

Analysis of Relations Between Transmission Time of Therapeutic Ultrasound and Pulse Transit Time

金 性 民[†] · 李 柱 煥^{*} · 崔 炳 哲^{**} · 鄭 會 昇^{***} · 裴 夏 奭[§]
 (Sung-Min Kim · Joo-Hwan Lee · Byeong-Cheol Choi · Whoi-Seong Jung · Ha-Suk Bae)

Abstract - Recently, ultrasound is becoming a universal way of treatment when it comes to clinic. The thermal effect of therapeutic ultrasound can raise the temperature of tissue without damage and thus increases the flow rate, and this leads to the oxygen transportation velocity of peripheral tissue and ultimately facilitates the metabolism. The purpose of this research is analyzing relations between PTT and transmission time of therapeutic ultrasound, and in this study the PTT variation due to respective transmission time of ultrasound upon 17 normal persons was measured and as a result, it was observed that PTT increases as transmission time of therapeutic ultrasound

Key Words : Therapeutic Ultrasound, PTT(Pulse Transit Time), PPG(PhotoPlethysmoGraph), Thermal Effect

1. 서 론

환자에게 초음파를 적용하여 치료를 하는 일은 임상에서 보편적인 방법 중의 하나로 자리 잡아 가고 있다. 일반적으로 0.75~3 MHz의 범위를 갖는 치료용 초음파는 연조직 손상, 부종 및 근 운동성을 향상 시키는데 효능이 입증되었고 [1][2], 골절의 치유에도 상당한 효과가 있음이 밝혀졌다[3]. 또한 1 MHz의 치료용 초음파는 약 3~5 cm의 투과력을 가지고 온열효과를 일으켜 혈관의 유순도 혹은 탄성도와 같은 기계적 성질을 변화시키는 작용을 할 수 있다[2][4].

이러한 치료용 초음파의 온열효과는 조직손상 없이 조직의 온도를 상승시켜 혈류량을 증가시키고 혈류량의 증가는 말초조직의 산소운반 속도를 증가시켜 신진대사를 활발하게 해 준다. 또한 혈관 벽의 유순도 혹은 탄성도 등을 변화시켜 혈관이 가지고 있는 기계적인 성질을 변화시킬 수 있다.

혈관의 기계적인 성질 변화는 PTT(Pulse Transit Time)의 변화를 통해 유추할 수 있으며 이러한 PTT는 혈관이 수축하여 혈압이 높아지면 감소하고, 이완하여 혈압이 낮아지면 증가하는 특징을 가지고 있다. 즉, PTT는 혈관의 기계적인 성질 변화를 파악할 수 있는 중요한 지표라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 인체 내에 치료용 초음파를 3분과 5분의 각기 다른 시간 동안 투과하고, 이에 따른 초음파 투과 시간과 혈관의 유순도 및 탄성도 등의 기계적 성질 변화에

의한 치료 효과를 알아보려고 한다.

2. 본 론

2.1 PTT(Pulse Transit Time)

PTT는 혈류가 대동맥 판막에서 말초혈관까지 흐르는 시간으로 정의되고 심전도의 R 또는 Q 파로부터 그에 해당하는 PPG(PhotoPlethysmoGraph) 파형의 최대치의 25 % 또는 50 % 지점 사이의 시간차를 통해 측정할 수 있다[5]. 본 연구에서는 그림 1과 같이 심전도의 R파와 그에 해당하는 PPG 파형의 최대치의 50 %에 해당하는 지점 사이의 시간 차이를 PTT라 정의하였다.

PTT를 측정하기 위한 시스템은 크게 PPG 측정 센서부, ECG(ElectroCardioGram) 측정 센서부, 측정된 신호를 증폭하기 위한 증폭부, 증폭된 신호를 샘플링 및 A/D converting 하여 PC로 전송하기 위한 직렬 통신부로 구성되고, 측정된 ECG와 PPG 값은 그림 2와 같은 과정을 통해 최종 PTT 값으로 도출된다.

2.2 초음파 진동수조

평가를 진행하기에 앞서 인체 내에 초음파를 큰 손실 없이 투과시키기 위해 그림 3과 같은 초음파 진동수조를 이화여자대학교 의과대학부속 목동병원에 설치하였다. 초음파 진동수조는 초음파 구동회로가 수조에 내장되어 있고, 크기는 180 cm(L) x 80 cm(W) x 54 cm(H)로 일반적으로 사용하는 진동 수조와 비교하여 크게 다르지 않았다.

평가 중 인체 내에 초음파를 고르게 투과시키기 위해 그림 4와 같은 초음파 진동자를 수조 옆면에 12개를 설치하였으며, 이는 압전 세라믹스 진동자와 스테인리스 스틸의 금속 진동체로 구성된다. 수조의 옆면에 설치된 초음파 진동자의 직경과 두께는 각각 4.5 cm 및 0.8 cm로 제작되었고, 평가

† 교신저자, 正會員 : 建國大學校 醫療生命大學 醫學工學部
 E-mail : ssmkim@kku.ac.kr
 * 學生會員 : 建國大學校 醫療生命大學 醫學工學部
 ** 正 會 員 : 春海大學 醫療工學科
 *** 正 會 員 : 舟城大學 醫用電子機器研究所
 § 正 會 員 : 梨花女子大學校 醫學專門大學院 再活醫學教室
 接受日字 : 2008年 8月 19日
 最終完了 : 2008年 9月 30日

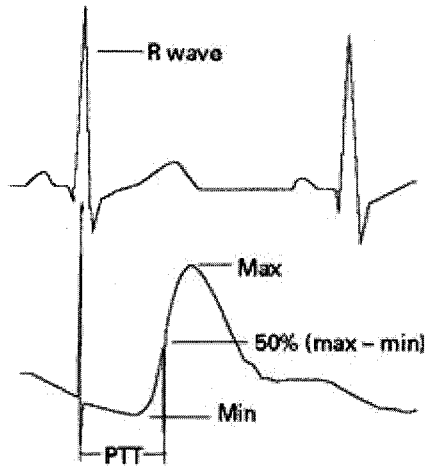


그림 1 ECG와 PPG를 통한 PTT의 검출[5]
 Fig. 1 Method of measuring PTT through ECG and PPG

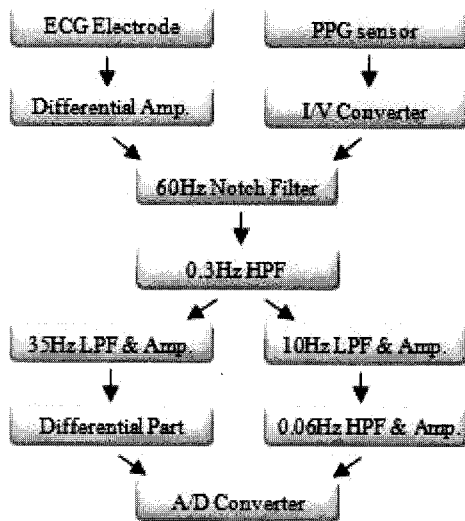


그림 2 PTT 검출 블록 다이어그램
 Fig. 2 Block diagram of PTT measurement system

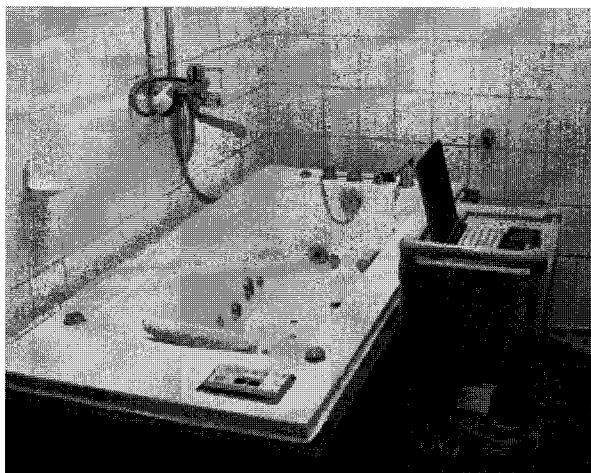


그림 3 초음파 전신 수조를 통한 실험 환경
 Fig. 3 Condition of ultrasonic experiment

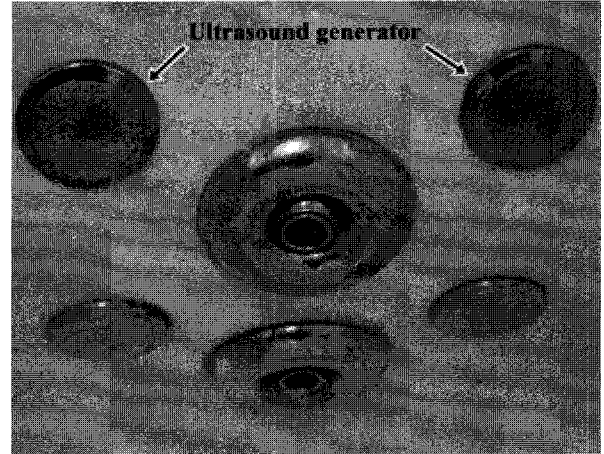


그림 4 초음파 발생 진동자
 Fig. 4 Ultrasound generator

에 사용된 초음파의 주파수와 강도는 각각 1 MHz와 0.6 W/cm²를 유지하도록 하였으며, 이는 보편적으로 사용되고 있는 치료용 초음파의 주파수 범위인 0.75~3 MHz의 범위에 부합하는 것이다.

2.3 평가대상

평가는 20대 정상인 남성 17명을 대상으로 진행하였다. 평가에 참여한 정상인 20대 남성 17명은 근 골격계, 혈관계 질환 등 PTT에 영향을 줄 수 있는 과거 병력이 없었으며 평균 연령은 표 1과 같이 26.00 ± 1.15 세, 평균 신장은 175.50 ± 5.70 cm, 평균 체중은 71.13 ± 5.32 kg으로 나타났다. 또한 정상시의 평균 심박동수는 76.31 ± 13.70 beats/min, 수축기와 이완기의 평균 혈압은 각각 123.00 ± 12.74 mmHg 및 72.00 ± 9.75 mmHg로 나타나 정상 범위에서 크게 벗어나지 않는 것으로 나타났다.

평가에 참여한 정상인 남성 17명은 실험을 진행하기에 앞서 실험과 관련된 안전사항 및 평가내용 등의 정보를 환자 동의서를 통해 충분히 숙지하였고, 평가에 대한 동의를 얻은 후 진행하였다. 또한 보다 정확한 PTT를 도출하기 위해 평가 중 수면, 과도한 움직임 등과 같이 PTT의 변화를 야기할 수 있는 요소들을 제한하였다.

2.4 평가방법

혈관 내의 성질 변화를 나타내는 지표인 PTT를 도출하기 위해 표준 사지 유도법에 따라 전극을 부착한 후 ECG를 측정하였고, 양쪽 검지에 PPG 센서를 부착한 후 PPG 값을 측정하였다.

초음파의 투과 시간에 따른 PTT의 변화를 측정하기 위해 평가절차는 표 2와 같이 총 4단계로 구분을 하였다. 먼저 평가결과에 대한 대조군으로서 평가절차 1과 평가절차 2를 지정하였고, 비교군으로서 평가절차 3과 평가절차 4를 지정하였다. 초음파는 물을 매개체로 하여 체내에 투과되기 때문에 평가절차 3과 평가절차 4의 결과를 평가절차 1과 비교하는 것은 평가절차 2에서 적용된 32°C 수온의 영향을 고

표 1 실험군의 생리 변수

Table 1 Physiologic parameters of total subjects

	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	Heart Rate (beats/min)	Systolic pressure (mmHg)	Diastolic pressure (mmHg)
Normal	26.00 ± 1.15	175.50 ± 5.70	71.13 ± 5.32	76.31 ± 13.70	123.00 ± 12.74	72.00 ± 9.75

려하지 않은 것으로 초음파의 치료 효과를 판단하기 어려울 수 있다. 따라서 이와 같이 4단계의 평가절차를 수립하였다.

평가 진행 절차는 먼저 평가에 앞서 평상시의 기준 값을 설정하기 위해 충분한 안정을 취한 후 실험군의 평상시 PTT를 측정하였고, 측정이 끝나고 바로 수조에 입수하였다. 다음으로 평가에 사용된 32°C의 수온이 PTT에 미치는 영향을 확인하기 위해 실험군이 수조에 들어가고 3분 후 PTT를 측정하였다. 다음으로 초음파의 투과시간에 따른 PTT의 변화를 측정하기 위해 먼저 평가절차 3에 따라 3분간 초음파를 투과한 후 PTT를 측정하였다. 측정을 마치고 앞서 투과된 초음파의 영향을 최소화하기 위해 초음파 투과를 중지하고 약 5분간 휴식을 취하였다. 휴식을 취한 후 다시 측정된 PTT가 초음파를 3분간 투과하기 전, 즉 평가절차 2에서의 PTT 측정값과 비교하여 초음파에 의한 영향이 최소화되었다고 판단되면 평가절차 4에 따라 초음파를 5분간 투과한 후 마지막 PTT를 측정하였다.

3. 결 과

3.1 32°C 수온에 따른 PTT 변화

32°C 수온에서의 PTT 변화량을 측정하기 위해 평가절차 1에서의 측정을 마친 후, 수조에 입수하고 3분 후 PTT를 측정하였다.

측정결과 표 3에 나타난 바와 같이 평가절차 1에서의 PTT는 207.12 ± 26.89 ms, 평가절차 2의 PTT는 212.46 ± 27.77 ms로 나타났으며, 평가절차 1에 대한 평가절차 2에서의 PTT 증가량은 표 3과 같이 5.35 ± 3.60 ms로 나타났다.

표 2 평가 절차

Table 2 Experimental stage

Experiment	Experimental stage			
	1	2	3	5
Measurement / Rest	-	3 min	3 min / 5 min	5 min
Water temperature	-	32°C	32°C	32°C
Intensity	-	-	0.6 W/cm ²	0.6 W/cm ²

따라서 32°C 수온이 정상인 실험군의 혈관을 확장시켜 혈관의 유순도 및 탄성도 등의 기계적 성질에 영향을 준 것으로 판단된다.

3.2 초음파 투과시간에 따른 PTT 변화(3분)

평가절차 3을 진행하기 위하여 평가절차 2에서의 측정을 마친 후 바로 초음파를 투과시키고 3분 후 PTT를 다시 측정하였다.

측정결과 PTT는 표 3과 같이 216.65 ± 27.84 ms로 나타났고 평가절차 2에 대한 PTT의 증가량은 4.19 ± 2.19 ms로 나타났으며, 따라서 32°C 수온의 수조 내에서 초음파를 3분간 투과하는 것이 초음파를 투과하지 않았을 때 보다 혈관을 더욱 확장시켜 혈관의 기계적 성질에 영향을 준 것으로 판단된다.

3.3 초음파 투과시간에 따른 PTT 변화(5분)

평가절차 4를 진행하기 위해 먼저 평가절차 3에서의 측정을 마치고 3분간 투과된 초음파에 의한 영향을 최소화 할 수 있도록 약 5분간 휴식을 취하였다. 그 후 다시 초음파를 5분간 투과시키고 마지막 PTT를 측정하였다.

측정결과 PTT는 표 3과 같이 219.65 ± 26.93 ms로 나타났으며 평가절차 3에 대한 PTT 증가량은 3.00 ± 2.87 ms로 나타났다. 즉 초음파를 5분간 투과하는 것이 평가절차 3과 같이 3분간 투과하는 것 보다 혈관 확장에 있어 더욱 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 각 평가절차에 따른 PTT 증가량의 경우 평가절차 4보다 평가절차 3에서 더 크게 나타났다.

표 3 평가 절차에 따른 PTT
Table 3 PTT on each experimental stage

Experiment	Experimental stage			
	1	2	3	4
PTT	207.12 ± 26.89 ms	212.46 ± 27.77 ms	216.65 ± 27.84 ms	219.65 ± 26.93 ms
Increment of PTT	-	5.35 ± 3.60 ms	4.19 ± 2.19 ms	3.00 ± 2.87 ms

표 4 평가절차 1에 대한 PTT의 누적 증가량
Table 4 Increment of cumulative PTT due to experimental stage 1

Experiment	Experimental stage			
	1	2	3	4
Increment of PTT	-	5.35 ± 3.60 ms	9.53 ± 4.26 ms	12.54 ± 4.35 ms

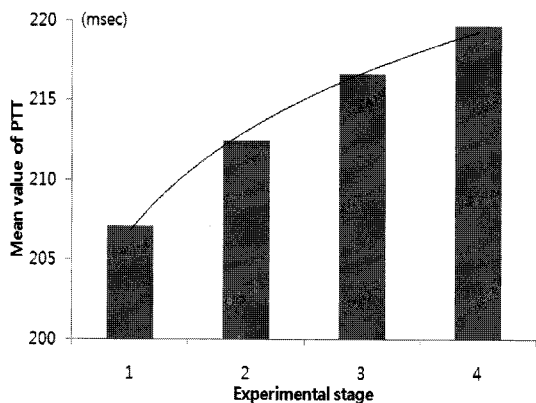


그림 5 평가절차에 따른 PTT
Fig. 5 PTT on each experimental stage

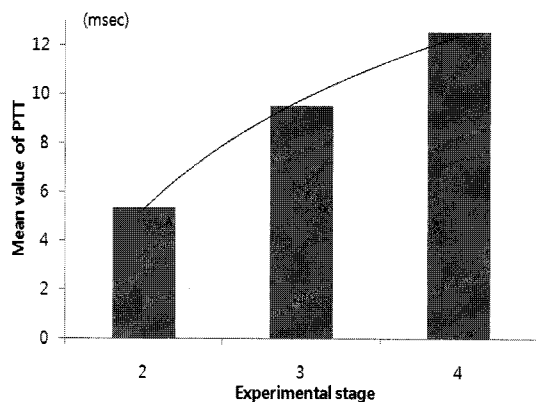


그림 6 평가절차 1에 대한 PTT의 누적 증가량
Fig. 6 Increment of cumulative PTT due to experimental stage 1

또한 평가절차 1에 대한 각 평가절차의 누적 PTT 증가량을 보면 표 4와 같이 먼저 평가절차 2에서는 평가절차 1에 비해 PTT가 5.35 ± 3.60 ms로 약 2.68% 증가하였고, 평가절차 3에서는 평가절차 1과 비교하여 9.53 ± 4.26 ms로 약 4.68% 증가하였다. 그리고 평가절차 4에서는 평가절차 1에 대하여 PTT가 12.54 ± 4.35 ms로 약 6.10% 증가한 것으로 나타났다. 그림 5와 그림 6은 평가절차에 따른 PTT 및 평가절차 1에 대한 PTT 증가량을 나타낸 것이다.

4. 결과분석

각 평가절차에 따른 PTT의 변화에 대한 유효성 및 연관성을 분석하기 위해 평가결과에 대한 대응표본 t-검정을 실시하였다. 대응표본 t-검정을 이용하여 PTT를 각 평가절차별로 비교 분석하였고, 추가적으로 평가절차 1과 평가절차 2에 대한 각 평가절차의 PTT 증가량의 검정을 실시하였다.

표 5는 정상인 17명의 평가결과에 대한 대응표본 t-검정을 실시한 결과로 먼저 검정 통계량을 나타내는 t-value는 그 절대치가 1보다 큰 값을 가질수록 유효성이 높다고 판단한다. 또한 유의확률을 나타내는 p-value도 유효성을 입증하는 지표로서 일반적으로 그 값이 0.05보다 작을수록 결과에 대한 유효성이 높다고 판단한다.

분석결과 먼저 상관계수를 나타내는 Correlation coefficient는 모든 t-검정 범위에 걸쳐 그 값이 0.98 이상으로 나타나 각 평가절차에 따른 PTT의 상관성이 매우 높다는 것을 확인하였다. 그리고 검정 통계량을 나타내는 t-value 또한 모든 t-검정 범위에 걸쳐 절대치가 3 이상으로 나타나 높은 통계적 유효성을 나타냄을 확인할 수 있었다. 마지막으로 유의확률을 나타내는 p-value도 모든 t-검정 범위에 걸쳐 그 값이 0.001보다 작게 도출되어 상당히 높은 유효성을 나타냄을 확인하였다.

표 5 대응표본 t-검정 분석

Table 5 Analysis of t-test

Analysis	Relative experimental stage					
	1-2	2-3	3-4	1-3	1-4	2-4
Correlation coefficient	0.992	0.997	0.994	0.987	0.987	0.989
t-value	-6.127	-8.032	-3.860	-8.845	-11.882	-7.114
p-value	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000

5. 결 론

본 연구에서는 초음파의 각기 다른 적용 시간에 따른 PTT의 변화를 측정하기 위해 32°C 수온 환경에서 정상인 17명을 대상으로 초음파를 3분 및 5분으로 구분하여 투과하였고, 평가결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

평가절차 3과 평가절차 4의 결과를 평가절차 2와 비교해 보면 먼저 평가절차 3과 같이 초음파를 3분간 투과할 경우 평가절차 2와 같이 초음파를 투과하지 않은 경우 보다 PTT가 더욱 증가하는 것을 확인하였다. 다음으로 평가절차 4와 같이 초음파를 5분간 투과할 경우에도 평가절차 3의 결과와 비교하여 PTT가 증가하는 것을 확인하였으나 평가절차 1과 평가절차 2에 대한 PTT의 증가율은 오히려 평가절차 4에서 평가절차 3 보다 적게 나타났다. 이는 초음파 투과 등의 외부 자극에 의한 혈관의 확장성이 한계를 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다. 즉 혈관은 확장성의 한계를 가지고 있기 때문에 PTT가 초음파의 투과 시간에 비례하여 선형적으로 증가하지 않고 증가량이 점차 감소하는 것으로 판단된다. 이에 초음파의 투과 시간이 평가절차 3과 같이 3분일 때와 평가절차 4와 같이 5분일 때의 PTT 증가량은 크게 차이가 나지 않았다. 따라서 정상인의 PTT는 초음파의 투과 시간에 따라 증가하고, 초음파의 투과시간이 5분일 때 보다 3분일 때 더욱 효율적인 치료 효과를 얻을 수 있다고 판단된다.

초음파 투과에 의한 PTT의 증가는 혈관이 확장하여 혈류량이 증가하고, 혈류량의 증가에 의해 말초 조직의 산소 운반 속도가 증가하여 신진대사가 활발하게 됨을 의미한다. 이러한 치료용 초음파를 근·골격계 질환 또는 마비 등과 같은 운동 장애 환자들에게 적용할 경우 기존의 재활치료와 구분되는 추가적인 치료 효과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다. 따라서 위와 같은 운동 장애 및 근·골격계 질환을 가지고 있는 환자들을 대상으로 한 치료용 초음파의 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부 지역산업기술개발사업(10017552)에 의하여 지원되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Ter Haar G., "Therapeutic applications of ultrasound," Progress in biophysics and molecular biology, vol. 93, no. 1/3, pp.111-129, 2007
- [2] Speed C. A., "Therapeutic ultrasound in soft tissue lesions," Rheumatology, vol. 40, no. 12, pp. 1331-1336, 2001
- [3] Cook S. D., Ryaby J. P., McCabe J., Frey J.J., Heckman J. D., Kristiansen T. K., "Acceleration of tibia and distal radius fracture healing in patients who smoke," Clinical orthopaedics and related research, no. 337, pp. 198-207, 1997
- [4] Lehman E. D., Hopkins K. D., Gosling R. G., "Aortic compliance measurements using doppler ultrasound : In vivo biochemical correlates," Ultrasound in medicine & biology, vol. 19, no. 9, pp. 683-710, 1993
- [5] Smith R. P., Argod J., Pepin J. L., Levy P. A., "Pulse transit time : an appraisal of potential clinical applications," Thorax, vol. 54, no. 5, pp. 452-457, 1999

저 자 소 개



김 성 민 (金 性 民)

1962년 9월 25일생. 1985년 연세대학교 전자공학과 졸업. 1991년 미국 아이오와 대학교 의용공학과 졸업(석사). 1995년 미국 아이오와대학교 의용공학과 졸업(박사). 2002-건국대학교 의료생명대학 의학공학부 부교수

Tel : 043-840-3761

Fax : 043-851-7205

E-mail : smkim@kku.ac.kr



배 하 석 (裴 夏 奭)

1966년 8월 26일생. 1992년 연세대학교 의과대학 졸업. 2002년 연세대학교 의과대학 졸업(석사). 2006년 고려대학교 의과대학 졸업(박사). 2002년-2005년 연세대학교 의과대학 재활의학과 조교수. 2006-이화여자대학교 의학전문 대학원 재활의학교실 부교수.

Tel : 02-2660-6036

Fax : 02-2660-6146

E-mail : acebhs@ewha.ac.kr



이 주 환 (李 柱 煥)

1983년 5월 19일생. 2002년 건국대학교 의료생명대학 의학공학부 재학 중.

Tel : 043-851-7205

Fax : 043-851-7205

E-mail : tupac1969@kku.ac.kr



최 병 철 (崔 炳 哲)

1968년 12월 21일생. 1995년 인제대학교 의용공학과 졸업. 1998년 부산대학교 의공학협동과정(석사). 2004년 부산대학교 의공학협동과정(박사). 2000년 춘해대학교 의료공학과 부교수

Tel : 052-270-0282

Fax : 053-270-0280

E-mail : bcchoi@choonhae.ac.kr



정 회 승 (鄭 會 昇)

1963년 7월 20일생. 1986년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1988년 연세대학교 전자재료전공(석사). 1999년 연세대학교 전자재료전공(박사). 1998년 - (주)울쏘하이텍 기술이사. 1997-주성대학 부교수.

Tel : 043-210-8209

Fax : 043-214-7800

E-mail : hsjeong@jsc.ac.kr