

Finite Element Analysis of Wrist Orthosis with 3D Printing

Hyeun-Woo Choi,¹ Inyeong Kang,² Gunwoo Noh,² Anna Seo,³ Jong-Min Lee^{4,*}

¹Department Biomedical Engineering, Kyungpook National University

²School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

³College of Medicine, Gachon University

⁴Department of Radiology, School of Medicine, Kyungpook National University

Received: November 01, 2019. Revised: December 27, 2019. Accepted: December 31, 2019

ABSTRACT

The purpose of this study was to manufacture a wrist brace using a computerized tomography system, clinical design software (MediACE 3D Program), and 3D printer. After acquiring the Dicom file of the upper limb with a computed tomography, the wrist brace was designed using the MediACE 3D Program to create a "stereolithography" file. The designed wrist brace was printed using a 3D printer. To verify the effectiveness of wrist assistive device manufactured by 3D printing technology, the stress distribution of the pressure and orthosis applied to bone and skin is represented by finite element analysis. It is expected that the wrist brace can be manufactured by reinforcing the part where the damage caused by pressure and breakage of the brace frequently occurs with the result of finite element analysis when producing the wrist brace.

Keywords: Wrist brace, Computed tomography(CT), 3D print, FEM(finite element analysis).

I . INTRODUCTION

1986년 처음 발명된 3D 프린터 기술은 신속한 제품 생산이 가능하다는 이점 때문에 최근에는 주얼리, 헬스케어, 취미, 교육, 예술, 방위, 건축 및 산업 디자인들의 분야에도 적용되고 있다. 특히 의료, 패션 등의 분야에서 개인 맞춤에 대한 적용이 가능하기 때문에 시장성이 매우 우수하다.

손목 보조기(Wrist brace)는 골절, 신경 손상, 건초염, 염좌로 인한 처치에 널리 사용되고 있다. 손목에 가해지는 심각한 부상에 대한 지원과 보호를 제공한다. 원위 요골이나 원위 척골 골절에 주로 사용되며, 급성 손상 및 수술 후에 사용한다. 깁스를 자르거나 교체할 필요 없이 환자의 상처를 치료할 수 있다.

원위 요골 골절의 치료로는 부목이나 석고 붕대

등을 이용하는 보존적 치료와 경피적 핀 고정술이나 금속판을 이용한 관혈적 정복 및 고정술과 같은 수술 적 치료가 있다. 원위 요골 골절의 보존적 치료에서 비관혈적 정복 후 고정하는 방법으로는 여러 종류의 도구가 사용되는데 설탕집게부목(sugar-tong splint), 요골거터부목(radial gutter splint), 원주형 깁스(circumferential cast) 등이 대표적이다. 이 중 가장 흔히 사용되는 설탕집게부목은 주관절을 포함하여 고정함으로 전완의 회전을 방지하여 골절부의 정복 소실을 줄이고자 하는 목적이 있으나 주관절을 신전하지 못하는 불편감이 있다.^[1]

3D 프린팅 기술은 몰딩 없이 수정 가능하여 개체를 쉽게 생성할 수 있다. 설계된 3D 모델링 파일을 한번 저장하면 손목 보조기 제작을 쉽게 반복할 수 있고, 보조기 디자인을 위한 자동화된 소프트웨어 프로그램의 사전 프로그래밍 된 보조기 템플릿 디자인을 사용하면, 보조기 제작이 쉽게 이루어지

며 환자 스스로 수정할 수 있다.^[2] 3D 프린팅 기술로 만들어진 보조기는 열가소성 소재를 성형하여 기존의 제조된 보조기에 비해 제조가 쉽고, 재현 어려운 기술과 노력이 적다는 장점이 있다.^[3]

3차원 프린팅 기술은 의료 분야에서 널리 사용되고 있으며,^[4] 3D 프린터를 활용한 손목 보호대 개발,^[5,6] 로봇 손 제작^[7] 및 손목 절단,^[8,9] Computer tomography(CT) 영상과 3차원 프린팅 기술이 환자 맞춤형 모델 제작에 수행 등에 사용 되고 있다.

이에 본 연구에서는 연구자의 손목 보조기를 디자인을 하고 제작하였다. 3D 프린팅 기술로 제작된 손목 보조기의 효용성 검증을 위해 뼈와 피부에 가해지는 압력 및 보조기의 스트레스 분포를 유한요소법으로 분석하고자 하며, 3D 프린터 손목 보조기 디자인 제작에 관한 기초자료로서 제시하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 연구대상

본 연구는 연구자의 왼쪽 상지를 전산화단층촬영(CT)으로 Dicom file을 획득한 후 이 파일로 디자인 프로그램(MediACE3D®, SolidEng Corp.)으로 디자인하여 손목 보조기를 제작하였다.

2. 실험방법

3D 프린팅 기술을 사용하여 손목 보조기를 제작하기 위해 연구자의 왼쪽 상지를 컴퓨터 단층촬영(CT)으로 Fig. 1처럼 촬영하였고, 손목 Dicom 이미지를 Fig. 2와 같이 획득하였다.

손목 보조기 디자인은 해부학적 경계표의 지점의 두 번째 및 다섯 번째 수근관절부위(Metacarpophalangeal joints) 선을 결정하였다. 요골조면(Radial tuberosity) 위치에서 팔꿈치 둘레로 두 번째 선을 결정하였다. 세 번째 선은 엄지 두등근(Thenar muscles)이 나올 수 있도록 하고, 첫 번째 손바닥뼈 관절(Carpometacarpal articulation) 둘레를 관절이 충분히 움직일 수 있도록 선을 결정하였다. 이렇게 디자인 된 손목 보조기의 3D 모델링을 Fig. 3과 같이 설계되었다.

설계된 3D 모델링 파일을 획득한 후, 맞춤형 소프트웨어 (MediACE3D®)로 이 모델링 파일을 업로

드하고 손목 보조기 준비를 위한 "STL"파일을 만들었다.

제작된 손목 보조기를 착용하여 Fig. 4처럼 유한요소해석을 위한 모델을 나타내었다.



Fig. 1. CT scan.



Fig. 2. CT scan Dicom image.

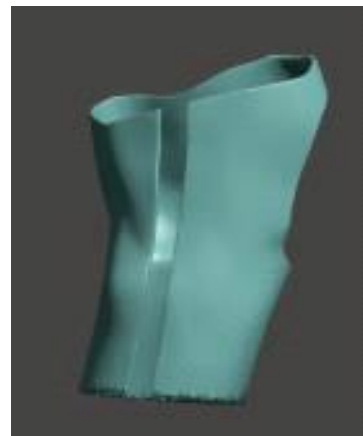


Fig. 3. Wrist brace Design.

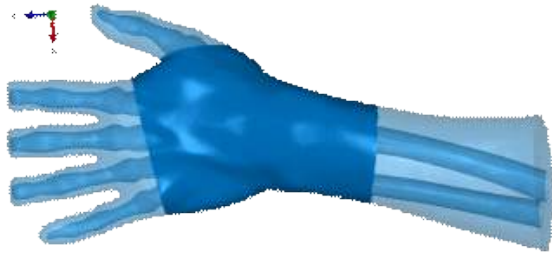


Fig. 4. Model used in finite element analysis.

3. 유한 요소 해석

3.1. 모델링

유한요소해석에 사용된 모델은 조직(Tissue), 뼈(Bone), 보조기(Brace)로 구성되어 있다. 조직의 물성은 초음파로 측정된 영률을 사용하였다.^[10] 뼈는 모든 부분이 이어진 하나의 모델을 사용하였고, 전체에 노뼈(Radius)와 자뼈(Ulna)에 해당하는 물성을 적용하였다. 보조기 모델에는 TPU(Thermoplastic polyurethane) 중에서도 휘기 쉬운(flexible) 형태의 물성을 사용하였다. 모든 모델은 4절점 4면체 선형 요소를 통해 근사 되었고 각 모델의 물성과 요소(element)의 수는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The number of properties and elements applied to the model

Materials	Young's Modulus[MPa]	Poisson's ratio	Number of element
Tissue	0.15	0.45	377395
Bone	7000	0.3	119041
Splint	60	0.4	213972

3.2. 힘 및 경계 조건의 유한요소 해석

보조기를 착용한 채 실생활을 하는 것이 뼈와 보조기에 끼치는 영향을 분석하기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램 ABAQUS를 사용해 해석을 수행하였다. 힘 및 경계 조건은 Fig. 5에 도식화되어 있다. 보조기 고정을 위해 외부 표면 사이에 스프링을 적용하고 하중을 가하였다. 벨크로의 스프링 상

수는 실험을 통해 측정하였다. 실생활에서 손바닥으로 바닥을 짚는 행동이 뼈에 끼치는 영향을 분석하기 위해 손바닥 표면의 일부에 하중을 가하였고 뼈와 조직의 끝단은 모든 축에 대해 고정시켰다.

조직 표면의 일부와 보조기 내부 표면 사이에 Contact 조건으로 마찰 계수 0.3을 적용하였다. 뼈와 조직 사이에는 상대운동을 제한하도록 매듭(Tie) 조건을 적용하였다. 보조기 외부의 표면에는 네 개의 기준점이 있어 벨크로를 부착하는 표면과 기구학적 커플링(Kinematic coupling) 조건을 적용하였다.

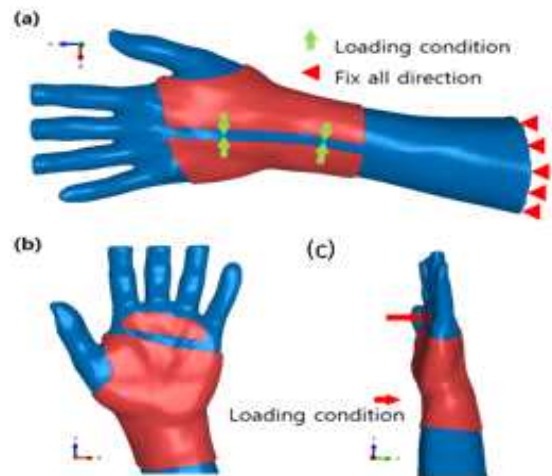


Fig. 5. (a) Boundary condition and load condition 1. (b) Load condition 2 area. (c) Load condition 2 area.

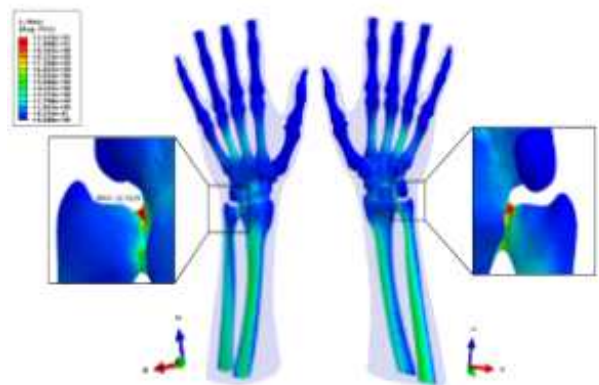


Fig. 6. Equivalent Stress Distribution and Maximum Value of Bone.

III. RESULT

상지 보조기(Short arm brace)를 착용을 했을 때 상지 뼈와 조직과 상지 보조기의 응력 분포를 알아보기 위해 삼차원 유한요소 분석법을 이용하였다. 본 실험 결과는 Table 2와 같은 표로 나타내었다.

Table 2. Short arm brace Maximum stress by site

Location	Maximum Stress
1 Bone	21.2
2 Short arm brace	0.270
3 Tissue x-direction	0.0099
4 Tissue y-direction	0.0168

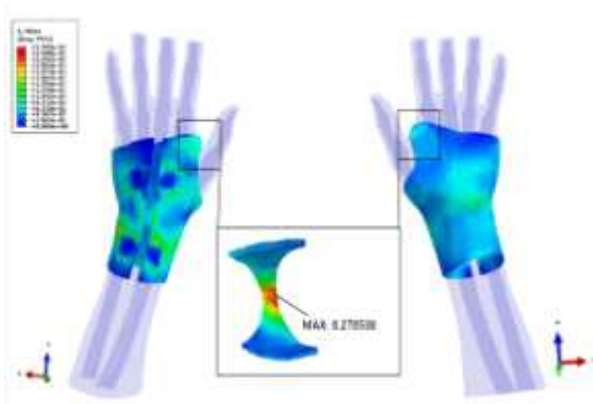


Fig. 7. Equivalent Stress Distribution and Maximum Value of Orthosis.

요·척골인대(Dorsal radioulnar ligament) 부위 뼈(Bone)에서 최대 등가응력이 21.2(Pa, N/m²)로 Fig. 6처럼 그림과 같은 결과가 나타났다. 첫 번째 중수골관절(First through metacarpo-phalangerl joints) 연결 보조기 라인의 등가응력이 0.270으로 Fig. 7처럼 그림과 같이 가장 크게 나타났다.

보조기에서 첫 번째 중수골관절(First through metacarpo-phalangerl joints) 연결 보조기 라인의 응력이 가장 크고, 조직에서는 요골 조면(Ulnar styloid)에서 x- direction 0.0099, y- direction 0.0168로 Fig. 8처럼 그림과 같이 최고 응력을 나타내었다.

뼈와 손목 보조기, 조직의 x, y 방향의 최대응력 수치를 그래프로 Fig. 9에 나타내었다.

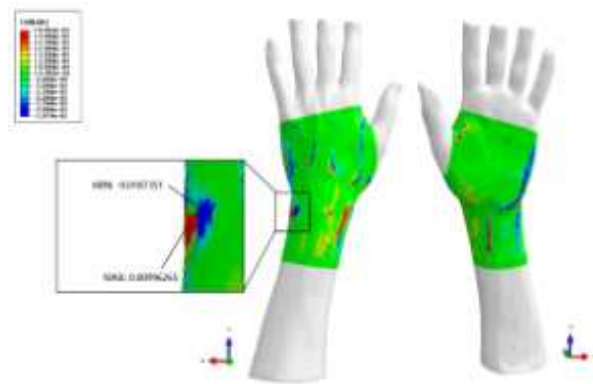


Fig. 8. x-direction Shear Stress Distributions and Maximums on Tissue Surfaces.

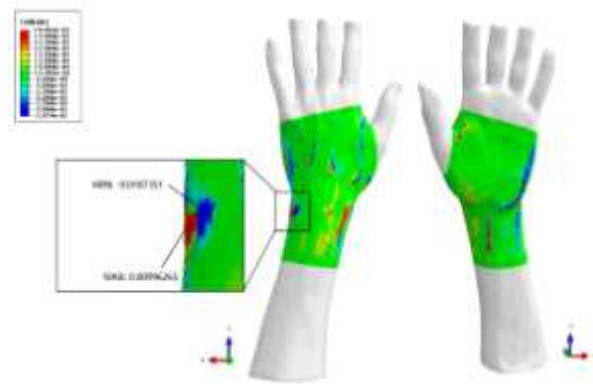


Fig. 9. y-direction Shear Stress Distributions and Maximums on Tissue Surfaces.

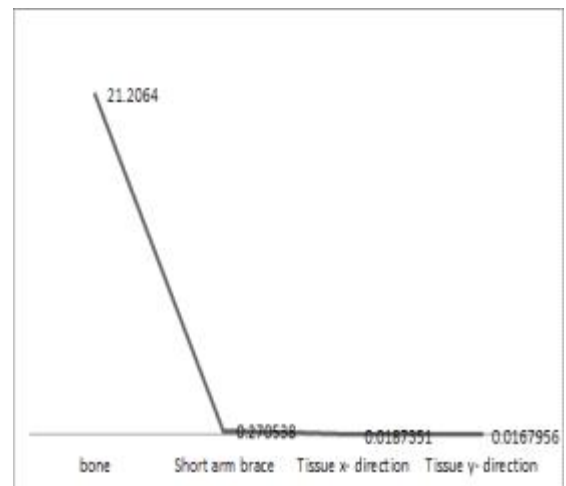


Fig. 9. Short arm brace Maximum stress by site.

IV. DISCUSSION

원위 요골 골절의 치료로는 부목이나 석고 붕대를 이용하는 보존적 치료와 경피적 핀 고정술이나 금속판을 이용한 관혈적 정복 및 고정술과 같은 수술적 치료가 있다.^[11] 손목 염좌는 손목 관절을 지지하는 인대나 근육이 외력, 충격, 사고로 인하여 늘어나거나 찢어지는 경우를 말한다. 주로 손목을 빼거나 손목 인대가 늘어난 것을 이야기한다. 증상으로는 부종, 열감, 염증에 의한 발적과 통증이다. 피하출혈 및 관절의 경직 등 운동 저하가 올 수가 있다. 물건을 들 때, 손을 짚을 때 동작이 어려운 부하 능력이 감소할 수도 있다. 손목 염좌가 생겼을 때는 안정을 취하고 손목 사용을 줄여야 한다. 보호대나 압박붕대로 환부를 고정시켜 주어야 한다.

손목 염좌가 잦은 부위는 월상유두인대(lunate-capitate ligament), 요측측부인대(radial collateral ligament), 척골-삼각골, 요골-월상골, 요골-주상골인대가 있다.

Volar RadioUlna Ligament(VRUL), Ulnar Triquetral Ligament(UTL) 세 가지 인대를 삼각섬유연골(TFCC) 복합체를 이룬다. 삼각섬유연골(TFCC) 복합체는 만성 통증과 부분 파열, 척골충돌증후군 손상이 있다. 장요측수근신근(ECRI), 단요측수근신근(ECRB) 상완요골근(ECU)의 근육의 긴장과 건의 마찰에 의해 인대 염증이 생길 수도 있다.

손목 염좌는 근육의 기능과 수근관을 지나는 신경과도 연관되어 있기에 보존적 치료에서의 보호대 착용이 매우 중요하다. 골절이나 신경 손상의 문제가 아니더라도 손목 염좌의 질병이 많음으로 손목 보조기의 착용으로 인한 환자의 치료 질을 높일 수 있기를 바란다.

손목 보조기를 3D 프린터를 이용하여 제작 시 뼈와, 인대 및 상지 보조기 자체에 대한 최대 응력 부위를 알고 제작한다면 임상적으로 환자에게 양질의 보조기를 제작하고 보조기 파손으로 인한 불편함을 줄여 줄 수 있을 것이다.

V. CONCLUSION

본 연구는 전산화 단층촬영기(CT)와 자동화된 설

계 소프트웨어(MediACE3D), 3D 프린팅 기술로 제작된 손목 보조기(Wrist brace)의 효용성 검증을 위해 뼈와 피부에 가해지는 압력 및 보조기의 스트레스 분포를 유한요소법(FEM)으로 해석하였다.

향후 3D프린터를 이용한 손목 보조기를 제작 시 뼈와 피부가 압력에 의한 손상과 보조기의 파손이 자주 일어나는 부위를 보강할 수 있을 것이며, 석고붕대 고정술 및 금속 부목 고정의 보존적 치료를 대체할 수 있을 것이라 기대된다.

Reference

- [1] J. H. Lee, S. H. Hong, Y. J. Kim, J. H. Back, J. S. Lee, "Effect of Different Splints on Displacement after Closed Reduction of the Distal Radius Fractures: A Comparison of Short Arm Double Splint and Sugar-Tong Splint," J. Korean Society for Surgery of the Hand, Vol. 20, No 3, pp. 104-109, 2015.
- [2] Y. H. Cha, K. H. Lee, H. J. Ryu, I. W. Joo, A. Seo, D. H. Kim, S. J. Kim, "Ankle-foot orthosis made by 3D printing technique and automated design software," Applied bionics and biomechanics, Vol. 2017, pp. 1-6, 2017.
- [3] C. E. Dombroski, M. E. Balsdon, A. Froats, "The use of low cost 3D scanning and printing tool in the manufacture of custom-made foot orthoses: a preliminary study," BMC Research Notes, Vol. 10, No. 7, pp. 1-4, 2014.
- [4] F. Rengier, A. Mehndiratta, H. T. K. Von, C. M. Zechmann, R. Unterhinninghofen, H. U. Kauczor, F. L. Giesel, "3D printing based on imaging data: review of medical applications," International journal of computer assisted radiology and surgery, Vol. 5, No. 4, pp. 335-341, 2010.
- [5] S. J. Kim, S. J. Kim, Y. H. Cha, K. H. Lee, J. Y. Kwon, "Effect of personalized wrist orthosis for wrist pain with three-dimensional scanning and printing technique: A preliminary, randomized, controlled, open-label study," Prosthetics and orthotics international, Vol. 42, No. 6, pp. 636-643. 2018.
- [6] D. Palousek, J. Rosicky, D. Koutny, P. Stoklásek, T. Navrat, "Pilot study of the wrist orthosis design process," Rapid Prototyping Journal, Vol. 20, No. 1,

pp. 27-32, 2014.

- [7] C. S. Lovchik, M. A. Diftler, "The robonaut hand: A dexterous robot hand for space," In Proceedings 1999 IEEE international conference on robotics and automation, Vol. 2, No. 99, pp. 907-912, 1999.
- [8] K. F. Gretschi, H. D. Lather, K. V. Peddada, C. R. Deeken, L. B. Wall, C. A. Goldfarb, "Development of novel 3D-printed robotic prosthetic for transradial amputees," *Prosthetics and orthotics international*, Vol. 40, No. 3, pp. 400-403, 2016.
- [9] K. S. Tanaka, N. Lightdale-Miric, "Advances in 3D-printed pediatric prostheses for upper extremity differences," *JBJS*, Vol. 98, No. 15, pp. 1320-1326, 2016.
- [10] E. J. Chen, J. Novakofski, W. K. Jenkins, W. D. O'Brien, "Young's modulus measurements of soft tissues with application to elasticity imaging," *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 43, No. 1, pp. 191-194. 1996.
- [11] B. S. Wook, K. H. Yoon, S. B. Yong, A. Y. Ju., "Treatment with external fixation device or K-wire reinforced external fixation device for distal radius fracture," *Journal of the Korean Fracture Society*, Vol. 18, No. 3, pp. 311-316. 2005.

3D 프린트를 통해 제작된 손목 보조기의 유한요소해석

최현우,¹ 강인영,² 노건우,² 서안나,³ 이종민^{4,*}

¹경북대학교대학원 의용생체공학과

²경북대학교 기계공학부

³가천대학교 의과학과

⁴경북대학교 의학전문대학원 영상의학교실

요 약

임상에서 사용하는 진단 검사 장치인 전산화 단층촬영기와 자동화된 설계 소프트웨어(MediACE 3D Program), 3D 프린터로 손목 보조기를 제작하고자 하였다. 전산화단층촬영기로 상지의 Dicom 파일을 획득한 후 MediACE 3D Program을 통해 손목 보조기를 디자인하여 "STL(stereolithography)"파일을 만들었고, 디자인된 손목 보조기는 3D 프린터를 이용하여 인쇄하였다. 3D 프린팅 기술로 제작된 손목보조기의 효용성 검증을 위해 뼈와 피부에 가해지는 압력 및 보조기의 스트레스 분포를 유한요소해석으로 나타내었다. 손목 보조기를 제작할 때 유한요소해석의 결과를 가지고 뼈와 피부가 압력에 의한 손상과 보조기의 파손이 자주 일어나는 부위를 보강하여 손목 보조기를 제작할 수 있을 것이라고 기대된다.

중심단어: 손목보조기, 전산화단층촬영기, 3D 프린터, 유한요소해석.

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	최현우	경북대학교대학원 의용생체공학과	대학원생
(공동저자)	강인영	경북대학교 기계공학부	연구원
	노건우	경북대학교 기계공학부	교수
	서안나	가천대학교 의과학과	교수
(교신저자)	이종민	경북대학교 의학전문대학원 영상의학교실	교수