

임플란트 주위의 골융합(osseointegration) 향상에 관한 조사

윤 영 준*,

A study on improvement of osseointegration around implants

Young-June Yoon*

요 약

임플란트 삽입 시 뼈의 회복기간은 약 8주에서 12주가 소요되는데, 이 때 임플란트 주위에서 발생하는 뼈의 회복작용 다시 말하여 골융합은 임플란트의 사용에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 이 조사논문에서는 골융합의 촉진작용으로 직접적인 기계적 자극, 초음파에 의한 자극, 레이저에 의한 자극, LED에 의한 자극을 비교 하였으며, 이번 조사를 통해서 자극 방법에 상관없이 1.47~1.6 MHz의 자극이 가장 이상적임을 찾아내었다.

Abstract

When the implants are inserted, the recovery period of bone matrix is around 8 to 12 weeks. The osseointegration plays an important role in recovery period of bone matrix around the implants. In this study, we surveys how mechanical stimuli, ultrasonic stimuli, laser stimuli, LED stimuli affects the osseointegration. We found that 1.47~1.6MHz stimuli are ideal for all stimuli.

Keywords: Osseointegration, Implant, LED, Ultrasonic, Laser

1. 서 론

현재 임플란트를 삽입하기 위해서는 발치 후 뼈의 회복기간으로 약 8주에서 12주가 소요되며, 임플란트 삽입 후 견고한 뼈에 의해서 고정되기까지 또 12주정도가 소요된다 [34]. 뼈의 높이가 낮을 경우 골이식(Bone graft)을 이용한 뼈를 높이는 수술이 임플란트 삽입 이전에 필요하다. 그만큼 뼈의 건강상태가 임플란트 수술에 중요한 역할을 하고, 임플란트와 뼈의 밀착도 또한 수술성공에 중요한 요소가 된다.

임플란트에 나사선이 있을 경우, 나사선이 없을 경우에 비해서 임플란트 주위에 좀 더 강한 뼈를

생성한다는 것을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 예측하였다 [5]. 이는 강하게 고정된 임플란트가 단단한 뼈들로 둘러싸여짐을 의미한다. 이는 임플란트의 미세한 움직임으로 설명될 수 있는데, 임플란트가 뼈에 완전히 부착되지 않으면 미세한 움직임이 발생하고, 이 경우 뼈가 아닌 부드러운 결합조직 (soft connective tissue)이 주위에 형성된다 [4]. 이러한 미세 움직임은 골융합을 방해하는 요소가 되며, 이러한 움직임을 방지할 수 있다면 임플란트 직후 음식을 씹는 등의 직접적인 자극도 임플란트 주위의 골융합(osseointegration)에 큰 영향을 미치지 않을 것이다 [17]. 현재 연구결과에 따르면 약 50에서 150 mm 정도의 미세 움직임은 임플란

* 교신저자 : 한양대학교 기계공학부 (yyoon@hanyang.ac.kr)

접수일자 : 2012년 10월 15일, 수정일자 : 2012년 11월 05일, 심사완료일자 : 2012년 11월 10일

트 주위의 골융합에 큰 영향을 미치지 않는 허용 범위로 생각한다 [36]. 임플란트 후 빠른 시간내에 골융합이 이루어지면 임플란트 주위에 단단한 뼈가 생성되고, 이는 임플란트의 움직임을 최소화 시킬 수 있을 것이다. 이번 조사에서 임플란트 주위의 골융합을 가속화 시킬 수 있는 몇가지 방법에 대해서 알아보려고 한다.

II. 외부자극에 의한 임플란트 주위의 골융합(Osseointegration) 촉진

임플란트를 삽입하면 새로운 뼈가 주위에 형성되면서 임플란트를 고정하게 되는데, 이런 과정을 골결합(osseointegration) 이라고 부르며 조골세포(osteoblast)가 임플란트 주위에서 새로운 뼈를 형성하게 된다. 이 현상은 골절 후 뼈가 자연 치유되는 현상과 비슷하며 [7], [23], 골전도(osteoconduction), 골유도(osteoinduction), 골형성(osteogenesis)등의 방법으로 새로운 뼈를 형성하게 된다 [6]. 골전도는 어떤 특정부위에 뼈가 직접적으로 부착되어서 형성되는 것을 말하고, 골유도는 조골세포를 유도함으로써 뼈형성을 증대시키는 것을 말한다. 단순히 세포뿐만 아니라 PDGF (Platelet Derived Growth Factor)와 IGF-1 (Insulin Growth Factor-1) [14], TGFb-1 (Transforming Growth Factor b-1) [24], bFGF (basic Fibroblast Growth Factor) [41] 등의 전달 물질들도 새로운 뼈의 형성에 도움을 준다.

1. 직접적인 기계적 자극 (Mechanical Loading)

임플란트에 직접적인 기계적인 자극을 주어서 골융합을 향상시키기 위해서는 고주파 미세자극 (low magnitude and high frequency)이 적합할 것이다. 이유인즉 임플란트 주위에서 최적의 골융합을 조성하기 위해서는 임플란트의 움직임을 150 mm 이내로 한정시켜야 하기 때문이다 [36]. 골감소증(osteopenia)을 가진 칠면조의 척골(ulna)에 다공형태를 지닌 임플란트를 삽입한 후 150 mm, 20Hz의 기계적인 자극을 가했을 경우 임플란트와 뼈의 경계부분 뿐만 아니라 골내막(endosteum)과

골막 (periosteum)에서도 뼈가 생성되는 현상을 발견하였다 [32]. 다른 조건인 30Hz와 5mm 정도의 미세자극을 가했을 경우에도 양(sheep)의 대퇴골(femur)내 망상골 (cancellous bone)에서 약 32%의 골밀도 증가를 보였다 [32]. 이는 고주파 미세자극이 임플란트 주위의 골융합에 매우 중요한 역할을 할 수 있음을 의미한다.

골융합시 또 하나의 중요한 점은 콜라겐(collagen)의 방향성이다. 콜라겐의 방향성에 따라서 새로 생성되는 뼈의 물성치가 결정되기 때문이다 [44]. 그러나 콜라겐의 방향성을 결정하는 것은 미세자극이 아닌 체중에 의해서 발생하는 것과 같은 강한 자극에 의해서이다. 임플란트 주위의 콜라겐의 방향성을 편광현미경 (polarized light microscopy)과 주사형 전자현미경 (scanning electron microscopy)를 사용하여 본 결과, 임플란트에 음식물을 씹을 때와 같은 기계적인 자극을 주었을 경우 좀 더 많은 콜라겐들이 자극 방향과 직각 방향 형태로 배열되는 것을 알아내었다 [38]. 이는 치밀골(cortical bone)에서 발생하는 골단위(osteon)와 비슷한 형태를 띠고 있으며, 뼈가 압축을 받았을 때 골단위내의 콜라겐의 방향은 힘의 방향과 직각 방향의 형태를 띠는 경향이 있음을 밝힌 바 있다 [2]. 이렇듯 콜라겐의 방향성은 새로운 뼈의 형성에 중요한 역할을 담당하지만, 고주파 미세자극을 통해서 변화시킬 수 없을 것으로 생각된다. 그러나 바쁜 시간내에 어느 정도의 강도를 가진 뼈로 골융합에 성공한 이후 강한 자극을 가한다면 뼈의 재생성을 통해서 콜라겐의 방향을 변화시킬 수도 있다.

그러나 임플란트 삽입 직후엔 음식물을 씹는 것과 같은 강한 자극을 가했을 경우 임플란트의 움직임으로 인해 안정적인 뼈가 생성되지 않을 수 있기 때문에, 고주파 미세자극을 인위적으로 줄 수 있다면 임플란트의 상대적인 움직임을 최소화 할 수 있고, 골융합을 향상시킬수 있을 것이다. 우리가 또 하나 주시해야 할 것은 20-50 nm내외의 결정화되지 않은 또는 약간만 결정화 된 얇은 막이 임플란트와 뼈 사이에 존재한다는 것이다 [25]. 이 막의 존재가 음식물을 씹을 경우 임플란트와 뼈간의 상대적인 움직임을 증폭시킬 수도 있고, 임플란트의 미세한 움직임은 얇은 막에 존재하는 세포

들에게 직접적인 영향을 줄 수 있다.

2. 초음파에 의한 자극

골절의 치료를 위한 보조방법으로 초음파가 사용되어지고 있고, 미국 Exogen 에서 생산한 Sonic Accelerated Fracture Healing System (SAFHS)이 현재 사용되는 대표적인 제품이다 [42]. 이 장비는 현재 구입하는 것이 아닌 대여의 방법으로 이용되고 있으며, 초음파 사용으로 인한 빠른 회복으로 골절에 의한 수술비용의 절감효과를 나타내고 있다 [16].

골절이 발생하면 출혈(hemorrhage)이나 혈종(hematoma)으로 인해서 혈소판 (Platelet)이나 비만세포(mast cell)가 모이게 된다. 이 때 초음파를 사용하게 되면 비만세포의 수를 증가시켜서 히스타민(histamine)이라는 물질의 양을 증가시키는데, 이 물질은 혈관의 투과성에 영향을 주는 물질로 알려져 있다 [13]. 초음파의 사용은 단순 비만세포뿐만 아니라 혈관조성(angiogenesis)을 위한 콜라겐의 형성을 촉진시키고 [45], IL-8 (Interleukin-8), bFGF (basic Fibroblast Growth Factor), VEGF (vascular endothelial growth factor) 등의 신호전달물질의 분비 또한 촉진한다 [9], [30]. 골절 부위의 혈류의 양을 증가시키며 [29], 경결 (Callus)의 양 또한 증가시킨다 [10]. 초음파는 연골 (Cartilage)의 형성 (chondrogenesis)과 연골이 뼈로서 변화하는 것(endochondral ossification)을 도와주며 [43], 생체의 실험에서는 미네랄에 의해서 결정화 된 뼈의 길이를 증가시킨다 [26].

임플란트 주위의 골융합 (osseointegration) 현상은 골절 발생 후 일어나는 현상들과 비슷한 것으로 알려져 있으며, 초음파가 골절부위에 긍정적인 영향을 미치듯 임플란트 주위의 골융합에도 긍정적인 역할을 할 것이라고 생각한다 [7], [23]. 그러나 초음파가 어떻게 뼈 조직의 형성과정을 향상시키는지에 대해서는 아직 구체적으로 알려져 있지 않다 [23].

각각의 실험에서 같은 조건의 초음파 주파수를 쓰지 않았기에, 예를 들면 45kHz [9], [30], 0.75MHz [45], 1MHz [9], [30], 1.5MHz [26], [29],

3.0 MHz [45], 임플란트의 골융합에 이상적인 주파수를 파악하는 것이 무엇보다 중요하며, 이상적인 초음파의 강도(Intensity) 또한 조직 손상을 막기 위해서 매우 중요한 선결과제이다 [42].

3. 레이저에 의한 자극

레이저 또한 조골세포(osteoblast)나 뼈 조직 형성을 향상시키는 역할을 한다. 주로 레이저로는 Ga-Al-As (Gallium-Aluminum-Arsenide) diode laser가 사용되는데, 사람의 조골세포에서 오스테오칼신(osteocalcin)과 TGFb-1을 증가시킴을 발견하였다 [19]. 연속적인 또는 간헐적인 (1Hz, 2Hz, and 8Hz) 레이저 자극 (Ga-Al-As laser, 830nm, 500mW, 0.48-3.84 J/cm²)을 준 경우, 세포의 수는 증가하였고, 뼈의 결정화에 중요한 알칼리 포스파타아제와 그에 따른 유전자표현을 증가시켰다 [40]. 또 다른 실험에서 연속적인 자극형태를 1Hz의 간헐적인 자극과 비교하였을 경우 간헐적인 자극이 보다 효과적임을 발견할 수 있었다 [39]. 이렇듯 간헐적인 레이저의 사용이 세포의 수를 증식시키고, 뼈의 결정화(mineralization)에 효과적이다.

레이저 치료를 받은 임플란트는 골융합이 보다 효과적이어서, 수술 후 10일이 지났을 때, 인장시험을 한 결과 14.35N의 힘을 지탱할 수 있었다. 이는 레이저 치료를 받지 않은 그룹의 10.27N보다 높은 수치이며, 뼈의 결정화에 중요한 역할을 하는 칼슘(Calcium)과 인산 (Phosphorous)의 양이 레이저의 자극을 받은 후 높아졌다 [20]. 양(Sheep)을 이용한 임상실험에서 홍미롭게도 레이저(75mW, 680nm, 3-4J/cm²)는 뼈의 높이를 높이기 위해 시술한 망상골의 자가이식 (bone graft)내 뼈 재생성을 도와주지는 않지만, 임플란트 삽입시 임플란트 주위의 골형성에 도움을 주는 것으로 알려져 있다 [18]. 토끼의 경골(tibia)에 680 nm 보다 큰 파장인 830nm (21.5 Joule/cm², 10mW, 86Jpersession)의 레이저를 48 시간 간격으로 가했을때, 미네랄의 주요 소인 칼슘 수산화인석회 (Calcium Hydroxyapatite)가 증가함을 발견하였다 [20]. 특히 초기 (1주) 뼈의 결정화(mineralization)에 효과적이며, 약 4주후에는 레이저 치료를 받지 않는 그룹과 커다란 차이가 없음을 보여줬다 [35].

레이저 치료에는 조골세포가 아닌 다른 세포들도 비슷한 반응을 보여준다. 연골세포 [37]도 조골세포 [28]와 비슷하게 레이저의 자극에 의해서 세포 수가 증식하며 콜라겐이 응집되는 것을 돕는다. 조골세포(osteoblast)가 830nm (10J/cm²) 레이저에 의한 자극에 의해서 세포의 수와 알칼리 포스파타아제를 증가시키는 반면, 종양세포인 골육종세포(osteosarcoma)는 더 낮은 파장인 670 nm (at 5J/cm²) and 780nm (at 1.5 and 10J/cm²)에서 그 세포의 수를 증가시킨다 [20], [31]. 이렇듯 세포들은 그들의 특성에 따라서 다른 파장의 레이저에 반응하는 경향이 있다.

4. LED(Light emitting diodes)에 의한 자극

LED (Light emitting diodes)는 레이저와 비슷하게 광자(photon)가 세포 내 미토콘드리아(mitochondria) 에너지 대사(metabolism)을 향상시킴으로서 임플란트 주위의 골융합을 향상시킨다고 알려져있다 [3], [8]. LED가 부각받게 된 이유는 레이저의 사용이 눈의 각막에 부정적인 영향을 미칠 수 있다는 점이며 [3], 52세의 여성의 어금니를 발치한 후 조직공학으로 제작된 골이식편(bone graft)를 삽입하고, 605-631 nm 파장을 지닌 LED의 제품 (Biolux Research Ltd, Vancouver, Canada)을 사용하여 자극을 가한 결과 골이식편 주위에 골융합이 향상되는 결과를 발견하였다 [3]. 하지만 아직까지 LED에 의한 임플란트 주위의 골융합에 관한 연구는 많이 진행되어 있지 않다.

III. 토론

직접적인 자극에 의한 임플란트 주위의 골융합을 향상시키기 위해서는 컴퓨터 시뮬레이션(ArtiSynth)을 통한 예측이 선행되어야 한다고 생각한다. 특히 다른 형태의 인공치아에 의해서 음식을 씹을 경우 턱뼈 및 근육들이 달리 움직인다 [15], [21], [27]. 보통 음식을 씹을 경우 가해지는 힘은 일반인과 틀니를 착용한 사람이 차이가 있다. 틀니를 착용한 사람의 경우, 대략 64에서 90N 정도, 그리고 일반인의 경우 720N 정도이다 [11], [12], [22].

다른 형태의 임플란트를 삽입한 환자의 CT이미지를 소프트웨어로 불러들여서, 음식을 씹는 시뮬레이션을 작동했을때, 다른 임플란트 타입에 따른 턱뼈의 움직임과 턱뼈에 연결되어 있는 근육에서 발생하는 힘의 변화를 예측할 수 있다 [15], [21], [27]. 임플란트에 가해지는 미세 움직임을 약 50에서 150 mm 정도의 허용범위를 넘지 않게 하고 [36], 시뮬레이션을 통해서 예측되어진 결과치로부터 어떤 근육이 해당 임플란트 부위와 연관되어있는가를 밝혀낸다. 그런 후 해당 근육에 통한 간접적인 자극을 가함으로써 임플란트 주위의 골융합을 촉진시킬 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 어떤 방법으로 근육을 자극할 것인가에 대해서는 좀 더 고려해 보아야 한다.

흥미롭게도 레이저와 LED의 파장을 주파수로 변환한 결과, 대략적인 주파수 범위는, 레이저를 이용한 세포실험의 경우 약 1.2 MHz (830 nm) 이고, 동물실험일 경우 약 1.47MHz (680 nm), LED의 경우 임상실험에서 약 1.6MHz (620 nm)이다. 초음파의 경우 세포나 조직들이 다양한 주파수(45kHz~3MHz)에서 반응하는 것을 보면 특별한 주파수가 존재하지 않는 것으로 생각된다. 그러나 레이저와 LED의 파장과 비교해 볼때 1.47~1.6MHz의 주파수가 임플란트의 골융합에 이상적이라고 생각한다. 조직의 손상을 방지하기 위해서는 주파수에 맞는 이상적인 강도(Intensity)를 찾는 것이 중요하다고 생각한다. 같은 조건에서의 주파수(1.47~1.6MHz의 주파수)에 해당하는 세가지 다른 타입의 자극 (초음파, 레이저, LED)을 임플란트에 가함으로써 골융합이 어떻게 변화하는 지를 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 연구비 (2010-0023070)의 지원에 의해서 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

[1] Anderson, K.N., Anderson, L.E., Glanze, W.D., "Mosby's Medical, Nursing, & Allied

- Health Dictionary, in: Anderson, K.N., Anderson, L.E., Glanze, W.D. (Eds.), Mosby's Medical, Nursing, & Allied Health Dictionary. Mosby, St. Louis."1998.
- [2] Ascenzi, A., Improta, S., Portigliatti Barbos, M., Carando, S., Boyde, A., "Distribution of lamellae in human femoral shafts deformed by bending with inferences on mechanical properties." Bone, 8, pp. 319-325. 1987.
- [3] Brawn, P.R., Kwong-Hing, A., "Histologic comparison of light emitting diode phototherapy-treated hydroxyapatite-grafted extraction sockets: a same-mouth case study." Implant dentistry, 16, pp. 204-211. 2007.
- [4] Brunski, J.B., Moccia Jr., A.F., Pollack, S.R., Korostoff, E., "The influence of functional use of endosseous dental implants on the tissue implant interface." Journal of Dental Research, 58, pp. 1953-1969. 1979.
- [5] Chou, H.Y., Jagodnik, J.J., Muftu, S., "Predictions of bone remodeling around dental implant systems." Journal of biomechanics, 41, pp. 1365-1373. 2008.
- [6] Cooper, L.F., "Biologic determinants of bone formation for osseointegration: clues for future clinical improvements." The Journal of prosthetic dentistry, 80, pp. 439-449. 1998.
- [7] Davies, J.E., "Understanding peri-implant endosseous healing." Journal of dental education, 67, pp. 932-949. 2003.
- [8] Desmet, K.D., Paz, D.A., Corry, J.J., Eells, J.T., Wong-Riley, M.T., Henry, M.M., Buchmann, E.V., Connelly, M.P., Dovi, J.V., Liang, H.L., Henshel, D.S., Yeager, R.L., Millsap, D.S., Lim, J., Gould, L.J., Das, R., Jett, M., Hodgson, B.D., Margolis, D., Whelan, H.T., "Clinical and experimental applications of NIR-LED photobiomodulation." Photomedicine and laser surgery, 24, pp. 121-128. 2006.
- [9] Doan, N., Reher, P., Meghji, S., Harris, M., "In vitro effects of therapeutic ultrasound on cell proliferation, protein synthesis, and cytokine production by human fibroblasts, osteoblasts, and monocytes." J Oral Maxillofac Surg, 57, pp. 409-419; discussion 420. 1999.
- [10] Duarte, L.R., "The stimulation of bone growth by ultrasound." Archives of orthopaedic and traumatic surgery, 101, pp. 153-159. 1983.
- [11] Falk, H., Laurell, L., Lundgren, D., "Occlusal force pattern in dentitions with mandibular implant-supported fixed cantilever prostheses occluded with complete dentures." The International journal of oral & maxillofacial implants, 4, pp. 55-62. 1989.
- [12] Falk, H., Laurell, L., Lundgren, D., "Occlusal interferences and cantilever joint stress in implant-supported prostheses occluding with complete dentures." The International journal of oral & maxillofacial implants, 5, pp. 70-77. 1990.
- [13] Fyfe, M.C., Chahl, L.A., "Mast cell degranulation and increased vascular permeability induced by 'therapeutic' ultrasound in the rat ankle joint." British journal of experimental pathology. 65, pp. 671-676. 1984.
- [14] Giannobile, W.V., Finkelman, R.D., Lynch, S.E., "Comparison of canine and non-human primate animal models for periodontal regenerative therapy: results following a single administration of PDGF/IGF-I." Journal of periodontology, 65, pp. 1158-1168. 1994.
- [15] Hannam, A.G., Stavness, I., Lloyd, J.E., Fels, S., "A dynamic model of jaw and hyoid biomechanics during chewing." Journal

- of biomechanics, 41, pp. 1069-1076. 2008.
- [16] Heckman, J.D., Sarasohn-Kahn, J., "The economics of treating tibia fractures." The cost of delayed unions. Bulletin (Hospital for Joint Diseases) New York, N.Y. 56, pp. 63-72. 1997.
- [17] Jaffin, R.A., Kumar, A., Berman, C.L., "Immediate loading of implants in partially and fully edentulous jaws: a series of 27 case reports." Journal of periodontology, 71, pp. 833-838. 2000.
- [18] Jakse, N., Payer, M., Tangl, S., Berghold, A., Kirmeier, R., Lorenzoni, M., "Influence of low-level laser treatment on bone regeneration and osseointegration of dental implants following sinus augmentation. An experimental study on sheep." Clinical oral implants research, 18, pp. 517-524. 2007.
- [19] Khadra, M., Lyngstadaas, S.P., Haanaes, H.R., Mustafa, K., "Effect of laser therapy on attachment, proliferation and differentiation of human osteoblast-like cells cultured on titanium implant material." Biomaterials, 26, pp. 3503-3509. 2005.
- [20] Khadra, M., Ronold, H.J., Lyngstadaas, S.P., Ellingsen, J.E., Haanaes, H.R., "Low-level laser therapy stimulates bone-implant interaction: an experimental study in rabbits." Clinical oral implants research, 15, pp. 325-332. 2004.
- [21] Langenbach, G.E., Hannam, A.G., "The role of passive muscle tensions in a three-dimensional dynamic model of the human jaw." Archives of oral biology, 44, pp. 557-573. 1999.
- [22] Laurell, L., Lundgren, D., "Interfering occlusal contacts and distribution of chewing and biting forces in dentitions with fixed cantilever prostheses." The Journal of prosthetic dentistry, 58, pp. 626-632. 1987.
- [23] Li, L., Zhu, Z., Huang, C., Chen, W., "Ultrasound: a potential technique to improve osseointegration of dental implants." Medical hypotheses, 71, pp. 568-571. 2008.
- [24] Lind, M., Overgaard, S., Ongpipattanakul, B., Nguyen, T., Burger, C., Soballe, K., "Transforming growth factor-beta 1 stimulates bone ongrowth to weight-loaded tricalcium phosphate coated implants: an experimental study in dogs." The Journal of bone and joint surgery, 78, pp. 377-382. 1996.
- [25] Murai, K., Takeshita, F., Ayukawa, Y., Kiyoshima, T., Suetsugu, T., Tanaka, T., "Light and electron microscopic studies of bone-titanium interface in the tibiae of young and mature rats." Journal of biomedical materials research, 30, pp. 523-533. 1996.
- [26] Nolte, P.A., Klein-Nulend, J., Albers, G.H., Marti, R.K., Semeins, C.M., Goei, S.W., Burger, E.H., "Low-intensity ultrasound stimulates endochondral ossification in vitro." J Orthop Res, 19, pp. 301-307. 2001.
- [27] Peck, C.C., Hannam, A.G., "Human jaw and muscle modelling. Archives of oral biology, 52, pp. 300-304. 2007.
- [28] Pinheiro, A.L., Gerbi, M.E., "Photoengineering of bone repair processes." Photomedicine and laser surgery, 24, pp. 169-178. 2006.
- [29] Rawool, N.M., Goldberg, B.B., Forsberg, F., Winder, A.A., Hume, E., "Power Doppler assessment of vascular changes during fracture treatment with low-intensity ultrasound." J Ultrasound Med, 22, pp. 145-153. 2003.
- [30] Reher, P., Doan, N., Bradnock, B., Meghji, S., Harris, M., "Effect of ultrasound on the production of IL-8, basic FGF and VEGF."

- Cytokine, 11, pp. 416-423. 1999.
- [31] Renno, A.C., McDonnell, P.A., Parizotto, N.A., Laakso, E.L., "The effects of laser irradiation on osteoblast and osteosarcoma cell proliferation and differentiation in vitro." *Photomedicine and laser surgery*, 25, pp. 275-280. 2007.
- [32] Rubin, C., Turner, A.S., Mallinckrodt, C., Jerome, C., McLeod, K., Bain, S., "Mechanical strain, induced noninvasively in the high-frequency domain, is anabolic to cancellous bone, but not cortical bone." *Bone*, 30, pp. 445-452. 2002.
- [33] Rubin, C.T., McLeod, K.J., "Promotion of bony ingrowth by frequency-specific, low-amplitude mechanical strain." *Clinical orthopaedics and related research*, 165-174. 1994.
- [34] Schortinghuis, J., Bronckers, A.L., Stegenga, B., Raghoobar, G.M., de Bont, L.G., "Ultrasound to stimulate early bone formation in a distraction gap: a double blind randomised clinical pilot trial in the edentulous mandible." *Archives of oral biology*, 50, pp. 411-420. 2005.
- [35] Silva Junior, A.N., Pinheiro, A.L., Oliveira, M.G., Weismann, R., Ramalho, L.M., Nicolau, R.A., "Computerized morphometric assessment of the effect of low-level laser therapy on bone repair: an experimental animal study." *Journal of clinical laser medicine & surgery*, 20, pp. 83-87. 2002.
- [36] Szmukler-Moncler, S., Salama, H., Reingewirtz, Y., Dubruille, J.H., "Timing of loading and effect of micromotion on bone-dental implant interface: review of experimental literature." *Journal of biomedical materials research*, 43, pp. 192-203. 1998.
- [37] Torricelli, P., Giavaresi, G., Fini, M., Guzzardella, G.A., Morrone, G., Carpi, A., Giardino, R., "Laser biostimulation of cartilage: in vitro evaluation." *Biomedicine & pharmacotherapy = Biomedecine & pharmacotherapie*, 55, pp. 117-120. 2001.
- [38] Traini, T., Degidi, M., Caputi, S., Strocchi, R., Di Iorio, D., Piattelli, A., "Collagen fiber orientation in human peri-implant bone around immediately loaded and unloaded titanium dental implants." *Journal of periodontology*, 76, pp. 83-89. 2005.
- [39] Ueda, Y., Shimizu, N., "Pulse irradiation of low-power laser stimulates bone nodule formation." *Journal of oral science*, 43, pp. 55-60. 2001.
- [40] Ueda, Y., Shimizu, N., "Effects of pulse frequency of low-level laser therapy (LLLT) on bone nodule formation in rat calvarial cells." *Journal of clinical laser medicine & surgery*, 21, pp. 271-277. 2003.
- [41] Wang, J.S., "Basic fibroblast growth factor for stimulation of bone formation in osteoinductive or conductive implants." *Acta orthopaedica Scandinavica*, 269, pp. 1-33. 1996.
- [42] Warden, S.J., Bennell, K.L., McMeeken, J.M., Wark, J.D., "Acceleration of fresh fracture repair using the sonic accelerated fracture healing system (SAFHS): a review." *Calcified tissue international*, 66, pp. 157-163. 2000.
- [43] Yang, K.H., Parvizi, J., Wang, S.J., Lewallen, D.G., Kinnick, R.R., Greenleaf, J.F., Bolander, M.E., "Exposure to low-intensity ultrasound increases aggrecan gene expression in a rat femur fracture model." *J Orthop Res*, 14, pp. 802-809. 1996.
- [44] Yoon, Y.J., Cowin, S.C., "The estimated elastic constants for a single bone osteonal lamella." *Biomechanics and modeling in*

mechanobiology, 7, pp. 1-11. 2008.
 [45] Young, S.R., Dyson, M., "Macrophage re-
 sponsiveness to therapeutic ultrasound."
 Ultrasound in medicine & biology, 16, pp.
 809-816. 1990.

저자약력

윤 영 준(Young-June Yoon) 정희원



1996년 명지대학교 기계공학
 과 공학사
 2001년 뉴욕시립대학교 기계
 공학과 공학석사
 2005년 뉴욕시립대학교 기계
 공학과 공학박사
 2005년 뉴욕시립대학교 강사
 2006년 텍사스 주립대학교
 박사후 연구원
 2008년 위싱턴대학교 박사후
 연구원
 2009년 명지대학교 산업대학
 원 객원조교수
 현재 한양대학교 기계공학부
 조교수

<관심분야> 생체역학, 의공학