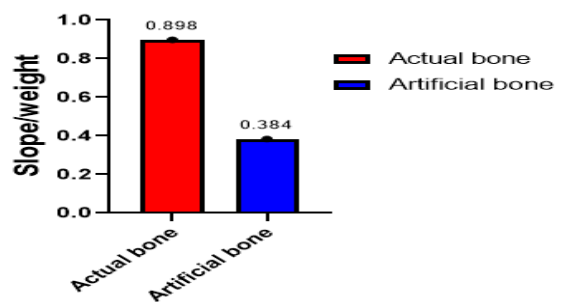


Fig. 11 Slope/weight graph of actual bone and artificial bone

3.6 파단면 관찰 결과

Fig. 12~13에서는 3점 굽힘 시험 후 파단된 시편의 파단면을 현미경을 통해 관찰한 사진을 나타내며 파단면을 관찰 해본 결과 내부채움밀도 값을 100%로 설정하였음에도 불구하고 내부에 공간이 존재하는 것을 확인하여 내부채움밀도 라는 Parameter는 해당 3D Printer에만 적용되는 설정 값으로 보여 시험편 파단면의 필라멘트 사이의 거리를 측정하고 실제 부피를 계산하여 출력시 설정한 부피와 실제 출력된 시편의 부피에 대한 차이를 Fig. 14 그래프에 나타내어 모든 3D Printer 출력물에서의 재현성을 확보하고자 하였다.

내부채움밀도를 30%로 설정 하였을 때 실제 출력물의 내부밀도는 25.9%, 50%일 때 46.52%, 70%일 때 57.88%, 100%일 때 70.17% 로 계산이 되었으며 다음 결과를 통해 본 연구에 사용한 3D Printer 뿐만 아니라 다른 어떤 3D Printer를 사용

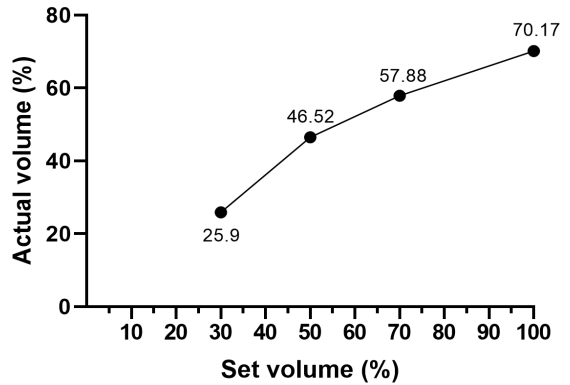


Fig. 14 Graph of set value and actual value

하여도 실제 내부밀도를 적용하여 출력하면 본 연구와 같은 결과값에 대한 재현성을 확보할 수 있을 것으로 보인다.

4. 결론

인체가 갖고 있는 뼈를 대신하는 임플란트 재료가 발달함에 따라 3D프린팅으로 제작하여 수술하기도 한다^{10,11}. 이에 소재는 생체재료가 아니지만 본 연구에서는 실제 넓다리뼈의 구조를 분석하고 3D Printer에 접목시켜 출력에 필요한 모형 넓다리뼈에 대한 여러 가지 Parameters의 변화에 따른 기계적 강도 값의 변화에 대한 경향성을 찾고자 하였다.

다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 외벽두께가 두껍고 내부채움밀도가 높을수록 강도와 탄성계수의 값이 높아지며 외벽두께에 대한 굽힘 응력과 탄성계수의 범위의 차가 좁아지며 해당 범위 안에 속하는 기계적 강도 값을 가지는 인공뼈를 출력 할 수 있다.
2. 실제뼈와 인공뼈의 굽힘 응력은 2.65배가 차이 났으며 굽힘 응력에 증량을 나눴을 때 1.3배의 차이가 났으며 탄성계수는 4.71배의 차이가 났고 탄성계수에 증량을 나눴을 때 2.34배의 차이가 생기는 것을 확인 하였다.
3. 실제뼈를 대신해서 사용하는 임플란트 인공뼈의 소재가 실제뼈보다 비중이 높은 금속소재의 경우에는 기계적 강도는 높지만 무게가 많이

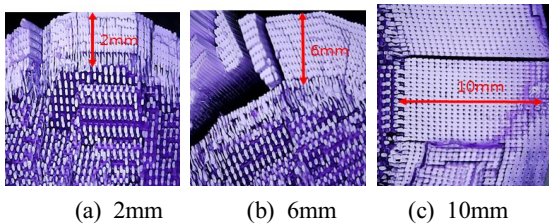


Fig. 12 Outer wall thickness cross section

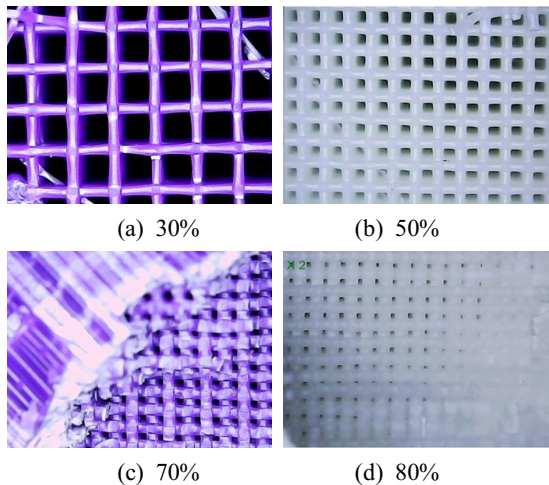


Fig. 13 Internal filling density cross section

나가기 때문에 생체적응력은 저하된다. 따라서 본 연구로 인하여 내부조직과 외벽두께의 파라미터를 이용하여 실제뼈의 무게를 고려한 임플란트 인공뼈의 제작이 용이하다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 일반교내과제(2018-104-034)의 지원에 의해 수행 되었습니다.

REFERENCES

1. Jeong, H. J., "Measurement of the Compressive Force on the Knee Joint Model fabricated by 3D Printing", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 2, pp. 1-7, 2014.
2. Seol, K. S., "Evaluation of Equivalent Mechanical Properties According to Filling Density of PLA Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 10, pp. 36-36, 2017.
3. Baek, M. H., "Correlation of the Microstructural and Mechanical Strength of the Trabecular Bone-The Primary Compression Trabeculae in Human Femoral Head", Journal of The Osteoporosis and Sarcopenia, Vol. 7, No. 2, pp. 84-95, 2009.
4. Cho, J. U., Lee, J. H. and Han, M. S., "An Analysis on Three Point Bending Specimen with Carbon Fiber Plastic Composite", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers,, Vol. 2014, No. 11, pp. 119-119, 2014.
5. Jang, D. I. and Go, J. W., "Flexural Behavior of Glass Fiber Reinforced Plastic Pipes", Journal of The Korea Concrete Institute, Vol. 5, No. 3, pp. 187-194, 1993.
6. Kim, B. C., "Conversion Method of a CT Image to the Mesh Model for Visualization of the Heterogeneity of a Bone", Journal of The Society for Computational Design and Engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 353-360, 2018.
7. Kim, D. H. and Cho, C. D., "Theoretical study on specific stiffness for "HM" Graphite/Epoxy and Silicon/Epoxy", Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 2009, No. 5, pp. 417-420, 2009.
8. Yoon, W. S. and Yoon, Y. J., "The bounds for the elasticity tensor components of cortical bone", J. KIIECT, Vol. 5, No. 1, pp. 52-59, 2012.
9. Choi, S. J. and Kwon, J. D., "AFM Observation of the Fatigue Fracture Surface for Aluminum Alloy", Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 2001, No. 3, pp. 147-154, 2001.
10. Sim, C. Y., Park, J. S. and Kim, D. Y., "Metal 3D Printing Applications in Medical", Conference of KSPE, p. 276, 2017.
11. Lim, K. M., Jung, H. B. and Park, S. J., "3D-Printed Customized Titanium Implant Design and Manufacturing", Conference of KSPE, p. 292, 2018.