

티타늄 합금, 지르코니아, 폴리에테르에테르케톤 지대주 재질에 따른 임플란트 구성요소의 응력분포: 유한 요소 분석을 통한 비교 연구

김성민

진주보건대학교 치기공과

Stress distribution in implant abutment components made of titanium alloy, zirconia, and polyetheretherketone: a comparative study using finite element analysis

Sung-Min Kim

Department of Dental Laboratory Technology, Jinju Health College, Jinju, Korea

Article Info

Received May 20, 2024

Revised June 13, 2024

Accepted June 16, 2024

Purpose: This study aimed to analyze the stress distribution and deformation in implant abutments made from titanium (Ti-6Al-4V), zirconia, and polyetheretherketone (PEEK), including their screws and fixtures, under various loading conditions using finite element analysis (FEA).

Methods: Three-dimensional models of the mandible with implant abutments were created using Siemens NX software (NX10.0.0.24, Siemens). FEA was conducted using Abaqus to simulate occlusal loads and assess stress distribution and deformation. Material properties such as Young's modulus and Poisson's ratio were assigned to each component based on literature and experimental data.

Results: The FEA results revealed distinct stress distribution patterns among the materials. Titanium alloy abutments exhibited the highest stress resistance and the most uniform stress distribution, making them highly suitable for long-term stability. Zirconia abutments showed strong mechanical properties with higher stress concentration, indicating potential vulnerability to fracture despite their aesthetic advantages. PEEK abutments demonstrated the least stress resistance and higher deformation compared to other abutment materials, but offered superior shock absorption, though they posed a higher risk of mechanical failure under high load conditions.

Conclusion: The study emphasizes the importance of selecting appropriate materials for dental implants. Titanium offers durability and uniform stress distribution, making it highly suitable for long-term stability. Zirconia provides aesthetic benefits but has a higher risk of fracture compared to titanium. PEEK excels in shock absorption but has a higher risk of mechanical failure compared to both titanium and zirconia. These insights can guide improved implant designs and material choices for various clinical needs.

Key Words: Dental abutment, Dental implants, Finite element analysis, Mechanical stress

Corresponding Author

Sung-Min Kim

Department of Dental Laboratory Technology, Jinju Health College, 51 Uibyeong-ro, Jinju 52655, Korea

E-mail: sm.kim81@hanmail.net

https://orcid.org/0000-0003-4984-7213

INTRODUCTION

치과 임플란트 기술의 발전은 치아 상실 환자의 삶의 질을 획기적으로 향상시키고 있다. 특히 다양한 신소재의 도입과 첨단 설계 기술의 발전은 임플란트의 기능성과 내구성을 크게 개선하였다 [1]. 치과 임플란트는 지대주, 나사, 매식체, 상부보철물로 구성되며, 각 구성 요소별로 선택된 재료는 고유의 물리적 특성을 가지고 있다. 이러한 재료의 선택은 임플란트의 구조적, 기능적 요구를 충족시키는데 특히 지대주와 상부보철물 제작에 사용되는 재료들은 심미적 요구를 충족시키는데 중요한 역할을 한다.

현재 임플란트 지대주로 제작되는 재료로는 티타늄 합금(Ti-6Al-4V), 지르코니아, 그리고 폴리에테르에테르케톤(polyetheretherketone, PEEK) 등이 있다. 티타늄 합금은 통상적으로 사용되며 생체적합성, 기계적 강도, 내식성 등이 우수하고 가공하기가 쉽지만, 치은이 얇은 환자에게 적용하거나 사용 동안 치은 퇴축이 진행된 경우에는 티타늄 합금 특유의 회백색이 노출되어 심미성이 떨어질 수 있고 소수의 환자에서는 알레르기 반응이 나타나는 경우도 있다[2,3]. 지르코니아는 티타늄에 비해 높은 기계적 강도와 우수한 내구성을 가지지만, 인성(toughness)이 낮아 충격이나 굽힘하중에는 취약할 수 있다[2,4,5]. PEEK는 고성능 열가소성 폴리머로서 우수한 기계적 강도와 함께 유연성을 제공하여 충격 흡수 능력이 우수하다. 낮은 탄성계수(Young's modulus)는 임플란트가 받는 응력을 보다 효과적으로 분산시켜 주변 조직에 가해지는 응력을 줄이는데 기여한다. 또한 자연치아와 유사한 색상을 가지고 있으며 인체 조직과 잘 호환되는 것으로 알려져 있다[6-8].

임플란트 재료의 기계적 특성이 임플란트의 성공률에 중요한 영향을 미친다는 점은 Bayata와 Yildiz [9]의 연구에서도 언급되었다. 본 연구에서는 세 가지 재료로 제작된 임플란트 지대주의 응력 분포 양상을 유한 요소 분석을 통해 비교하였다. 유한 요소 분석은 실제 임상 조건에서 임플란트가 경험할 수 있는 다양한 하

중 조건을 모사하고, 이를 통해 임플란트와 조직 간의 상호 작용을 분석하는데 유용하다[3,9].

본 연구의 목적은 세 가지 재료를 사용한 임플란트 지대주의 응력 분포를 분석하고, 각 재료의 임플란트 설계에 대한 적합성을 평가하는 것이다. 이를 통해 임플란트 재료의 선택 기준을 제시하고, 임플란트의 임상적 적용 가능성을 높이기 위한 설계 개선 방안을 모색하고자 한다.

MATERIALS AND METHODS

1. 3차원 실험모델 설계

치과 임플란트 지대주의 제작 재료 및 교합력에 따른 임플란트 구성요소 및 치조골에 가해지는 응력을 분석하기 위해 Dio사의 Internal Submersed Implant Type의 정보를 바탕으로 임플란트 시스템의 구성요소(지대주: 길이 10.5 mm, 직경 3.9 mm, 나사: 길이 5.1 mm, 직경 1.8 mm, 매식체: 길이 15.3 mm, 직경 5.8 mm)를 Siemens NX (NX10.0.0.24, Siemens) 프로그램을 이용하여 설계하였다(Fig. 1).

2. 유한요소 분석

지대주와 매식체가 나사에 의해 체결된 치과임플란트 구조물에 교합력이 가해질 때 임플란트 각 구성요소에 가해지는 응력을 비교 분석하기 위해 Abaqus 프로그램(Abaqus 6.12, Dassault Systèmes)을 이용한 유한요소분석을 실시하였다. 매식체 및 나사의 재질은 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)으로 설정하였고, 지대주는 티타늄 합금, 지르코니아, PEEK로 각각 설정하여 Table 1과 같이 각 구성요소의 물성치를 부여하였다. 각 재료별 물성치는 ASTM F136 (티타늄 합금), ISO 13356 (지르코니아) 및 ISO 10993 (PEEK)에 따라 설정하였으며 매식체와 지대주 결합을 위한 지대주 나사의 조임 토크(torque)는 동일하게 30 N의 값을 설정하였다[10]. 외력 조건은 교합력을 고려하여 175 N으로 설정하였고 [11], 지대주에 수직 및 측방 교합력이 가해지는 상황을 모델링하였다. Abaqus 6.12를 사용하여 응력 및 변형을 계산하였고 분석은 선형 탄성 이론을 기반으로 수행되었으며, 모든 재료는 균질

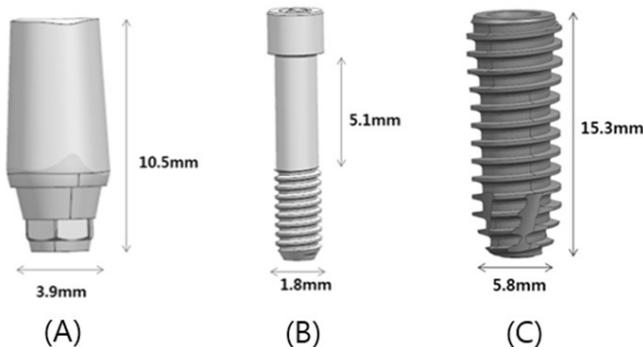


Fig. 1. Schematic diagram of single implant dimensional data. (A) Abutment, (B) screw, (C) fixture.

Table 1. Mechanical properties of implant components

Component	Material	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
Fixture	Ti-6Al-4V	110,000	0.35
Abutment	Ti-6Al-4V	110,000	0.35
	Zirconia	210,000	0.26
	PEEK	4,000	0.40
Screw	Ti-6Al-4V	110,000	0.35

PEEK: polyetheretherketone.

(homogeneity)하고 등방성(isotropy)을 가정하였다.

RESULTS

티타늄 합금, 지르코니아, PEEK로 설계된 임플란트 지대주가 동일한 외력을 받을 때 각 지대주 재질에 따른 임플란트 시스템의 응력 분포 양상을 분석하기 위해 유한 요소 분석을 실시하였다. Table 1은 임플란트 구성요소로 사용된 재료와 각 재료의 기계적인 성질을 나타낸다. Fig. 2와 Fig. 3은 지대주 장축에 대해 수직 교합력(90°)과 측방 교합력(30°)이 175 N으로 가해졌을 때 지대주, 나사, 매식체에 가해지는 등가응력(von Mises stress)의 분포를 보여주며 Table 2는 지대주 재료에 따른 임플란트 구성요소의 최대등가응력을 나타낸다.

수직교합력이 가해졌을 때, 지대주 재료별 최대등가응력을 분석한 결과, 지르코니아 지대주는 1,225 MPa로 가장 높게 나타났

고 티타늄 지대주는 843.7 MPa, PEEK 지대주는 253.9 MPa로 가장 낮게 나타났다(Table 2). 응력 분포의 양상을 관찰한 결과, 세 종류의 지대주 모두에서 나사와 지대주 내부의 접촉 부위에 응력이 집중되는 경향이 관찰되었다. 특히 PEEK 지대주는 다른 두 시편군에 비해 응력 분포 범위가 내외부로 더 넓게 분포된 것으로 관찰되었다(Fig. 2).

지대주에 수직교합력이 가해졌을 때 나사의 최대등가응력을 분석한 결과 지르코니아 지대주에 결합된 나사는 909.7 MPa로 나타났고, 티타늄 지대주에 결합된 나사는 916.3 MPa, PEEK 지대주에 결합된 나사에서는 2,024 MPa로 다른 두 시편군에 비해 월등히 높게 나타났다(Table 2). 나사에 발생한 응력 분포 양상을 살펴보면, 세 지대주 모두에서 나사 머리 부위에서부터 나사산 시작 부위까지 응력이 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 나사 머리 아래부분, 즉 지대주와 접촉 계면에서 응력이 크게 나타났다. 특히, PEEK 지대주와 결합된 나사에서는 티타늄 합금 및 지르코니아

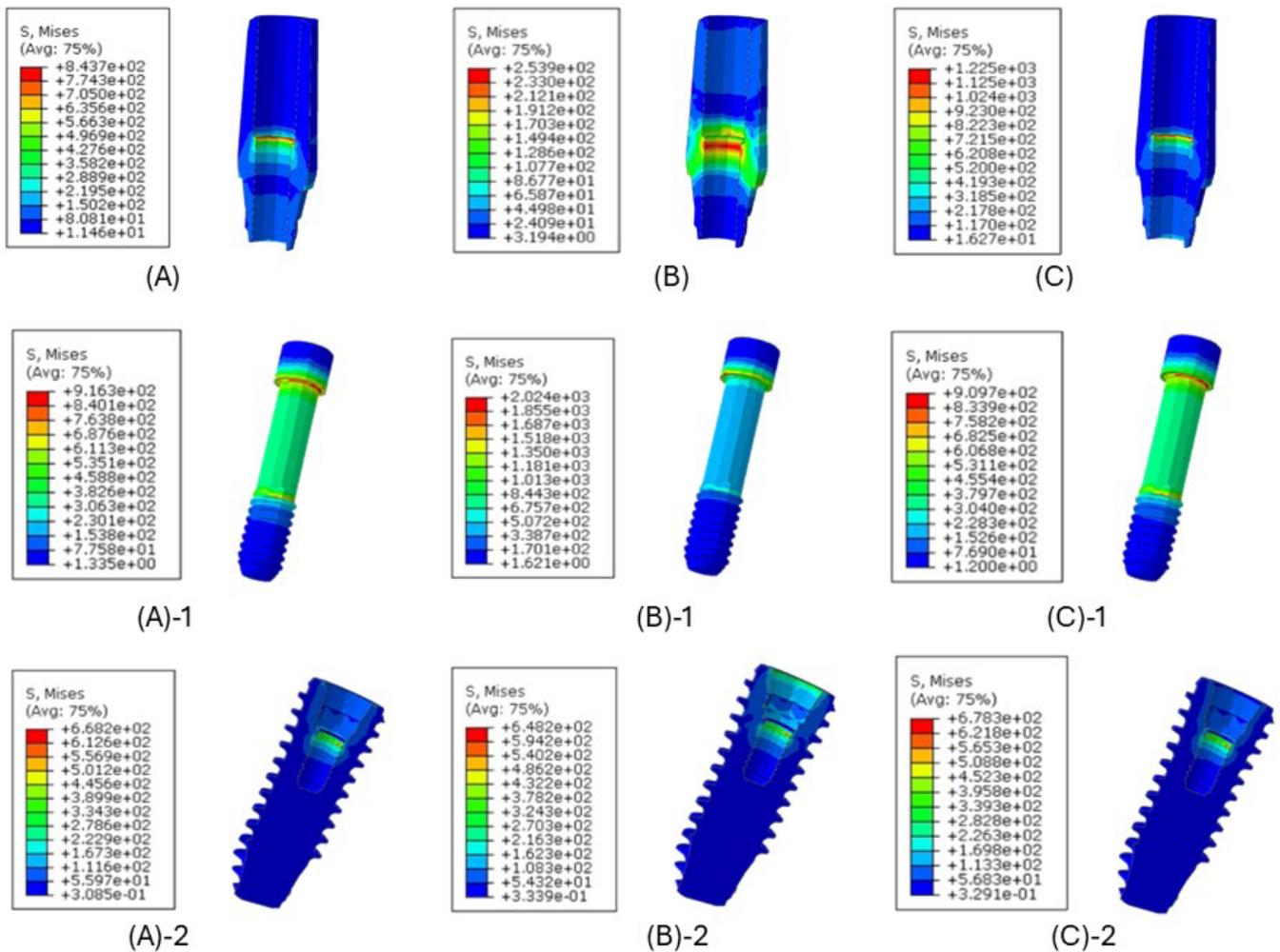


Fig. 2. von Mises stress distribution in the abutment, screw, and fixture under a vertical load (90°). (A) Ti-6Al-4V abutment, (B) PEEK abutment, (C) Zirconia abutment, 1: Ti-6Al-4V screw, 2: Ti-6Al-4V fixture. S, Mises: Von Mises stress, Avg: average, PEEK: polyetheretherketone.

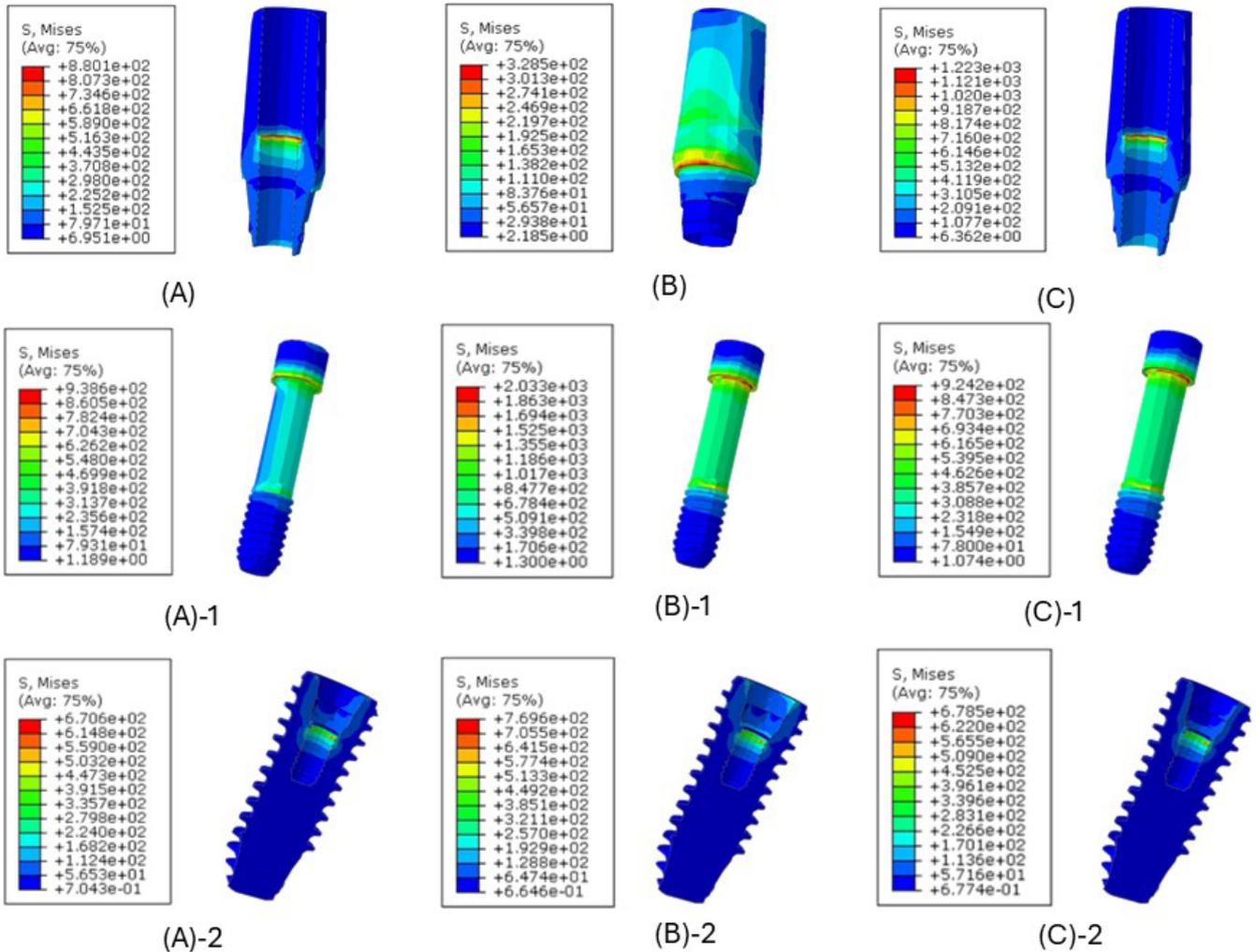


Fig. 3. von Mises stress distribution in the abutment, screw, and fixture under a lateral load (30°). (A) Ti-6Al-4V abutment, (B) PEEK abutment, (C) Zirconia abutment, 1: Ti-6Al-4V screw, 2: Ti-6Al-4V fixture. S, Mises: Von Mises stress, Avg: average, PEEK: polyetheretherketone.

Table 2. Maximum von Mises stress distribution in implant components by material and load direction

Material	Load (N)	Load direction (degree)	Abutment (Mpa)	Screw (Mpa)	Fixture (Mpa)
Ti-6Al-4V	175	90	843.7	916.3	668.2
PEEK		253.9	2,024.0	648.2	
Zirconia		1,225.0	909.7	678.3	
Ti-6Al-4V		30	880.1	938.6	670.6
PEEK		328.5	2,033.0	769.6	
Zirconia		1,223.0	924.2	678.5	

PEEK: polyetheretherketone.

지대주와 결합된 나사에 비해 더 큰 응력이 집중되었다(Fig. 2).

지대주와 나사에 의해 결합된 매식체에서 발생한 최대응력응력을 분석한 결과, 지르코니아 지대주와 결합된 매식체에서는 678.3 MPa의 응력이 발생하여 가장 높았으며, 티타늄 합금 지대주와 결합된 매식체에서는 668.2 MPa, PEEK 지대주와 결합된 매식체는 648.2 MPa로 가장 낮았다. 응력 분포의 양상을 살펴보면,

티타늄 합금 및 지르코니아 지대주에 결합된 매식체에서는 나사산과 결합되는 매식체 상부에 응력 집중되었으나, PEEK 지대주에 결합된 매식체에서는 응력이 더 넓게 분포하며, 나사산 상부 및 지대주 하부와의 결합 계면까지 응력이 확장되었다.

측방교합력이 가해졌을 때는, 세 종류의 지대주에서 수직 교합력이 가해졌을때와 비교해서 응력이 상대적으로 높게 나타났으며

(Table 2), 응력 분포 양상은 수직 교합력을 가했을 때와 유사하게 지대주와 나사, 나사와 매식체의 계면에서 응력의 집중이 나타났다(Fig. 3).

DISCUSSION

고정형 임플란트가 교합력을 받을 때 발생하는 응력은 상부보철물, 지대주, 나사, 매식체 등의 구성요소를 통해 지지 뼈로 전달된다. 임플란트 보철물이 기능을 할 때 임플란트 구성요소에 가해지는 응력의 집중은 최소화 하는 것이 임플란트 실패를 방지하는데 중요하다. 따라서 다양한 재료를 통해 지대주와 지대주 나사 및 매식체로 전달되는 응력을 분석하는 것은 성공적인 임플란트 치료를 위해 필요하다[12].

본 연구에서 수행된 유한 요소 분석은 치과 임플란트 지대주 제작에 사용되는 다양한 재료 - PEEK, 지르코니아, 티타늄 합금 - 의 응력 분포 양상을 평가하여, 각 재료의 기계적 특성에 따른 구조적 특성을 비교하였다. 유한 요소 분석은 실제 환자 구강내의 모든 생화학적 범위를 포함할 수 없지만, 각 재료의 기계적 특성을 고려한 적절한 지대주 선택, 응력 분포를 고려한 설계를 통해 임플란트 구조물의 안정성과 유효성 등을 미리 예측할 수 있어 환자의 만족도 향상 및 치료결과 개선에 필요한 중요한 정보를 제공한다[13,14].

실험 결과, 세 종류의 지대주 모두에서 지대주 내부의 나사 접촉 부위에 응력이 집중되는 경향이 관찰되었으며, 특히 PEEK 지대주를 사용한 나사에 높은 응력 집중이 두드러졌다. 이는 PEEK의 낮은 탄성계수 때문에 외력에 대해 더 유연하게 반응하여 나사에 더 높은 응력이 발생하는 것으로 해석된다[15]. Harinee 등[7]의 연구에서도 임플란트 지대주로서 PEEK 재료의 유연성이 나사에 응력을 증가시킬 수 있다고 보고하였으며, 이는 본 실험에서 PEEK 지대주와 결합된 나사에서 응력이 상대적으로 높게 나타난 결과와 일치한다. 결과적으로, PEEK는 높은 응력이 가해지는 임플란트 부위에 사용될 경우 나사의 피로 파괴 가능성을 높일 수 있다[6-8]. 그러나 PEEK의 유연성은 충격 흡수 측면에서 유리하게 작용하여 임플란트 주변 조직에 가해지는 부담을 감소시킬 수 있는 잠재적 이점도 지닌다[7-9].

지르코니아 지대주는 지대주 자체의 응력 집중이 높게 나타났고 특히 나사와의 계면에서 높은 응력 분포를 보였는데, 이는 지르코니아의 높은 탄성계수가 지대주에 가해지는 외력을 효과적으로 분산시키지 못하고 지대주와 나사의 계면에 응력이 집중된 것으로 생각한다. Butz 등[16]의 연구에 따르면, 지르코니아는 우수한 생체 적합성과 높은 기계적 강도를 제공하여 임플란트의 신뢰성을 장기적으로 향상시킬 수 있으나 높은 탄성계수로 인해 변

형률이 낮아서 응력이 특정 부분에 집중할 수 있다고 보고하였다[16-18]. 이는 본 연구에서 지르코니아 지대주가 티타늄과 PEEK에 비해 지대주 내부의 나사와의 계면에서 높은 응력 분포를 나타낸 결과와 일치한다.

티타늄 합금 지대주는 응력 분포가 가장 균일하게 관찰되었고 가장 높은 응력을 견딜 수 있는 것으로 나타났다. 티타늄은 높은 항복강도와 인장강도를 가지는데 티타늄의 탄성계수(110,000 MPa)는 지대주가 적절한 강성을 가지고 탄성변형 능력을 제공하였다. 이는 임플란트 구성 요소로서 티타늄이 응력을 고르게 흡수하고 분산시켜서 장기간에 걸쳐 안정적인 성능을 유지할 수 있음을 시사한다[2,9]. 이는 티타늄이 임플란트 재료로서 널리 사용되는 이유 중 하나이다. 본 연구의 응력 분포에서 나타난 티타늄의 우수한 성능은 Merz 등[19]의 연구 결과와 일치하며, 이는 임플란트의 수명을 연장하고 실패율을 줄이는 데 기여할 수 있다고 판단한다[20].

이상의 결과는 임플란트의 지대주 재료의 선택이 단순히 기계적 성질만 고려할 것이 아니라, 임플란트가 적용될 임상적 상황을 고려하여 종합적으로 이루어져야 함을 시사한다. 각 재료의 특성을 고려한 설계 및 적용은 임플란트의 성공률을 최적화하고 환자의 만족도를 높이는 중요한 요소이다. 본 연구의 결과는 향후 임플란트 지대주 재료의 선택 및 설계 개선을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

CONCLUSIONS

본 연구는 티타늄 합금, 지르코니아, 그리고 PEEK로 제작된 임플란트 지대주에 수직 및 측방 교합하중이 가해질 때 임플란트 구성요소의 응력 분포를 평가하여 임플란트 설계 개선 방안과 재료 선택의 중요성을 모색하고자 하였다.

1. 티타늄 합금 지대주는 높은 기계적 강도와 균일한 응력 분포로 인해 매식체에 균등하게 응력을 전달함으로써 외력에 대해 높은 저항성을 보였다. 이는 임플란트 시스템의 안정성을 증진시키고 장기간 사용에도 견딜 수 있음을 의미하기 때문에 티타늄 합금 지대주는 전반적인 안정성과 내구성을 요구하는 임플란트 부위에 적합한 것으로 생각한다.

2. 지르코니아 지대주는 높은 탄성계수로 인해 외력이 특정 부위에 집중되어 나사와 접촉 계면에서 높은 응력이 발생하였고, 낮은 변형률로 인해 나사로 전달되는 응력은 낮게 나타났다. 따라서 지르코니아는 응력 분산 능력이 제한적이므로 외력이 낮고 심미적 요구가 높은 전치부에서 사용하기에 유리한 것으로 생각한다.

3. PEEK 지대주는 낮은 탄성계수로 인해 나사와의 계면에서 더 많은 변형이 발생하여 지대주 자체에서는 낮은 응력을 나타내지

만, 나사 부위에서는 과도한 응력이 집중되어 피로 파괴 가능성을 높일 수 있는 것으로 나타났다. PEEK는 높은 유연성과 충격 흡수 능력을 제공하지만, 지대주 재료로 사용할 경우 나사 부위의 응력 집중을 피할 수 있는 설계적 보완이 필요한 것으로 생각한다.

FUNDING

None to declare.

ACKNOWLEDGEMENTS

None.

CONFLICT OF INTEREST

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

ORCID

Sung-Min Kim, <https://orcid.org/0000-0003-4984-7213>

REFERENCES

1. Kim WJ, Cho YD, Ku Y, Ryoo HM. The worldwide patent landscape of dental implant technology. *Biomater Res.* 2022;26:59.
2. Bharate V, Kumar Y, Koli D, Pruthi G, Jain V. Effect of different abutment materials (zirconia or titanium) on the crestal bone height in 1 year. *J Oral Biol Craniofac Res.* 2020;10:372-374.
3. Kim NS, Lee MK, Hong MH. A Finite element stress analysis of abutment screw according to the implant abutment material. *J Korean Acad Dent Technol.* 2016;38:1-6.
4. Sailer I, Zembic A, Jung RE, Hämmerle CH, Mattioli A. Single-tooth implant reconstructions: esthetic factors influencing the decision between titanium and zirconia abutments in anterior regions. *Eur J Esthet Dent.* 2007;2:296-310.
5. Schmalz G, Garhammer P. Biological interactions of dental cast alloys with oral tissues. *Dent Mater.* 2002;18:396-406.
6. Kurtz SM, Devine JN. PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. *Biomaterials.* 2007;28:4845-4869.
7. Harinee A, Rajesh C, Anilkumar S, Raj I, Sandhya MR. Comparison of mechanical properties of the implant materials- titanium, zirconium and PEEK using three dimensional finite element analysis. *Int J Adv Res.* 2023;11:656-663.
8. Gowda EM, Iyer SR, Verma K, Murali Mohan S. Evaluation of PEEK composite dental implants: a comparison of two different loading protocols. *J Dent Res Rep.* 2018;1:1-5.
9. Bayata F, Yildiz C. The mechanical behaviors of various dental implant materials under fatigue. *Adv Mater Sci Eng.* 2018;5047319.
10. Eom TG, Suh S, Jeon GR, Shin JW, Jeong CM. Effect of tightening torque on abutment-fixture joint stability using 3-dimensional finite element analysis. *J Korean Acad Prosthodont.* 2009;47:125-135.
11. Choi SM, Choi H, Lee DH, Hong MH. Comparative finite element analysis of mandibular posterior single zirconia and titanium implants: a 3-dimensional finite element analysis. *J Adv Prosthodont.* 2021;13:396-407.
12. Chand YB, Mahendra J, Jigeesh N, Mahendra L, Shivasubramanian L, Perika SB. Comparison of stress distribution and deformation of four prosthetic materials in full-mouth rehabilitation with implants: a three-dimensional finite element study. *J Contemp Dent Pract.* 2020;21:1210-1217.
13. Hong MH. Effects of titanium and PEEK abutments on implant-supported dental prosthesis and stress distribution of surrounding bones: three-dimensional finite element analysis. *J Tech Dent.* 2022;44:67-75.
14. 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.
15. Lin CP, Shyu YT, Wu YL, Tsai MH, Chen HS, Wu AY. Effects of marginal bone loss progression on stress distribution in different implant-abutment connections and abutment materials: a 3D finite element analysis study. *Materials.* 2022;15:5866.

16. Butz F, Heydecke G, Okutan M, Strub JR. Survival rate, fracture strength and failure mode of ceramic implant abutments after chewing simulation. *J Oral Rehabil.* 2005;32:838-843.
17. Denry IL, Holloway JA. Microstructural and crystallographic surface changes after grinding zirconia-based dental ceramics. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2006;76:440-448.
18. Sundh A, Molin M, Sjögren G. Fracture resistance of yttrium oxide partially-stabilized zirconia all-ceramic bridges after veneering and mechanical fatigue testing. *Dent Mater.* 2005;21:476-482.
19. Merz BR, Hunenbart S, Belser UC. Mechanics of the implant-abutment connection: an 8-degree taper compared to a butt joint connection. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2000;15:519-526.
20. Norton MR. An in vitro evaluation of the strength of an internal conical interface compared to a butt joint interface in implant design. *Clin Oral Implants Res.* 1997;8:290-298.