

상악 전치부 즉시하중 임플란트의 식립 깊이에 따른 삼차원 유한요소 분석

박철우 · 김성훈 · 여인성 · 윤형인 · 한중석*

서울대학교 치의학대학원 치과보철학교실

Three-dimensional finite element analysis according to the insertion depth of an immediately loaded implant in the anterior maxilla

Cheol-Woo Park, Sung-Hun Kim, In-Sung Yeo, Hyung-In Yoon, Jung-Suk Han*

Department of Prosthodontics, School of Dentistry, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

Purpose: The purpose of this study was to investigate the effects of the insertion depth of an immediately loaded implant on the stress distribution of the surrounding bone and the micromovement of the implant using the three-dimensional finite element analysis. **Materials and methods:** A total of five bone models were constructed such that the implant platform was positioned at the levels of 0.00 mm, 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm, and 1.00 mm depth from the crest of the cortical bone. A frictional coefficient of 0.3 and the insertion torque of 35 Ncm were simulated on the interface between the implant and surrounding bone. A static load of 178 N was applied to the provisional prosthesis with a vertical load in the axial direction and an oblique load at 30° with respect to the central axis of the implant, then a finite element analysis was performed. **Results:** The implant insertion depth significantly affected the stress distribution on the surrounding bone. The largest micromovement value of the implant was 39.34 μ m. The oblique load contributed significantly to the stress distribution and micromovement in comparison to the vertical load. **Conclusion:** Increasing the implant insertion depth was advantageous in dispersing the concentrated stress in the cortical bone and did not significantly affect the micromovement associated with early osseointegration failure. (*J Korean Acad Prosthodont 2018;56:105-13*)

Keywords: Dental implants; Immediate dental implant loading; Insertion depth; Finite element analysis

서론

임플란트를 이용한 보철 수복의 성공에 골유착에 의한 기능뿐만 아니라 심미적인 회복이 중요하다는 인식이 높아지고,¹ 임플란트 치료에 있어서 더 짧은 치료 기간과 편안함에 대한 환자의 요구가 증가하면서 즉시하중 방법이 전통적인 치료 방법의 대안으로 시도되고 있다.^{2,3}

지금까지 즉시하중 임플란트에 관한 실험적 및 임상적 연구가 발표되었고, 특히 심미성이 매우 중요하게 생각되는 상악 전치부에서 즉시하중 방법이 골유착, 임플란트의 생존율, 변연골 흡

수 정도, 연조직 상태 등과 관련하여 긍정적인 결과를 나타낸 것으로 보고되었다.⁴⁻⁹ 그러나 생체 역학적인 관점에서 상악 전치부는 골질이 다른 곳에 비해 좋지 않고 교합력이 측방으로 작용하기 때문에 치유 과정에서 임플란트에 과도한 힘이 가해진다면 임플란트의 일차 안정성이 확보되지 않아서 초기 실패가 일어날 수 있다. 임플란트의 일차 안정성은 골유착이라기보다는 임플란트의 나사산과 골 사이에서 발생하는 기계적인 맞물림 정도에 의해 영향을 받는 것으로 알려졌다.¹⁰ 따라서 치유 기간 동안 과도한 임플란트의 미세움직임이 발생하지 않도록 충분한 초기 식립 토크 값의 확보와 하중 조절이 즉시하중 임플란트의 성공에 중

*Corresponding Author: Jung-Suk Han

Department of Prosthodontics and Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University, 101 Daehak-ro, Jongno-gu, Seoul 03080, Republic of Korea
+82 (0)2 2072 2661: e-mail, proshan@snu.ac.kr

Article history: Received December 4, 2017 / Last Revision January 11, 2018 / Accepted February 23, 2018

©2018 The Korean Academy of Prosthodontics

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요한 요인으로 고려되어야 한다.

임플란트의 식립 깊이는 치조정 피질골 상연에 대한 임플란트 고정체 상단의 위치와 관련이 있으며, 임플란트 치료의 임상적 성공과 장기적인 예후에 중요하다. 심미적 관점에서 식립 깊이는 임플란트 고정체 상단에서 보철물의 풍용부까지 점진적으로 이행되는 자연스러운 출현윤곽(emergence profile)을 위한 공간과 관련이 있으며 향후 임플란트 주위 연조직의 형태와 위치에도 영향을 준다.¹¹ 또한 생체 역학적인 관점에서 식립 깊이는 임플란트와 접촉하는 피질골의 두께와 망상골의 양과 관련이 있기 때문에 임플란트와 주위 골의 응력 분포에도 영향을 미치는 것으로 보고되었다.¹²⁻¹⁴ 그 동안 골유착된 임플란트의 식립 깊이와 응력 분포에 관한 여러 연구가 발표되었다.¹⁵⁻¹⁷ 그러나 즉시하중 임플란트의 식립 깊이에 따른 주위 골의 응력 분포와 임플란트의 미세움직임에 관한 연구는 아직까지 보고된 바가 없었다.

유한요소분석법은 유한요소로 이산화된 형상의 구조에서 응력과 변형에 대한 컴퓨터 수치 해석 방법으로 치과 연구 분야에서 유용하게 사용되고 있다. 최근에는 컴퓨터 기술의 발전과 다양한 유한요소 분석 기법으로 더 정교한 모델링과 정확한 해석이 가능하게 되었고, 하중에 의해 임플란트 지지 보철물과 임플란트 주위 골에 발생한 응력 분포 양상을 평가하기 위해 삼차원 유한요소분석법이 많이 사용되고 있다.^{18,19}

이에 본 연구에서는 삼차원 유한요소분석을 이용하여 식립 토크가 재현된 상악 전치부 즉시하중 임플란트의 식립 깊이가 주위 골의 응력 분포와 임플란트의 미세움직임에 미치는 영향을 알아 보고자 하였다.

재료 및 방법

1. 유한요소 모형의 설계

본 연구 모형은 상악 좌측 중절치가 결손된 부분 무치악의 치유된 치조제에 단일 임플란트를 서로 다른 깊이로 식립하고 즉시하중을 위해서 맞춤형 지대주와 임시 보철물로 수복하는 것으로 가정하였다.

단순화 골모형을 제작하기 위해서 치과용 cone-beam computed tomography로 촬영된 data를 OnDemand3D 프로그램(Cybermed Inc., Seoul, Korea)을 이용하여 재구성하였다. 전체 골모형은 수직 높이, 근원심 폭경, 치아 결손부위 치조정의 순구개 폭경이 각각 22.0 mm, 20.0 mm, 7.3 mm가 되도록 제작하였다. D3의 골질을 재현하기 위해서 0.75 mm 두께의 피질골이 내측의 망상골을 균일하게 둘러싸는 구조로 설계하였다.²⁰ 피질골과 망상골은 모형 제작과 해석의 단순화를 위하여 골모형에 균질성, 등방성, 선형탄성을 부여하였다.

임플란트는 직경 4.0 mm, 길이 10.0 mm인 IS III active 임플란트 고정체(Neobiotech Co., Ltd., Seoul, Korea)의 형태를 근거로 설계하였다. 지대주 나사는 임플란트 제조사에서 제작한 형태를 근거로 설계하였다. 맞춤형 지대주와 임시 보철물은 CBCT data를 근거로 획득한 임플란트 위치 좌표를 활용하여 Exocad dental CAD 프로그램(Exocad GmbH, Darmstadt, Germany)을 이용하여 디자인하였다.

유한요소 모형은 Altair HyperWorks Ver. 13 (Altair Engineering Inc., Troy, MI, USA)을 이용하여 모델링하고 격자를 생성하였다. 단순화 골모형 치조제의 순구개 정중앙에서 임플란트 중심축이 치조골의 장축에 평행이 되고 고정체 상단의 위치가 치조골 상연을 기준으로 0.00 mm (치조정과 동일한 위치), 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm, 1.00 mm 깊게 되도록 고정체를 골모형에 식립하여 총 5개 유한요소 모형을 제작하였다 (Fig. 1). 고정체를 골모형에 식립할 때, 35 Ncm의 식립 토크를 재현하기 위해서 Lee 등²¹의 선행 연구를 근거로 고정체와 접촉하는 골의 계면을 고정체 내측으로 피질골과 망상골에서 각각 2.38 μ m, 6.50 μ m 만큼 이동시켜 유한요소 해석 모형을 구성하였고, 골의 계면 절점들을 이동시킨 양만큼 외측으로 강제 이동시켜 고정체와 골의 계면에서 접촉조건을 부여한 후 평형상태에 도달할 때까지 해석을 수행하였다.

보다 정확한 유한요소분석을 위해서 요소의 크기를 고정체와 골의 계면을 비롯하여 세밀한 관찰이 필요한 부위는 0.10 - 0.15 mm로 분할하였고, 해석에 영향을 덜 미치는 부위는 0.40 - 1.00 mm로 더 크게 분할하였다. 그 결과, 모형의 전체 요소 수가 0.00

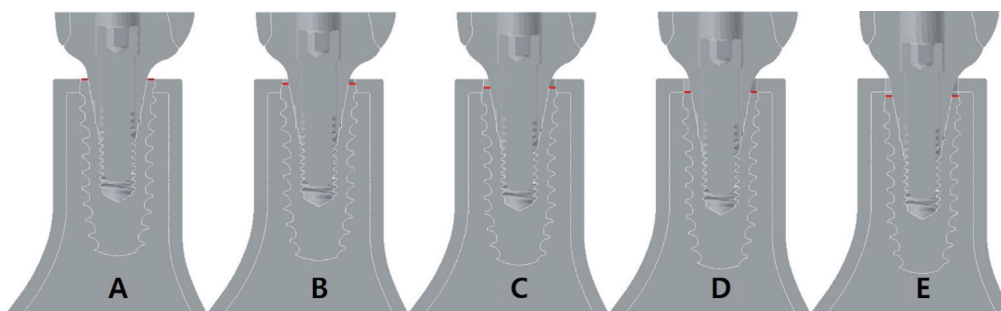


Fig. 1. Representative illustration of 5 different bone models. Implant platform (red line) was positioned at depths of 0.00 mm (A), 0.25 mm (B), 0.50 mm (C), 0.75 mm (D), 1.00 mm (E) from the crest of the cortical bone.

mm 모형에는 1,394,707개, 0.25 mm 모형에는 1,317,862개, 0.50 mm 모형에는 1,321,682개, 0.75 mm 모형에는 1,330,145 개, 1.00 mm 모형에는 1,334,248개로 구성되었다.

2. 재료의 물성

본 연구에 사용된 모든 재료의 물성은 선학들의 연구²²⁻²⁴를 참고하여 결정하였으며 Table 1에 정리하였다. 모든 모형에 균질성과 등방성을 부여하였고, 보다 정확한 해석을 위해 선형 탄성을 가정하였다.

3. 접촉 조건, 경계 조건 및 하중 조건

임플란트의 즉시하중을 재현하기 위해서 서로 침투하지 않으면서 약간의 변위가 일어나는 마찰접촉이 되도록 고정체와 주위 골 계면에 0.3의 마찰계수(μ)를 부여하였다.²¹ 고정체/맞춤형 지대주, 고정체/지대주 나사, 맞춤형 지대주/지대주 나사 사이에도 각각 마찰접촉이 되도록 가정하였고 피질골과 망상골의 계면과 임시 보철물/맞춤형 지대주의 계면은 각각 완전 고정된 것으로 가정하였다. 단순화 골모형의 경계 조건은 근원심 양 측면에서 6 자유도 완전 고정으로 간주하여 설정하였다.

하중조건은 선학들의 연구^{22,24}를 참고하여 결정하였다. 수직하중은 고정체의 중심축 선상의 임시 보철물 표면에서 축 방향으로, 경사하중은 임상적으로 2 mm 과개교합을 고려하여 임시 보철물의 절단면으로부터 수직적으로 2 mm 떨어진 구개면에서 고정체의 중심축에 대하여 30도를 이루도록 구개측에서 순측 방향으로 각각 178 N의 정하중을 가하였다 (Fig. 2).

4. 유한요소 분석

삼차원 유한요소해석은 VP Solution 2016.1 프로그램(ESI Group, Paris, France)을 이용하여 수행하였고, 삼차원 유한요소 분석 프로그램인 Visual-Viewer 13.0 (ESI Group, Paris, France)을 이용하여 산출된 등가 응력(von Mises stress) 값을 평가하여 임플란트 주위 골에 발생한 응력 분포와 최대 응력 값을 분석하였고, 임플란트와 골 계면에서 산출된 변위 값을 평가하여 임플란트의 미세움직임을 분석하였다.

Table 1. Mechanical properties of the materials used in the 3D finite element models

Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Titanium alloy (implant, abutment, screw)	110	0.35
Acrylic resin (crown)	2.4	0.35
Cortical bone	13.7	0.3
Cancellous bone	1.37	0.3

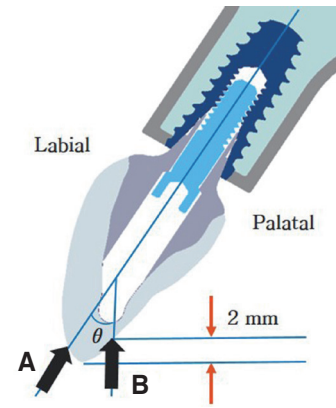


Fig. 2. Loading condition. The static load (178 N) was applied to the provisional prosthesis. (A) vertical load, (B) oblique load, $\theta = 30^\circ$.

결과

1. 응력 분포

임플란트 고정체의 식립 깊이가 서로 다른 5개 모형에서 수직하중과 경사하중을 가한 후, 고정체 주위 골에 발생한 응력 분포 양상은 등가 응력을 응력 등고선식(stress control plot)으로 나타내어 비교하였고, 피질골과 망상골에 나타난 최대 응력 값은 고정체와 주위 골의 계면을 따라 측정된 등가 응력 값으로 평가하였다.

1) 하중 전

순-구개 단면에서 주위 골에 나타난 응력 분포는 전반적으로 모든 모형에서 고정체의 순측과 구개측에 비슷하였고 고정체의 나사산을 따라서 가깝고 좁은 범위에 집중되었다 (Fig. 3). 높은 응력은 주로 고정체 경부 주위 치조정 피질골과 망상골 사이 계면 상방과 고정체의 근단부 나사산 첨단(thread tip) 외측 망상골에서 관찰되었다. 1.00 mm 모형을 제외한 나머지 모형에서 최대 응력 값과 평균 응력 값이 식립 깊이와 상관없이 망상골에 비해 피질골에서 더 높게 나타났다. 피질골에 나타난 최대 응력 값은 0.25 mm 모형을 제외한 나머지 모형에서 식립 깊이가 증가함에 따라서 감소하였다. 망상골에 나타난 최대 응력 값과 평균 응력 값은 각각 20.02 - 21.55 MPa, 5.52 - 5.70 MPa로써 식립 깊이에 따른 차이가 거의 없었다 (Table 2).

Table 2. Maximum and average values of von Mises stress in peri-implant bone according to different insertion depths before loading (unit: MPa)

Insertion Depth (mm)	Cortical bone		Cancellous bone	
	Maximum	Average	Maximum	Average
0.00	44.46	20.63	21.16	5.70
0.25	53.86	19.15	20.17	5.68
0.50	36.45	15.18	21.55	5.65
0.75	31.59	8.10	21.12	5.60
1.00	7.64	3.62	20.02	5.52

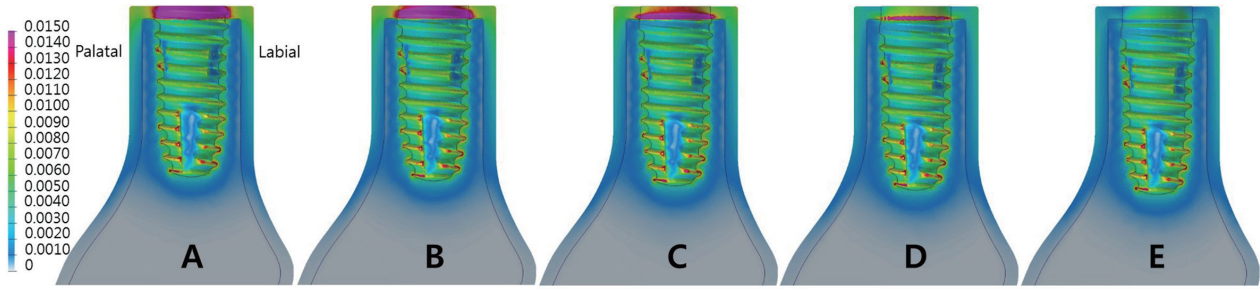


Fig. 3. Stress distributions in peri-implant bone before loading. The stress was concentrated in a close and narrow area along the thread of the implant and similar on the labial and palatal side. (A) 0.00 mm, (B) 0.25 mm, (C) 0.50 mm, (D) 0.75 mm, (E) 1.00 mm.

2) 수직하중시

응력 분포가 주위 골의 순측과 구개측에 거의 대칭적인 양상으로 관찰되었다. 하중의 영향으로 응력이 치조정 피질골 뿐만 아니라 순측과 구개측 피질골판을 따라 넓게 분포하였고 망상골에서도 고정체로부터 더 멀리 분산되었다. 특히 치조정 피질골에서 응력 분포는 식립 깊이가 증가함에 따라서 응력이 집중되는 면적이 피질골 상연에서부터 피질골과 망상골 사이 계면으로 점차 줄어들었다 (Fig. 4). 높은 응력이 치조정 피질골과 망상골의 계면 근처와 고정체의 근단부 나사산 첨단(thread tip) 하방 부위 망상골에서 관찰되었다. 피질골에 나타난 최대 응력 값은 0.25 mm 모형, 0.75 mm 모형, 0.00 mm 모형, 0.50 mm 모형,

1.00 mm 모형 순으로 감소하였고, 평균 응력 값은 식립 깊이가 증가함에 따라 점점 감소하였다 (Table 3).

3) 경사하중시

하중 방향의 영향으로 응력 분포가 대부분 고정체 상단의 순측 주위 골에 집중되는 비대칭적인 양상을 보였다. 식립 깊이가 증가할 때 높은 응력이 집중되는 부위가 고정체 상단 주위 치조정 피질골에서는 점점 좁아졌으나 고정체 상단의 위치 변화로 인해서 순측 피질골판에서는 근단쪽으로 이동하였다 (Fig. 5). 식립 깊이와 관련하여 피질골에 나타난 최대 응력 값은 0.75 mm 모형, 0.25 mm 모형, 0.50 mm 모형, 0.00 mm 모형, 1.00 mm 모

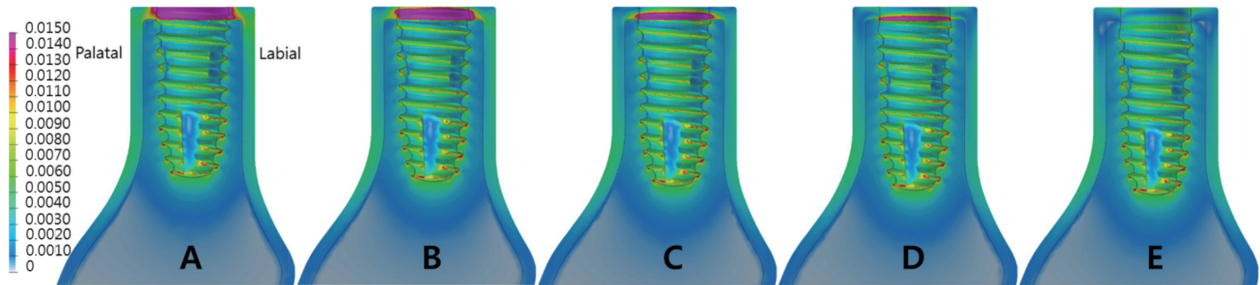


Fig. 4. Stress distributions in peri-implant bone under vertical loading. The stress was distributed widely and the area of stress concentration in the crest of the cortical bone gradually decreased as the insertion depth increased. (A) 0.00 mm, (B) 0.25 mm, (C) 0.50 mm, (D) 0.75 mm, (E) 1.00 mm.

Table 3. Maximum and average values of von Mises stress in peri-implant bone according to different insertion depths under vertical and oblique loading (unit: MPa)

Insertion Depth (mm)	Vertical Load				Oblique Load			
	Cortical bone		Cancellous bone		Cortical bone		Cancellous bone	
	Maximum	Average	Maximum	Average	Maximum	Average	Maximum	Average
0.00	51.32	25.57	32.63	5.40	133.82	46.99	23.68	5.63
0.25	81.23	23.07	31.85	5.41	229.63	52.82	41.11	5.84
0.50	42.45	14.54	33.50	5.46	166.54	43.20	54.85	6.17
0.75	53.14	9.43	34.42	5.40	330.98	44.46	48.92	6.44
1.00	7.78	3.76	33.91	5.38	37.97	21.89	57.73	7.04

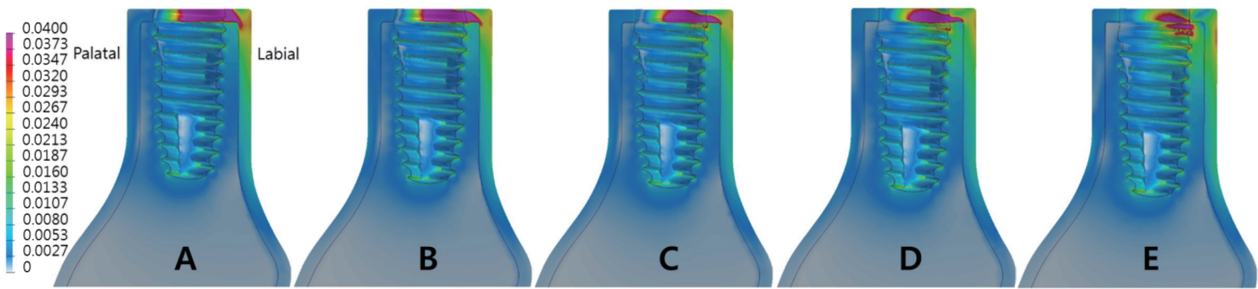


Fig. 5. Stress distributions in the peri-implant bone under oblique loading. The stress was concentrated on the labial side of the cortical bone, and the area of high stress concentration shifted more and more apically as the insertion depth increased. (A) 0.00 mm, (B) 0.25 mm, (C) 0.50 mm, (D) 0.75 mm, (E) 1.00 mm.

형 순으로 높았고, 망상골에 나타난 최대 응력 값은 1.00 mm 모형, 0.50 mm 모형, 0.75 mm 모형, 0.25 mm 모형, 0.00 mm 모형 순으로 높았다. 1.00 mm 모형을 제외한 나머지 모형에서 최대 응력 값은 망상골에 비해 피질골에서 더 높았다 (Table 3).

2. 미세움직임

임플란트의 미세움직임은 측정된 변위의 최대 값과 평균 값을 비교하여 분석하였다. 수직하중과 경사하중이 가해진 경우에 식립 깊이에 따라 고정체와 주위 골의 계면에서 관찰된 임플란트의 미세움직임을 Table 4에 정리하였다. 수직하중이 가해진 경우에는 식립 깊이가 증가함에 따라서 미세움직임의 최대 값은 감소하였으나 그 차이는 크지 않았고, 고정체 상단으로부터 근단 방향으로 약 1.0 - 2.0 mm 떨어진 고정체 경부 주위 망상골 계면에서 관찰되었다. 경사하중이 가해진 경우에는 식립 깊이가 증가함에 따라서 미세움직임의 최대 값과 평균 값이 모두 점차 증가하였으며, 그 범위는 각각 28.51 - 39.34 μm , 8.25 - 9.67 μm 였다. 경사하중이 가해진 경우에 발생한 미세움직임이 수직하중이 가해진 경우에 비해서 약 3.5 - 5배 증가한 것으로 확인되었다.

고찰

최근에는 CAD/CAM 기술과 3D 프린팅 기술의 발전으로 수술 전에 임플란트 고정체의 식립 위치를 결정하고 지대주와 임시 보철물을 미리 제작한 후, 수술용 가이드 스텐트(surgical guide stent)를 이용하여 고정체를 식립하고 즉시 임시 보철물을 장착하는 즉시하중 방법이 임상에서 널리 적용되고 있다.²⁵ 상악 전치부에도 임플란트 고정체를 식립한 후 즉시 임시 보철물을 장착하는 즉시하중 방법이 매우 유용하다고 인식되어 왔다.⁴⁻⁷ 이에 본 연구에서는 심미적으로 가장 중요한 부위로서 즉시하중 방법이 많이 요구되는 상악 전치부 골모형을 이용하였고, 임시 보철물에 178 N의 정하중을 가하여 유한요소분석을 수행하였다.

본 연구에서는 임플란트 식립 후 초기 상태의 임상적 상황을 보다 정확하게 가정하기 위해서 Attard와 Zarb²⁶이 제안한 즉시

Table 4. Maximum and average values of implant micromovement according to different insertion depths under vertical and oblique loading (unit: μm)

Insertion Depth (mm)	Vertical Load		Oblique Load	
	Maximum	Average	Maximum	Average
0.00	7.83	6.73	28.51	8.25
0.25	7.79	6.80	29.51	8.52
0.50	7.73	6.82	30.04	8.73
0.75	7.72	6.79	33.39	9.16
1.00	7.70	6.71	39.34	9.67

하중 임플란트를 위한 최소 식립 토크값(32 Ncm) 보다 높은 값인 35 Ncm의 식립 토크를 유한요소 모형의 임플란트 고정체와 골 계면에서 재현하였다. 임플란트의 일차 안정성의 정도가 식립 부위의 골질 및 골양, 임플란트의 형태, 디자인 및 표면 특성 그리고 수술기법에 의해 영향을 받는다고 알려져 있지만,¹⁰ 임상에서 주어진 골질과 골양의 상악 전치부 치조골에서 임플란트에 즉시하중 방법을 적용하기 위해서는 임플란트가 충분한 토크 값으로 식립되어야 하고, 적절한 일차 안정성의 유지가 즉시하중 임플란트의 성공적인 골유착과 장기적인 성공을 위해서 중요하기 때문에 즉시하중이 가해진 임플란트 주위 골에 발생한 응력 분포와 임플란트의 미세움직임을 평가할 때 식립 토크가 고려되는 것은 중요하다고 사료된다.

본 연구 결과, 식립 깊이에 따른 응력 분포 양상은 모든 모형에서 하중 전과 수직하중이 가해진 경우에는 고정체 주위 골에 고르게 분산되었고, 경사하중이 가해진 경우에는 고정체 상단의 순측 주위 치조골에 집중되는 것으로 나타났다. 또한 모든 하중 조건에서 최대 응력 값은 고정체가 치조정 피질골과 접촉하는 모형에서는 망상골보다 피질골에서 더 높았지만, 그렇지 않는 모형에서는 피질골보다 망상골에서 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 즉시하중 임플란트에 관한 이전 연구들^{8,9,21}의 결과와 유사하였다. 하중에 의해 발생된 응력이 고정체 상단 주위 피질골에 집중되는 것은 임플란트가 하중을 받으면 움직임

이 발생하는데, 고정체와 접촉하는 치조정 피질골이 그 움직임에 대하여 저항하는 주된 역할을 담당하고 있으며, 피질골이 망상골에 비해 탄성계수가 높고 훨씬 더 단단하기 때문이다. 임플란트 보철물에 과도한 하중이 가해질 경우 일차 안정성에 불리하고 주위 골의 특정한 부위에 응력이 과도하게 집중되면 골흡수에 대한 위험성이 높다는 점을 고려할 때, 하중 조절과 치조정 및 순측 피질골의 두께, 식립 깊이에 따른 고정체와 치조정 치조골의 접촉 여부가 상악 전치부 즉시하중 임플란트의 일차 안정성과 장기적 예후에 매우 중요할 것으로 사료된다.

Rismanchian 등¹⁶은 골유착된 하악 임플란트의 식립 깊이에 따른 응력에 관한 연구를 통해서 임플란트 주위 피질골의 응력은 치조정보다 깊게 식립할 때 증가했고, 피질골의 최대 응력은 대부분 임플란트가 치조제 상연과 일치하도록 식립된 경우에 낮게 나타났다고 보고하였다. 또한 응력 분포는 치조정 하방에 식립된 경우에는 임플란트 협측 피질골의 치근단 부위에 집중되었고, 치조제 상연과 일치하도록 식립된 경우에는 협측 변연골에 집중되었다고 보고하였다. 이런 결과와 유사하게 본 연구에서도 경사하중이 가해진 경우에 식립 깊이가 증가함에 따라서 응력이 집중되는 부위가 고정체 상단 주위 치조정 피질골에서는 점점 좁아지면서 순측 피질골판에서는 근단쪽으로 이동하는 양상이 관찰되었다. 이를 통해서 임플란트의 식립 깊이가 임플란트 주위 골의 응력 분포에 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였고, 치조골의 폭이 좁고 골질이 좋지 않은 상악 전치부에서 임플란트를 치조정보다 깊게 식립함으로써 순측 피질골의 변연부에 과도한 응력이 집중되는 것을 막을 수 있을 것으로 생각된다.

임플란트의 식립 깊이는 치조정 피질골의 상연에 대한 임플란트 고정체 상단의 치조골 내측 위치를 의미하고, 고정체와 접촉하는 피질골의 두께와도 관련이 있으며 술자에 의해 최종적으로 결정된다. Huang 등¹⁵은 임플란트-지대주 연결부가 치조정과 일치할 때 피질골의 최대 압축 응력 값이 가장 낮았다고 보고하였고, Okumura 등²⁷은 임플란트 경부와 접촉하는 피질골의 두께가 감소할수록 피질골의 응력이 증가한다고 보고하였다. 본 연구에서 비록 경사하중이 가해진 경우에 피질골의 최대 응력 값이 1.00 mm 모형을 제외하면 0.00 mm 모형에서 가장 낮았지만, 식립 깊이에 따른 최대 응력 값이 하중 조건에 대하여 일관되지 않은 결과를 보인 것은 본 실험에 적용된 0.75 mm의 얇은 피질골의 두께와 적은 수의 골모형, 35 Ncm의 식립 토크 때문인 것으로 판단된다.

여러 연구를 통해서 하중의 유형이 임플란트 주위 골의 응력 분포와 크기에 결정적인 요인으로 알려져 있다. Qian 등¹⁷은 골에 발생한 응력이 축방향 하중에서는 대칭적으로 분포하였으나 경사하중에서는 비대칭적으로 나타났으며, 하중 방향이 증가할수록 최대 응력은 망상골에서는 거의 변화가 없었지만 피질골에서는 크게 변했다고 보고하였다. Hsu 등²²은 상악 전치부 임플란트의 경사하중이 미치는 영향을 평가한 연구에서 수직하중에 비해서 경사하중이 매우 높은 응력을 발생시킨 것으로 보고하였다. 본 연구에서도 모든 모형의 피질골에 발생한 최대 응력 값이

수직하중에 비해 경사하중이 가해진 경우에 현저히 증가하였고, 망상골 보다는 피질골에서 더 크게 변화를 보인 것으로 나타났다. 이는 경사하중이 수직하중보다 응력을 증가시키는 더 큰 굽힘 모멘트를 야기한다는 것을 의미하는 것으로써 임상적으로 상악 전치부 즉시하중 임플란트의 경우 경사하중을 피하거나 최소화할 수 있도록 임시 보철물에 대한 주의깊은 교합 검사와 조정이 필요할 것으로 사료된다.

임플란트에 가해진 하중에 의해서 임플란트와 주위 골의 계면에서 발생한 미세움직임의 크기는 마찰계수, 골의 탄성계수, 초기 고정력과 같은 요인에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다.⁹ 본 연구 결과에서 축방향의 수직하중이 가해진 경우에 미세움직임이 7.70 - 7.83 μm 로 적게 나타났고 큰 차이를 보이지 않은 것은 모형에 재현된 35 Ncm의 식립 토크에 의해서 피질골 및 망상골과 임플란트 고정체의 나사산 사이에 기계적인 맞물림이 충분히 유지되었기 때문으로 판단된다. 경사하중이 가해진 경우에 식립 깊이가 증가함에 따라서 미세움직임이 증가한 것으로 나타난 것은 모델 설계에 차이는 있으나 치조정 피질골의 두께가 미세움직임의 최대 범위에 유의한 영향을 미치는 것으로 발표한 Sugiura 등²⁸의 연구 결과와 유사하였다. 본 실험에서 나타난 임플란트의 가장 큰 미세움직임은 39.34 μm 로써 골유착을 위해서 임플란트의 미세움직임이 100 μm 이하여야 한다고 제안한 Brunski²⁹의 임계 값과 비교할 때, 골유착의 잠재적 실패를 야기하지 않을 것으로 추측된다.

삼차원 유한요소분석법은 치과 임플란트 분야에서 광범위하게 사용되고 있으나 유한요소 모델링 과정에서 요소의 유형, 배열, 크기, 총 수는 결과의 정확성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.⁸ 본 실험에서는 비선형 분석을 위해서 단순화 골모형에 균질성, 등방성과 선형탄성을 부여하였기 때문에 구조가 복잡하고 개인 차이가 있는 실제 치조골의 특성을 반영하지 않았고, 선행 연구를 참고하여 제한된 식립 토크값과 하중 조건만을 적용하였다는 한계가 있다.

본 연구의 결과를 통해서, 상악 전치부에서 35 Ncm의 토크로 식립된 즉시하중 임플란트는 골유착의 실패를 야기하지 않고 일차 안정성을 확보할 수 있는 미세움직임을 보였고, 경사하중을 가한 경우에 0.25 mm 모형과 0.75 mm 모형에서 피질골의 최대 응력 값이 높게 나타났지만 임플란트를 치조정 하방에 깊게 식립함으로써 치조정 피질골 및 순측 피질골의 변연부에 집중된 응력을 분산시킬 수 있음을 알게 되었다. 임플란트의 식립 깊이가 증가할수록 고정체와 접촉하는 치조정 피질골은 감소하거나 없어지는 반면에 망상골의 접촉응력은 증가하므로 향후 망상골의 골밀도를 고려하고 다양한 피질골의 두께와 식립 깊이를 가정한 모형을 이용하여 더 정교한 유한요소 연구가 추가적으로 필요하리라 사료된다.

결론

식립 토크가 재현된 상악 전치부 즉시하중 임플란트 모형은

이용하여 임플란트 식립 깊이가 주위 골의 응력 분포와 임플란트 미세움직임에 미치는 영향을 알아보기 위해서 삼차원 유한요소 연구를 수행하였다. 임플란트의 식립 깊이가 주위 골의 응력 분포에 많은 영향을 주는데, 특히 식립 깊이의 증가는 피질골에 집중된 응력을 분산시키는데 유리하고 이러한 응력 분산의 효과는 경사하중에서 더욱 크게 나타났다. 이는 임상적으로 상악 전치부 임플란트 식립 시, 임플란트 고정체 상단의 위치를 주의 깊게 결정하여야 함을 말해 준다. 또한 임플란트 식립 깊이의 증가가 초기 골유착 실패와 관련이 있는 미세움직임에는 크게 영향을 주지 않아 임상적으로 일차 안정성 확보에 불리하지 않음을 알았다.

ORCID

Cheol-Woo Park <https://orcid.org/0000-0002-8941-2292>

Sung-Hun Kim <https://orcid.org/0000-0003-3289-9703>

In-Sung Yeo <https://orcid.org/0000-0002-6780-2601>

Hyung-In Yoon <https://orcid.org/0000-0002-9597-6342>

Jung-Suk Han <https://orcid.org/0000-0002-9439-1465>

References

- Rodriguez AM, Rosenstiel SF. Esthetic considerations related to bone and soft tissue maintenance and development around dental implants: report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *J Prosthet Dent* 2012;108:259-67.
- Misch CE, Wang HL, Misch CM, Sharawy M, Lemons J, Judy KW. Rationale for the application of immediate load in implant dentistry: Part I. *Implant Dent* 2004;13:207-17.
- Cooper LF, De Kok IJ, Rojas-Vizcaya F, Pungpapong P, Chang SH. The immediate loading of dental implants. *Compend Contin Educ Dent* 2007;28:216-25; quiz 226.
- Mangano FG, Mastrangelo P, Luongo F, Blay A, Tunchel S, Mangano C. Aesthetic outcome of immediately restored single implants placed in extraction sockets and healed sites of the anterior maxilla: a retrospective study on 103 patients with 3 years of follow-up. *Clin Oral Implants Res* 2017;28:272-82.
- den Hartog L, Raghoobar GM, Stellingsma K, Vissink A, Meijer HJ. Immediate loading of anterior single-tooth implants placed in healed sites: Five-year results of a randomized clinical trial. *Int J Prosthodont* 2016;29:584-91.
- den Hartog L, Raghoobar GM, Stellingsma K, Vissink A, Meijer HJ. Immediate non-occlusal loading of single implants in the aesthetic zone: a randomized clinical trial. *J Clin Periodontol* 2011;38:186-94.
- Cooper LF, Reside GJ, Raes F, Garriga JS, Tarrida LG, Wiltfang J, Kern M, De Bruyn H. Immediate provisionalization of dental implants placed in healed alveolar ridges and extraction sockets: a 5-year prospective evaluation. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2014;29:709-17.
- Ding X, Zhu XH, Liao SH, Zhang XH, Chen H. Implant-bone interface stress distribution in immediately loaded implants of different diameters: a three-dimensional finite element analysis. *J Prosthodont* 2009;18:393-402.
- Kao HC, Gung YW, Chung TF, Hsu ML. The influence of abutment angulation on micromotion level for immediately loaded dental implants: a 3-D finite element analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2008;23:623-30.
- Javed F, Romanos GE. The role of primary stability for successful immediate loading of dental implants. A literature review. *J Dent* 2010;38:612-20.
- Cassetta M, Driver A, Brandetti G, Calasso S. Peri-implant bone loss around platform-switched Morse taper connection implants: a prospective 60-month follow-up study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2016;45:1577-85.
- Chu CM, Hsu JT, Fuh LJ, Huang HL. Biomechanical evaluation of subcrestal placement of dental implants: in vitro and numerical analyses. *J Periodontol* 2011;82:302-10.
- Chou HY, Müftü S, Bozkaya D. Combined effects of implant insertion depth and alveolar bone quality on periimplant bone strain induced by a wide-diameter, short implant and a narrow-diameter, long implant. *J Prosthet Dent* 2010;104:293-300.
- León J, Carrascosa A, Rodríguez X, Ruiz-Magaz V, Pascual A, Nart J. Finite element analysis relative to the crestal position of a 3.0-mm-diameter implant. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2014;34:381-7.
- Huang CC, Lan TH, Lee HE, Wang CH. The biomechanical analysis of relative position between implant and alveolar bone: finite element method. *J Periodontol* 2011;82:489-96.
- Rismanchian M, Askari N, Shafiei S. The effect of placement depth of platform-switched implants on periimplant cortical bone stress: a 3-dimensional finite element analysis. *Implant Dent* 2013;22:165-9.
- Qian L, Todo M, Matsushita Y, Koyano K. Effects of implant diameter, insertion depth, and loading angle on stress/strain fields in implant/jawbone systems: finite element analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2009;24:877-86.
- Dos Santos MBF, Meloto GO, Bacchi A, Correr-Sobrinho L. Stress distribution in cylindrical and conical implants under rotational micromovement with different boundary conditions and bone properties: 3-D FEA. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 2017;20:893-900.
- Borie E, Orsi IA, Noritomi PY, Kemmoku DT. Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Biomechanical Behaviors of Implants with Different Connections, Lengths, and Diameters Placed in the Maxillary Anterior Region. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2016;31:101-10.
- Bal BT, Çağlar A, Aydin C, Yilmaz H, Bankoğlu M, Eser A. Finite element analysis of stress distribution with splinted and nonsplinted maxillary anterior fixed prostheses supported by zirconia or titanium implants. *Int J Oral Maxillofac Implants*

- 2013;28:e27-38.
21. Lee JS, Cho IH, Kim YS, Heo SJ, Kwon HB, Lim YJ. Bone-implant interface with simulated insertion stress around an immediately loaded dental implant in the anterior maxilla: a three-dimensional finite element analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2012;27:295-302.
 22. Hsu ML, Chen FC, Kao HC, Cheng CK. Influence of off-axis loading of an anterior maxillary implant: a 3-dimensional finite element analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2007;22:301-9.
 23. Santiago Junior JF, Pellizzer EP, Verri FR, de Carvalho PS. Stress analysis in bone tissue around single implants with different diameters and veneering materials: a 3-D finite element study. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl* 2013;33:4700-14.
 24. Verri FR, Santiago Júnior JF, Almeida DA, Verri AC, Batista VE, Lemos CA, Noritomi PY, Pellizzer EP. Three-dimensional finite element analysis of anterior single implant-supported prostheses with different bone anchorages. *ScientificWorld-Journal* 2015;2015:321528.
 25. Tahmaseb A, De Clerck R, Aartman I, Wismeijer D. Digital protocol for reference-based guided surgery and immediate loading: a prospective clinical study. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2012;27:1258-70.
 26. Attard NJ, Zarb GA. Immediate and early implant loading protocols: a literature review of clinical studies. *J Prosthet Dent* 2005;94:242-58.
 27. Okumura N, Stegaroiu R, Kitamura E, Kurokawa K, Nomura S. Influence of maxillary cortical bone thickness, implant design and implant diameter on stress around implants: a three-dimensional finite element analysis. *J Prosthodont Res* 2010;54:133-42.
 28. Sugiura T, Yamamoto K, Horita S, Murakami K, Tsutsumi S, Kirita T. The effects of bone density and crestal cortical bone thickness on micromotion and peri-implant bone strain distribution in an immediately loaded implant: a nonlinear finite element analysis. *J Periodontal Implant Sci* 2016;46:152-65.
 29. Brunski JB. Avoid pitfalls of overloading and micromotion of intraosseous implants. *Dent Implantol Update* 1993;4:77-81.

상악 전치부 즉시하중 임플란트의 식립 깊이에 따른 삼차원 유한요소 분석

박철우 · 김성훈 · 여인성 · 윤형인 · 한중석*

서울대학교 치의학대학원 치과보철학교실

목적: 삼차원 유한요소분석을 이용하여 상악 전치부 즉시하중 임플란트의 식립 깊이가 주위 골의 응력 분포와 임플란트의 미세움직임에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

재료 및 방법: 임플란트 상단이 치조정 피질골 상연을 기준으로 0.00 mm, 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm, 1.00 mm 깊게 위치되도록 총 5개 골모형을 제작하였다. 고정체와 주위 골 계면에 마찰접촉과 35 Ncm의 식립 토크를 재현하였다. 임시 보철물에 178 N의 정하중을 고정체의 중심축에 대하여 축방향의 수직하중과 30°의 경사하중으로 가하고 유한요소 분석을 시행하였다.

결과: 임플란트의 식립 깊이가 주위 골의 응력 분포에 상당한 영향을 주었다. 임플란트의 가장 큰 미세움직임이 39.34 μ m로 나타났다. 경사하중이 수직하중에 비해서 응력 분포와 미세움직임의 변화에 크게 기여하였다.

결론: 임플란트 식립 깊이의 증가는 피질골에 집중된 응력을 분산시키는데 유리하였으며, 초기 골유착 실패와 관련이 있는 미세움직임에는 크게 영향을 주지 않았다. (*대한치과보철학회지* 2018;56:105-13)

주요단어: 치과용 임플란트; 즉시하중; 식립 깊이; 유한요소분석

*교신저자: 한중석

03080 서울 종로구 대학로 101 서울대학교 치의학대학원 치과보철학교실

02 2072 2661; e-mail, proshan@snu.ac.kr

원고접수일: 2017년 12월 4일 / 원고최종수정일: 2018년 1월 11일 / 원고채택일: 2018년 2월 23일

© 2018 대한치과보철학회

이 글은 크리에이티브 커먼즈 코리아 저작자표시-비영리 3.0 대한민국 라이선스에 따라 이용하실 수 있습니다.