

## 유한 요소법을 이용한 하악골 이부 결손수복에 사용된 재건용 금속판의 응력분포에 관한 연구

오정환 · 한정수 · 민지현 · 문성준 · 이백수  
경희대학교 치의학전문대학원 구강악안면외과학교실

### Abstract

#### FINITE ELEMENT ANALYSIS OF RECONSTRUCTION OF MANDIBULAR SYMPHYSIS DEFECTS USING RECONSTRUCTION PLATES

Jung-Hwan Oh, Jung-Soo Han, Jee-Hyun Min, Sung-Jun Mun

*Department of Oral and Maxillofacial Surgery, School of Dentistry, Kyung-Hee University*

**Purpose:** This study aimed to evaluate distribution and maximal value of mechanical stresses on the reconstruction plate, bridging mandibular symphysis defect, and to optimize the most appropriate locations of the plate to distribute the stress causing the fracture of the plate.

**Materials and methods:** Four types of reconstruction were constructed by different number and location of the reconstruction plates on the 3 D finite element model (FEM) of a human edentulous mandible: Type I: one plate on the inferior border of the anterior mandible, Type II: one plate on the middle of the anterior mandible, Type III: one plate on the superior border of the anterior mandible, and Type IV: two plates on the inferior and superior border of the anterior mandible.

**Results:** The results showed that the maximal stress of type I (234.29 Mpa) was lower than that of type II (260.91 Mpa) and type III (247.37 Mpa), but higher than that of type IV (186.64 Mpa). We could also observe that the stresses are tending to focus on the inner side and inferior part of the plate which connected proximal segment from the vertical load.

**Conclusions:** On the basis of the findings, it was concluded that using a plate on the inferior border of mandible or two plates on the inferior and superior border of mandible are more favorable to distribute mechanical stresses, which could reduce the fracture of the plate.

**Key words:** Finite element method (FEM), Mandible, Reconstruction plate, Mechanical stress.

### 1. 서 론

중양 절제술에 의한 광범위한 하악골 결손은 하악골의 연속성의 상실, 심한 안모변형, 저작기능과 언어장애를 유발하고 하악골 이부 결손의 경우 호흡장애를 유발할 수도 있다<sup>1)</sup>. 하악골 결손 수복의 목적은 하악골의 연속성을 회복하고 임플란트 등의 보철수복을 위한 충분한 수직적 골량의 획득, 적절한 근육의 부착 등을 수복하여 구강기능과 심미성을 개선하는 데 있다<sup>1)</sup>. 최근에는 혈관을 포함한 골이식 등의 높은 성공률이 보고되고 있지만 진행된 압병기, 예후

가 불량한 경우, 그리고 환자의 전신적 상태가 좋지 않은 경우 하악골의 형태를 유지하고 기능을 보존하면서 잔존하는 골편을 수술 전 위치에 고정하기 위해서 골이식술 보다 재건용 금속판을 이용한 하악골 재건이 선호되고 있다<sup>2)</sup>. 하지만 재건용 금속판의 사용은 감염, 금속판의 노출, 나사의 풀림과 파절, 금속판의 파손, 불량한 하악골의 외형 형성 등의 합병증을 야기할 수 있다. 특히, 비정상적인 하중에 의해 나사의 풀림과 파절, 금속판의 파손 등이 발생하고, 이것은 금속판을 제거하는 추가적인 수술을 필요로 한다<sup>3)</sup>.

본 연구에서는 응력의 비교연구에 효율적인 것으로 알려

진 유한 요소법을 이용하여 하악골 이부에 결손모델을 구성하고, 수직적 힘을 가했을 때 재건용 금속판의 위치와 개수에 따라 금속판에 전달되는 응력의 분포와 최대 응력값을 연구하고 금속판 파손을 감소시킬 수 있는 방법을 알아보고자 하였다.

## II. 실험재료 및 방법

### 1. 삼차원 하악골 모델링

하악골의 기하학적 삼차원 구조는 인간 무치악 하악골을 컴퓨터 단층 촬영하고 이를 CAD데이터로 변환하여 얻었다. 유한요소해석 프로그램인 Hypermesh (version 7.0)을 이용하여 하악골의 치밀골 부위의 자료를 기반으로 정상적인 가상의 하악골 유한요소 모델을 구성하였다. 모델은 정위적 X-Y-Z 좌표 시스템으로 설정되었다. X 축은 내, 외측 방향, Y축은 상하방향, Z축은 전후방으로 설정되었다. 원점은 좌, 우 하악 과두돌기의 중앙점에서 X-Y 평면상에 위치하였다. 하악골체의 견고한 회전과 전위를 방지하지 하기 위하여 양측 하악과두를 고정시켰다. 하악골 결손 모델은 양측 견치를 포함한 이부의 결손 형태로 형성하였다.

### 2. 경계조건 및 재건용 금속판과 나사 모델링

금속판은 두께가 1.5mm인 Martin사의 Smart Shape Plates 2.3mm 시스템 (나사 직경: 2.3mm, Martin GmbH, Germany)을 기초로 하여 디자인되었다. 금속판 길이를 9-hole로 설정하고 하악골의 외형에 맞게 구부린 다음, 양측에서 두 개의 나사를 이용하여 하악골의 협, 설측 치밀골에 고정되도록 설정하였다. 나사를 rigid body element로 설정하여 정상적인 두께의 실린더 형태의 핀으로 치밀골과 금속판을 연결, 고정하여 금속판과 나사는 하나의 단위로 간주되도록 하였다. 저작근의 부착위치와 근육의 방향은 고려하지 않았으며, 비교와 평가를 단순화하기 위해서 정상적인 저작운동 패턴 대신에 수직적 하중을 사용하였다.

재건용 금속판의 위치와 개수에 따른 응력이 분포되는 위치와 최대 응력값의 변화를 연구하기 위하여 다음과 같은 네 가지의 재건 형태를 설정하였다.

- Type I: 하악골 하연에 한 개의 재건용 금속판 적용
- Type II: 하악골 중간부위에 한 개의 재건용 금속판 적용
- Type III: 하악골 상연에 한 개의 재건용 금속판 적용
- Type IV: 하악골 하연과 상연에 각각 한 개씩 재건용 금속판 적용 (두 개의 금속판).

하악골의 격자 구조를 위해 15,158개의 요소(4-node

tetragonal)와 4,334개의 절점이 사용되었으며, 2.3mm 재건용 금속판을 위해 7,872개의 요소(8-node hexagonal)와 11,635 절점이 사용되었다.

재료의 물성치는 다음과 같다. Young's modulus의 경우, 하악골은  $1.020 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ , 금속판은  $1.000 \times 10^{10} \text{ kg/cm}^2$  이었으며, Poisson's 비율은 각각 0.30과 0.34이었다.

정상 성인을 기준으로 제 1 대구치 부위에서 평균 저작압은 300N으로 보고되었는데, 하악골 절제 후 금속판으로 재건된 환자의 저작력이 감소된다는 연구결과를 고려하여 본 연구에서 수직 저작력은 좌측 제 1 대구치 부위에 135N의 수직적 하중이 가해지도록 설정하였다<sup>4,7)</sup>. von Mises 응력과 최대등가응력을 측정하기 위하여 ABAQUS (version 6.5-1) 프로그램을 사용하였다.

## III. 결 과

### 1. 하나의 재건용 금속판의 적용위치에 따른 최대 응력값

재건용 금속판을 하연과 상연에 적용한 경우 최대 응력이 수직적 하중을 가한 근심측 골절단면에 가장 가까운 나사구멍 사이의 금속판 내측, 하방에 집중되었으며, 최대 응력값은 각각 234.29 MPa과 247.37 MPa이었다 (Fig. 1, 2, 4). 하악골 중앙부에 금속판을 적용한 경우 최대 응력은 원심측 골절단면의 첫 번째 나사구멍의 내측에 집중되었으며, 하연과 상연에 금속판을 적용한 경우에 비해 최대 응력값이 가장 크게 나타났으며, 그 값은 260.91 MPa이었다 (Fig. 1, 3).

### 2. 두 개의 재건용 금속판을 사용한 경우 최대 응력값

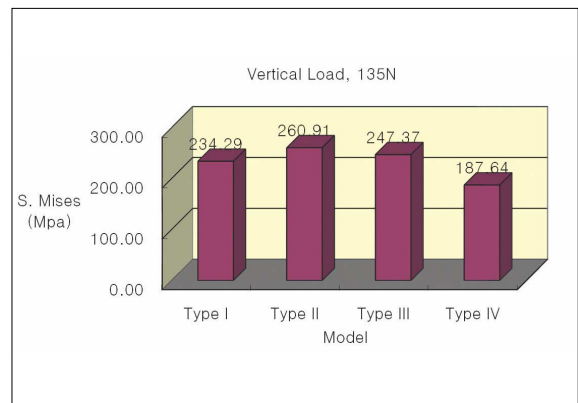
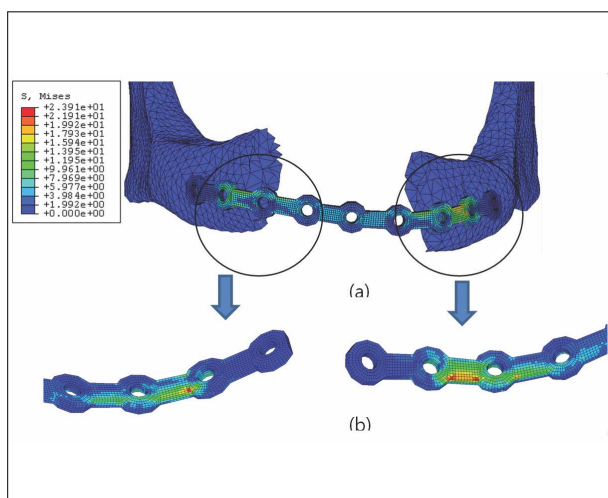
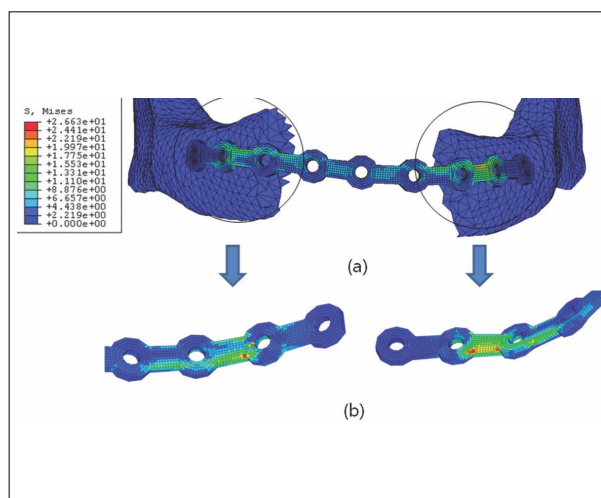


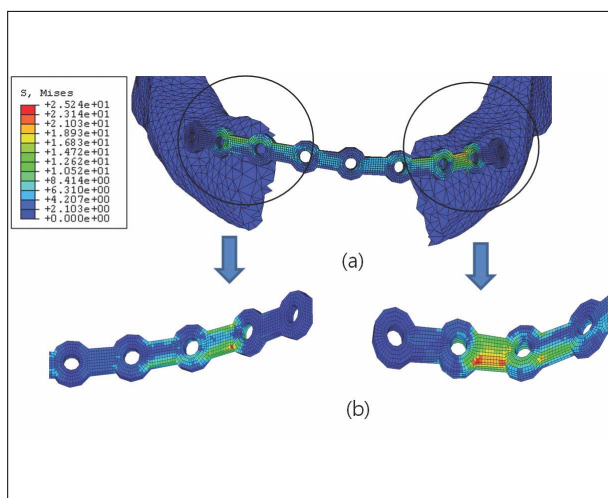
Fig. 1. Von Mises stress (MPa) according to the different locations and numbers of reconstruction plate.



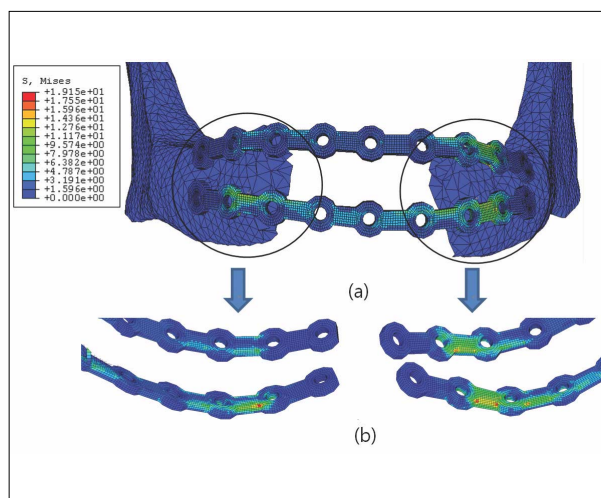
**Fig. 2.** Finite element method analysis of Type I (one reconstruction plate bridging the inferior border of mandibular segments); External (a) and internal (b) view of the plates.



**Fig. 3.** Finite element method analysis of Type I (one reconstruction plate bridging the inferior border of mandibular segments); External (a) and internal (b) view of the plates.



**Fig. 4.** Finite element method analysis of Type III (one reconstruction plate bridging the superior border of mandibular segments); External (a) and internal (b) view of the plates.



**Fig. 5.** Finite element method analysis of Type IV (two reconstruction plates bridging the inferior and superior border of the mandibular segments); External (a) and internal (b) view of the plates

재건용 금속판을 하악골의 상연과 하연에 각각 하나씩 사용한 경우 최대 응력은 하연에 고정된 금속판의 근심측 골 단면에서 가까운 내측, 하방 부위에 집중되었으며, 이 때 최대 응력값은 187.64 MPa이었다 (Fig. 1, 5).

#### IV. 총괄 및 고찰

금속판의 실패를 피판의 괴사, 금속판의 노출, 금속판의 파손, 나사의 풀림, 나사의 파손 등을 포함한 추가적인 외과 적 수술의 필요할 경우로 정의하면, 중앙수술 후 금속판 사용 시 실패율은 약 5-35% 정도로 보고되었으며, 하악골의

골체부보다 순수한 이부 결손의 경우 더 많이 실패하는 것으로 알려져 있다<sup>8-11)</sup>. Schusterman 등<sup>11)</sup>은 하악골체부 결손 수복의 성공률은 92%였지만 이부의 재건의 성공률은 30%였다고 하였으며, Gullane 등<sup>9)</sup>은 하악골체부 성공률이 83%인 반면 이부 재건 성공률은 65%였다고 보고하였다. 재건용 금속판 실패 중 금속판의 파손 발생빈도는 2.9-10.7% 정도로 보고되고 있다. 금속판 파손은 수술 후 2년 이내에 발생하지만 대부분 1년 이내에 발생한다<sup>3,12,13)</sup>. 하악골 재건을 위한 티타늄 금속판은 생체 적합성이 우수하고 수술 후 MRI 촬영할 때 인공물이 나타나지 않기 때문에 선호되고 있지만 스테인리스 금속판에 비해 파손이 잘 일어난

다<sup>3)</sup>.

재건용 금속판 파손의 주된 원인으로 금속판을 하악골 외형에 맞게 구부리는 과정에 생긴 금속피로와 잔존응력, 특정부위에 응력의 집중, 잔존치아에 의한 저작력과 하악골에 부착된 근육의 작용 등이 알려져 있다.

일반적으로 금속판 휨과 잔존응력이 금속판 파손의 중요한 원인으로 알려져 있는데, 하악골의 외형에 맞게 금속판을 조절하고 휘는 과정에서 금속 변형이 일어나고 금속피로가 누적되는 부위에서 파손이 일어난다<sup>8,9,14)</sup>.

금속판의 특정 부위에 기계적인 응력의 집중도 파손의 중요한 원인으로 알려졌는데, Katakura 등<sup>13)</sup>은 파손된 금속판을 주사 전자 현미경으로 관찰한 연구를 통해 파손의 원인이 금속판을 휘는 과정에서 발생하는 금속피로와 변형보다는 한 부위에 집중되는 응력이 더 큰 작용을 한다고 하였다. 응력이 집중되는 곳에 갈라지는 틈이 형성되고, 이 부위로부터 파손이 발생한다. 응력이 비교적 빈번하게 반복적으로 가해지는 부위에 금속판을 사용하거나 금속판의 형태에 따라 집중되는 응력이 피로파손의 주된 원인이라고 하였다. 또한 저작력이 가해졌을 때 응력이 집중될 수 있는 금속판의 표면의 노치(notch)와 같은 부위도 금속판 파손의 중요한 원인이 될 수 있다고 하였다. 본 연구는 금속판의 적용 위치에 따라 금속판의 주된 파손의 원인인 응력의 감소효과를 연구하였는데, 하나의 금속판을 사용한 경우 하악골의 상연과 중앙부보다 하연에 적용하였을 때 최대 응력값이 감소되었다. 하악골의 상연 및 하연에 각각 한 개의 금속판을 적용했을 때 하연, 중앙부, 상연에 하나의 금속판을 사용한 실험모델에 비해 최대 응력값이 각각 19.9%, 28.8%, 24.2% 감소함을 관찰하였다. 이 결과는 두 개의 금속판을 사용한 경우 금속판에 전달되는 하중과 토크를 효과적으로 분산할 수 있어 금속판의 파손 발생률을 감소시킬 것으로 생각된다. 하지만 하악골 이부에서 6.2%-44.4%정도의 높은 금속판 노출 빈도를 고려할 때<sup>15,16)</sup> 임상적으로 두 개의 금속판 사용은 신중한 선택이 필요할 것으로 생각된다.

하악골에 가해진 저작력은 휘는 힘, 비틀림(토크) 모멘트, 전단응력을 야기하는데, 금속판을 통해 전달되는 하중이 재료의 강도 한계를 넘어서면 금속판의 파손이 발생하게 된다<sup>17)</sup>. 하악골에 횡 방향으로 가해지는 압축력과 편측 저작력은 회전운동에 의한 토크를 발생시킨다. 하악골 편측에 가해지는 힘에 의해 발생된 토크의 경우, 압력이 가해지는 측에서는 하악골의 돌출이 발생하고 반대측에서는 하악골의 함몰이 나타난다. 금속판으로 재건된 하악골에서의 이러한 생체역학적 변화가 금속판 재건 후 합병증의 원인으로 지적되고 있다<sup>18)</sup>. 본 연구에서 금속판을 중앙부에 적용했을 때 수직적 하중이 가해진 원심축 골단면에 가까운 첫 번째 나사구멍의 내측 중앙부에서 최대 응력이 관찰되고 근심축 골단면의 금속판 내측 하단에도 많은 응력이 집중되는 것을 발견할 수

있었는데, 이런 현상은 본 모델에서 편측 저작과 같은 편측 하중이 가해졌을 때 절단된 두 개의 하악골편이 서로 다른 방향으로 움직이며 중앙부위의 고정된 금속판을 중심으로 한 회전력에 의한 토크에 의해 발생한 것으로 생각된다.

하악골 자체의 결손과 저작근육들의 상실뿐만 아니라 재건된 하악골의 반대측 대합치의 존재도 토크의 발생에 중요한 원인으로 알려져 있다. 또한 한 쪽의 무치악 절제부위와 반대측의 교합되는 대합치가 존재할 경우의 교합고경의 차이에 의해서도 토크가 발생할 수도 있다<sup>18)</sup>. 따라서 금속판의 강도와 무관하게 재건술 후 금속판에 응력을 발생시킬 수 있는 저작력이 금속판의 파손의 원인이 될 수 있고, 저작력이 있는 남아 있는 치아의 개수와 금속판의 파절의 빈도와 연관성이 보고되었다<sup>3,8)</sup>. Irish 등<sup>9)</sup>은 위 절제를 시행한 군에서는 재건용 금속판의 파손이 일어나지 않고 실패의 주원인이 금속판의 노출 때문이었고, 구강으로 음식물 섭취가 가능한 군에서는 금속판의 골절이 자주 발생함을 관찰하고 금속판 파손의 원인을 재건술 후 거의 정상에 가깝게 회복된 저작압이 금속판에 전달되어 일어난 것으로 설명하였다.

하악골에 부착된 근육의 작용도 금속판 파손의 원인으로 알려져 있다. 하악골체부에서 금속판 파손의 경우 골편과 연결되는 원심축에서 빈번하게 발생하는데, 이 부위에 이복근과 같은 악골의 하방 견인근육의 하방 견인력과 이에 상응하는 하악골의 칸틸레버(cantilever) 힘이 가장 집중되기 때문이라고 하였다<sup>8)</sup>.

## V. 결 론

본 연구는 유한요소분석법을 이용하여 하악골 이부에 형성된 결손의 재건을 위해 적용되는 금속판 파손의 주된 원인인 응력을 효과적으로 분산할 수 있는 방법을 연구하기 위해 가상의 삼차원 하악골 모델을 구성하고 하악골의 하연, 중앙부, 상연에 한 개의 금속판을, 상연과 하연에 각각 한 개의 금속판을 적용한 모델을 설정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 하나의 금속판을 중앙부에 적용한 모델을 제외하고 모든 실험모델에서 최대 응력은 수직적 하중이 가해진 근심축 골절단면에 가까운 금속판의 하방, 내측에 집중되는 것으로 관찰되었다.
2. 금속판을 하연에 적용할 경우 중앙부에 비해 최대 응력값이 10.2%, 상연에 비해 5.3% 감소하였다.
3. 하악골의 상연과 하연에 각각 한 개의 금속판을 적용한 경우, 한 개의 금속판으로 하연, 중앙부, 상연에 적용한 경우에 비해 최대 응력값이 19.9%, 28.8%, 24.2% 정도 감소하였다.

이상의 연구결과와 문헌고찰을 고려할 때 하악골 이부의 결손을 재건용 금속판을 이용하여 수복할 경우 하악골 결손

의 모양에 적합한 형태의 금속판을 선택하여 하악골 외형에 적합을 위한 조작을 최소로 하고, 하나의 재건용 금속판을 사용할 경우 하악골의 하연 쪽에 적용하는 것과 한 개보다 는 상연과 하연에 두 개의 금속을 사용하는 것이 금속판에 가해지는 응력을 분산시킴으로써 금속판 파손을 줄일 수 있는 방법으로 생각된다. 하지만 하악골의 모델링과 경계조건 등을 단순화시킨 유한요소 모델의 한계점을 고려할 때 생체 모델에서 추가적인 연구가 요구된다.

## References

- Schupp W, Arzdorf M, Linke B *et al* : Biomechanical testing of different osteosynthesis systems for segmental resection of the mandible. *J Oral Maxillofac Surg* 65 : 924, 2007.
- Goh BT, Lee S, Tideman H *et al* : Mandibular reconstruction in adults: a review. *Int J Oral Maxillofac Surg* 37 : 597, 2008.
- Curtis DA, Plesh O, Hannam AG *et al* : Modeling of jaw biomechanics in the reconstructed mandibulectomy patient. *J Prosthet Dent* 81 : 167, 1999.
- Shibahara T, Noma H, Furuya Y *et al* : Fracture of mandibular reconstruction plates used after tumor resection. *J Oral Maxillofac Surg* 60 : 182, 2002.
- Ferrario VF, Sforza C, Serrao G *et al* : Single tooth bite forces in healthy young adults. *J Oral Rehabil* 31 : 18, 2004.
- Maurer P, Pistner H, Schubert J : Computer assisted chewing power in patients with segmental resection of the mandible. *Mund Kiefer Gesichtschir* 10 : 37, 2006.
- Knoll WD, Gaida A, Maurer P : Analysis of mechanical stress in reconstruction plates for bridging mandibular angle defects. *J Craniomaxillofac Surg* 34 : 201, 2006.
- Curtis DA, Plesh O, Miller AJ *et al* : A comparison of masticatory function in patients with or without reconstruction of the mandible. *Head Neck* 19 : 287, 1997.
- Irish JC, Gullane PJ, Gilbert RW *et al* : Primary mandibular reconstruction with the titanium hollow screw reconstruction plate: evaluation of 51 cases. *Plast Reconstr Surg* 96 : 93, 1995.
- Gullane PJ : Primary mandibular reconstruction: analysis of 64 cases and evaluation of interface radiation dosimetry on bridging plates. *Laryngoscope* 101 : 1, 1991.
- Boyd JB : Use of reconstruction plates in conjunction with soft-tissue free flaps for oromandibular reconstruction. *Clin Plast Surg* 21 : 69, 1994.
- Schusterman MA, Reece GP, Kroll SS *et al* : Use of the AO plate for immediate mandibular reconstruction in cancer patients. *Plast Reconstr Surg* 88 : 588, 1991.
- Schoning H, Emshoff R : Primary temporary AO plate reconstruction of the mandible. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 86 : 667, 1998.
- Katakura A, Shibahara T, Noma H *et al* : Material analysis of AO plate fracture cases. *J Oral Maxillofac Surg* 62 : 348, 2004.
- Lindqvist C, Soderholm AL, Salo A *et al* : A comparative study on four screw-plate locking systems in sheep: a clinical and radiological study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 30 : 160, 2001.
- Ueyama Y, Naitoh R, Yamagata A *et al* : Analysis of reconstruction of mandibular defects using single stainless steel A-O reconstruction plates. *J Oral Maxillofac Surg* 54 : 858, 1996.
- Markwardt J, Pfeifer G, Eckelt U *et al* : Analysis of complications after reconstruction of bone defects involving complete mandibular resection using finite element modeling. *Onkologie* 30 : 121, 2007.
- Korkmaz HH : Evaluation of different miniplates in fixation of fractured human mandible with the finite element method. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 103 : 1, 2007.
- Korioth TW, Hannam AG : Deformation of the human mandible during simulated tooth clenching. *J Dent Res* 73 : 56, 1994.

## 저자 연락처

우편번호 130-702  
서울시 동대문구 회기동 1번지  
경희대학교 치의학전문대학원 구강악안면외과교실  
이백수

원고 접수일 2008년 8월 26일  
게재 확정일 2008년 11월 5일

## Reprint Requests

Baek-Soo Lee  
Dept. of OMFS, School of Dentistry, Kyung-Hee University  
1 Hoegidong, Dongdaemungu, Seoul, 130-702, Korea  
Tel: 82-2-958-9440, Fax: 82-2-966-4572  
E-mail: ibees@khu.ac.kr

Paper received August 26 2008  
Paper accepted November 5 2008