

유한요소법을 이용한 임플란트 고정체의 삼각배열에 따른 지지골의 응력 분석

손 성 식, 이 명 곤*

인제치과기공소, 부산가톨릭대학교 생명과학대학원 치기공학과*

Finite element stress analysis on supporting bone by tripodal placement of implant fixture

Sung-Sik Son, Myung-Kon Lee*

Inje Dental Lab.

Dept. of Dental Laboratory Science, Graduate School of Life Science, Catholic University of Pusan*

[Abstract]

Purpose: This study was to propose the clear understanding for stress distribution of supporting bone by use of staggered buccal offset tripodal placement of fixtures of posterior 3 crown implant partial dentures. We realized posterior 3 crown implant fixed partial dentures through finite element modeling and analysed stress effect of implant arrangement location to supporting bone under external load using finite element method.

Method: To understand stress distribution of 3 crown implant fixed partial dentures which have 2 different arrangement by finite element analysis. In each model, for loading condition, we applied 45° oblique load to occlusal surface of crown and applied 100 N for 3 crown individually(total 300 N) for imitating possible oral loading condition. at this time, we calculated Von Mises stress distribution in supporting bone through finite element method.

Result: When apply 45° oblique load to in-line arrangement model, maximum stress result for 100 N for each 3 crown 47.566MPa. In tripodal placement, result for 1 mm buccal offset tripodal placement implant model was maximum distributed load 51.418MPa, so result was higher than in-line arrangement model.

Conclusion: In stress distribution result by placement of implant fixture, the most effective structure was in-line arrangement. The tripodal placement does not effective for stress distribution, gap cause more damage to supporting bone.

○Key word : Dental implant, Tripodal placement, Finite element method, von Mises stress

교신저자	성명	이 명 곤	전화	010-4818-0591	E-mail	mkleee@cup.ac.kr
	주소	부산시 금정구 부곡동 9, 부산가톨릭대학교 치기공학과				

I. 서 론

골유착성 임플란트(osseointegrated implant)는 임플란트 구조의 디자인과 제작 재료 그리고 고정체의 표면처리 등에 대한 많은 연구와 발전으로 임상에서 그 효율성이 입증됨에 따라 초기의 완전 무치악 적응증에서 부분 무치악, 최근에는 단일치 수복에 이르기까지 그 이용이 증가되고 있으며, 악안면 보철 및 교정 치료의 고정원(anchor) 등 다양한 임상적 상황에도 적용되고 있다(김영석과 이동근, 2002; 남기운 등, 2003).

지지골에 식립 결합되는 치과용 임플란트는 저작기능에서 발생하는 정하중과 동하중의 복잡한 하중 조건에 노출되며, 보철물을 통해 임플란트에 가해지는 하중들은 고정체와 직접 결합되어 있는 지지골로 전달되어 비정상적인 하중 조건과 과하중 조건을 만나게 되면 임플란트 지지골의 소실, 임플란트와 지지골의 유착 파괴 등의 위험 상황이 발생할 수 있다. 따라서 임플란트 시술 시에는 골조직에서 발생할 수 있는 응력의 크기와 분포 양상을 파악하여 이를 감소시키는 노력이 필요하며, 임플란트 보철물의 생체역학적인 안정성을 얻을 수 있도록 구조의 기하학적 위험 요소를 축소시킬 수 있는 연구가 필요하다.

임상적으로 가장 많이 시술되고 있는 구치부 부분 무치악에 대한 임플란트 고정성 국소의치의 경우, 고정체들의 식립 위치를 삼각형으로 변화시켜 임플란트 구조물과 지지골의 안정성을 얻고자 하는 고안이 있었다. Rangert 등(1997)의 삼각 배열(tripodal placement)에 대한 연구와 Palacci(2001)도 삼각 배열 시술은 임플란트 보철물에 대한 지지골의 생역학적 위험 요소를 감소시키는 효과가 있다고 제시하였다.

그러나 삼각 배열 구조에 대한 지지골의 안정성에 대하여 다른 결론들이 보고되었는데 Sato 등(2000)의 3개 임플란트의 tripodism 식립에 따른 응력 비교 연구, Akca 등(2001)의 임플란트의 삼각 배열에 대한 굽힘 모멘트(bending moment)에 대한 유한요소법 연구와 Itoh 등(2004)의 설측 및 협측 방향의 삼각 배열 구조와 일렬 배열(in-line placement) 지지골의 응력 비교 연구, Sütpideler 등(2004)과 Abu-Hammad 등(2007)의 연구에서 삼각 배열이 일렬 배열에 비해 취약점을 가지고 있

다는 보고를 하고 있다.

임플란트의 배열 구조에 따른 지지골의 응력 분포를 분석하기 위한 생체역학적 연구 방법에는 크게 두 가지의 연구 방법이 이용되고 있다. 하나는 실제 실험실에서 임플란트 재료의 물성이나 파괴 강도 등의 측정과 같은 기계적인 실험 방법이고, 다른 하나는 임상 실험의 어려움 즉, 재료의 한정성과 생체를 이용하는 실험의 제약성, 그리고 다양한 생체역학적 환경 구현의 애로점 등을 극복하기 위해 컴퓨터를 이용하여 가상공간에서 유한요소법으로 응력 분포 및 구조적 안정성 등을 연구하는 방법이다.

컴퓨터 모의 실험 방법인 유한요소 해석(FEA: Finite Element Analysis)은 구조물 내의 무한개의 미지수 점들을 유한개의 이산화된 위치의 절점(node)과 이들을 유기적인 관계를 맺어주는 요소(element)로 나타내고, 절점들의 변위를 미지수로 하는 연립방정식의 계산을 통해 각 절점에서의 변위를 구함으로써 해서 구조물 내의 임의의 점에서의 변위, 응력, 변형률 등의 값을 수치적인 근사화를 통해 얻어내는 것을 말한다(손창현 등, 1999). 유한요소법은 적절한 조건 설정과 정확한 계산과정이 이루어진다면 실험과 관련 없는 외적 요인을 배제할 수 있으며, 복잡한 구조물 해석에 있어 구조 재현이 쉽고 모형의 변형이 간단하며 변형 전 후의 구조물 상태를 비교 할 수 있다. 또한 전체 구조물의 응력 분포와 측정이 용이하다는 장점을 갖고 있다(Alkan 등, 2004; Lang 등, 2003; Sakaguchi & Borgerser, 1995).

본 연구는 구치부 임플란트 고정성 국소의치 제작시 임플란트의 삼각 배열 구조에 따른 지지골의 응력 분포 결과를 파악하기 위하여 3개 치관 고정성 국소의치 모델을 일렬 배열 모델과 협측 방향으로 1mm 간격을 갖는 삼각 배열 모델을 제작하고, 교합 하중을 모방한 45° 경사 하중을 적용하여 임플란트 지지골의 von Mises 응력 결과를 비교 분석하고자 시행하였다. 임플란트의 일렬 배열과 삼각 배열에 따른 생체역학적인 응력 분석 결과는 지지골 안정성의 비교, 예측을 위한 자료 제공이 가능할 것이며, 이를 바탕으로 임상 시술에 있어 환자의 구강 건강에 보다 효과적인 시술 방법의 자료를 제공하고자 한다.

II. 실험방법

유한 요소 분석을 위해 먼저 고정성 국소의치에 사용될 단관 모델을 구축하였다. 단관 모델은 임플란트가 치관 중심에 있는 기본 모델과 중심에서 0.5mm 협측으로 이동된 모델 2 종을 제작하였으며 이러한 단관 모델들을 기본으로 하여 일렬 배열과 삼각 배열의 2 종 고정성 국소의치 모델을 제작하였다. 본 연구에서 이용된 2가지 고정성 국소의치 임플란트 모델 구축과 하중 조건에 대한 유한요소 분석은 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS(Ver. 10.0, Swanson Analysis, USA)를 이용하였다.

1. 실험 모델 제작

1) 단관 모델

단관 모델의 모델링은 크게 4 부분으로 구성된 간단한 구조로 구현하여 외부 하중 조건에 따른 배열 조건의 차이에 따른 지지골의 하중 분포 비교 분석에 집중하려고 하였다. 4개 부분은 치관(crown), 임플란트(implant), 피질골(cortical bone), 그리고 해면골(cancellous bone)로 구성하였다. 상부 보철물인 치관 부분은 자연치의 제 2 소구치 근원심폭 7mm, 제 1, 2 대구치의 근원심폭 9~11mm를 기준으로 보철물 제작 시 자연치보다 교합면 크기를 축소하는 경향을 고려하고, 최후방 대합치(제 2대구치) 교합면의 중간까지 접촉될 수 있는 크기로 설정하여 교합면은 근원심폭경 8mm, 협설폭경 8mm의 4각 평면으로 하고

높이는 6mm인 직육면체로 구현하였다. 임플란트는 임상에서 가장 많이 사용하는 직경 3.75mm, 길이 13mm를 채택하여 간단한 원주형으로 구현하였다.

임플란트 고정체를 지지하는 지지골 형태는 외부 골 표면을 덮는 두께 1.5mm의 피질골과 내부 해면골로 구성하였다. 근원심폭은 8mm, 협설폭은 12mm로 지지골 전체 높이는 24mm로 하여 전체적으로 모서리를 둥글게 처리한 직육면체 형태로 구성하였다.

인체의 피질골과 해면골을 포함한 모델의 모든 구조물은 등방성, 균질성, 선형탄성 재료들로 가정하였으며, 각 재료들의 물성치는 문헌에 나와 있는 자료들을 이용하였다(Table 1). 모형을 이루는 각각의 부속 구조물들의 모형은 Fig.1에 나타내었으며, 이들이 결합된 단관 모델의 모형은 Fig.2에 나타내었다.

일렬 배열 고정성 국소의치 모델과 삼각 배열 고정성 국소의치 모델에 사용하기 위하여 단관 모델은 2종류를 제작하였는데, 일렬 배열에 사용되는 고정체가 지지골과 치관 중심에 배열된 모델은 Fig.2a에 제시하였으며, 삼각 배열 구조 모델을 제작하기 위한 고정체 편심 배열 단관 모델은 고정체 중심 배열 모델과 같은 구조와 형태이나 임플란트의 위치를 지지골과 치관의 중심에서 피질골측으로 0.5mm 이동된 편심 배열 단관 모델을 제작하였다. 다른 변수 조건을 제어하기 위하여 고정체의 위치가 중심에서 이동된 형태 외에는 모든 조건을 동일하게 제작하였으며 이 모델의 형태를 Fig.2b에 제시하였다.

Table 1. Material properties used in the implant model

Materials	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio
Cortical bone (Sertgoz, 1997)	13.7	0.3
Cancellous bone (Kamposiora 등, 1996)	1.37	0.3
Ti alloy implant (Lang 등, 2003)	117	0.3
Gold alloy crown (Kamposiora 등, 1996)	91	0.33

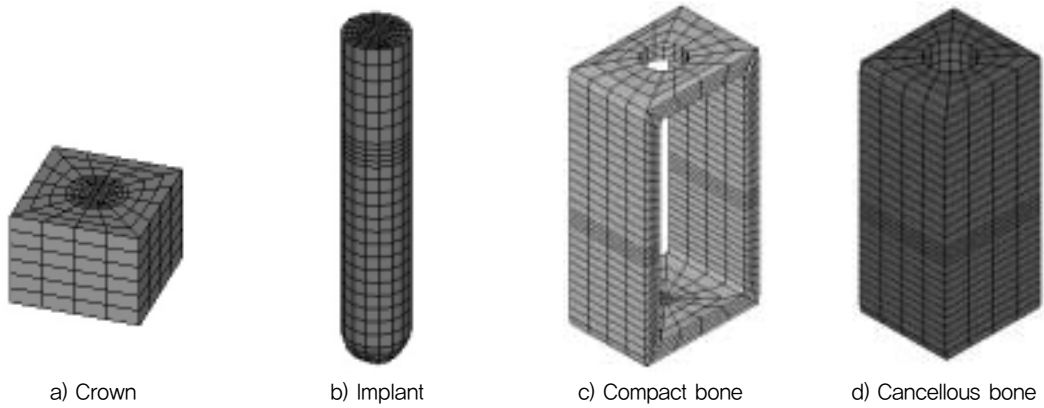


Fig. 1. Parts of the crown implant model used in this study

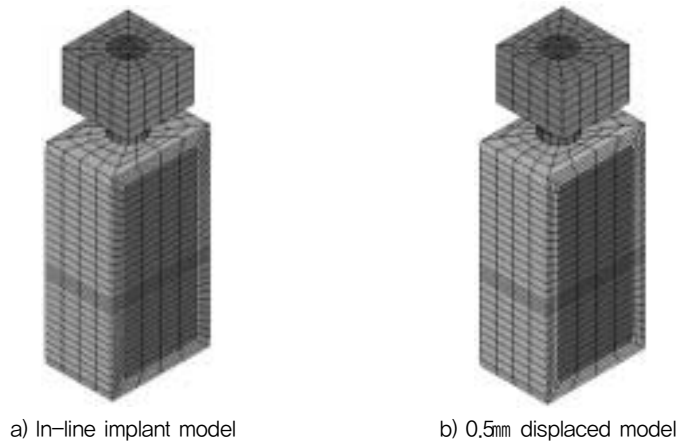


Fig. 2. In-line model and 0.5 mm offset implant model

2) 고정성 국소의치 모델

본 연구에서는 제 2소구치부터 제 2대구치까지의 3 치관을 연결한 하악 구치부 국소의치 형태의 임플란트 모델을 가정하여 고정체 중심 배열 단관 모델을 3개 연결하여 제작한 3 임플란트 3 치관의 일렬 배열 국소의치 모델과 중심 치관 고정체와 양단 치관 고정체가 1mm 간격을 갖는 삼각 배열 국소의치 모델을 구현하였다. 임플란트 고정체의 삼각 배열은 0.5mm 이동 단관 모델을 중심 치관 임플란트는 협측 방향으로, 양쪽 끝 편심 위치 임플란트는 설측 방향을 연결하여 협측 방향 삼각 배열 모델을 제작하였다. 이 모델은 0.5mm씩 이동된 단관 모델이 반대 방향으로 연결되어 결국 임플란트 중심에서 1mm 간격을 갖게 하였다(Fig.3).

고정성 국소의치 모델은 68,394개의 육면체 요소들로

구현 하였으며, 본 연구에서 사용한 2종의 임플란트 국소의치 모델의 요소 수는 모두 동일하게 구성하였다.

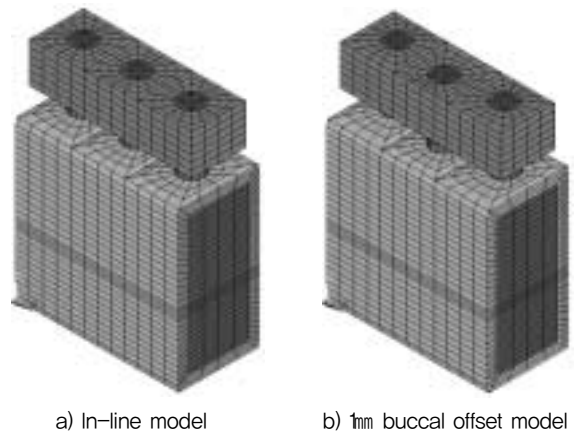


Fig. 3. 2 types of implant-supported partial dentures models

2. 유한요소 분석

1) 외부 하중

교합 하중을 모방한 외부 경사 하중 설정에 있어 선행연구에서는 수직 하중과 수평 하중, 경사 하중을 다양하게 사용하고 있는데 이는 각 치아 교두 경사도와 교합면 형태, 하악골 운동 등이 복합적으로 작용하여 저작시 하중 경사에 대한 일정한 경향을 찾기 어렵기 때문으로 사료된다. 기존 하중 적용 방법을 보면 수직 하중을 교합면의 1점이나 다수의 점으로 분산하여 적용하는 경우(Akca 등, 2003; Eskitascioglu 등, 2004)와 수직 하중과 근원심 방향 수평 하중을 동시에 적용하거나(Akour 등, 2005), 교두 경사를 만들고 직각으로 하중을 적용하여 수직 하중과 협설 방향의 수평 하중이 동시에 작용하게 하거나 15~30° 정도의 경사 하중을 적용하는 연구(Pierrisnard 등, 2003; Sato 등, 2000) 등으로 다양하게 이루어지고 있다.

본 연구는 선행연구(Holmgren 등, 1998; Geng 등, 2004)와 Ishigaki 등(2003)이 발표한 저작 습관을 자르기형(chopping type)과 갈기형(grinding type)으로 구분하고 전면에서의 저작 주기(chewing cycle)로 인한 폐구 운동으로 각도가 각각 35.6°와 60.7°로 발표한 내용을 바탕으로 설측에서 협측으로의 45° 경사 하중을 적용하였다.

하중의 크기도 역시 임상적 교합 하중의 크기에 대한 명확한 정의가 없으며 선행 연구에서도 1개 치관당 1~300N까지 다양하게 이용되고 있으며, 본 연구에서는 선행 연구에서 가장 많이 이용되고 있는 1치관당 100N을 사용하였다(권주홍 등, 2001; 김일규 등, 2004; 손성식, 2008; 손성식 등, 2007; 윤승현 등, 1997; 이명곤, 2004; 이태엽 등, 2002; Eraslan 등, 2005; Stegaroiu 등, 1998).

외부 경사 하중은 국소의치 모델의 각 치관 모두에 적용하는 개별하중(individual load) 조건으로 적용하였다. 개별하중은 3개 교합면에 균등하게 분산된 교합하중을 가산하여 3개의 치관 교합면에 존재하는 모든 절점에 300N/(3개 교합면 총 절점 수) 만큼 설측에서 협측 방향으로 균등하게 나누어 적용하였다.

2) 구속 조건과 von Mises 응력 분석

모델에 적용한 구속 조건으로는 지지골 구조의 최하단

부위 모든 절점을 6 방향의 자유도를 공히 구속시켜 이동 및 회전이 없도록 하였다.

지지골에 미치는 응력 분포를 분석하기 위해 각 모델의 하중 적용에 따른 지지골 내 최대 von-Mises 응력 값의 크기와 위치를 분석하였으며, 등 간격으로 구분된 응력 값의 분포를 색깔 별로 나타내었다.

III. 실험결과

유한 요소를 이용한 von Mises 하중 분포도를 분석하여 실험 결과를 얻었다. 45° 경사 하중을 모델 교합면 전체에 적용한 결과 양 모델 모두 최대 von Mises 응력 값은 임플란트 고정체가 삽입되어 접하는 상부 피질골 부위에서 나타났다. 하중 조건과 배열 조건에 따른 각 모델의 최대 응력값을 Table 2에 제시하였으며, 동일한 하중 조건에서 일렬 배열 모델에 대한 협, 설측 1, 2mm 간격 삼각 배열 모델 응력값을 %로 비교 제시하였다.

1. 일렬 배열 고정성 국소의치 모델

고정체 일렬 배열 국소의치 모델에 300N의 45° 경사 하중을 교합면 전체에 분산 하중 형태로 부여 한 후 발생하는 지지골의 von Mises 응력 분포를 유한요소 분석을 통해 계산 하였다. 일렬 배열 모델에 45° 경사 하중을 적용하여 나타난 최대 von Mises 응력값은 47.566MPa 임플란트 인접 상부 피질골에서 나타났으며, 최대 응력값이 나

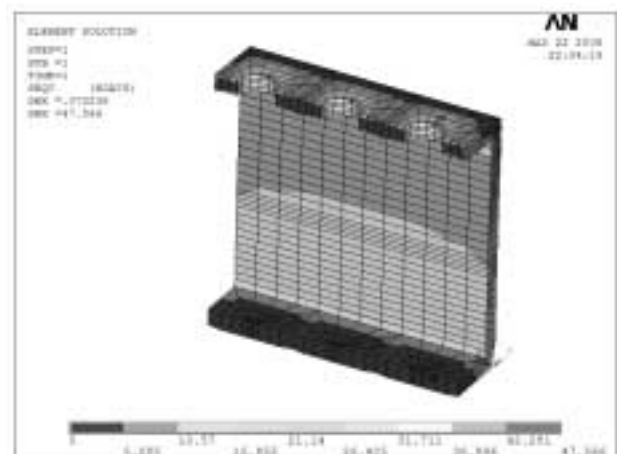


Fig. 4. von Mises stress distribution in the in-line partial implant dentures model

타난 피질골 부위를 지지골 모델에서 분리하여 Fig.4에 제시하였다(손성식, 2008).

2. 1mm 간격 협측 삼각 배열 국소의치 모델

3 개의 임플란트를 중심선에서 중심 치관과 양단 치관이 각각 협측과 설측으로 서로 0.5mm씩 떨어지게 하여 총 1mm 간격을 가지도록 배열한 삼각 배열 국소의치 모델을 이용하여 일렬 배열 국소의치 모델과 같은 하중 조건으로 유한요소 분석한 결과를 얻었다. 45° 경사 하중을 3 개 치관 교합면에 분산 적용한 결과 최대 von Mises 응력값은 51.418MPa로 상부 피질골의 임플란트 인접 부위에서 나타났으며 응력 분포양상은 Fig.5와 같다(손성식, 2008).

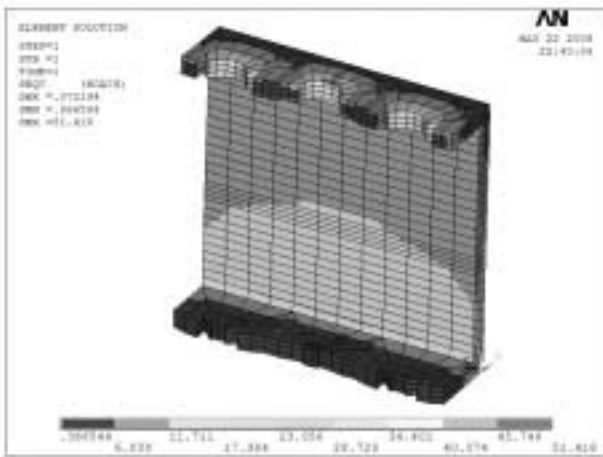


Fig. 5. von Mises stress distribution in the 1mm buccal offset partial dentures model

Table 3. Maximum von Mises stress value of each models (손성식, 2008)

Result of each fixture placement types model			
In-line model	47.566MPa (100.0%)	Buccal 1mm offset model	51.418MPa (108.1%)

IV. 고찰

본 연구는 유한요소 모델링과 응력 분석법을 이용하여 실험하였다. 유한요소 모델링을 통해 구현된 치관, 임플란트 및 지지골 등의 모델이 실제 구강 내의 모든 구조적, 역학적, 생화학적 환경을 대변한다고 할 수는 없다. 그러

나 유한요소법을 이용한 연구는 다양한 장점을 가지고 있으며, 가장 두드러진 장점은 생체를 통한 연구에서는 할 수 없는 역학적 하중 조건에 대한 연구가 가능하다는 것이다.

치과 영역에서의 생체 실험은 동물을 이용한 실험을 제외하면 인체 실험은 불가능하다고 할 수 있으며, 동물 실험도 구강 내 역학적 환경이 인간과 달라 그 결과 값을 바로 인체에 적용하는 것은 무리가 있다. 이렇게 생체를 이용한 연구가 불가능한 경우 유한요소법 등을 이용한 시뮬레이션 연구는 매우 유용한 방법이라고 할 수 있다. 본 연구에서 구현한 모델과 하중 조건은 임상적 상황의 국소의치 형태를 모델화 한 것이며, 실제 구강 내 역학적 하중 환경과 구강 내 구조물들의 물성을 단순화하여 재현한 것이다. 임플란트 배열 상태에 따른 지지골의 von Mises 응력 분포를 파악하려는 본 연구 목적에 적합한 모델이라고 판단되며, 각 모델에서 나타난 응력 분포 분석을 통해 임플란트 고정체의 배열 위치 선택에 적절한 판단 근거를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

지지골에 식립된 치과용 임플란트는 구강 내에서 발생하는 복잡한 하중 조건에 노출 된다. 이때 치과 임플란트에 가해지는 하중은 치근막이 없는 지지골에 직접적으로 전달되게 되며 이로 인한 지지골과 임플란트 고정체 간의 골유착 파괴의 위험성이 높다. 따라서 골조직에서 발생하는 응력의 크기와 분포 양상을 정확하게 파악하고 조절하는 것이 필요하다.

부분 무치악 회복을 위한 3 개 치관 연결 구치부 임플란트 국소의치 시술의 경우, 임플란트 고정체들의 식립 위치를 변화시켜 임플란트 구조물과 지지골의 안정성을 도모하고자 하는 노력이 있었다.

임플란트 고정성 국소의치 제작시 삼각 배열 구조가 굽힘 모멘트에 대해 지지골과 임플란트의 각 구조부가 보다 안정성을 가질 수 있다고 알려져 왔다(Palacci, 2001; Rangert 등, 1989). 그러나 근래에는 삼각 배열구조가 오히려 지지골에 높은 응력을 발생시키거나 응력 감소 효과가 없다는 주장이 제기 되었다 (Akca 등, 2001; Itoh 등, 2004; Sato 등, 2000; Sütçüoğlu 등, 2004). 이러한 상반된 연구 결과들은 하중 조건과 배열 조건이 서로 다르게 적용되어 삼각 배열과 일렬 배열의 지지골의 응력 발

생 결과 비교가 곤란한 상태라고 할 수 있다.

본 연구는 하악 구치부 3개 임플란트 고정성 국소의치 모델을 가정하여 임플란트의 일렬 배열 모델과 임플란트 간격을 1mm로 달리한 삼각 배열의 모델을 3차원 유한요소 모델링을 이용하여 구현하고 45° 경사 하중을 적용하여 각 모델에서 발생하는 지지골의 von Mises 응력분포에 미치는 영향을 유한요소법으로 분석하여 임플란트 지지골의 안정성을 예측하고자 시행 하였다.

실험 결과와 같이 본 연구의 하중 조건과 배열 조건 하에서는 삼각 배열 국소의치 모델에서 더 높은 von Mises 응력 분포가 지지골에서 나타났다. 1mm 간격 협측 삼각 배열 모델은 45° 경사 분산 하중에서 51,418MPa로 일렬 배열 국소의치 모델의 피질골에서 나타난 최대 von Mises 응력값 47,566MPa에 비하여 약 8% 높게 나타나 기존 이론에 주장한 삼각 배열의 응력 감소 효과가 전혀 나타나지 않았다.

따라서 임플란트 고정성 국소의치 제작시 삼각 배열이 굽힘 모멘트에 대해 하중이 주로 치축방향으로 향하도록 유도하고 응력도 최소화 시켜주는 효과가 있다고 알려져 왔으나 본 연구의 결과로는 삼각 배열의 지지골의 응력 감소 효과는 없다고 볼 수 있으며 오히려 삼각 배열은 일렬 배열보다 매우 높은 응력 상황이 발생되어 지지골 건강에 해로운 상태가 된다고 할 수 있다.

이러한 결과에 대한 원인으로는 보다 상세한 실험 연구 분석이 필요하다고 생각되지만 기본적으로 추측되는 원인으로는 삼각 배열을 위해서는 각 임플란트의 위치가 지지골 중심에서 한쪽 끝으로 편중되어 응력의 흡수 분산시키는 골질의 양이 축소되기 때문인 것으로 추측된다. 이에 대한 보다 확실한 원인 분석을 위해서는 삼각 배열 고정체의 식립 간격을 다르게 하여 발생하는 응력 분석 연구가 필요하다고 생각된다.

V. 결 론

본 연구는 유한요소법을 이용하여 삼각 배열의 구치부 고정성 국소의치 형태를 유한요소법 모델링을 통하여 구축하고 구강 내 저작 운동을 모방한 가상 외부 하중을 임

플란트 상부 구조물 치관에 인가하여 임플란트의 구조적 안정성 및 지지골의 von Mises 응력 분포를 관찰하였다.

1. 3개 치관 3개 임플란트 국소의치 모델의 고정체를 일렬 배열과 삼각 배열로 구성하여 45° 경사 하중을 300N 분산 하중을 적용하여 임플란트 지지골에서 발생하는 von Mises 응력을 분석한 결과 모두 150MPa 이하의 낮은 응력값의 분포를 보였다. 본 연구에서 가정한 하중 조건 하에서는 양 모델 모두 지지골의 안정성에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.
2. 각 하중 조건에서 삼각 배열 구조가 일렬 배열 구조에 비해 높은 최대 von Mises 응력값을 보였다. 이러한 결과는 일렬 배열 구조가 삼각 배열 구조보다 지지골의 안전성에 있어서는 더 좋은 구조라고 판단된다.

참 고 문 헌

- 권주홍, 조혜원. 단일치 임플란트 지지 보철물에서 고정체와 지대주 나사 직경의 차이에 따른 삼차원 유한요소법적 응력 분석. 원광치의학, 10(2), 1-14, 2001.
- 김영석, 이동근. 골유착성 치과 임플란트의 성공률에 대한 임상적 연구. 원광치의학, 11(1), 163-180, 2002.
- 김일규, 이성호, 류승현. 구치부 부분 무치악 결손에서 유용한 세 가지 임플란트 수복법들의 응력분산에 관한 3차원 유한요소법적 비교연구. 대한구강악안면외과학회지, 30, 175-180, 2004.
- 남기윤, 장범석, 엄홍식. 국산 임플란트의 임상적 성공률에 대한 2년간의 후향적 연구. 대한치주과학회지, 33(1), 37-46, 2003.
- 손성식. 임플란트의 삼각배열에 따른 지지골의 유한요소법 응력 분석. 부산가톨릭대학교 대학원 석사논문, 2008.
- 손성식, 김영직, 이명곤. 유한요소 분석을 이용한 하중 위치에 따른 구치부 임플란트 국소의치 지지골의 응력 분포 연구. 대한치과기공학회지, 29(1), 93-101, 2007.

- 손창현, 이규민, 박장원, 김형일, 조운원. ANSYS를 이용한 유한요소해석 입문. 3판, 도서출판 계림, 31-40, 1999.
- 윤승현, 신종현, 정재현. 임플란트 조임 나사의 종류에 따른 임플란트 보철의 유한요소법적 응력 분석. *Oral Biology Research*, 21(1), 125-148, 1997.
- 이명곤. 골유착성 치과 임플란트 고정체 직경에 따른 지지골의 응력 분포에 관한 삼차원 유한요소 분석적 연구. *대한치과기공학회지*, 26(1), 69-76, 2004.
- 이태엽, 강재석, 이승훈, 안옥주, 강동완. 임플란트 고정체의 매식 경사에 따른 응력분석. *Oral Biology Research*, 26(2), 17-30, 2002.
- Abu-Hammd O, Khraisat A, Dar-Odeh N, Jagger DC, Hammerle CH. The staggered installation of dental implants and its effect on bone stresses. *Clin Implant Dent Relat Res*, 9(3), 121-127, 2007.
- Akca K, Cehreli MC, Iplikcioglu H. Evaluation of the mechanical characteristics of the implant-abutment complex of a reduced-diameter morse-taper implant. *Clin Oral Implants Res*, 14(4), 444-454, 2003.
- Akour SN, Fayyad MA, Nayfeh JF. Finite element analyses of two antirotational designs of implant fixtures. *Implant Dent*, 14(1), 77-81, 2005.
- Alkan I, Sertgoz A, Ekici B. Influence of occlusal forces on stress distribution in preloaded dental implant screws. *J Prosthet Dent*, 91(4), 319-325, 2004.
- Eraslan O, Sevimay M, Usumez A, Eskitascioglu G. Effects of cantilever design in stress distribution in fixed partial dentures—a finite element analysis. *J Oral Rehabil*, 32(4), 273-278, 2005.
- Eskitascioglu G, Usumez A, Sevimay M, Soykan E, Unsal E. The influence of occlusal loading location on stress transferred to implant-supported prostheses and supporting bone : a three-dimensional finite element study. *J Prosthet Dent*, 91(2), 144-150, 2004.
- Geng JP, Ma QS, Xu W, Tan KB, Liu GR. Finite element analysis of four thread-form configurations in a stepped screw implant. *J Oral Rehabil*, 31(3), 233-239, 2004.
- Holmgren EP, Seckinger RJ, Kilgren LM, Mante F. Evaluating parameters of osseointegrated dental implant using finite element analysis—a two dimensional comparative study examining the effects of implant diameter, implant shape, and load direction. *J Oral Implantol*, 24(2), 80-88, 1998.
- Ishigaki S, Nakano T, Yamada S, Nakamura T, Takashima F. Biomechanical stress in bone surrounding an implant under simulated chewing. *Clin Oral Implants Res*, 14(1), 97-102, 2003.
- Itoh H, Caputo AA, Kuroe T, Nakahara H. Biomechanical comparison of straight and staggered implant placement configurations. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 24(1), 47-55, 2004.
- Kamposiora P, Papavasiliou G, Bayne SC, Felton DA. Stress concentration in all-ceramic posterior fixed partial dentures. *Quintessence international*, 27(10), 701-706, 1996.
- Lang LA, Kang B, Wang RF. Finite element analysis to determine implant preload. *J Prosthet Dent*, 90(6), 539-545, 2003.
- Palacci P. Esthetic implant dentistry : soft and hard tissue management. 정원사(김영수 외 역), 58-67, 2001.
- Pierrisnard L, Renouard F, Renault P, Barquins M. Influence of implant length and bicortical anchorage on implant stress distribution. *Clin Implant Dent Relat Res*, 5(4), 254-262, 2003.

- Rangert B, Jemt T, Jörneus L. Forces and moments on Branemark implants. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 4(3), pp. 241–247, 1989.
- Rangert BR, Sullivan RM, Jemt TM. Load factor control for implants in the posterior partially edentulous segment. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 12(3), 360–370, 1997.
- Sakaguchi R, Borgersen SE. Nonlinear finite element contact analysis of dental implant components. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 8(6), 656–661, 1993.
- Sakaguchi R, Borgersen SE. Nonlinear contact analysis of preload in dental implant screws. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 10(3), 295–302, 1995.
- Sato Y, Shindoi N, Hosokawa R, Tsuga K, Akagawa Y. A biomechanical effect of wide implant placement and offset placement of three implants in the posterior partially edentulous region. *J Oral Rehabil*, 27(1), 15–21, 2000.
- Sertgoz A. Finite element analysis study of the effect of superstructure material on stress distribution in an implant-supported fixed prostheses. *Int J Prosthodont*, 10(1), 19–27, 1997.
- Stegaroiu R, Sato T, Kusakari H, Miyakawa O. Influence of restoration type on stress distribution in bone around implant: a three-dimensional finite element analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 13(1), 82–90, 1998.
- Sütüpedeler M, Eckert SE, Zobitz M, An KN. Finite element analysis of effect of prosthesis height, angle of force application, and implant offset on supporting bone. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 19(6), 819–825, 2004.