

# 하악골의 치조골 골삭제를 위한 동적 제약 기구부의 성능에 관한 연구

김광호\*, 이동운\*\*, 정상화\*\*.#

\*프로텍코리아(주), \*\*조선대학교 기계공학과

## A Study on the Performance of Dynamic Restraint Manipulator for Drilling Alveolar Bone in Mandible

Gwang-Ho Kim\*, Dong-Woon Lee\*\*, Sang-Hwa Jeong\*\*.#

\*PROTECHKOREA Co. LTD., \*\*Dept. of Mechanical Engineering, CHOSUN UNIV.

(Received 25 May 2020; received in revised form 02 September 2020; accepted 04 September 2020)

### ABSTRACT

The increase in the edentulous jaw which occurs in the aged population has led to personal dental health concerns. In the case of dental implant surgery, the duration of a patient's recovery depends on the surgical plan and their physical ability. A device may be required to assist a physician in controlling vibration reduction of free-hand drilling and prescribing a good treatment plan that is suitable for the patient's condition. In this work, an artificial tooth-root implant assistant manipulator was studied. The structure and the vibration analysis of the dynamic restraint manipulator that is for drilling the alveolar bone in the mandible bone were performed, and the structural stability was analyzed. Further, a virtual prototype of an artificial tooth-root implant assisted manipulator was fabricated and tested. Hence, the state of the Remote Center of Motion (RCM) point and the driving state of the manipulator were confirmed. Furthermore, the drilling experiments were performed by using materials similar to a human jawbone in order to evaluate the performance of the drilling process that is operated using the assistant manipulator.

**Key Words** : Alveolar Bone(치조골), Mandible(하악골), Dynamic Restraint(동적 제약), Dental Implant(치과 임플란트), Remote Center of Motion(운동원격중심)

### 1. 서 론

인류의 고령화로 무치악 발병률이 높아지고 있고, 개발도상국의 소득수준 향상으로 인해 수요가 증가함으로써 치과용 임플란트 시장은 2020년까지 연평균 8.3%로 성장할 것으로 전망된다. 특히, 대한

민국의 경우 2030년에는 고령화 비율이 24.3%로 초고령화 사회가 될 전망이다. 이처럼 치과 임플란트의 수요는 꾸준히 증가할 것으로 예상되지만, 치과 분쟁 중 임플란트 관련 분쟁이 28%로 가장 많으며, 임플란트 재수술 원인으로서는 숙련도 부족이 81%를 차지하고 있다. 임플란트 골유착 저해요소(interference of osseointegration)는 과도한 골의 손상, 세균감염, 초기안정성의 부족 그리고 초기 부하 등에 의해 발생한다<sup>[1]</sup>. 초기하중에 의한 과도한 외과

# Corresponding Author : shjeong@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7178, Fax: +82-62-230-7055

적 상해(surgical trauma)는 임플란트 표면과 골 조직 사이에 섬유성 결합조직(fibrous tissue)을 형성한다. 이물질에 의한 오염은 산화층의 성분을 변화시키고 염증반응을 일으켜 육아조직(granulation tissue)을 형성하게 된다<sup>2)</sup>. 인공치아 매식 시술 중에 골 괴사를 일으킬 수 있는 요인들로는 열발생, 압축, 진동 등이 있다. 특히 매식 수술 중 온도 상승은 40°C의 열을 7분간 또는 47°C의 열을 1분간 유지할 때 골 조직이 파괴되어 더 이상 골활성이 발생하지 않는다. 43°C가 넘으면 알칼리성 인산가수 분해요소(ALP)가 파괴되기 시작하기 때문에 적절한 속도와 날카로운 드릴을 이용하여 소독된 생리식염수의 지속적인 냉각하에 골외상을 최소화하여야 임플란트 표면에 신생골이 재침착된다<sup>3,4)</sup>. 또한, 시술자의 피로도는 시술의 정확도를 저하시키고, 환자의 회복 기간에 영향을 준다<sup>5)</sup>.

의료용 제어 시스템은 수동(passive) 제어, 반능동(semi-active) 제어, 능동(active) 제어로 구분할 수 있다. 능동 제어 기술은 주어진 환경 내에서 별도의 조작 없이도 주변 환경을 인지하고 판단하여 작업을 수행하거나 인간과의 협력을 통해 다양한 작업을 수행할 수 있게 한다. 특히, 의료용 로봇은 시술자가 시술하기 어려운 미세한 단위의 시술영역에 사용되어 시술 일부를 대체하거나 경험이 적은 시술자가 시술을 연습할 때 사용된다. 반능동 제어 기술은 부분적으로 정의된 전략을 실행하기 위하여 기계적 가이드(mechanical guides), 템플릿(templates), 동적 제약(dynamic constraints) 등의 물리적으로 움직임 제약을 제한함으로써 구현된다<sup>6)</sup>. 반복적인 작업으로 인한 부담이 없고 동일한 능률을 보이는 제어 시스템의 장점으로 인해 시술 현장에서 시술을 보조하는 역할로 시술 전체 과정의 부담을 줄일 수 있다. 이러한 이유로 의료용 보조 기구에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 하악골의 치조골 골삭제를 위한 동적 제약 기구부를 제작하고 작동 성능에 관해 연구하였다. 인공치아 매식 시술을 위한 구강 구조를 분석하고 기구부 설계를 위한 설계 파라미터를 도출하였다. 설계 검증을 위해 구조해석 및 진동해석을 수행하였고, 다물체 동역학해석을 통해 각운동에 대한 운동원격중심(remote center of motion) 기구

부의 진입점(entry point)에 대한 흔들림을 예측하였고 기구의 구동 범위를 분석하였다. 제작한 기구부의 성능평가를 위해 턱뼈 인공모사 시편을 이용하여 드릴링 실험을 수행하였다.

## 2. 동적구속 기구부 설계

### 2.1 운동원격중심 기구부 메커니즘

복강경 수술에서 환자 피부의 절개구 제한으로 인해 내시경 또는 투관침이 좁은 삽입점을 기준으로 선회 운동하여 수술하는 것과 같이 인공치아 매식을 위한 치조골 골삭제 시술은 구강 내에서 한 점에 고정되어 정밀한 각운동이 요구된다. 각운동 고려 사항은 인공치근의 축과 드릴팁(drill tip)의 거리, 인공치근의 축과 드릴축의 각도, 그리고 드릴링의 깊이이다. 인공치근 이식 구멍의 드릴링 작업은 마찰할 때 발생하게 되는 악골의 열적 손상을 방지하기 위해 드릴의 직경을 순차적으로 늘려가며 시술한다. 그러므로 드릴의 축 위치 및 각도가 매번 동일하게 시술되어야 한다. 초기 각 편차(initial angle deviation)는 드릴의 축과 인공치근의 축의 거리가 시술이 진행될수록 크게 벌어지게 되는 원인으로 드릴링의 깊이에도 영향을 준다<sup>7)</sup>. 그러므로 초기 위치를 선정할 후 시술 각도에 변화를 주더라도 삽입점의 위치가 변하지 않도록 제어가 용이한 운동원격중심 메커니즘을 적용해 시술자의 움직임을 제한하는 반능동제어 기구부를 Fig. 1과 같이 구현하였다<sup>8)</sup>.

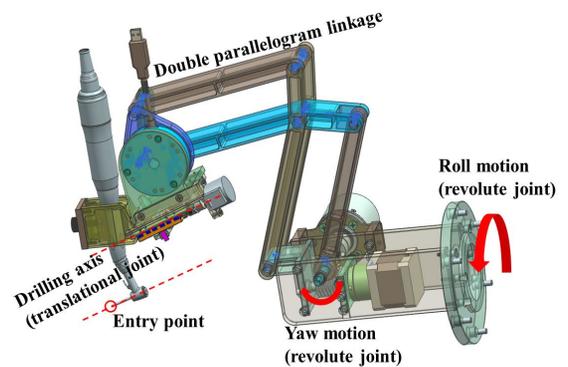


Fig. 1 Dynamic restraint manipulator design

## 2.2 설계 파라미터 선정

상악골의 드릴링은 안면구조상 기술적 난이도가 높지만 감각지배에 대한 안정성에 우려가 없기 때문에 해부학적 측면에서 시술 난이도가 낮은 편이다. 또한, 상악대구치 부위는 뼈가 부드럽고 양이 적어 임플란트 치료의 성공률이 높다. 반면에, 하악 구치부의 경우에는 입술로 오는 삼차신경(두개 제5신경)의 손상을 피해야 하기 때문에 해부학적 측면에서 시술 난이도가 높은 하악골을 기준으로 설계 파라미터를 파악하였다. 치아 치조 치수와 턱 치수를 파악하여 동적 제약 기구부의 구동 범위를 제시하였다. 성인 남성의 악안면 주요 참조 점과 공간적 위치를 참고하여 하악골의 평균 길이는 79.54 mm이고 하악골 중절치 뿌리 꼭대기에서 하악 중앙 절치 꼭대기까지는 23.56 mm이며 상악 중절치 뿌리 꼭대기에서 상악 중앙 절치 꼭대기까지 21.17 mm이다. 또한 성인의 평균 개구량은 40 mm이고 중절치에서 제3대구치까지의 거리는 65 mm이다<sup>[9,10]</sup>. 해부학적 구조물 분석을 통해 운동원격중심 메커니즘이 적용된 운동 제약 기구부는 구강 내에서 상하로 84.74 mm, 전후방으로 65 mm의 구동 범위로 제한된다. 대구치와 소구치 부위의 안전을 고려하여 드릴링 깊이는 최대 18 mm 이내로 설계하였다.

## 2.3 각도변화에 따른 진입점 운동 해석

인공치아매식 시술을 위한 동적 제약 기구부를 설계하였다. 제한된 영역에서 움직임을 고려하여 전체적인 높이를 최소화하였고, 기구부의 강성을 고려하여 설계하였다. 요운동(yaw) 모터는 기구부 베이스에 설치하고 워기어를 이용하여 회전 운동을 할 수 있도록 설계하였다. 각도 변화가 발생하더라도 진입점의 위치 변동이 최소화 되도록 이중평행 사변형 링크(double-parallelogram linkage)를 이용하여 운동원격중심 메커니즘을 구현하였다. 핸드피스 의 드릴 끝은 진입점에 위치하도록 설계하였다. 드릴링의 깊이를 조절하는 모터의 이송축을 핸드피스 드릴링축과 평행이 되도록 설계하여 사전시술계획에 의해 흔들림없이 골삭제가 가능하도록 하였다. 힘-토크 센서를 이용하여 핸드피스에 전달된 힘을

감지하여 햅틱기반 제어환경을 구축하였고, 드릴링 힘을 측정하여 드릴링 속도가 제어되도록 하였다. 롤 운동은 제한없이 자유롭게 회전가능하고, 요 운동은 2상 스텝모터를 사용하였고, 1 pulse 당 0.36° 회전이 가능하게 설계하였다. 스텝모터의 회전은 워기어와 워휠을 사용하여 각 운동을 구현하였다. 워기어와 워휠의 감속비는 1/10로 구성하였다. 다물체동역학해석(ADAMS, MSC software)을 통해 기구부의 구동범위와 각운동에 대한 진입점의 흔들림을 Fig 2에 나타내었다. Fig. 2(a)와 같이 초기 위치를 기준으로 +22.655° ~ -36.268°의 기구부구동범위(range of motion)를 보여 58.923° 회전이 가능하다. 각 운동에 대해 Fig 2(b)와 같이 진입점의 위치변화는 관측되지 않았다.

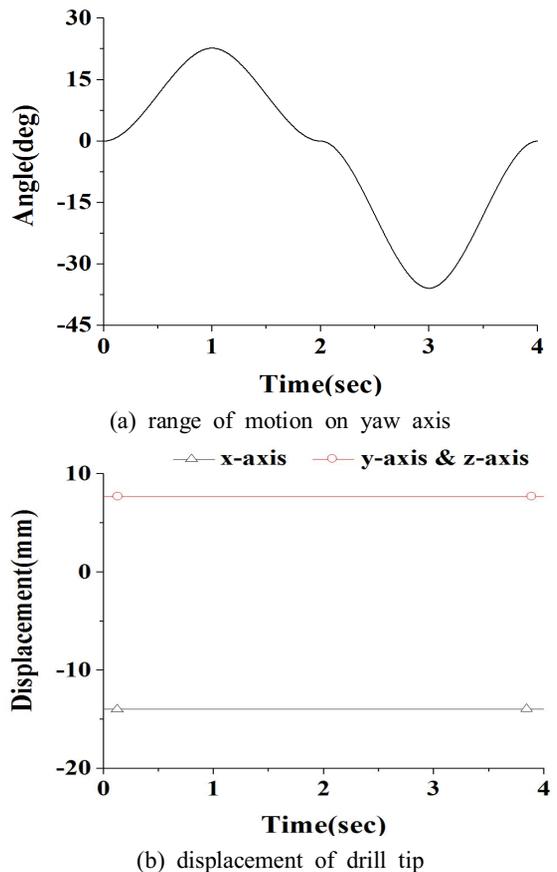


Fig. 2 Fluctuation of drill tip during yaw motion

### 2.4 구조해석 기반 설계 검증

동적 제약 기구부에 대한 구조적 안정성을 검증하기 위해 정적 구조해석과 모드해석(ANSYS, ANSYS Inc.)을 수행하였다. 해석을 위한 입력조건은 Table 1에 나타내었다. Fig. 3은 구조해석 결과를 나타내었다. 인공치아매식 시술에 사용되는 치과용 드릴의 부하는 1.5 ~ 24 N의 하중이 적용된다<sup>[1]</sup>. Fig. 3과 같이 24N의 힘을 드릴에 인가하고, 롤 운동부를 고정하였다. 핸드피스의 그립부를 드릴링 모터의 운동 축에 최대한 가깝게 설계하여 핸드피스 드릴의 굴착력에 의한 토크가 최소화되도록 설계하였다. Fig. 4(a)에 정적 구조 해석 결과를 나타내었다. 핸드피스와 드릴의 연결 부분에서 최대 응력 61.9 MPa이 발생하였고, 주로 핸드피스 그립부에 응력이 분포되었다. 최대 변위는 0.1 mm로 예측되어 사용환경에서 충분한 구조 안정성을 확인하였다. 치과용 핸드피스 모터의 회전에 의해 8 ~ 20 Hz의 진동이 발생한다. 설계된 기구부의 고유진동수는 Fig. 4(b)와 같이 예측되었다. 1차 모드의 고유주파수가 38.4 Hz로 핸드피스 모터의 구동 주파수 영역과 일치하지 않아 공진이 발생하지 않는 구조임을 확인하였다.

Table 1 Input conditions for finite element method

Solid mesh		Materials	
Element	Node	Manipulator	Handpiece
451,451	831,592	Al6061	Carbon steel

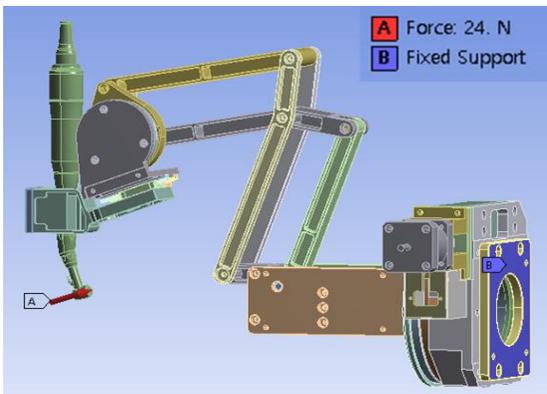
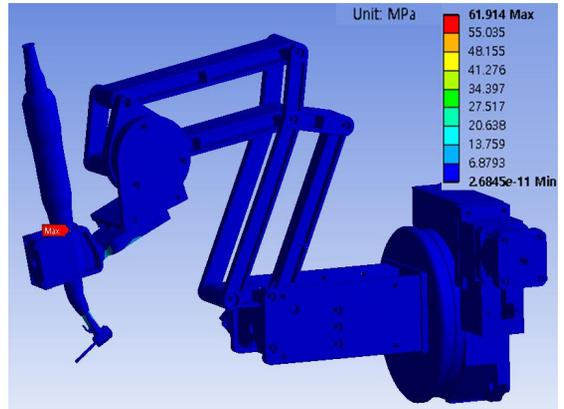
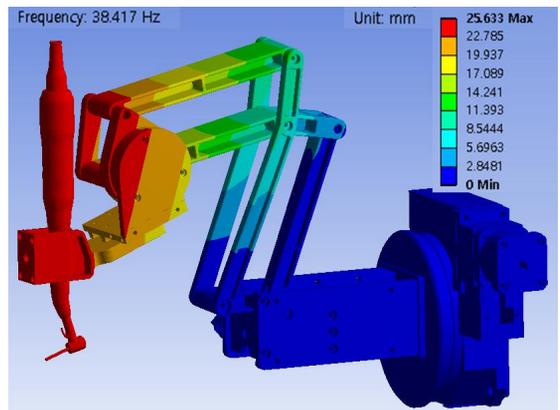


Fig. 3 Boundary conditions for structural analysis



(a) Equivalent stress in structural analysis



(b) 1<sup>st</sup> mode in modal analysis

Fig. 4 Structural analysis of manipulator

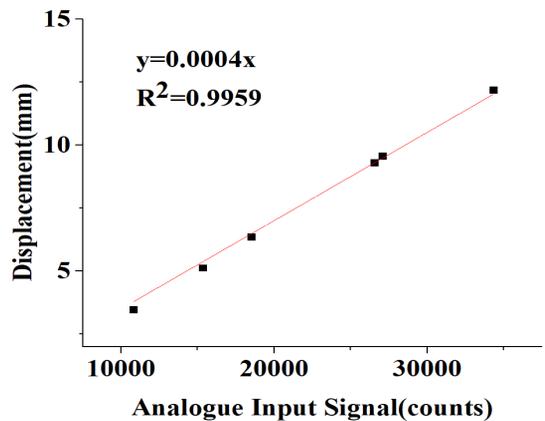


Fig. 5 Drilling displacement according to ADC signal of slide potentiometer

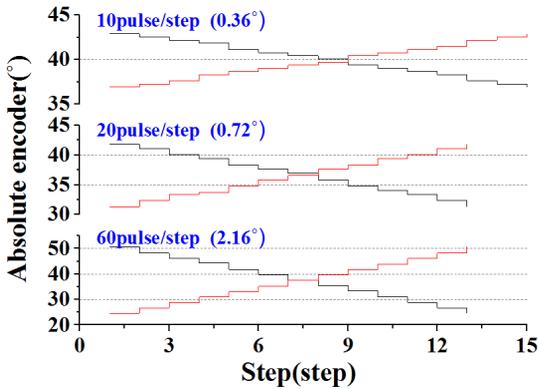


Fig. 6 Angle accuracy in yaw motion

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 동적 제약 기구부 성능평가

드릴링을 위해 0.175°/pulse 회전하는 스텝 모터를 사용하였고, 직동가이드를 이용해 직선운동으로 변환하였다. 드릴링 모터의 이송량은 리니어 센서 (slide potentiometer, ALPS Electronic Co., LTD.)를 이용해 측정하였다. Fig. 5와 같이 모터 이송량이 0.4 mm일 때, 리니어 센서는 1,000 counts 신호가 출력된다. 요운동은 유니폴라 방식의 모터 드라이버를 사용하였고, 절대형 로터리 엔코더(EP50S, AUTONICS)를 이용해 회전각을 측정하였다. Fig. 6과 같이 0.036°/pulse 회전하였다.

#### 3.2 드릴링 실험

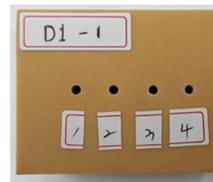
하악골의 치조골 골삭제를 위한 동적 제약 기구부의 성능을 평가하기 위하여 턱뼈 인공모사 물질을 이용하여 시편을 제작하고, 드릴링 성능을 평가하였다. 성능 평가를 위해 D1, D2 등급의 시편을 사용하였다. 턱뼈 인공모사 물질인 D1~D2 laminated test block-polyurethane foam (Sawbones Inc., Vashon, WA, USA) 시편의 물성치는 Table 2와 같다. D1 등급의 인공모사 물질은 참나무와 같은 치밀한 피질골을 나타내며, D2 등급의 인공모사 물질은 치조능이 두껍고 치밀하거나 다공성의 피질골과 내부의 거친 골소주의 골질을 나타낸다<sup>[12]</sup>. 턱뼈 인공모사 시편에 드릴링 실험을 진행하였다. 드릴링 성능 실험

Table 2 Artificial material similar to jaw bone

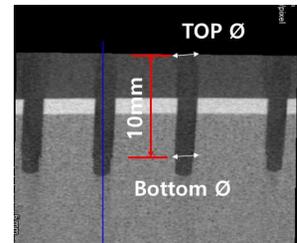
Grade	Cortical layer		Sponge layer	
	Density (g/cc)	Thickness (mm)	Density (g/cc)	Thickness (mm)
D1	0.80	3	0.48	27
D2	0.80	2	0.32	28



(a) straight drill



(b) Specimen

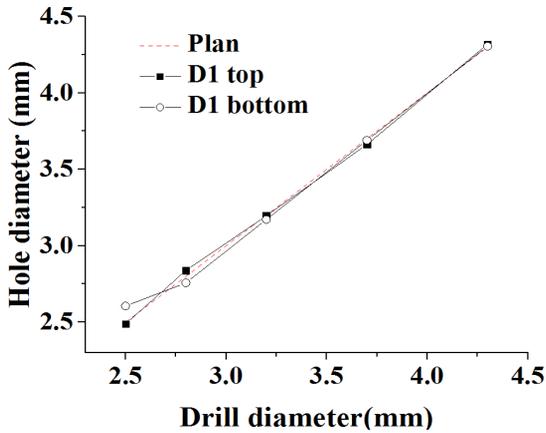


(c) CT image

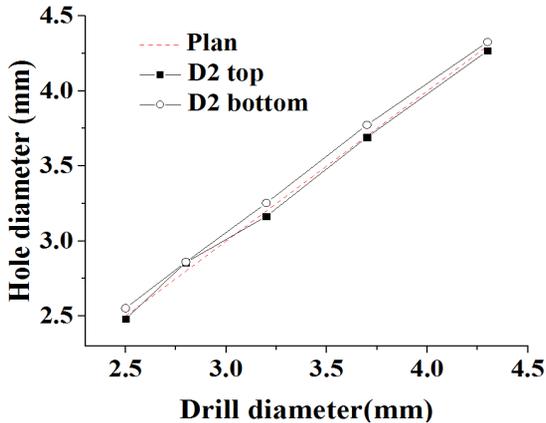
Fig. 7 Drilling test of laminated test block polyurethane foam specimens

험은 100×100×30 mm 크기의 시편을 9등분하여 진행하였다. 콘트라앵글 핸드피스(FORTE 100 α EI, ACL(B)-45I, SAESHIN precision Co., LTD.)를 사용하였고, 치과임플란트 시술용엔진(X-CUBE, SAESHIN precision Co., LTD.)을 사용하여 드릴 회전속도 1,500 rpm으로 설정하고, 드릴링 깊이는 10mm로 제어하였다. Fig. 7(a)와 같이  $\phi 2.5$ ,  $\phi 2.8$ ,  $\phi 3.2$ ,  $\phi 3.7$ ,  $\phi 4.3$  트위스트 드릴(twist drill, DENTIS)을 이용해 Fig. 7(b)의 시편에 구멍을 뚫었다. 드릴링이 완료된 시편은 micro CT (SMX-225CT, SHIMADZU)를 이용해 Fig. 7(c)와 같이 단층 촬영하였다. 이미지 분석을 통해 드릴 진입점에서의 드릴 홀 직경과 진입점으로부터 10mm 깊이에서의 드릴 홀 직경을 측정하였다.

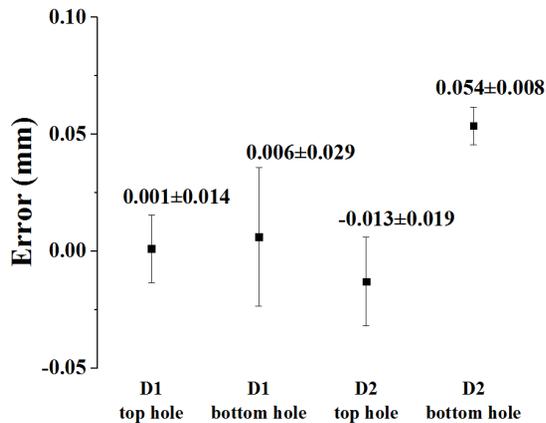
단층촬영 영상으로부터 진입점의 홀 직경과 10mm 드릴 위치에서의 홀 직경을 골 밀도 시편별로 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. Sarment의 심플란트 시스템<sup>[13]</sup>은 진입점 편차  $0.9 \pm 0.5$  mm, 드릴 끝점



(a) Hole diameter in D1 grade specimen



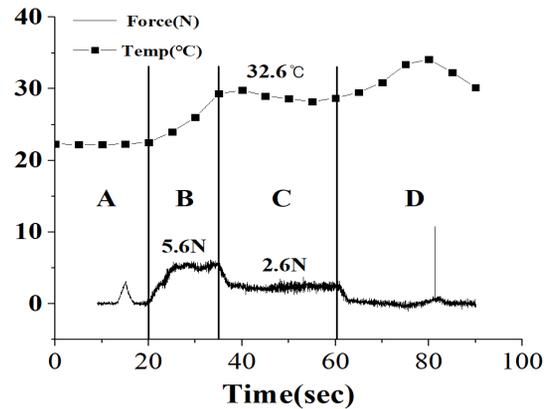
(b) Hole diameter in D2 grade specimen



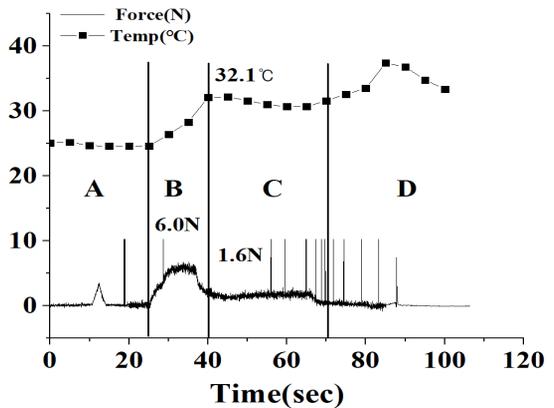
(c) Error of drilling hole

Fig. 8 Drilling hole error in jaw bone specimens

편차  $1.0 \pm 0.6$  mm, Brief의 IGI 시스템<sup>[14]</sup>은 상·하단에서 0.65 mm, Assche 노벨가이드시스템<sup>[15]</sup>은 상단  $1.1 \pm 0.7$  mm, 하단  $2.0 \pm 0.7$  mm로 보고되었다. 제작된 동적 제약 기구부의 드릴링 실험 결과, Fig. 7에서와 같이 D1 시험편은 상단 0.001mm, 하단 0.006mm의 크게 뚫렸으며, D2 시험편은 상단 0.013mm, 하단 0.054mm의 편차를 확인하였다. 홀 직경은 약 0.015 ~ 0.058 mm 크게 천공되었고, 밀도가 큰 D1 시험편에서 오차가 상대적으로 작게 발생하였다. 드릴링 작업에서 발생하는 미세한 진동으로 인해 고정점(pivot)인 진입점(entry point)의 홀 직경보다 드릴이 완료된 위치(reached depth)에서의 홀 직경이 크게 뚫리는 것을 확인하였다.



(a) Force and temperature in D1 grade specimen



(b) Force and temperature in D2 grade specimen

Fig. 9 Drilling force and rising temperature in jaw bone specimens

또한, 골밀도에 따른 드릴링 온도와 포스/토크센서를 이용해 굴착력을 측정하였다. 드릴링 온도는 세척(irrigation)없이 열화상카메라(E40, FLIR)를 이용해 시편의 측면에서 측정하였다. 측정결과를 Fig. 9에 나타내었다. A구간은 핸드피스가 진입점에 접근하는 구간이며, B구간은 피질골 구간(cortical layer)으로 D1과 D2의 피질골 밀도는 동일하다. 실험결과 또한 B구간에서 5.6 N과 6.0 N으로 유사한 굴착력을 나타내었다. C구간은 해면골 구간(sponge layer)으로 D1 시편은 2.6 N, D2 시편은 1.6 N으로 동일한 회전속도와 이송속도에서 밀도가 높은 D1 시편에서 굴착력이 크게 측정되었다. 또한, 피질골(B)의 밀도가 해면골(C)의 밀도보다 높기 때문에 더 큰 힘을 필요로 한다. 드릴에 의한 시편 표면 온도는 B구간에서 34 °C 이상 상승하였고, C구간에서는 온도가 유지되는 경향을 보였다. 40 °C 이상 온도에서 골괴사가 발생하기 때문에 드릴링에 의한 열적 손상은 발생하지 않으나, 안정적인 시술을 위해 세척을 동반하여 시술하거나, 굴착력에 따라 드릴의 이송속도를 제어한다면 좀 더 안정적인 시술이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 인공치아매식 수술 보조 기구로써 시술자의 움직임의 기구학적 구조로 제한할 수 있는 동적 제약 기구부를 설계하였다. 하악골 치조골의 골삭제를 목표로 악안면 구조를 분석하여 설계 파라미터를 선정하고, 구조해석과 동역학해석에 기초하여 운동원격중심(RCM)이 가능한 이중평행사변형 기구를 제작하였다. 제작한 기구부의 성능 평가를 위해 주요 구동부의 위치결정 정확도를 평가하고, 모사물질을 이용한 시편을 이용하여 드릴링 성능을 평가하였다.

1. 동역학 해석을 통해 설계된 기구부의 운동원격중심의 진입점(entry point)을 검증하고 각 운동에 대해 핸드피스 드릴 팁의 위치가 고정되는 것을 확인하였다.
2. 턱뼈 모사물질 시편을 통해 동적 제약 기구부의 드릴링에 의한 드릴 홀 직경의 편차가 0.06mm 이내로 골삭제 안정성이 우수하였다. 충분한 임

상실험을 바탕으로 인공치아매식 시술에 적용된다면 임플란트 고정체의 골유착 기간을 단축할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

“이 논문은 2019학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.”

#### REFERENCES

1. Tonetti, M. S. and Schmid J., “Pathogenesis of implant failures,” *Periodontology* 2000, Vol. 4, No. 1, pp.127-138, 1994.
2. Albrektsson, T., Brånemark, P-I., Hansson, HA., and Lindström, J., “Osseointegrated Titanium Implants. Requirements for ensuring a long-lasting direct bone-to-implant anchorage in man,” *Acta Orthopaedica Scandinavica*, Vol. 52, No. 2, pp. 155-170, 1981.
3. Eriksson R. and Albrektsson T., “The effect of heat on bone regeneration:An experimental study in the rabbit using the bone growth chamber,” *Jorunal of Oral Maxillofacial Surgery*, Vol. 42, No. 11, pp. 705-711, 1984.
4. Han, S. H., Kim, B. K. and Kim, B. I., “Temperature Measurement during Implant-site Preparation,” *Implantology*, Vol. 17, No. 4, pp.268-274, 2013.
5. Brief, J., Hassfeld, S., Redlich, T., Ziegler, C., Muenchenberg, J., Dauber, S., Pernozzoli, A., Krempien, R., Slacik, P., Opalek, M., Boesecke, R. and Mühling, J., “Robot Assisted Insertion of Dental Implants-A Clinical Evaluation,” *CAR2000*, pp.932-937. 2000.
6. Udupa, J. K. and Herman G. T., *3D Imaging in Medicine*, Second Edition, CRC Press, pp. 212~213. 1991.
7. Koulechov, K. and Lueth, T., “A new metric for drill location for Navigated Control in navigated dental implantology,” *In International Congress*

- Series, Vol. 1268, pp. 1220-1225, 2004.
8. Kim, G. H., Jo, Y. S., Kang, D. W. and Jeong, S. H., "Implantology of Assistant Robot for dental Implant Surgery," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers Vol. 20, No. 1, pp. 9-14, 2011.
  9. Oh, Y. D., Yoon, Y. J. and Kim, K. W., "A comparative study on head posture and craniofacial morphology between koreans and scandinavian caucasians," The korean journal of orthodontics, Vol. 29, No. 6, pp. 707-720, 1999.
  10. Hong, Y. S., Yoon, Y. J. and Kim, K. W., "The correlation between cranial base size, shape and head posture, and the position of maxillo-facial structures," The korean journal of orthodontics, Vol. 27, No. 5, pp. 743-760, 1997.
  11. Chacon, G. E., Bower, D. L., Larsen, P. E., McGlumphy, E. A. and Beck, F. M., "Heat production by 3 implant drill systems after repeated drilling and sterilization," Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Vol. 64, No. 2, pp.265-269, 2006.
  12. Misch, C. E., Contemporary implant dentistry, Implant Dentistry. 3<sup>rd</sup> ed. St. Louis, Mosby, pp.40, 2010.
  13. Sarment, D. P., Sukovic, P. and Clinthorne, N., "Accuracy of implant placement with a stereolithographic surgical guide," International Journal of Oral & Maxillofacial Implants, Vol. 18, No. 4, pp. 571-577, 2003.
  14. Brief, J., Edinger, D., Hassfeld, S. and Eggers, G., "Accuracy of image-guided implantology," Clinical Oral Implants Research, Vol. 16, No. 4, pp. 495-501, 2005.
  15. Van Assche, N., Van Steenberghe, D., Guerrero, M. E., Hirsch E., Schutyser, F., Quirynen M. and Jacobs R., "Accuracy of implant placement based on pre-surgical planning of three - dimensional cone-beam images: a pilot study," Journal of clinical periodontology, Vol. 34, No. 9, pp. 816-821, 2007.