지르코니아 및 티타늄 임플란트를 사용한 지지골 및 임플란트 유지 수복물의 응력 분포 비교: 3차원 유한 요소 분석

홍민호

부산가톨릭대학교 보건과학대학 치기공학과

Comparison of stress distribution in bone and implant-supported dental prosthesis with zirconia and titanium implants: a 3-dimensional finite element analysis

Min-Ho Hong

Department of Dental Laboratory Science, College of Health Science, Catholic University of Pusan, Busan, Korea

Article Info

Received November 4, 2020

Revised December 1, 2020

Accepted December 16, 2020

Corresponding Author

Min-Ho Hong

Department of Dental Laboratory Science,
College of Health Science, Catholic University of Pusan, 57 Oryundae-ro, Geumjeong-gu, Busan 46252, Korea

E-mail: mhhong@cup.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0002-6456-2200>

Purpose: Zirconia is differentiated from other ceramics because of its high resistance to corrosion and wear, excellent flexural strength (900~1400 MPa), and high hardness. Dental zirconia with proven mechanical/biological stability is suitable for the manufacture of implants. However, there are limited in vivo studies evaluating stress distribution in zirconia compared with that in titanium implants and studies analyzing finite elements. This study was conducted to evaluate the stress distribution of the supporting bone surrounding zirconia and titanium implants using the finite element analysis method.

Methods: For finite element analysis, a single implant-supported restoration was designed. Using a universal analysis program, eight occlusal points were set in the direction of the occlusal long axis. The occlusal load was simulated at 700 N.

Results: The zirconia implant (47.7 MPa) von Mises stress decreased by 5.3% in the upper cortical bone compared with the titanium implant (50.2 MPa) von Mises stress. Similarly, the zirconia implant (20.8 MPa) von Mises stress decreased by almost 4% in the cancellous bone compared with the titanium implant (21.7 MPa) von Mises stress. The principal stress in the cortical and cancellous bone exhibited a similar propensity to von Mises stress.

Conclusion: In the supporting bone, the zirconia implant is able to reduce bone resorption caused by mechanically transferred stress. It is believed that the zirconia implant can be a potential substitute for the titanium implant by reinforcing aesthetic characteristics and improving stress distribution.

Key Words: Bite force, Dental Implants, Finite element analysis, Implant-supported dental prosthesis

INTRODUCTION

치과용 임플란트 제조에 이상적인 재료는 생체 적합성, 적절한 경도, 내식성, 내마모성 및 우수한 파괴 강도를 가져야 한다. 오늘날 대부분의 치과용 임플란트는 티타늄 합금으로 제작되며 그 특성은 우수한 생체 적합성 및 장기적인 임상 성공으로 간주된다[1]. 하지만 티타늄의 뛰어난 특성에도 불구하고 알러지 반응(과민성 통증, 발진, 피로 및 불쾌

감 등)이 종종 보고되고 있다. 환자가 알러지 반응에 노출되면 면역체계가 과민하게 반응할 수 있으며 이는 임플란트 실패의 원인이 된다(예상 유병률 0.6%) [2].

최근 치과 산업에서는 금속을 활용하지 않는 보철물의 수요가 증가하고 있다[3]. 치과 임플란트 산업에서도 티타늄 임플란트의 대안으로 지르코니아 임플란트가 소개되고 있다[4]. Yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal (Y-TZP)은 높은 내식성 및 내마모성, 우수

한 굽힘 강도(900~1,400 MPa) 및 높은 경도로 인해 다른 세라믹과 차별화된다[3,5]. 이러한 Y-TZP의 우수하고 안정적인 특성은 치과용 임플란트 제조에 적합한 소재라는 것을 말해준다. Y-TZP의 고유한 특성은 정방정계의 상(tetragonal phase)에서 단사정의 상(monoclinic phase)으로 상 변형이 생길 때, 상 변형과 함께 3%~5%의 부피 확장이 일어나 균열 전파를 제한하는 작용을 한다[6].

지르코니아 임플란트를 적용한 동물실험의 연구 결과에 따르면 지르코니아 임플란트가 골유착에 성공한 것으로 보고되었다[7,8]. 이는 평균적으로 지지골과 임플란트 접촉이 66% 이상이고 티타늄 임플란트와 유사한 골유착의 특성을 나타내는 것으로 보고되고 있다[7,8]. 최근의 체계적인 동물 실험에서는 티타늄과 지르코니아 임플란트 간의 토크 제거값에 통계적으로 유의한 차이가 없다고 보고하였다[9]. 또한 지르코니아와 접촉하는 연조직 반응은 티타늄과 비교하여 유사하거나 더 우수한 치유 반응 결과를 보여주었다[10,11].

티타늄 임플란트의 단점 중 하나로 환자의 치은 점막이 얇거나 퇴축될 경우 티타늄 임플란트 가지는 고유의 색상으로 인해 심미성이 결여되는 문제가 발생되고 있다. 하지만 최근 보고된 전향적 임상 시험에서 최대 5년 동안 추적조사를 시행한 지르코니아 임플란트가 티타늄 임플란트에 필적하는 임플란트 주변 조직과의 심미성을 유지하는 만족스러운 결과를 나타냈다[12-15]. 지르코니아 임플란트는 티타늄 임플란트와 유사한 생존율을 달성하여 잔존 치아가 존재하는 부분 무치악 환자에게서 우수한 연조직 및 경조직 안정성을 보여주었다[16,17].

치과용 티타늄 임플란트에 비해 지르코니아 임플란트의 하중 반응과 응력 분포 패턴을 평가하는 연구는 여전히 부족하다. 유한 요소 분석(finite element analysis, FEA) 방법은 임플란트와 주변 지지골

에 대한 응력의 영향을 예측하는 데 유용하게 활용되는 분석 도구이다[18,19]. 구강 내에서 발생하는 하중에 대한 임플란트를 지지하는 주변 지지골의 응력 분포와 크기를 예측하기 위한 실험 분석방법으로 FEA가 많이 이용되고 있다.

FEA는 임플란트 시스템 내의 무한개의 점들을 유한개의 이산화된(discretized) 위치의 절점(node)과 이들을 조직화된 관계를 맺어주는 요소(element)로 구성된다. Node의 변위를 미지수로 하는 수식적 계산을 통해 각 node에서의 변위값을 계산해서 3차원 구조물의 임의의 점에서의 변형률과 응력 등의 값을 산술적인 근사화를 통해 데이터를 구하는 방법이다. FEA는 최적화된 구조물의 묘사와 정확한 산술적 계산 방법이 적용된다면 실험과 관련 없는 외적 요인을 배제할 수 있다[20,21]. 또한 FEA를 활용한 구조 해석은 구조물의 하중 적용 전과 후의 상태를 비교할 수 있다. 게다가 해석 대상의 3차원 모형의 안정성을 비교할 수 있다는 이점을 가지고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 FEA를 사용하여 지르코니아와 티타늄 임플란트 주위 지지골의 응력 분포를 평가하는 것이다.

MATERIALS AND METHODS

1. 유한 요소 모델

두 가지 임플란트 소재(지르코니아 및 티타늄) 적용에 따른 임플란트 주위 지지골에 발생하는 응력 분산과 크기의 경향성을 알아보기 위해 Fig. 1과 같이 단관 구조 임플란트 시스템(CATIA; Dassault Systemes, Velizy-Villacoublay, France)을 구축하였다. 상부 보철물은 자연치 스캔 데이터를 CAD (computer-aided design) 프로그램에서 편집하

Figure 1. Three-dimensional analysis structure; abutment, implant, and screw in the bone. (A) Zir-model, (B) Ti-model. Zir: zirconia, Ti: titanium.

여 설계하였다. 또한 단관 임플란트 시스템의 설계는 하악 대구치가 위치할 지지골을 설계하였다. 단관 임플란트 시스템의 구조물은 임플란트(implant), 지대주(abutment), 지대주 나사(abutment screw), 피질골(cortical bone), 그리고 해면골(cancellous bone)로 구성하였다.

구성 요소별 결합 관계는 지대주와 임플란트, 임플란트와 피질골, 피질골과 해면골은 완전히 결합된 것으로 가정하고 임플란트 재질에 따른 내부 응력 분포를 관찰하기 위하여 임상과 유사한 조건을 묘사하기 위해 지대주 나사 조임 토크(tightening torque)는 32 N을 적용하였으며 지대주 나사에 의해 지대주와 임플란트가 결합되도록 설계하였다. 또한, 연구에 사용된 모델은 임플란트 소재를 달리하여 Zir-model 그리고 Ti-model로 분류하였다.

단관 임플란트 시스템에서 internal type 직경 5 mm, 길이 11.5 mm의 임플란트(AnyOne; MEGAGEN, Daegu, Korea)를 사용하였다. 지대주는(ZrGen abutment; MEGAGEN) 직경 4.5 mm, cuff 1.5 mm, post-height 4.5 mm의 구조를 가지는 기성 지대주를 사용하였다. 지대주 나사의 직경은 1.8 mm이고 지대주 나사 머리에서 나사선까지의 거리는 5.1 mm이다. 본 연구에서 사용된 지대주와 지대주 나사 그리고 임플란트는 실제로 제작된 Ti-6Al-4V 합금의 물성을 해석에 사용하였다. Table 1 [19,22]에 연구에 사용된 물성치를 나타내었다. 피질골은 해면골 외각을 1.4~3.7 mm 정도의 두께로 감싸는 형상으로 설계하였다.

단관 구조 임플란트 시스템 설계 후 메쉬(mesh) 이산화 과정의 기하학적 오류 특성을 최소화하기 위해 NX 10 Pro-Post에서 mean size 0.5 mm 크기의 mesh를 설정하였다. Tetra 10 node 약 20만 개로 구성된 단관 임플란트 시스템의 해석 모델에 하중과 경계조건을 적용하여 범용성 해석 프로그램으로(Abaqus; Dassault Systemes, Waltham, MA, USA) 분석하였다.

2. 경계 및 하중 조건

임플란트와 피질골, 임플란트와 지대주 나사는 나사선으로 결합되어 있고 임플란트와 지대주도 지대주 조임 토크로 단단하게 결합되어 있어 완전결합으로 가정하였다. 단 지대주 나사 머리의 외측과 지대주의 내측면은 마찰 계수 0.3를 가지는 contact 조건을 사용하였다. 이러한 경계조건을 Fig. 2에 나타내었다. 또한 하악골 양 측면은 X, Y, Z 변위 이동을 막기 위해 완전 구속시켰다.

본 연구에서의 하중 형태는 임상적으로 가장 많이 적용되는 교합 하중을 모방하여 수직 하중을 적용시켰다. 하중의 크기는 최대 하중에 해당하는 700 N의 하중을 8개의 교합점으로 나누어 균일하게 분산시켰다. 교합면 점은 각 협측 교두의 외부 경사 지점에 3점, 각 협측 교두의 내부 경사에 3점, 각 설측 교두의 내부 경사에 2점으로 위치시켰다 [23].

선행 연구[19,21-23]와 유사하게 해석에 적용된 구조물의 단순화를 위해 구조물의 기계적 특성이 세 가지 방향으로 모두 동일하다는 등방성(isotropy)과 모든 위치에서 균일하다는 균질성(homogeneity)을 가

Table 1. Mechanical properties of all simulated materials

Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Reference
Titanium implant	110	0.35	[22]
Zirconia implant	210	0.30	[19]
Abutment screw	110	0.35	[22]
Titanium abutment	110	0.5	[22]
Zirconia crown	210	0.26	[19]
Cortical bone	13.7	0.30	[22]
Cancellous bone	1.37	0.30	[22]

Figure 2. Contact and boundary condition of model (A) and application method of loading condition on the zirconia crown (B).

정하였다. 임플란트 재료의 소성(plasticity)은 고려하지 않고 선형 탄성(linear elasticity)을 가정하였다.

RESULTS

두 가지 임플란트 소재(지르코니아 및 티타늄) 적용에 따른 피질골과 해면골의 폰 미세스 응력(von Mises stress, VMS)을 Fig. 3에 나타내었다. VMS의 가장 높은 값은 임플란트를 주변 피질골 내측의 나사선 부분에서 나타났다. 또한 해면골의 가장 높은 VMS값은 피질골과 해면골의 경계 부분에서 보였다. 피질골에서 지르코니아 임플란트(47.7 MPa)는 티타늄 임플란트(50.2 MPa)보다 5.3% 정도로 상부 피질골 부위에서 감소하였지만 차이는 미미한 것으로 나타났다. 해면골 역시 지르코니아 임플란트(20.8 MPa)는 티타늄 임플란트(21.7 MPa)보다 4% 정도 감소한 것으로 나타났다.

Fig. 4는 두 가지 임플란트 소재 적용에 따른 피질골과 해면골의 주응력 결과를 보여준다. 피질골의 경우 임플란트 나사와 마주치며 해면골에 접하는 부분에서 최대/최소 주응력(principal stress)은 각각 상반되는 부분에서 나타났고 해면골은 피질골과 결합하는 나사선에서 최대와 최소 주응력은 유사한 부분에서 나타났다. Fig. 4에서 피질골의 최대/최소 주응력은 VMS와 유사한 경향성을 보였다.

DISCUSSION

본 연구에서는 3차원 FEA를 사용하여 지르코니아 임플란트 적용에 대한 지지골의 안정성을 평가하였다. FEA를 사용하면 복잡한 구조와

재료의 변수를 처리하여 임상 현실에서 예상되는 생체 역학적 동작을 정성적으로 계산할 수 있다. 본 연구에서 지르코니아 임플란트는 기존에 활용되는 티타늄 임플란트와 유사한 지지골 응력 분산과 크기를 보여주었다.

FEA의 정확도를 높이기 위해 현재 연구에서는 시뮬레이션 모델의 세부사항과 물리적·기계적 특성을 검증된 수치값을 바탕으로 진행하였다. 그럼에도 불구하고 FEA를 이용한 구조물 설계와 역학적 분석값은 실제 환자의 구강 내 모든 역학적 조건과 생화학적 내용들을 포함하고 있지는 않다[19]. 하지만 FEA 해석을 바탕으로 구조물의 약점이나 안정성 및 유효성 등을 사전에 예측하여 임플란트 시스템의 설계를 개선하는 데 많은 도움을 줄 수 있을 뿐만 아니라 실험실 단위에서 진행하는 실험이 불가능한 경우에도 다양한 변수 적용을 통해 결과를 예측하는 데 도움이 될 수 있다[20,21].

임플란트 시스템의 장기적 성공을 위해서는 적용된 교합 하중이 균일하게 분산되어야 하고 지지골에 생성되는 응력을 최소화해야 한다 [18,19,21]. 본 연구에서는 기존의 연구와 차별성을 부여하기 위해 중심 교합위(centric occlusal position) 상태를 묘사하기 위해 8개의 교합점을 적용하였다. 본 연구에 나타난 VMS값은 선행 연구보다 월등히 높은 하중 적용으로 피질골과 해면골에서 높은 VMS를 기록한 것으로 생각된다. 또한 본 연구의 결과에서 응력값은 두 소재 간의 차이가 유사하지만 분산되는 응력 분포가 다른 것을 시사한다[22,24].

본 연구에서는 지르코니아 임플란트를 적용한 임플란트 시스템은 티타늄 임플란트 시스템보다 높은 탄성 계수로 내부 구조 내에서 더 많은 응력을 분산시켰다. 이는 지르코니아의 탄성 계수가 임플란트의 높은 내부 VMS 그리고 낮은 등가 변형에 반영되어 구조물의 변위를 동등하

Figure 3. Equivalent stress distribution for each implant materials under vertical loading. (A) Zir-model, (B) Ti-model. Zir: zirconia, Ti: titanium.

Figure 4. Results of principal stress with regard to the vertical load in finite element model in cross-section view. (A) Zir-model, (B) Ti-model. Zir: zirconia, Ti: titanium.

게 낮추는 역할을 한 것으로 간주된다[21,24].

본 연구에서 지르코니아 임플란트의 적용은 잠재적으로 임상 결과를 개선하고 특히 지지골 흡수가 더 쉽게 발생하는 지지골과 임플란트 경계에서 주변 지지골의 손실을 줄일 수 있음을 보여주었다(Fig. 3, 4). 최근 FEA 임플란트 시스템의 연구에서는 지르코니아가 티타늄에 비해 더 높은 응력을 나타내는 해석 결과를 지적했다[23]. 하지만 재료의 응력과 임플란트에 전달되는 응력 사이에 직접적인 관계가 있을 수 있으며 티타늄보다 더욱 단단한 지르코니아 임플란트가 더 많은 응력을 흡수할 수 있다고 제안할 수 있다. 이는 본 연구에서 티타늄 임플란트보다 지르코니아 임플란트의 임플란트 주변 지지골에 응력이 적은 이유가 추가적으로 설명된다[25].

향후 지르코니아 임플란트가 티타늄 임플란트에 대한 좋은 임상 대안임을 증명하기 위해서는 많은 환자 케이스를 대상으로 접근한 전향적 임상연구가 필요할 것이다. 또한 연구설계 시 결정된 지지골의 등방성, 균질성은 생체와 다소 차이가 발생할 수 있으며 구강 내에서 실제 교합력은 동적 하중이기 때문에 정적 하중에 비해서 하중의 지속 크기와 시간에 차이가 발생할 수 있으므로 하중의 적용 방법, 구조물의 구

성 등의 지속적인 연구가 필요하다.

CONCLUSIONS

본 연구에서는 FEA를 사용하여 지르코니아와 티타늄 임플란트 주위 지지골의 응력 분포를 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 지르코니아 소재의 강성과 본질적으로 높은 탄성 계수로 인해 지르코니아 임플란트는 티타늄 임플란트보다 임플란트 주변 지지골(피질골 및 해면골) 응력 분포 측면에서 더 유리한 응력 분산을 나타낸다.
2. 지르코니아 임플란트는 주변 지지골에 기계적으로 전달된 응력에 의해 발생하는 골흡수를 줄일 수 있는 특성을 나타낼 수 있다. 지르코니아 임플란트는 지르코니아 고유의 색상으로 심미적 특성뿐만 아니라 개선된 응력 분포를 나타내어 티타늄 임플란트의 잠재적인 대체 재료가 될 수 있다고 제안된다.

CONFLICT OF INTEREST

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

ORCID

Min-Ho Hong, <https://orcid.org/0000-0002-6456-2200>

REFERENCES

1. Khorasani AM, Goldberg M, Doeven EH, Littlefair G. Titanium in biomedical applications- properties and fabrication: a review. *J Biomater Tissue Eng.* 2015;5:593-619.
2. Siddiqi A, Payne AGT, De Silva RK, Duncan WJ. Titanium allergy: could it affect dental implant integration? *Clin Oral Implants Res.* 2011;22:673-680.
3. Gautam C, Joyner J, Gautam A, Rao J, Vajtai R. Zirconia based dental ceramics: structure, mechanical properties, biocompatibility and applications. *Dalton Trans.* 2016;45:19194-19215.
4. Pjetursson BE, Zarauz C, Strasding M, Sailer I, Zwahlen M, Zembic A. A systematic review of the influence of the implant-abutment connection on the clinical outcomes of ceramic and metal implant abutments supporting fixed implant reconstructions. *Clin Oral Implants Res.* 2018;29 Suppl 18:160-183.
5. Denry I, Kelly JR. State of the art of zirconia for dental applications. *Dent Mater.* 2008;24:299-307.
6. Kelly JR, Denry I. Stabilized zirconia as a structural ceramic: an overview. *Dent Mater.* 2008;24:289-298.
7. Akagawa Y, Ichikawa Y, Nikai H, Tsuru H. Interface histology of unloaded and early loaded partially stabilized zirconia endosseous implant in initial bone healing. *J Prosthet Dent.* 1993;69:599-604.
8. Osman RB, Swain MV. A critical review of dental implant materials with an emphasis on titanium versus zirconia. *Materials (Basel).* 2015;8:932-958.
9. Manzano G, Herrero LR, Montero J. Comparison of clinical performance of zirconia implants and titanium implants in animal models: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2014;29:311-320.
10. Delgado-Ruiz RA, Gomez Moreno G, Aguilar-Salvatierra A, Markovic A, Mate-Sánchez JE, Calvo-Guirado JL. Human fetal osteoblast behavior on zirconia dental implants and zirconia disks with microstructured surfaces. An experimental in vitro study. *Clin Oral Implants Res.* 2016;27:e144-e153.
11. Degidi M, Artese L, Scarano A, Perrotti V, Gehrke P, Piatelli A. Inflammatory infiltrate, microvessel density, nitric oxide synthase expression, vascular endothelial growth factor expression, and proliferative activity in peri-implant soft tissues around titanium and zirconium oxide healing caps. *J Periodontol.* 2006;77:73-80.
12. Borgonovo AE, Corrocher G, Dolci M, Censi R, Vavassori V, Maiorana C. Clinical evaluation of zirconium dental implants placed in esthetic areas: a case series study. *Eur J Esthet Dent.* 2013;8:532-545.
13. Borgonovo AE, Censi R, Vavassori V, Dolci M, Calvo-Guirado JL, Delgado Ruiz RA, et al. Evaluation of the success criteria for zirconia dental implants: a four-year clinical and radiological study. *Int J Dent.* 2013;2013:463073.
14. Cionca N, Müller N, Mombelli A. Two-piece zirconia implants supporting all-ceramic crowns: a prospective clinical study. *Clin Oral Implants Res.* 2015;26:413-418.
15. Grassi FR, Capogreco M, Consonni D, Bilardi G, Buti J, Kalemaj Z. Immediate occlusal loading of one-piece zirconia implants: five-year radiographic and clinical evaluation. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2015;30:671-680.
16. Brüll F, van Winkelhoff AJ, Cune MS. Zirconia dental implants: a clinical, radiographic, and microbiologic evaluation up to 3 years. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2014;29:914-920.
17. Borgonovo AE, Censi R, Vavassori V, Arnaboldi O, Maiorana C, Re D. Zirconia implants in esthetic areas: 4-year follow-up evaluation study. *Int J Dent.* 2015;2015:415029.
18. Kohal RJ, Papavasiliou G, Kamposiora P, Tripodakis A, Strub JR. Three-dimensional computerized stress analysis of commercially pure titanium and yttrium-partially stabilized zirconia implants. *Int J Prosthodont.* 2002;15:189-194.
19. Çağlar A, Bal BT, Karakoca S, Aydın C, Yılmaz H, Sarısoy S. Three-dimensional finite element analysis of titanium and yttrium-stabilized zirconium dioxide abutments and implants. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2011;26:961-969.
20. Alkan I, Sertgöz A, Ekici B. Influence of occlusal forces on

- stress distribution in preloaded dental implant screws. *J Prosthet Dent.* 2004;91:319-325.
21. Jörn D, Kohorst P, Besdo S, Rücker M, Stiesch M, Borchers L. Influence of lubricant on screw preload and stresses in a finite element model for a dental implant. *J Prosthet Dent.* 2014;112:340-348.
  22. Verri FR, Santiago Júnior JF, Almeida DA, Verri AC, Batista VE, Lemos CA, et al. Three-dimensional finite element analysis of anterior single implant-supported prostheses with different bone anchorages. *Scientific World J.* 2015;2015:321528.
  23. Ha SR, Kim SH, Lee JB, Han JS, Yeo IS, Yoo SH, et al. Biomechanical three-dimensional finite element analysis of monolithic zirconia crown with different cement thickness. *Ceram Int.* 2016;42:14928-14936.
  24. Marcián P, Wolff J, Horáčková L, Kaiser J, Zikmund T, Borák L. Micro finite element analysis of dental implants under different loading conditions. *Comput Biol Med.* 2018;96:157-165.
  25. Pérez-Pevida E, Brizuela-Velasco A, Chávarri-Prado D, Jiménez-Garrudo A, Sánchez-Lasheras F, Solaberrieta-Méndez E, et al. Biomechanical consequences of the elastic properties of dental implant alloys on the supporting bone: finite element analysis. *Biomed Res Int.* 2016;2016:1850401.