

초음파 치료 시 초음파 세기 변화에 따른 생리적 효과 연구

김성민¹, 이만표², 최병철³, 최상혁¹, 배하석⁴, 정희승⁵, 박성윤⁶

¹건국대학교 의료생명대학 의학공학부, ²건국대학교 신기술융합과, ³춘해대학 의료공학과,
⁴이화여자대학교 의학전문대학원, ⁵주성대학 보건행정과, ⁶식품의약품안전청

A Study of Ultrasound Rehabilitation Therapy : Physiological Effects by Change of Ultrasound Intensity

S.M. Kim¹, M.P. Lee², B.C. Choi³, S.H. Choi¹, H.S. Bae⁴, H.S. Jung⁵, S.Y. Park⁶

¹Department of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, Konkuk University,

²Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University,

³Department of Biomedical Engineering, Choonhae College, ⁴School of Medicine, Ewha Womans University,

⁵Department of Public Health Administration, Ju-seong College, ⁶Korea Food and Drug Administration

(Received May 14, 2007. Accepted December 5, 2007)

Abstract

Therapeutic ultrasound which is developed for rehabilitation therapy have already been used for healing joint contracture, synechia, acute and chronic inflammatory diseases. Medical devices for pain-relief and healing using therapeutic ultrasound are actively being developed. This study measured the change of PTT with the transmitted ultrasound through the human body to find out the increase of compliance of blood vessels. Measurement method of PTT in this study is employed as useful ways to acquire physiological information of patients in the clinical case in order to measure the change of mechanical characteristics of blood vessels. This study confirmed the PTT change of rehabilitation patients through the thermal effects of ultrasound by using PTT and also found that it is possible to increase PTT by adjusting the warm water and ultrasound. The increase of PTT means the decrease of the pulse wave velocity from the cardiovascular system to the peripheral arteries. The physiological effects occurred using the warm water and ultrasound.

Key words : ultrasound therapy, pulse transit time, rehabilitation treatment, thermal effects

1. 서론

최 근 초음파 진동자를 이용한 기기들이 많이 등장하고 있으며, 초음파 진동자의 개발로 인해 세척기 등 초음파를 이용한 제품이 등장하면서 초음파의 의료산업 이용이 확대되고 있다.

재활치료용으로 사용되는 초음파는 관절구축 및 유착, 급성 및 만성염증성 질환, 통증 완화 등의 목적으로 이미 널리 사용되고 있으며, 치료 초음파(Therapeutic Ultrasound) 위주의 통증의 경감과 치유를 목적으로 의료기기 개발이 활발하게 이루어지고 있다.

1958년 Lehmann 등은 1MHz의 초음파로 조직의 손상없이 조

직의 온도를 상승시킴으로 혈류량이 증가함을 발견하였다[1]. 혈류량의 증가는 말초조직의 산소운반 속도를 증가시키며, 영양분 공급 등 신진대사를 활발하게 해 준다. 초음파의 온열효과는 국소 조직의 온도를 증가시키며[1], 기계적 자극에 의한 히스타민 물질의 분비로 인해 동맥벽(Arterial Wall)과 내장에 있는 평활근(Smooth Muscle)을 수축시키고 동맥(Artery) 및 모세혈관(Blood Capillary)을 확장시켜 세포의 수분의 양을 증가시키는 작용을 한다.

초음파를 이용하여 국소조직의 온도가 증가되면, 혈관의 기계적 인 성질이 변한다. 혈관의 기계적 성질은 인체의 순환생리를 결정하는 매우 중요한 요인인데, 이 중 혈관의 유순도(Compliance)는 동맥의 탄성(Elasticity)을 의미하는 것으로 동맥의 구조적, 기능적 상태를 평가하게 된다. 동맥의 압력이 증가할 때 유순도도 증가하여 동맥의 팽창으로 인해 혈관저항이 감소하면서 혈류의 흐름을

본 연구는 산업자원부 지역중점기술개발사업의 지원으로 이루어짐.

Corresponding Author : Sung Min Kim

Department of Biomedical Engineering College of Biomedical & Health Science Konkuk University 322, Danwol-dong, Chungju-city, Chungcheong buk-do 380-701, Korea

Tel : 043-840-3761 / FAX : 043-851-7205

E-mail : smkim@kku.ac.kr

증가시키는 기전을 나타낸다. 이러한 기전은 초음파를 이용한 의 료기기의 치료분야에서 널리 사용되고 있다.

현재 재활치료 중인 환자를 대상으로 간이수조를 이용하여 맥 파전달시간(Pulse Transit Time : PTT)의 변화를 측정하였고, 혈 관확장으로 인한 혈류량의 증가를 확인하였다.

본 연구에서는 인체에 투사하는 초음파의 세기에 따라 PTT의 변화를 측정함으로써, 혈관의 유순도의 증가를 판단하고, 재활 치 료 시 안정적이고 효과적인 세기를 사용한 초음파의 이용에 대해 서 연구하고자 한다.

II. 방법

A. 초음파의 효과

초음파가 의료산업에 적용되기 시작하면서 진단뿐만 아니라 치 료의 효능에 대한 연구가 진행 중이다. 그 중 온열효과와 혈관확장 과 혈류량의 증진에 대한 효과는 초음파 치료의 일차적인 효과로 널리 알려져 있다.

초음파의 온열효과는 초음파 에너지의 흡수에 따른 조직온도의 상승으로 나타난다. 초음파 에너지가 조직에 도달하면 분자들의 마찰에 의해 열에너지로 전환되며, 발생된 열로 인해 조직온도를 상승시키고 혈류량이 증진되는 생리학적 반응이 나타난다[2].

초음파의 치료효과는 40℃ 이상에서 나타나는데, 조직의 국소 온도가 42℃ 이상으로 올라가면 열에 의한 직접적인 효과 외에도 초음파의 자극으로 인해 동맥 및 모세혈관의 확장이 현저하게 일 어난다. 혈관이 확장되면 혈류량이 변화하는데, 이는 초음파 치료 로 이용될 수 있다. 낮은 강도로 짧은 시간동안 치료하면 혈류량이 증가하는 반응을 볼 수 있다.

$$PWV = \sqrt{(Eh/\rho D)} \quad \text{Eq. (1)}$$

PWV : Pulse Wave Velocity
E : the incremental Young's Modulus
h : thickness of the arterial wall
ρ : blood density
D : diameter of the artery

표 1. 피실험자 정보(n=40)

Table 1. Subjects Information(n=40)

	Age(yr)	Height(cm)	Weight(kg)	Heart rate(bat/min)
Female	61.47 ± 8.36	159.16 ± 5.81	54.95 ± 10.41	79.05 ± 13.94
Male	51.19 ± 17.57	170.05 ± 5.54	66.33 ± 7.17	79.81 ± 9.68

표 2. 측정조건(수온변화, 초음파 세기 변화)

Table 2. Measurement Condition(Water Temperature, Change of Ultrasound Intensity)

실험단계	정상시	수온변화	1	2	3
측정시간/휴식시간	3분 / 5분	3분 / 5분	3분 / 5분	3분 / 5분	3분 / 5분
수온	물 없음	27℃	27℃	27℃	27℃
초음파 세기	-	-	약(1W/cm ²)	중(1.5W/cm ²)	강(2W/cm ²)

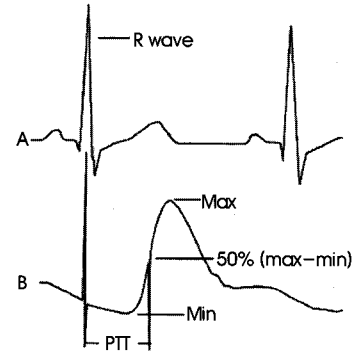


그림 1. ECG와 PPG를 이용한 PTT 측정
 Fig. 1. PTT Measurement by ECG and PPG

B. PTT(Pulse Transit Time)

심장의 대동맥판(Aortic Valve)에서 말초까지 혈류가 흐르는 시간을 PTT이라 한다.

PTT는 혈관을 통한 맥파속도(PWV, Pulse Wave Velocity)가 감소하면 길어지고, 맥파속도가 증가하면 짧아진다. 맥파속도 (PWV)는 Eq. [1]에 의해 예측된다[3].

하지만 현재까지 동맥혈관의 탄성을 정량화 할 수 있는 비침습 적인 방법이 개발되지 않았으며, PTT를 이용하여 혈관의 탄성을 판단하는 방법을 사용하고 있다. Eq. [2]를 이용하여 동맥혈관의 유순도를 판단할 수 있으며[4-6], Eq. [3]을 이용하여 유순도와 맥 파속도는 반비례함을 알 수 있다.

PTT는 그림 1에서 ECG (Electrocardiogram) (그래프 A)의 R-Peak부터 광전용적맥파(Photo-plethysmography, PPG)(그래 프 B)의 최대점과 최소점의 중간지점(50%)을 측정함으로써 알 수 있다[7,8].

$$T = (dV/dP) / V \quad \text{Eq. (2)}$$

T : the arterial distensibility
dV : increase in the arterial blood volume
V : the arterial blood volume
dP : increase in the arterial blood pressure

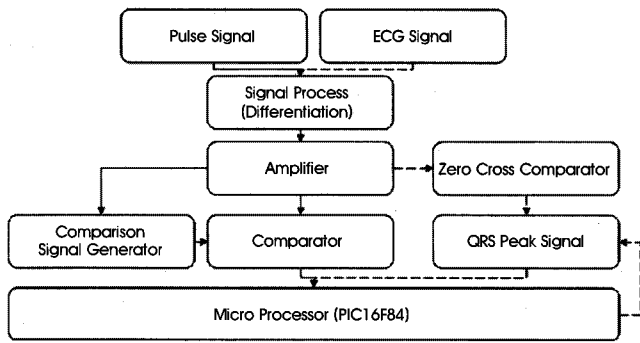


그림 2 맥파와 ECG의 Process
Fig. 2. Diagram of Pulse and ECG Signal Process

$$PWV = (\rho T)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. (3)}$$

PWV : Pulse Wave Velocity
ρ : blood density
T : the arterial distensibility

C. PTT 측정 시스템

본 연구에서 사용한 PTT시스템의 하드웨어 부는 심전도 측정을 위한 전극, PPG 측정을 위한 투과형 PPG 센서부, 심전도 및 맥파 신호의 검출 및 필터링을 위한 신호처리부, 신호를 PC로 보내기 위한 직렬통신부 등으로 구분 할 수 있다. (그림 2) 소프트웨어는 Visual C++(Microsoft Ver.6.0)을 사용하여 개발하였다.

D. 초음파 간이수조와 초음파 발생기

초음파 간이수조와 초음파 발생기는 구동회로 외장형으로 서로 분리되어 있으며, 초음파가 발생되는 초음파 간이수조와 초음파의 세기를 조절 할 수 있는 초음파 발생기로 구성되어 있다. (그림 3) 본 실험에서 이용된 초음파 수조는 팔 또는 다리를 수조에 담고



그림 3 실험장비 ① : 초음파발생 간이수조, ② : PTT 측정장치, ③ : PTT Software, ④ : 초음파 발생장치
Fig. 3. Experimental Equipment

고 1.1MHz의 초음파를 인가하여 초음파의 출력, 초음파 인가시간, 수온 등에 따른 생리적 특성의 변화를 파악하는 것을 목적으로 제작되었다. 바닥면의 형태는 직사각형이며, 바닥면에는 3개의 초음파 진동자가 설치되었다. 초음파 진동자는 압전 세라믹스 진동자와 금속진동체로 구성되며 금속진동체는 스테인레스 스틸(SUS303)을 이용하였고 초음파 방사면 직경을 44mm로 설정하였다. 또한 일정한 수온을 유지하기 위하여 수온을 조절할 수 있는 Hot Pump가 장착되어 있다. (그림 4)

초음파 적용 시 흡수계수가 가장 낮은 매질은 물(0.0022dB/cm)이며, 가장 효율적으로 초음파를 전달한다. 초음파의 감쇄는 변환기에서 멀리 떨어질수록 지수 함수적으로 감소되는데, 연부조직에서 1.1MHz 주파수의 반가층은 약 4cm가 되며, 근육에서의 반가층은 약 0.9cm가 된다[9]. 본 연구에서 초음파 수조의 매질은 물로 사용하였으며, 진동자와 팔의 거리는 약 1~2cm가 되도록 수조내부가 설계되었다.

초음파 발생기는 수온의 설정(25℃ ~ 40℃) 및 초음파의 세기를 설정(1.0W/cm² ~ 2.0W/cm²)할 수 있도록 제작되었다. (그림 3) 초음파 치료 효과는 조직의 온도가 40℃부근, 최대 45℃ 이내의 범위에서 얻을 수 있으며, 이러한 조건을 충족하기 위하여 초음파 치료는 일반적으로 1.0 ~ 2.0W/cm²의 강도범위에서 이루어진다. 초음파는 5cm 또는 그 이상의 심부조직에서 온도를 상승시키는데, 0.1W/cm²의 강도로 5cm 두께의 연부조직을 치료하면 1분당 0.2℃씩 투사부위의 조직온도가 상승하는 것으로 알려져 있다 [9].

E. 실험대상

본 연구에 참여한 환자들은 노인성 질환 및 척추 손상으로 인한 마비 환자와 근육이상 환자들이며, 총 40명의 성인 남녀를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험기간은 약 3 개월이 소요되었으며, 1회의 실험 시 약 3 ~ 5명의 환자를 대상으로, 실험 전 주의사항 등을 설명 후 실행하였다.

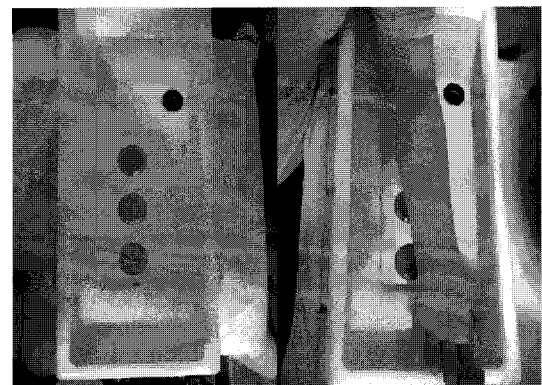


그림 4. 간이수조의 구조 및 초음파 조사 방법
Fig. 4. Structures and Operated Conditions of Water Tank

표 3. 27℃ 수온에서 PTT 변화

Table 3. PTT Variation at 27℃ Water

PTT	Experimental PTT(msec)		
	Normal	Water(27℃)	PTT variation
Average	219.62 ± 10.18	226.84 ± 8.19	7.22 ± 2.5

표 4. 초음파 세기에 따른 PTT 평균 변화

Table 4. Average Value of PTT Variation by Change of Ultrasound Intensity

PTT	Normal	Experimental PTT(msec)		
		1.0(W/cm ²)	1.5(W/cm ²)	2.0(W/cm ²)
Average	219.62 ± 10.18	232.55 ± 11.33	231.07 ± 9.78	234.58 ± 11.67
Avg. Value : 232.30 ± 10.25				

표 5. 초음파 세기에 따른 PTT 평균 변화량

Table 5. Average Value of PTT Variation Amount by Change of Ultrasound Intensity

PTT	Experimental PTT(msec)		
	1.0(W/cm ²)	1.5(W/cm ²)	2.0(W/cm ²)
Average	12.93 ± 4.32	11.45 ± 3.21	14.96 ± 2.99
Avg. Value : 13.12 ± 3.46			

피실험자의 연령대는 평균 56.08세이며, 50 ~ 70대 환자가 80%, 20 ~ 40대 20%이었다.

전체 환자 중 뇌경색, 뇌졸중 및 뇌출혈로 인한 마비 환자는 23명으로 전체 환자의 70.0%이었고, 근육 이상 환자들은 17.5%, 그 외 12.5%는 운동기능에 불편함을 느끼는 환자들이었다.

현재 재활의학과에서 재활치료를 받는 마비 환자로 분류된 환자들 중에서 주치의의 통한 주의사항 및 실험 제한인원을 제외한 인원을 선정하였다. (표 1)

F. 측정방법

혈관확장의 유무를 알기 위한 방법으로 PTT를 측정하였으며, 맥파전달시간을 측정하기 위한 방법으로 ECG와 PPG를 측정하였다. 흉부에 전극을 부착하여 ECG를 측정하였으며, 왼손과 오른손의 검지에 PPG센서를 부착하여 PPG를 측정하였다.

실험은 총 5 단계로 나누어 시행하였으며, 3분의 투사시간과 5분의 휴식을 통하여 각 실험 단계를 구분하였다. 실험 시 실험환경을 동일하게 유지하기 위하여 실험장소의 실내온도를 약 21℃로 유지하였고, 간이수조는 27℃의 물이 일정하게 유지되도록 하였다.

피실험자는 의자에 앉은 상태에서 왼팔의 손목에서 상완까지 온수에 담그고 초음파를 투사하였다. 초음파는 손목에서 팔꿈치까지 3개의 진동자를 통하여 전체적으로 투사를 하였으며, 각 단계가 끝나면 PTT를 측정하여 기록하였다. 휴식시간 5분이 종료될 때 각 단계의 영향이 최소화된 것을 확인하기 위하여 PTT를 재 측정하여, 최초 측정된 PTT와 비교한 후 다음 단계 실험으로 진행하였다. 초음파의 세기는 총 3단계로 나누었으며, 약(1W/cm²), 중

(1.5W/cm²), 강(2W/cm²)로 구분하였다.(표 3)

III. 결과

A. 수온에 따른 PTT 변화

간이수조에 담긴 물은 27℃의 일정한 온도로 유지되도록 하였으며 수온으로 인한 PTT의 변화를 측정하였다.

평상시의 PTT는 219.62±10.18msec이었으며, 27℃수온에서의 PTT는 226.84±8.19msec이었다. 평상시 상태와 27℃수온에서의 PTT는 약 7.22±2.5msec의 변화량을 보였다.

평상시의 PTT와 27℃ 수온의 PTT를 분석하면 평상시보다 27℃수온에서 증가하는 양상을 보이며, 이는 수온과 PTT가 혈관확장의 기전과 관계있다는 것을 판단할 수 있다.

B. 초음파 세기에 따른 PTT 변화

초음파의 세기를 단계별로 변화시키면서 맥파전달시간(PTT)을 측정하였다. 피실험자의 평상시의 평균 PTT는 219.62±10.18 msec이었으며, 약, 중, 강 세기의 초음파를 가한 후 PTT의 평균 변화량은 13.12±3.46msec였다.

초음파를 가했을 때 맥파전달시간이 길어지는 것을 볼 수 있다. (표 4) 초음파의 세기에 따른 PTT 변화량은 평균 13.12±3.46 msec로 1.0(W/cm²)일 때 12.93±4.32msec, 1.5(W/cm²)일 때 11.45±3.21 msec, 2.0(W/cm²)일 때 14.96±2.99msec의 변화를 보였다. (표 5)

초음파의 세기를 변화시키면서 PTT를 측정한 결과 초음파의 세

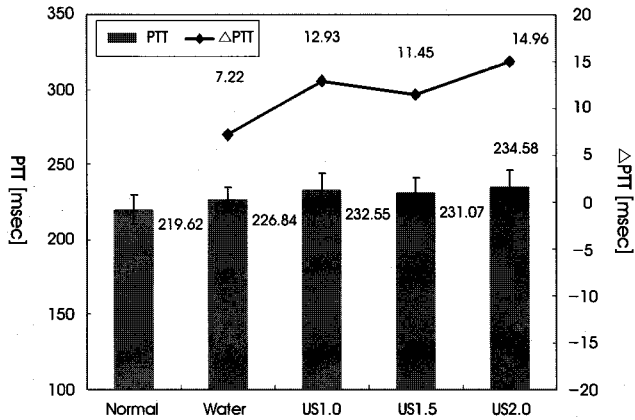


그림 5. 단계별 PTT변화 및 ΔPTT변화량
Fig. 5. PTT and ΔPTT Variation

기가 2.0(W/cm²)일 때 가장 큰 변화를 보이는 것을 알 수 있었다. (그림 5)

IV. 결론 및 고찰

초음파의 세기에 따른 PTT의 변화량과 수온에 따른 PTT의 변화량을 측정하였다. PTT가 증가할수록 혈관의 유순도가 증가하는 것을 알 수 있었으며, 이는 혈관 확장으로 인해 혈류가 증가한다는 것을 판단할 수 있었다.

27°C 수온을 매개체로 하는 초음파를 이용한 PTT의 변화는 평균 13.12msec로 나타났으며, 27°C 수온에서는 PTT의 변화량이 평균 7.22msec로 나타났다. 초음파를 이용했을 때 PTT의 변화량이 약 5.9(±2.31)msec 높게 나타났다. 이를 이용하여 수온을 이용한 방법보다 수온과 초음파를 병행하여 온열치료를 하는 것이 더 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

초음파 세기의 변화에 따라 측정된 PTT의 변화량은 1.0(W/cm²)일 때 12.93msec, 1.5(W/cm²)일 때 11.45msec, 2.0(W/cm²)일 때 14.96msec로 나타났다. 이때 PTT의 변화량은 초음파 세기에 따라 증가하는 것이 아님을 볼 수 있다. 이는 연속적인 초음파 세기의 변화는 PTT의 변화량과 유의성이 없다는 것을 말해 준다.

본 연구는 초음파의 세기로 인한 PTT의 변화량을 측정하였다. 연구에 참여한 마비환자의 연령에 따른 혈관의 혈류량 및 혈관의 상태 등이 다를 것으로 판단되지만, 초음파 투사로 인한 혈관확장의 효과를 확인하는 데 있어서는 무리가 없을 것이라 사료된다.

초음파의 강도는 단위시간동안 단위면적을 통과한 초음파에너지의 양으로 정의되며, 총 출력을 초음파 진동자의 방출면적으로 나누어 구할 수 있다. 본 실험에서 사용한 초음파는 그 주파수가 1.1MHz이며, 방사면 직경 44mm, 압전진동자 직경 30mm 입을 고려할 때 반감각이 3° 정도로서 지향성이 우수하므로 제작된 실험장비 내에서 초음파 진동자의 상부측으로 평행하게 전파된다고

볼 수 있다. 따라서 초음파를 인가하는 대상부위는 손목에서 팔꿈치 부위를 전반적으로 포함하며, 초음파 진동자의 상부에 위치하는 부위에서는 균일한 자극이 가해진다고 볼 수 있다.

또한 실험장비의 구조상 초음파 진동자로부터 자극이 가해지는 신체부위(팔 부분)까지의 거리는 단거리로서(약 1~2 cm) 거의 일정하게 유지되며 균질한 물을 통해 초음파가 전달되므로 거리에 따른 출력 변화가 실험결과에 변수로서 작용하지는 않을 것으로 사료된다. 초음파 치료를 목적으로 사용되는 초음파 출력의 크기는 일반적으로 1W/cm² ~ 3W/cm² 범위에 있으며, 따라서 본 실험에서 사용한 1W/cm² ~ 2W/cm²의 출력범위는 적절한 것으로 사료된다.

초음파의 효과는 일차적으로 열효과(Thermal Effects)이며 이는 초음파 에너지가 생체내를 전파할 때 흡수, 산란 등에 의해 열로 변환되어 발생된다. 감쇄(attenuation)는 흡수, 산란 및 반사등이 복합적으로 작용하여 초음파의 강도가 진행방향에 따라 감소되는 것을 말하며, 이 또한 열효과에 기여한다고 볼 수 있다.

본 연구를 통하여 혈관의 유순도를 증가시키는 방법으로 수온과 초음파를 병행하는 것이 더 효율적이라는 것을 알 수 있었다. 또한 초음파를 인가하면 혈관의 유순도가 증가하며, 혈류속도가 증가한다는 것을 확인할 수 있었다.

혈관의 확장은 수온과 초음파의 온열효과에 의해서 일어나므로, 평상시 상태 보다 수온을 이용한 온열효과와 초음파를 이용한 온열효과를 이용하면 재활치료 시 환자의 피로도를 줄일 수 있으며, 혈류속도가 빨라짐으로 세포와 조직에 전달되는 산소와 영양분의 양을 일시적으로 증가시킬 수 있을 것이다.

세포와 조직에 전달되는 산소의 양이 늘어나면 운동기능 증진효과와 재활 치료를 받는 환자들의 재활치료 기간을 단축 할 수 있을 뿐만 아니라, 환자들에게 재활치료 시 보조적인 치료역할을 할 수 있을 것으로 판단된다. 재활 치료 전·후에도 수온 및 초음파 치료를 병행함으로써 환자가 재활치료로 인해 받았던 피로 등을 해소할 수 있으며, 산소 및 영양분의 공급이 원활하게 이루어짐으로 인해 재활치료의 효과도 증진시킬 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Chan, A. K., Myrer, J. W., Measom, G, Draper, D. O., "Temperature changes in Human Patellar Tendon in Response to Therapeutic Ultrasound", *Journal of Athletic Training.*, Vol.33, no.2, pp.130-135, 1998.
- [2] Baker, K. G., Robertson, V. J., Duck, F. A., "A Review of therapeutic Ultrasound : Biophysical Effects", *Physical Therapy.*, Vol. 81, no. 7, pp. 1351-1377, 2001.
- [3] Jong Yong Abdiel Foo, Chu Sing Lim, "Pulse Transit Time as an indirect marker for variation in cardiovascular related reactivity", *Technology and Health care.*, Vol 14, Issue 2, pp.97-108, 2006.
- [4] M Nitzan, B Khanokh, Y Slovik, "The Difference in pulse transit time to the toe and finger measured by photoplethysmography", *Physiological Measurement.* pp. 85-93, 2002.

- [5] Franco P, Van De Borne P, Chabaski S, Sawaguchi T, et. al., "Physiology relationship between automatic reactions and arousals in infancy.", *Sleep Med* 2002, 3 Suppl 2, pp.49-52, 2002.
- [6] Wilcox I, Collins FL, Grunstein RR, Hender J, et. al., "Relationship between chemosensitivity, obesity and blood pressure in obstructive sleep apnea.", *Blood Press.*, Vol.3, Issue 1-2, pp. 47-54, 1994.
- [7] Drinnan, Michael J, Allen, John, Murray, Alen, "Relation between heart rate and pulse transit time during paced respiration", *Physiological Measurement.*, Vol.22, no.3, pp. 425-432, 2001.
- [8] Asmar, R., Menetos, A. Topuchian, J, Laurent, P., "Assessment of Arterial Distensibility by Automatic Pulse Wave Velocity Measurement: Validation and Clinical Application Studies", *Hypertension.*, Vol.26, no. 3, pp. 485-490, 1995.
- [9] Jae Hyoung Lee, "Electrotherapy", *Daihak Publishing Company*, 1995.