

# 체외 충격파 쇄석술 환자의 비침습적인 체내 충격파 압력 추정

최민주

제주대학교 의과대학 의공학교실/ 제주대학교 인공심장연구소

## Non-invasive estimation of the shock amplitude inside the body of the patient undergoing extracorporeal shock wave lithotripsy

Min Joo Choi

Department of Biomedical Eng, College of Medicine, Cheju National University/ Institute of Artificial Heart  
Corresponding email address: mjchoi@cheju.cheju.ac.kr

### 요약

체외 충격파 쇄석술 (ESWL)은 인체 외부에서 발생된 충격파를 인체 내부의 결석 부위에 집중하여 결석을 분쇄하고 치료 효과를 얻는 혁신적 치료술이다. 충격파의 압력 및 파형은 결석의 분쇄 효과 즉 치료 효과를 좌우한다. 체외에서 충격파의 압력은 고감도 하이드로폰을 이용하여 측정할 수 있지만, 인체 체내에서, 특히, 비침습적으로 충격파를 측정하기는 매우 어렵다. 본 논문에서는 ESWL 충격파에 의해 활성화된 체내의 기포군으로부터 방출된 음향 신호 (CIAE)를 측정하여 비침습적으로 충격파의 압력을 추정하는 방법을 실험하였다. 충격파 압력의 추정은 측정된 CIAE 신호에서 1차 기포군 파열음과 2차 파열음 간의 시간 지연은 충격파의 압력과 선형적인 관련성 가진다는 실험 결과 (Coleman et al 1996)에 근거하고 있다. 본 논문에서는 충격파 압력 측정 시스템을 구성하여 생체 외 실험을 수행하였고, 개발된 시스템의 임상적인 활용 가능성을 확인하였다.

과학적인 ESWL 치료 계획 수립 및 환자의 안전을 보장하기 위해 결석을 분쇄하는 에너지원인 충격파의 피폭량에 대한 정확한 평가가 요구된다. 충격파의 피폭량은 결석의 분쇄 및 조직에 대한 생물학적 효과를 야기하는 충격파의 물리량을 지칭하며 충격파의 압력, 에너지 등을 포함한다. ESWL의 높은 임상적인 활용도에 비해 아직 임상적으로 활용 가능한 충격파의 피폭량에 대한 측정법이 개발되지 못한 상태이다.

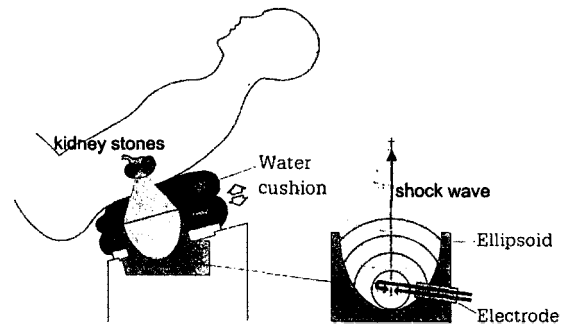


그림 1. Principle of ESWL

### 1. 서론

체외 충격파 쇄석술 (Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy: ESWL)이란 인체 외부에서 발생된 충격파를 인체 내부의 결석 부위에 집중하여 결석을 분쇄하고 치료 효과를 얻는 혁신적 치료술이다 (그림 1 참조). ESWL은 지난 10여년 사이에 전세계적으로 급속히 보급되어, 현재 결석 환자의 90 % 가량이 ESWL로 치료를 받고 있다 (Chaussy & Fuchs 1989).

본 연구에서는 충격파의 생물학적 효과에 중요한 역할을 하는 음향 공동 현상 (Choi 1992, Coleman et al 1992)을 활용하여 충격파의 압력을 추정하는 시스템을 개발하였다. 음향 공동 현상이란 과도한 음압에 노출된 매질에서 활성화된 기포군의 활동 및 그 결과로 인한 물리 화학적인 효과를 말한다 (Crum 1982). 본 방법에 대한 학술적인 근거는

본 연구자에 의해 이미 실험적으로 보고된 것으로 본 연구에서는 임상적인 활용 가능성을 평가하고자 한다.

## II. 학술적인 배경

체의 충격파 발생기에서 사용하는 충격파는 순간적으로 최대 압력 (P+)이 50 MPa (대기압의 500배) 이상, 최저 압력 (P-)이 -10 MPa까지 저하한다. 그림 2는 물 속에서 막형 하이드로폰으로 측정된 체외 충격파 쇄석술의 전형적인 충격파 파형이다.

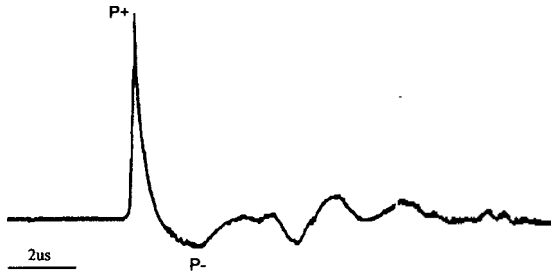


그림 2. ESWL에서 사용되는 전형적인 충격파 파형

체의 충격파에서 사용하는 강력한 충격파는 생체 미질을 전파하면서 기포군을 활성화한다. 활성화 된 기포군은 관성적으로 파열하며 음향 신호를 방출한다 (CIAE: Cavitation Induced Acoustic Emission). 그림 3은 Coleman et al (1992)에 의해 1 MHz 피동 집속형 초음파 센서를 이용하여 물 속에서 측정된 전형적인 CIAE 신호를 보여 준다.

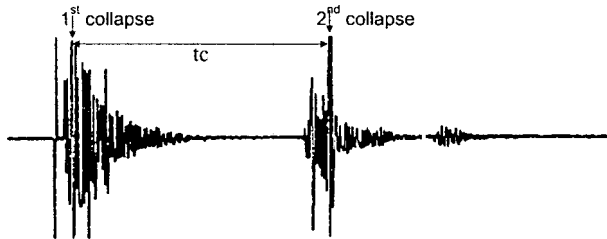


그림 3. Typical signal of the cavitation induced acoustic emission

측정된 CIAE 신호는 충격파에 의한 1차 파열음을 방출한 후 일정 시간이 지나 다시 관성적으로 강하게 파열 (2차 파열)하는 구조를 가진다. 기포군의 파열 지연 시간 (tc)은 충격파의 강도와 선형적인 관련성 가진다 (Choi 1992, Choi 1993). 이러한 관련성을 이용하여, CIAE 신호로부터 충격파의 압력을 추정할 수 있게 된다. Coleman et. al. (1996), Choi & Coleman (1995)은 ESWL 시술중 환자로부터

그림 3과 구조적으로 유사한 CIAE 신호를 측정하였으며, Choi (2001)는 CIAE 신호로부터 정확한 tc 측정을 위한 신호 처리 기법 개발하였다.

## III. 실험 및 결과

**비침습적 충격파 압력 측정 시스템:** 본 연구에서 구성한 체내의 충격파 압력 측정 시스템 (Shock Wave Radiation Dosimetry System: SWARDS)은 환자 체내의 CIAE 신호를 측정하는 다기능 초음파 변환기 MUT와 CIAE 측정 위치를 알려주는 수동형 다관절 위치 제어 로봇암 PAMPRA 및 제어부 & 사용자 접촉부 CUIU로 구성된다 (그림 4).

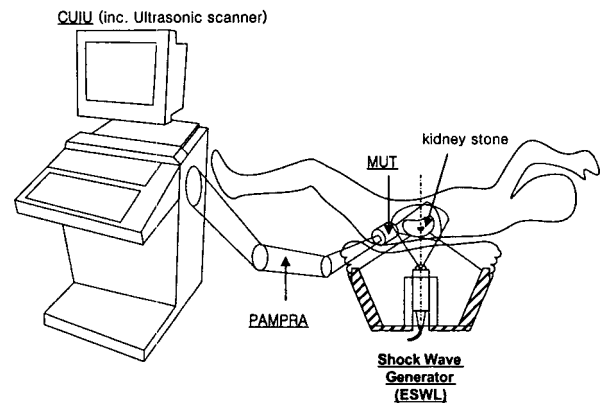


그림 4. 비침습적 체내 충격파 압력 측정 시스템 SWARDS의 구성도

(1) 다기능 초음파 변환기 (Multifunctional Ultrasonic Transducer: MUT): MUT는 CIAE 신호를 측정하기 위한 피동 집속형 초음파 변환기와 (Passive Focused Ultrasonic Transducer: PAFUT) 측정 부위 (PAFUT의 초점 f와 일치)의 초음파 영상을 얻기 위한 초음파 프로브 (Convex Array Imaging Ultrasonic Probe: CAIUP)를 결합하여 구성하였다 (그림 5 참조).

(2) 수동형 다관절 위치 제어 로봇암 (Passive Multi-joint Positioning Robot Arm: PAMPRA): PAMPRA는 6 자유도를 갖는다. PAMPRA의 end point에는 다기능 초음파 변환기 MUT를 장착하여, CIAE 신호를 측정하는 PAFUT의 초점 (f)의 위치 정보를 실시간으로 제공한다. 자체 개발한 초소형 전자기식 브레이크를 PAMPRA의 각 관절부에 설치하여, 필요시 특정한 측정 위치에서 로봇암 (즉 측정 센서)을 고정할 수 있도록 한다.

(3) 제어부 & 사용자 접촉부 (Control & User Interface Unit: CUIU): CUIU에서는 충격파 발생기, 초음파 영상기, 초음파 변환기, 위치 제어 로봇암의 제어

및 측정 결과를 출력한다. 제어부는 초음파 변환기에서 측정된 CIAE 신호를 입수하여 처리한다. 처리된 CIAE 신호로부터 기포군 파열 지연 시간  $t_c$ 를 측정하고 충격파 압력을 추정한다. 동시에 PAMPRA 관절부의 encoders로부터 관절부의 kinematic information을 입수하여 실시간으로 로봇의 위치 정보 즉 초음파 변환기의 측정 위치 계산한다. 초음파 측정 위치 즉 PAFUT의 초점 위치 (f)를 충격파 발생기의 초점 (F)에 대한 상대적인 위치로 좌표 상에서 연속적으로 보여주도록 한다. 초음파 변환기의 CAIUP로부터 얻은 초음파 영상은 초음파 영상기로부터 frame grabber를 통해 입수하여 PC 모니터에 도시한다.

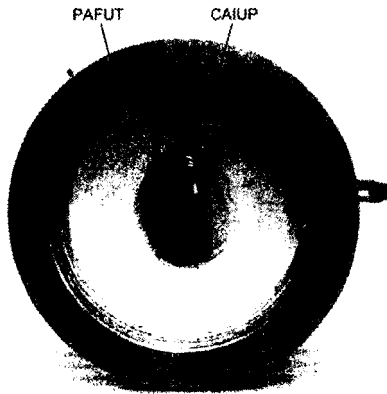


그림 5. 다기능 초음파 변환기 MUT의 외관 사진

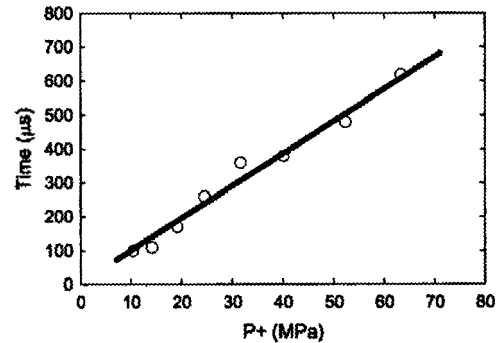
(4) 충격파 발생기 (ESWL): SWARDS가 동작하기 위해서는 ESWL 시스템의 충격파 발생기로부터 triggering 신호를 받아야 한다. 다기능 초음파 변환기 MUT의 CAIUP 단자는 ESWL 시스템의 초음파 영상기와 연결되어야 한다. 제어부 PC는 ESWL 시스템의 PC를 공유하도록 한다. 본 연구에서는 최근 개발된 전자식 충격파 발생기를 이용하여 구성된 차세대 국산체의 충격파 쇄석기 시스템 ((주)코메드)을 활용하였다.

**SWARDS를 이용한 체내 충격파 압력 측정:** ESWL에서 발생된 충격파는 파쇄할 결석 부위 (F)에 집중된다. 위치 제어 로봇암은 초음파 영상기에 CIAE 신호의 측정 위치 (f) 정보를 실시간으로 제공한다. 초음파 영상을 보면서 충격파 강도 측정 위치 (f)를 충격파 초점 부위 F와 일치하도록 하면, PAFUT는 로봇암에 끝에 고정되어 인체 내부 F 위치에서 발생된 CIAE 신호를 선택적으로 감지한다. 충격파의 강도는 CIAE 신호에서 기포군 파열 지연 시간  $t_c$ 와 선형적인 관련성으로부터 추정한다. 시간  $t_c$ 의 값은 CIAE 신호로부터 wavelet transformation technique를 이용하여 정밀하게 측정한다 (Choi 2001). 그림 6은 전형적인 SWARDS의 출력

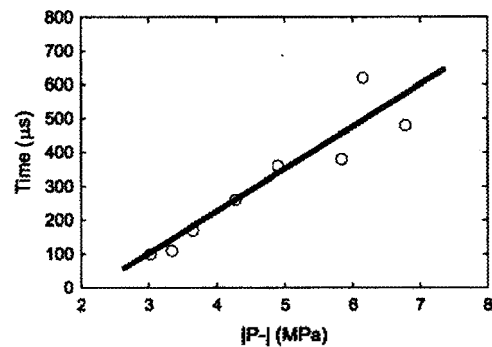
화면이며, CIAE 신호와 충격파 조사 횟수, 최대 강도 ( $P_+$ ,  $P_-$ )가 출력된다. 그림 7은 kidney phantom에 대해 측정된  $t_c$  및  $P_+$ ,  $P_-$  값의 관계를 도시하고 있다.



그림 6. 충격파 압력 측정 시스템의 출력 화면. (N: 충격파 횟수,  $t_c$ : 기포 파열 지연 시간,  $P_+$ ,  $P_-$ : 충격파의 강도)



(a)



(b)

그림 7. Shock wave amplitudes  $P_+$  and  $P_-$  against  $t_c$  (time interval between 1st & 2nd peak in the CIAE signal measured). (a)  $P_+$ , (b)  $|P_-|$

#### IV. 토의

본 실험에서 구성된 비침습적 체내 충격파 압력 측정 시스템 SWARDS는 ESWL 환자에게 조사되는 충격파의 피폭량 변수를 실시간으로 측정하는 세계 최초의 시스템이다. 체내의 충격파의 강도 ( $P_+$ ,  $P_-$ )는 충격파에 의해 활성화된 체내의 기포군으로부터 방출된 음향 신호 CIAE를 측정하여 추정한다. 충격파에 의해 가진된 기포의 파열 지연 시간은 충격파의 강도와 거의 선형적인 관련성을 가지고 있다는 사실에 근거한다. (Choi 2001, Coleman et al 1996).

본 실험에서 개발된 측정 방법은 ESWL 충격파 발생기의 초점 부위에서 방출된 음향 신호를 측정하기 위해 피동 집속형 초음파 센서를 사용하였다. 또한 초음파 센서의 측정 위치 정보를 얻기 위해 전자기식 브레이크를 장착한 피동형 위치 제어 로봇암을 자체 개발하여 사용하였다. 영상용 초음파를 장착하여 충격파 피폭량 측정시 체내 초음파 영상을 동시에 제공하여 임상적인 활용성이 매우 높을 것으로 예상된다.

충격파 압력 측정 시스템 SWARDS에서 측정된 물리량은 충격파 압력 외에도 측정 센서의 초점 (측정 부위)의 위치를 포함한다. 따라서 SWARDS를 이용하여 체내의 충격파 압력의 공간 따른 분포를 측정할 수 있다. 이러한 정보는 ESWL 장비의 설정 및 환자에 따라 변할 수 있는 충격파의 압력이 최대가 되는 초점 부위의 위치에 대한 정보를 제공하여 효율적인 치료 과정을 유지할 수 있게 한다.

충격파의 피폭량은 충격파의 생물학적인 효과와 관련된 물리적인 양으로 정의할 수 있다. 예를 들어, 환자 체내에 집속된 충격파의 최대 강도와 조사된 충격파의 횡수의 곱으로 정의할 수 있다. 따라서 SWARDS를 이용하면, 생물학적인 효과와 밀접한 관련성을 보이는 변수들을 평가할 수 있으며, 임상적으로 충격파의 피폭량을 정의할 수 있는 중요한 기초 자료를 얻을 수 있다.

SWARDS는 비침습적으로 충격파 피폭량과 관련된 물리량을 측정할 수 있어 임상적인 유용성이 매우 크다 할 수 있다. 따라서 SWARDS는 충격파 쇄석술의 체계적인 치료 계획 수립 및 환자의 안전을 위한 충격파의 노출 허용치 기준 설정에 크게 활용될 것으로 기대된다.

#### V. 결론

본 연구에서는 충격파 공동 현상을 이용하여 비침습적으로 체내 충격파의 압력 ( $P_+$ ,  $P_-$ )을 측정할 수 있는 시스템을 구성하고 생체 외 실험을 수행하였다. 본 연구에서 구성된 측정 시스템 SWARDS를 이용하면 체외 충격파 쇄석술의 피폭량 측정이 가능할 것으로 예상되며, 체외 충격파 쇄석술의 성능 및 안전성 평가에 크게 기여할 것으로 기대된다.

체외 충격파 쇄석술의 치료 계획 수립 및 환자에 대한 ESWL 충격파 방사 피폭량 허용치 기준 설정 기준을 마련하기 위해 SWARDS를 이용한 추가적인 생체 실험이

필요하다. 본 연구에서 개발한 비침습적 체내 충격파 압력 측정 방법은 충격파의 임상적인 효과를 연구하기 위해 매우 중요한 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

(본 연구는 대학보유기술이전사업비 및 원자력기초연구사업비의 지원으로 수행되었습니다.)

#### 참고 문헌

Chaussy C. G. and Fuchs G. J. (1989). Current state and future developments of noninvasive treatment of human urinary stones with extracorporeal shock wave lithotripsy. *The Journal of Urology*, 141, 782-788.

Choi M. J. (2001). Precise determination of the cavitation activity caused by a lithotripsy field using a wavelet transformation. *Proceedings of the Physics and Technology of Medical Ultrasound*, 26-28 March 2001, York, UK.

Choi M. J. (1993). Physical characteristics of the acoustic fields used in extracorporeal shock wave lithotripter. *KOFST*, 1991-1997.

Choi M. J. (1992). Physical aspects of high amplitude pulsed ultrasound used in lithotripsy, PhD Thesis, University of Bath, Bath, England

Choi M. J. and Coleman A. J. (1995). A non-invasive measurement of acoustic emission from cavitation in human tissue undergoing extracorporeal shock wave lithotripsy. *Proceedings of the Acoustical Society of Korea*, 14(1s), 19-23.

Coleman A. J., Choi M. J. and Saunders J. E. (1996) Detection of acoustic emission from cavitation in tissue during clinical extracorporeal lithotripsy. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 22(8), 1079-1087

Crum L. A. (1982). Acoustic cavitation. *Proceedings of the 1982 IEEE Ultrasonics Symposium*, IEEE, New York, 1982, pp. 1-11.