

고주파 저스트레인 골자극 인가용 진동 시스템 개발

유주연¹ · 박근철¹ · 전아영¹ · 김윤진² · 노정훈³ · 전계록³

¹부산대학교 의학전문대학원 의공학협동과정

²부산대학교 의학전문대학원 가정의학교실

³부산대학교 의학전문대학원 의공학교실

Development of the High_frequency and Low_strain Vibration Stimulation System for Stimulating Bone

Ju-Yeon Yoo¹, Guen-Chul Park¹, Ah-Young Jeon¹, Yun-Jin Kim²,
Jung-Hoon Ro³ and Gye-Rok Jeon³

¹Department of Interdisciplinary program in Biomedical Engineering, School of Medicine, Pusan National University

²Department of Family Medicine, College of Medicine, Pusan National University

³Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Pusan National University

(Received January 3, 2011. Accepted March 14, 2011)

Abstract: In this study, the system for application of the bone stimulation was implemented using high frequency and low strain method. The whole system consists of the high frequency and low strain vibration stimulation system for stimulating bone, LVDT sensor, and wireless sensor based on tri-axial accelerometer. To evaluate the usefulness of the system, the frequencies and accelerations from function generator were applied to the vibration stimulation system. The range of frequency was 17 Hz, 30 Hz, 45 Hz, 50 Hz and the range of acceleration was set 0.3 g, 0.6 g, 1 g, and 2 g. The measured frequencies and acceleration using LVDT (linear variable difference transformer) sensor and 3-axial accelerometer were estimated and compared. The range of frequencies average difference was from 0.0 to 0.004 Hz. As the standard deviation of frequencies estimated by LVDT sensor and accelerometer was below 0.03 Hz and the output frequencies of function generator were similar. Also the results of t-test were satisfied with conditions of $p > 0.05$. And the acquired frequencies and acceleration from vibration measuring device module were estimated and analyzed. As the mean of accelerations was similar to the acceleration applied from function generator. And the standard deviation of acceleration estimated from vibration measuring device module was ranged from 0.019 g to 0.038 g. Also the results of t-test were satisfied with conditions of $p > 0.05$. Therefore, these results were fairly similar to the acceleration applied from function generator. As a result, the usefulness of the system was confirmed. In a further study, clinical experiment will be carried out with the authorization of IRB (institutional review board) so that appropriate frequency and strain would be investigated in clinical field.

Key words: stimulating bone, vibration measuring device, LVDT, 3-axial accelerometer

1. 서 론

전 세계적으로 골다공증 환자는 지속적으로 증가하고 있

다[1-2]. 한국의 경우 골다공증 환자의 수에 대한 정확한 통계는 제시되지 않았으나, 약 200만 명 이상으로 추정되고 있다. 이와 같이 많은 골다공증 환자들은 골밀도 저하에 의한 골다공증 자체의 문제뿐만 아니라 이차적으로 발생하는 골절에 의한 후유증도 무시하지 못할 정도로 심각하게 나타난다[3-4]. 이러한 골다공증 예방 및 치료에 있어서는 비 약물요법인 운동요법과 약물요법으로 구분된다. 비 약물요법들은 효과가 미미하기 때문에 주로 약물요법이 사용되고 있는 실정이다[5-6]. 반면 약물요법은 골절의 위험성이 높은

Corresponding Author : 전계록
경상남도 양산시 물금읍 범어리 부산대학교 양산캠퍼스 의학전문대학원 의공학교실
TEL: +82-51-510-8119 / FAX: 051-510-8120
E-mail: grjeon@pusan.ac.kr
이 논문은 2009년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No.22009-0087028).

특정 대상군에 대한 선택적 치료법으로 골흡수 억제제와 골형성 촉진제가 사용된다. 골흡수를 억제하는 약제들로는 여성호르몬, 칼시토닌, 비스포스포네이트 등이 있고, 골형성을 촉진하는 약제들로는 아나볼릭스테로이드, 볼소 및 부갑상선호르몬 등이 있다[7]. 그러나 이와 같은 약물 요법을 장기간 사용하는 경우 과도한 의료비 지출과 약물 복용에 따른 부작용이 따른다[8-9].

이에 치료효능이 높으며 부작용이 적은 방법으로 골다공증을 치료하기 위해 다양한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 그 중에서도 최근 Rubin 등[10]은 골조직에 고주파 저스트레인 자극을 인가할 경우 골형성율의 조절력은 인가한 자극 즉 진동주파수와 중력가속도에 따라 다른 양상을 나타냄을 관찰하였다[10]. 양 (sheep)을 실험군으로 선정한 후 $0.3[9.8 \text{ m/s}^2]$ 의 중력가속도와 30 Hz 고주파수 진동자극을 인가하여 대퇴골의 골밀도, 골형성율, 석회화 (calcification) 등의 변화양상에 대한 연구를 수행한 결과 고주파 저스트레인 진동자극을 인가한 실험군이 대조군에 비해 골밀도는 약 34%, 골형성율은 2.1배, 석회화는 2.4배 증가하였다고 발표하였다[11-12]. 이러한 연구 결과를 기반으로 “고주파 저스트레인 진동자극은 골의 형태학적 변화양상에 밀접한 연관성을 지닌다.”고 주장하였다. 또한 Rubin과 Turner 등[13]의 실험에서는 암컷 양을 대상으로 1년 동안 실험을 수행한 결과 실험군이 대조군에 비해서 골의 미네랄 함유량은 10.6%, 해면골 골소주의 수가 8.3% 높게 나타났다고 보고하였다. 그리고 해면골 내의 공간은 대조군에 비해서 11.3% 감소하였고, 골소주의 연결도는 대조군에 비해서 24.2%로 감소하였다고 발표하였다. 그리고 국내 연구에서도 골 형성을 증가와 골 흡수율 저하를 위한 연구가 다음과 같이 수행되었다. 고창용 등[14]은 12마리의 암컷 SD 흰쥐를 대조군 (CON), 위수술군 (SHAM), 전신진동군 (WBV 17, WBV 30, WBV 45)으로 구분한 후 전신진동이 난소절제술을 시행한 흰쥐 해면골에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 결과를 다음과 같이 보고하였다. WBV 45군은 골량의 손실이 가장 적었으며 골간기둥 (bony trabecula)의 형태학적인 변화 역시 가장 적게 나타났었고, WBV 17군은 대조군에 비해 골간기둥의 형태학적인 변화는 없었지만 골량의 손실이 대조군에 비해서 많이 나타났다고 보고하였다. 이러한 결과를 기반으로 적절한 진동자극은 골량의 손실을 저하시키나, 골의 특성에 적합하지 않은 진동자극의 인가는 골량의 손실을 더욱 가속화시킨다고 주장하였다.

하지만 현재까지 수행된 대부분의 연구들은 동물을 실험군으로 선정하여 수행되었다. 그리고 연구에 사용된 진동자극 시스템의 경우에는 주파수 대역이 17 Hz, 30 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 90 Hz 등이며, 중력가속도는 0.3 g, 0.6 g, 1 g, 2 g 등으로 한정하여 진동자극을 인가하였다. 일반적으로 진동자극

은 주파수와 중력가속도에 의해 자극의 강도와 자극에 영향을 받는 인체 부위가 다르게 분포되는 양상을 지니고 있다. 그러나 현재까지는 진동자극 파라미터를 가변시킬 수 있는 진동자극 시스템은 개발되어 있지 않은 실정이고, 스트레인의 형태, 주파수, 강도, 그리고 운동 지속시간에 대한 실험 프로토콜은 설정되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 진동자극 시스템의 주요 파라미터인 진동 주파수와 중력가속도를 가변시킬 수 있는 진동자극 시스템을 개발하고자 다음과 같은 일련의 과정으로 연구를 수행하였다. 먼저 주파수는 최대 60 Hz 중력가속도는 최대 3g까지 가변시킬 수 있는 진동자극 시스템을 개발하였다. 다음으로 개발된 진동자극 시스템의 유용성을 평가하기 위하여 진동 주파수와 중력가속도를 파형발생기 (function generator, AFG3021, Tektronix Inc., USA)의 주파수와 진폭을 이용하여 진동자극 시스템에 인가한 후 LVDT (linear variable difference transformer) 변위센서 (LDC500C, RDP Electro-sense Co., USA)를 이용하여 진동주파수를 측정하였다. 그리고 3축 가속도 센서 (BMA150, Bosch Sensortec Co., Germany) 두 개로 구성된 진동측정장치 모듈을 사용하여 중력가속도 및 진동주파수를 측정 후 파형발생기의 출력 파형과 비교·검토함으로써 구현된 시스템의 유용성을 검증하였다.

II. 실험 방법

본 연구에 의해 개발된 고주파 저스트레인 골자극 인가용 진동 시스템은 상·하 진동만 인가하는 1축 가진 시스템이며, 개발된 진동자극 시스템의 유용성을 평가하기 위하여 파형발생기의 주파수와 진폭을 이용하여 진동자극 시스템에 진동주파수와 중력가속도를 인가한 후 LVDT 변위센서를 이용하여 진동주파수를 측정하였다. 그리고 3축 가속도 센서를 사용하여 중력가속도 및 진동주파수를 검출한 후 파형발생기의 출력 파형과 비교·검토함으로써 구현된 시스템의 유용성을 평가하였다. 중력가속도를 측정하기 위해 진동측정장치 모듈을 이용하여 측정하였다. 진동측정장치 모듈을 추가로 설치한 이유는 진동판의 크기가 커지는 경우 분할진동이 발생할 수도 있으므로 보다 정확하게 중력가속도를 측정하고 측정값의 신뢰성을 향상시키기 위함이다. 측정된 진동주파수와 중력가속도는 실험 프로토콜을 적용하여 10회씩 반복 실험을 시행하여 실시간으로 획득한 데이터를 통계적인 기법을 사용하여 평가하였다. 사용된 통계 프로그램은 MiniTAB 16.0 (Minitab, Inc., USA)과 SPSS 18.0 (IBM SPSS Co., USA)을 사용하여 분석하였다. 통계적인 파라미터는 평균 (mean), 표준편차 (SD, standard deviation), 상관분석 법인 t-test ($p < 0.05$) 등을 이용하여 유용성을 평가하였다.

표 1. 타 연구자에 의해 제시된 주파수와 중력가속도

Table 1. The vibration frequency and acceleration gravity proposed by other studies

Researchers	Subject	Frequency (Hertz)	Acceleration ($g = 9.8 \text{ m/sec}^2$)
J. Flieger	Wistar rats	50 Hz	2 g
Rubin	Sheep	30 Hz	0.3 g
Russell Garman	C57BL/6J	45 Hz	0.3 or 0.6 g
C.Y.Ko	SD rats	17 Hz, 30 Hz, 45 Hz	1 [mm] _{peak-peak}
H.J.Jung	SD rats	45 Hz	0.3 g
C.Y.Ko	SD rats	45 Hz	1 [mm] _{peak-peak}

본 연구의 진동자극 시스템에 인가하는 주파수 및 중력가속도를 설정하기 위하여 타 연구자에 의해 수행된 연구 논문 에 제시된 주파수 및 중력가속도들을 참조하여 실험 프로토콜을 정의하였다. 타 연구자에 의해 제시된 진동 시스템에 인가하는 주파수 및 중력가속도를 정리하여 Table 1에 나타내었다[13-18]. 진동자극 시스템의 실험 프로토콜은 다음과 같다. 파형발생기로부터 진동자극 시스템에 인가하는 주파수는 17 Hz, 30 Hz, 45 Hz, 50 Hz로 설정하였으며, 중력가속도는 인가 주파수의 진폭을 변화시켜 3축 가속도 센서에 의해 측정된 값이 0.3 g, 0.6 g, 1 g, 2 g가 되는 진폭으로 설정하였다. 중력가속도의 진폭은 10회의 반복 실험 결과 획득된 전압의 최저점과 최고점 차이의 평균값을 기준으로 설정하였다.

III. 실험 장치 구성

1. 하드웨어 구성

개발된 진동자극 시스템의 메커니즘을 구동하기 위해 개발한 시스템의 하드웨어 구성도는 Fig. 1과 같다. 진동자극 시스템은 크게 전원부, 가진기부, 진동주파수 측정부, 중력가속도 측정부, 통신부 등으로 구성하였다. 첫 번째, 전원부는 Fig.

1의 Power Amp.에 해당하며, 전력증폭기 (EuroPower EP2000, Beh-ringer International Co., Germany)를 사용하여 1축 가진기에 전원을 공급하였다. 두 번째, 가진기부는 Fig. 1의 Function Generator와 Shaker에 해당하며, 고주파 저스트레인 진동자극을 인가하기 위하여 파형발생기로부터 출력되는 주파수와 진폭을 개발된 시스템의 진동주파수와 중력가속도로 대응시켜 1축 가진기에 인가하였다. 세 번째, 진동주파수 측정부는 Fig. 1의 LVDT Sensor부터 AC Filter까지 해당되며, 가진기로부터 출력되는 진동주파수를 측정하기 위하여 설치를 하였다. 그리고 중력가속도 측정부는 Fig. 1의 3-Axis Acc. Sensor에 해당되며, 가진기로부터 출력되는 진동주파수와 중력가속도를 측정하기 위하여 설치하였다. 마지막으로, 통신부는 Fig. 1의 Wireless Communication과 Notebook으로 구성되었으며, 중력가속도 측정부로부터 출력되는 파라미터 가진속도 및 중력가속도, 가진주파수, 가진시간, 주기 등을 USB Data Acquisition Board (CompactRIO, National Instrument Co., USA)를 이용하여 노트북에 저장하였다. 저장된 파라미터들을 분석하여 진동자극 시스템을 제어하기 위해 랩뷰 (LabView 2009, National Instrument Co., USA) 프로그램을 사용하

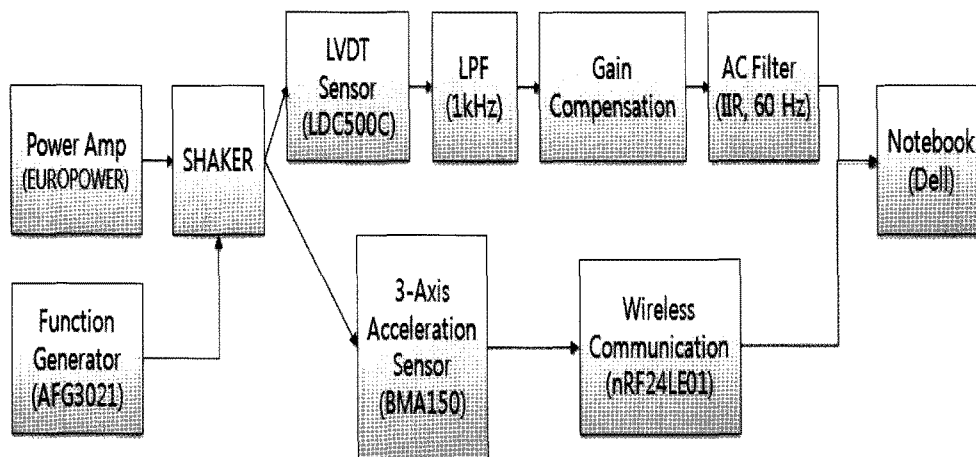


그림 1. 고주파 저스트레인 골자극 인가를 위해 제안된 시스템 구성도

Fig. 1. The proposed system block-diagram for bone stimulating vibration system using high frequency and low strain method

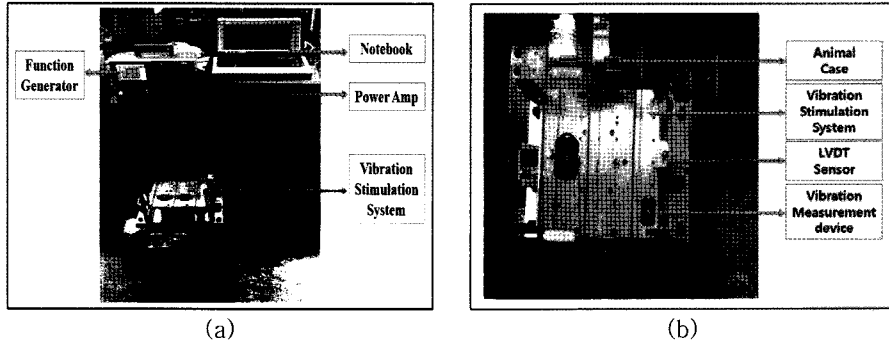


그림 2. 실험에 사용된 장비들: (a) 실험장치 전체 모습, (b) 진동측정장치 모듈의 부착 모습
 Fig. 2. Experimental devices: (a) appearance of whole system and (b) vibration measurement device module attached on the system

180

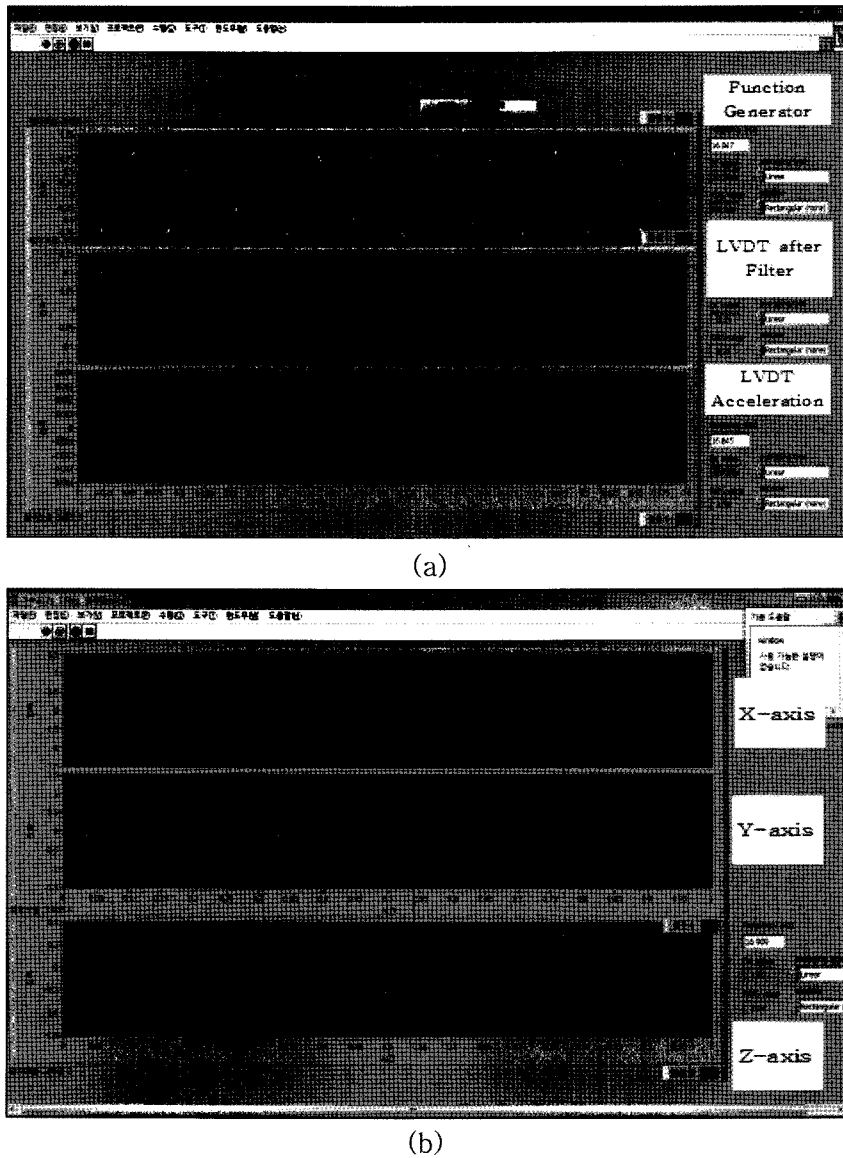


그림 3. 진동자극 시스템의 주파수 및 중력가속도 측정 프로그램 화면: (a) LVDT 센서를 사용한 진동주파수 측정 프로그램, (b) 3축 가속도 센서를 이용한 진동주파수 및 중력가속도 측정 프로그램
 Fig. 3. The software for vibration frequency and acceleration gravity measurement of vibration system : (a) measurement program of vibration frequency using LVDT sensor and (b) measuring program of acceleration due to vibration frequency and acceleration gravity using tri-axial accelerometer

여 프로그래밍 하였다[19].

본 연구를 수행하기 위하여 실험 장치 및 실험 환경을 Fig. 2와 같이 구성하였다. Fig. 2(a)는 실험을 위한 여러 가지 장비들을 연결한 모습과 실험에 사용되는 장비들을 나타내고 있다. Fig. 2(b)는 3축 가속도 센서를 사용한 진동측정장치 모듈을 진동자극 시스템에 부착한 모습이다.

2. 소프트웨어 구성

본 연구에서는 가진기로부터 출력되는 진동주파수와 중력 가속도 신호를 LVDT 센서와 3축 가속도 센서를 이용한 진동측정장치 모듈을 이용하여 진동자극 시스템의 가진속도 및 중력가속도, 가진주파수, 가진시간 등을 실시간으로 획득하고 분석한 후 제어하기 위하여 랩뷰 소프트웨어를 이용하여 프로그램을 개발하였다. 개발된 진동자극 시스템의 제어 프로그램은 LVDT 변위센서에 의해 획득된 진동주파수를 처리하는 프로그램과 3축 가속도 센서에 의해 획득한 중력가속도 및 진동주파수를 처리하는 프로그램으로 구분하였다.

Fig. 3(a)의 LVDT 변위센서의 데이터 획득 프로그램은 진동자극 시스템에서 출력되는 LVDT 변위 값을 1차적으로 1 kHz 저역통과필터 회로를 통과한 데이터들을 실시간으로 획득되도록 하였다. 그리고 획득된 데이터는 이득보정 (gain compensation)을 하고 IIR (infinite impulse response) 60 Hz 저역통과필터로 노이즈를 제거한 후 프로그램 화면에 디스플레이 되도록 하였다. 또한, IIR 필터를 거친 신호

를 미분하여 가속도 변화를 나타내었으며, 가속도의 변화 값으로 진동주파수를 측정하여 그 결과 값을 화면에 나타나게 프로그래밍 하였다.

3축 가속도 센서를 이용한 데이터 획득 프로그램은 x축, y축, z축의 중력가속도 신호 변화치를 실시간으로 측정하여 각각의 화면에 디스플레이 되도록 하였고, 실시간으로 획득된 중력가속도 신호의 변화 값을 주파수로 측정하도록 하였다. 본 연구에 의해 개발된 3축 가속도 센서를 이용한 진동주파수 측정 프로그램의 인터페이스는 Fig. 3(b)와 같다.

IV. 실험 결과

1. 주파수 분석 결과

개발된 LVDT 변위 센서와 무선통신 기반의 진동측정장치 모듈을 사용하여 10회의 반복 측정으로 데이터를 획득한 후 추정된 진동 주파수를 통계처리 기법을 적용해서 평균, 표준편차, t-test($p < 0.05$) 등을 산출한 후 비교·분석하여 진동자극 시스템의 유용성을 평가하였다. 통계처리 후 분석 결과 각 주파수별 평균 및 표준편차를 살펴보면 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 진동주파수 17 Hz를 자극으로 인가하였을 때 평균 및 표준편차를 나타내었다. Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이 17 Hz 인가시에 LVDT 변위센서를 이용한 측정 진동주파수의 평균은 파형발생기로부터 진동자극 시스템에 인가 주파수와 약 0.001의 근소한 차이로 유사함을 확인할 수 있

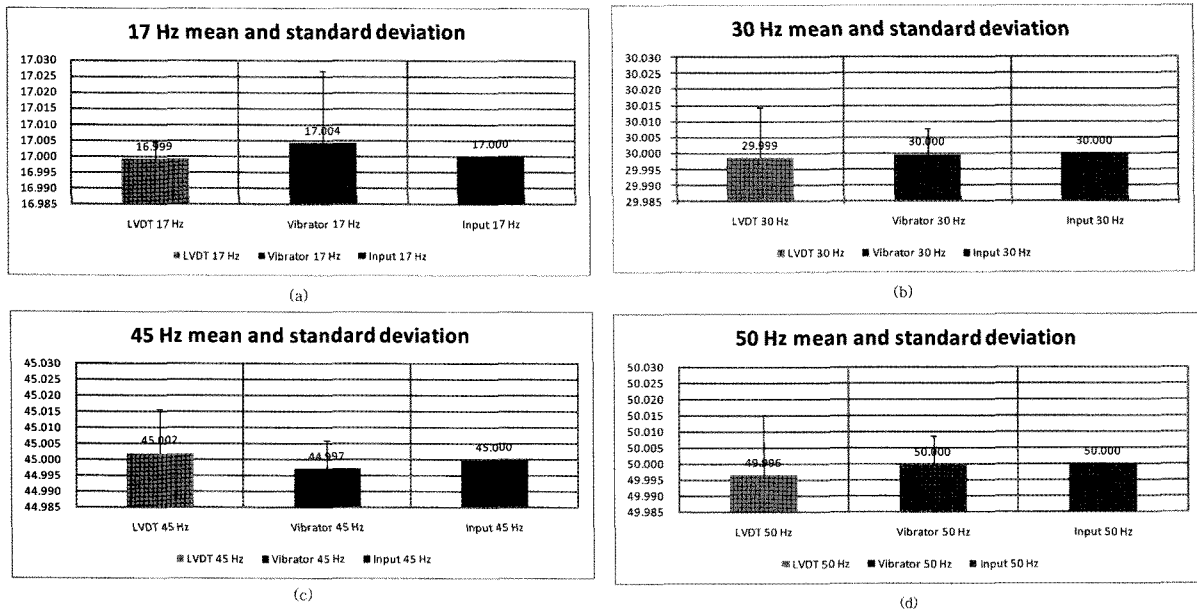


그림 4. 인가된 진동주파수별 LVDT 센서와 진동측정장치 모듈에 의해 측정된 진동주파수의 평균 및 표준편차: (a) 17 Hz의 평균 및 표준편차, (b) 30 Hz의 평균 및 표준편차, (c) 45 Hz의 평균 및 표준편차, (d) 50 Hz의 평균 및 표준편차

Fig. 4. The mean and standard deviation of measured vibration frequency according to applied vibration frequency using LVDT sensor and vibration measurement device module: (a) mean and standard deviation at 17 Hz, (b) mean and standard deviation at 30 Hz, (c) mean and standard deviation at 45 Hz, and (d) mean and standard deviation at 50 Hz

표 2. LVDT 센서와 진동측정장치 모듈로부터 측정된 진동주파수 및 중력가속도 의 t 검정 결과

Table 2. The t test result of the vibration frequency and acceleration gravity measured by using LVDT sensor and vibration measurement device module

t-test	17 Hz (95%)		30 Hz (95%)		45 Hz (95%)		50 Hz (95%)	
	*LVDT	*Vibrator	*LVDT	*Vibrator	*LVDT	**Vibrator	*LVDT	*Vibrator
P < 0.05	3.3*10 ⁻¹	2.3*10 ⁻¹	5.5*10 ⁻¹	7.5*10 ⁻¹	3.4*10 ⁻¹	6.0*10 ⁻²	2.3*10 ⁻¹	7.4*10 ⁻¹

*:10⁻¹ 이상, **:10⁻² 이하

었다. 그리고 표준편차의 분포에서는 오차범위가 약 0.03 이하로 분포하기 때문에 파형발생기로부터 출력된 주파수와 유사함을 확인하였다. 그리고 진동측정장치 모듈의 평균(± 표준편차)은 약 0.004 (± 0.03) Hz 정도의 분포를 나타내었다. Fig. 4(b)에서 30 Hz 진동주파수를 인가했을 시에는 LVDT 센서의 평균(표준편차)은 약 0.001 (± 0.016) Hz의 분포양상을 나타냈다. 그리고 진동측정장치 모듈의 측정치는 약 0 (± 0.010) Hz의 결과를 나타내었다. Fig. 4(c)에서 45 Hz 인가시 LVDT 센서에서 측정값은 약 0.002 (± 0.013) Hz의 결과를 나타내었다. 그리고 진동측정장치 모듈에서는 약 0.003 (± 0.008) Hz의 수치를 나타내었다. 마지막으로 Fig. 4(d)에서는 진동주파수 50 Hz 인가시 LVDT 센서의 측정 평균(표준편차)은 약 0.004 (± 0.019) Hz를 나타내었다. 그리고 진동측정장치 모듈에서는 약 0 (± 0.010) Hz를 분포를 나타내었다. 이러한 각 주파수별 LVDT 센서와 진동측정장치 모듈에서 측정된 진동주파수의 평균과 표준편차의 분포양상을 보면 파형발생기로부터 출력된 주파수와 유사함을 확인하였다.

t 검정 결과는 Table 2와 같다. Table 2에서 살펴보면 각 주파수별 LVDT센서와 진동측정장치 모듈의 유의확률 p-value가 0.05보다 크면 귀무가설의 조건(입력신호와 측정신호의 측정값이 같다)에 만족한다. 그래서 파형발생기로부터의 출력 주파수와 두 센서에서 추정된 진동 주파수가 비슷한 경향을 나타내는 결과로 제작한 시스템의 유용성을 확인할 수 있었다.

2. 중력가속도 분석 결과

본 연구에서 가속도 센서를 이용한 진동측정장치 모듈을 진동자극 시스템에 부착하여 앞에서 정의한 실험 프로토콜을 기반으로 10회의 반복 측정하였고, 측정된 중력가속도를 통계적인 기법을 이용하여 비교·분석한 결과로 진동자극 시스템의 유용성을 평가하였다. 분석 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5(a)의 결과를 살펴보면 진동자극 시스템에 각 주파수별 0.3 g를 인가시 측정되었던 중력가속도의 값의 평균은 파형발생기의 출력값과 유사함을 보였다. 그리고 표준편차의

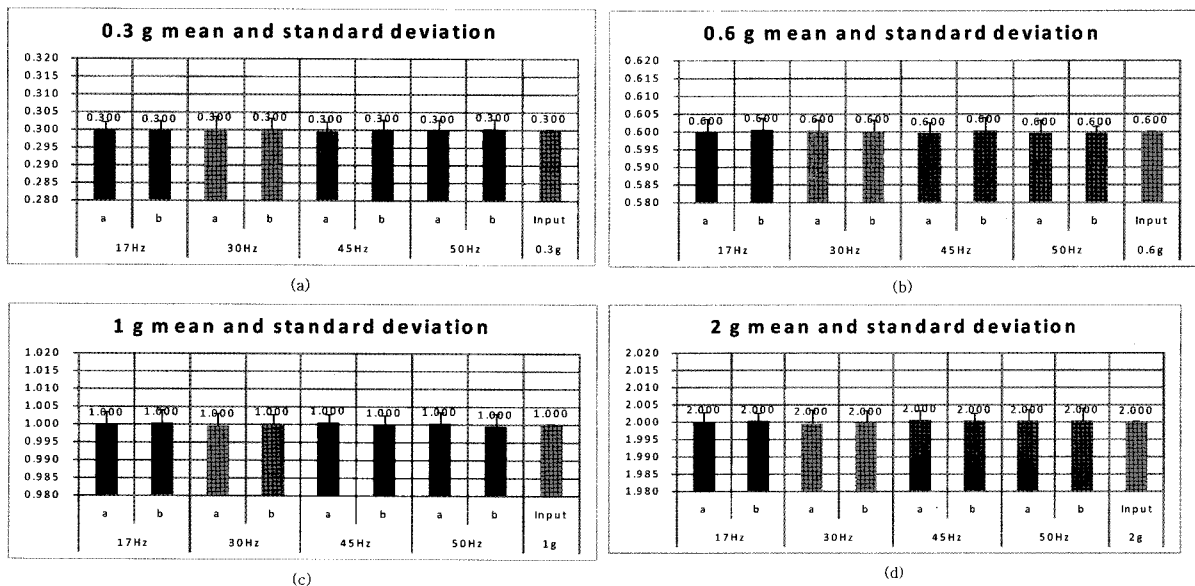


그림 5. 인가된 중력가속도별 진동측정장치 모듈에 의해 측정된 중력가속도 신호의 평균 및 표준편차: (a) 0.3 g에서 평균 및 표준편차, (b) 0.6 g에서 평균 및 표준편차, (c) 1 g에서 평균 및 표준편차, (d) 2 g에서 평균 및 표준편차

Fig. 5. The mean and standard deviation of measured acceleration signal in accordance with induced each acceleration due to gravities using vibration measuring device module: (a) mean and standard deviation in 0.3 g, (b) mean and standard deviation in 0.6 g, (c) mean and standard deviation in 1 g, and (d) mean and standard deviation in 2 g

표 3. 진동자극 시스템에 인가된 각각의 주파수와 진폭별로 측정된 진동주파수와 중력가속도에 대한 t 검정 결과

Table 3. The t test result of the vibration frequencies and acceleration gravities applied to vibration stimulation system

	17 Hz (95%)		30 Hz (95%)		45 Hz (95%)		50 Hz (95%)	
	a/Input	b/Input	a/Input	b/Input	a/Input	b/Input	a/Input	b/Input
0.3 g	8.95×10^{-1}	7.52×10^{-1}	9.32×10^{-1}	7.55×10^{-1}	6.57×10^{-1}	1.0×10^{-0}	8.40×10^{-1}	7.38×10^{-1}
0.6 g	8.67×10^{-1}	7.19×10^{-1}	8.40×10^{-1}	9.22×10^{-1}	6.18×10^{-1}	8.07×10^{-1}	6.90×10^{-1}	4.27×10^{-1}
1 g	1.0×10^{-0}	8.69×10^{-1}	7.21×10^{-1}	8.05×10^{-1}	5.91×10^{-1}	9.10×10^{-1}	8.55×10^{-1}	6.65×10^{-1}
2 g	9.12×10^{-1}	6.91×10^{-1}	7.49×10^{-1}	8.59×10^{-1}	6.70×10^{-1}	6.91×10^{-1}	7.80×10^{-1}	8.69×10^{-1}

크기도 약 0.01 g 이하로 나타나는 것을 확인함으로써 파형 발생기로부터 진동자극 시스템에 인가되는 각각의 주파수별 중력가속도와 유사함을 확인할 수 있었다. Fig. 5의 (b), (c), (d)의 경우를 살펴보면 각각의 주파수별 중력가속도의 평균은 파형발생기의 출력값과 비슷한 경향을 보였다. 그리고 표준편차의 결과에서는 최소 0.0019 g에서 최대 0.0038 g으로 수치적으로 낮게 분포양상을 나타냈다. 그러므로 인가한 중력가속도의 평균에서 차이가 나지 않음을 알 수 있었다.

t 검정의 결과를 정리하면 Table 3과 같다. Table 3의 결과를 살펴보면 진동측정장치 모듈의 유의 확률 살펴보면 $p < 0.05$ 의 조건에서 t-검정 p-value의 결과값이 0.05보다 크게 나타났다. 이러한 결과들은 파형발생기의 출력 가속도와 진동측정장치 모듈에서 측정된 가속도가 비슷한 결과값을 나타냄으로써 시스템의 유용성을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 연구에서는 개발된 진동자극 시스템의 유용성을 평가하기 위해서 기존 타 연구자에 의해 정의한 실험 프로토콜을 적용한 후 통계적인 기법을 이용하여 비교·분석 결과로 유용성을 평가하였다. LVDT 변위 센서와 3축 가속도 센서를 이용한 진동측정장치 모듈의 측정된 주파수와 파형발생기로부터 출력되는 주파수의 평균 및 표준편차 결과 유사함을 확인하였다. 그리고 t 검정을 통해 두 센서에서 획득한 측정된 주파수와 파형발생기의 출력 주파수가 유사함을 확인하였고 개발된 시스템의 유용성을 확인할 수 있었다. 또한 진동인가 시스템의 중력가속도의 통계적인 파라미터를 살펴보면 평균 및 표준편차의 경우 진동측정장치 모듈에 의해 측정된 중력가속도와 파형발생기에서 진폭을 조절하여 인가한 중력가속도가 유사함을 확인할 수 있었다. 그리고 t 검정에서도 유의확률의 조건인 $p < 0.05$ 에서 p-value의 결과값은 0.05보다 크게 나타나는 결과로 진동자극 시스템의 중력가속도에 대한 유용성을 확인하였다.

따라서 본 연구에 의해 개발된 고주파 저스트레인 골진동 인가용 진동자극 시스템의 유용성을 평가한 결과 제작한 시

스템의 유용성을 확인할 수 있었다. 그리고 향후 병원 IRB (institutional review board) 승인을 획득한 후 인체를 대상으로 임상 실험을 수행하여 골 형성을 증가와 골 흡수를 저하에 영향을 미치는 다양한 연구, 즉 고주파 저 스트레인 진동자극이 골의 형태학적 변화 양상에 관한 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] National Osteoporosis foundation, *Osteoporosis Prevalence Report, 1996 and 2015.*, Washington DC, 1997.
- [2] G. C. Park, J. Y. Yoo, A. Y. Jeon, N. J. Rho, G. R. Jeon, "The implementation of the vibration system for the increase of bone density.", in *Proc. 41th The Korea Society of Medical & Biological Engineering*, Chuncheon, Korea, May, 2010, pp. 44.
- [3] G. C. Park, J. Y. Yoo, A. Y. Jeon, N. J. Rho, G. R. Jeon., "The body vibration control system using LVDT Displacement Transducer", in *Proc. 42th The Korea Society of Medical & Biological Engineering*, Seoul, Korea, Nov, 2010, pp. 30.
- [4] Shinji K, Yukiharu H, Sadao S et al., "Functional Outcome after Hip Fracture in Japan", *Clin Orthop*, vol. 348, pp. 29-36, 1998.
- [5] Honda et al, "A High-impact exercise strengthens bone in osteopenic ovariectomized rats with the same outcome as sham rats.", *Journal of Applied Physiology*, vol. 95, no. 3, pp. 1032-1037. 2003.
- [6] S. K. Lim, "Osteoporosis", *Korean Journal of Medicine*, vol. 58, no. 6, pp. 698-702, 2000.
- [7] H. Y. Jung, "Osteoporosis Diagnosis and Treatment 2007", *Korean Society of Bone Metabolism*, vol. 23, no. 2, pp. 77-108, 2007.
- [8] Cauley JA, Robbins J, Chen Z et al., "Effects of estrogen plus progestin on risk of fracture and bone mineral density: the Women's Health Initiative randomized trial", *JAMA*, vol. 290, no. 13, pp. 1729-1738, 2003.
- [9] Sook-Bin Woo, Hellstein JW, and Kalmar JR, "Systematic Review; Bisphosphonates and Osteonecrosis of the Jaws", *Annals of Internal Med.*, vol. 144, pp. 753-761, 2006.
- [10] Rubin CT, Lanyon LE, Kappa Delta Award paper. "Osteoregulatory nature of mechanical stimuli: function as a determinant for adaptive remodeling in bone", *J. Orthop. Res.* vol. 5, pp. 300-310, 1987.
- [11] Rubin CT, Turner SM, Bain S, Mallinckrodt C, McLeod K, "Low mechanical signals strengthen long bones", *Nature*,

- vol. 412, pp. 603-604, 2001a.
- [12] Rubin CT, Xu G, Judex S, "The anabolic activity of bone tissue, suppressed by disuse, is normalized by brief exposure to extremely low-magnitude mechanical stimuli", *The FASEB Journal*, vol. 15, pp. 2225-2229, 2001b.
- [13] C. Rubin, A. Simon, R. Muller et al., "Quantity and Quality of Trabecular Bone in the Femur Are Enhanced by a Strongly Anabolic, Noninvasive Mechanical Intervention", *JBMR*, vol. 17, no. 2, pp. 349-357, 2002.
- [14] Chang-Yong Ko, Tae-Woo Lee, Dae-Gon Woo, Hyo-Seon Kim, Dohyung Lim, Han-Sung Kim, Beob Yi Lee, "Effect of Whole Body Vibration on Trabecular Bone in OVX Rats", *The Korean journal of physical anthropology*, vol. 20, no. 4, pp. 301-309, 2007.
- [15] Flieger J, Karachalios Th, Khaldi L, Raptou P, Lyritis G, "Mechanical Stimulation in the Form of Vibration Prevents Postmenopausal Bone Loss in Ovariectomized Rats.", *Calcif Tissue Int*, vol. 63, pp. 510-514, 1998.
- [16] R. Garman, G. Gaudette, L.R. Donahue, C. Rubin, S. Judex, "Low-level accelerations applied in the absence of weight bearing can enhance trabecular bone formation.", *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 25, pp. 732-740, 2007.
- [17] Chang-Yong Ko, Tae-Woo Lee, Dae-Gon Woo, Hyo-Seon Kim, Han-Sung Kim, Beob Yi Lee, Do-hyung Lim, "Effect of Whole Body Vibration on Trabecular Bone in OVX Rats", *Korean J Phys Anthropol*, vol. 25, no. 5, pp. 148-154, 2008.
- [18] Hui-Jeong Jeong, Gi-Uk Gwon, Jae-Geun O, "The Effect of Whole-Body Vibration Exercise on Prevent of Osteoporosis in Ovariectomized Rats", *Exercise Science*, vol. 16, no. 3, pp. 263-270, 2007.
- [19] J. Y. Yoo, G. C. Park, A. Y. Jeon, J. H. Rho, G. R. Jeon, "The measurement of Vibration using Ultra-low Power Wireless system.", in *Proc. 41th The Korea Society of Medical & Biological Engineering*, Chuncheon, Korea, May, 2010, pp. 65.