

## 체의 충격파 결석 파쇄 장치에 의한 대상물 파쇄시의 발생음의 측정과 해석

### Measurement of Sounds Radiated of Phantom Piezoelectric Extracorporeal Shock Wave Lithotripter and Their Analysis

장 윤 석\*, 박 무 훈\*\*  
(Yun-Seok Jang\*, Mu-Hun park\*\*)

#### 요 약

결석 치료에 있어서, 체외 충격파 결석 파쇄 장치(Extracorporeal Shock Wave Lithotripter)의 유효성은 잘 알려져 있지만, 충격파 照射시의 물리적 특성에 관한 기초적인 연구보고는 드문 실정이다. 따라서, 본연구는 충격파에 의한 파쇄과정에 있어서의 물리적 특성을 조사하기 위하여, 체외 충격파 결석 파쇄 장치에 의한 대상물 파쇄시에 발생하는 음을 분석하는 연구를 행한다. 또한, 본 논문에서는, 결석 모델로서 chalk를 선정하여, 단발 충격을 가할 시의 방사음의 특징을 조사하고, 아울러, 임상용 결석 파쇄 장치를 사용한 모의실험에 의해 전술한 실험결과를 확인한다. 연속적인 충격, 즉, 대상물의 파쇄과정에 있어서의 방사음도, 일정한 충격횟수 간격을 두고 측정, 분석한다. 그 결과, 고유 진동의 피크 주파수가 충격 횟수에 따라 변화되는 것이 확인되어, 실제로 장치를 임상용으로 사용할 때, 파쇄 과정 감시에 충분히 활용 가능하다.

#### ABSTRACT

The effectiveness of Extracorporeal Shock Wave Lithotripter(ESWL) for the therapy of calculus has been generally known in the field of urology. However, there are very little paper investigated about physical characteristics of sounds radiated when phantom is shotting with shock waves. Therefore, this paper, firstly, investigates the sounds radiated when impact is applied to the phantom with a single shot by an impact hammer and a clinical ESWL Next, it determines the variance of the sounds radiated during the breaking process using a piece of chalk as a phantom of a calculus. These results will be applied to the examination of the existence of the calculus at the focus and the monitoring the breaking process.

#### I. 서 론

최근, 泌尿器科 영역에서는 결석치료에 衝擊波 結石 破碎 裝置를 이용하는 경우가 세계적으로 증가하는 추세에 있다. 이전에는, 결석치료도 다른 외과영역과 마찬가지로 외과수술에 의존하는 경우가 일반적이었지만, 많은 고통이 따름에도 불구하고 자연배석을 기대할수밖에 없는 신장결석등의 예와 같이 미해결점을 다수 남기고 있었다. 그런 점에서, 외과수술 이외의 새로운 치료법 개발이 모색되면서, 수중 충격파를 응용하여 체내의 결석을 외과수술없이 파쇄, 제거하는 방법의 개발이 진행되어 왔다.<sup>1)</sup>

그런 방법으로 먼저, 내시경과 같이 조립된 探針을 체내에 삽입, 그 先端에서 수중방전, 미소발파 또는, 펄스

레이저를 照射함으로써 충격파를 발생시켜, 결석을 파쇄하는 방법(EHL:Electrohydraulic Lithotripsy)이 개발되어 현재 요도결석이나 방광결석등의 치료에 이용되고 있다.<sup>2)</sup>

한편, 전술한 체내로의 기구삽입식이 아닌, 체외로부터 결석을 파쇄, 제거하는 방법에 대해서 연구되고 있었다. 예를 들면, 회전타원체의 두 축점중 제 1 축점에서 충격파를 발생시키면, 충격파는 타원체의 벽면에서 반사하여 나머지 제 2축점근방에서 集束하게 된다. 그로 인하여, 제 2축점에서 순간적으로 극히 높은 압력을 발생시키는 것이 가능하다. Heusler는 위의 원리를 이용하여 결석을 非靦血的으로 파쇄할 수 있는 독창적인 방법을 고안했다. Chaussy는 이 방법을 계승하여 수중방전으로 인한 충격파를 이용하여 결석을 파쇄하는 장치개발 및 임상응용에 성공했고, 그 후, 압전식, 전자식, 미소폭약식, 레이저식등 다양한 방식의 충격파 결석 파쇄장치가 연구, 개발되어 왔다.<sup>3)</sup> 현재는 이 치료법이 체외 충격파 결석 파

\*부경대학교 공과대학 전기공학과

\*\*창원대학교 공과대학

접수일자: 1997년 2월 21일

쇄술(ESWL: Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy, 이후 ESWL로 표현한다)로서 널리 알려져 있고, 결석치료법으로서 중요한 위치를 점하고 있다. 본 논문에서는 체외 충격파 결석 파쇄장치(Extracorporeal Shock Wave Lithotripter, 이후 ESWL장치로 표현한다)중에서도 압전식 장치를 사용하는 경우에 착목하여 연구를 진행한다.

ESWL에 숙련되어 있는 臨床醫나 기사들의 경험에 의하면, ESWL장치에 의한 결석 파쇄수술시에, 충격파를 대상물에 조준하여 조사할 때마다 소리가 들리고, 그 소리의 청취에 의해 충격파가 조사 대상물인 결석에 명중하고 있는지 아닌지를 판별가능한 때가 있다고 진술하고 있다.<sup>1)</sup> 그러나, 그 판별은 경험에 의한 추측일 뿐 아직 그 판별가능성을 뒷받침할 수 있는 근거를 제시하는 자료 또는 연구보고는 극히 드문 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 압전식 충격파 발생 장치를 이용하여 모의 실험한 결과를 제시한다. 먼저, 打撃 해머(impact hammer)에 의한 대상물 타격시에 발생하는 소리를 분석하여, 그 특징을 조사한다. 다음에, 그 결과를 자료로 하여, 실제 임상용으로 사용되고 있는 압전식 체외 충격파 결석 파쇄 장치(France EDAP사의 LT-01)를 사용하여, 충격파를 대상물에 조사할 때의 발생음을 분석, 앞서 말한 경험자들의 진술에 대한 근거를 실험적으로 조사한다. 또한, 보다 실제적인 관측을 위해, 일본 TOSHIBA사의 시험용 압전식 충격파 발생장치 및 레이저 도플러 계측기(laser Doppler velocimetry)를 이용하여, 실제 결석에 대한 모델인 chalk를 단발충격이 아닌 연속적인 충격 즉, chalk의 파쇄과정에서 일어나는 현상을 계측, 분석하여 그 결과를 제시한다.

II. 대상물 단발충격시의 발생음 분석

2-1. 일반적인 대상물 타격시의 진동 및 발생음 분석

본 장에서는 서론에서 설명한 바와 같이 ESWL장치를 사용할때에 발생하는 음을 관측, 분석하기 위하여, 대상물 타격 실험을 행한다. 또, ESWL장치로 결석 파쇄시의 발생음을 청취함으로써 목적대상물에의 명중여부가 추정 가능할 때가 있다는 진술, 즉, 청취 가능하다는 점에 착안하여 가정주파수대의 발생음 분석 실험을 행한다.

먼저, 타격 hammer를 충격도구로 삼아, 대상물을 타격할 때의 발생음을 분석한다. 실험방법을 설명하면, 그림 1에 나타낸 것과 같이 타격 대상물에 가속도 픽업(Acceleration Pick-up)을 접촉하여, 타격시 발생하는 소리를 마이크로 수신함과 동시에 타격으로 인한 대상물의 진동을 계측한다. [6] 이것은 공기 중에서의 실험인 상황을 고려할 때, 주변잡음의 영향도 무시할수 없다는 점을 감안하여, 타격시의 발생음과 대상물의 진동자체를 정확히 비교하기 위한 것이다. 마이크 및 가속도 pick-up으로부터의 출력신호는 동시에 FFT 애널라이저의 2개의 채널에 접속하여 가정주파대역인 0~20kHz 범위에서 분석한다.

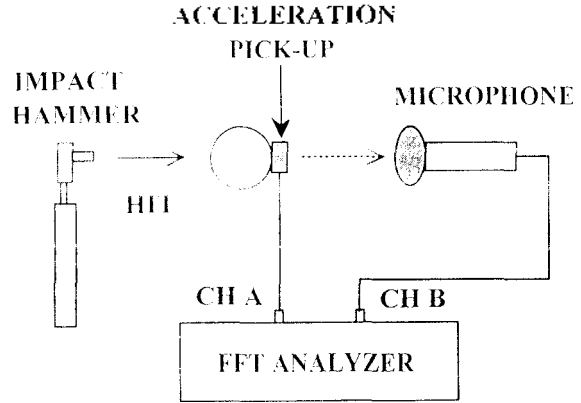


그림 1. 대상물 타격 실험의 구성  
Fig. 1. The configuration of the experiments by an impulse hammer

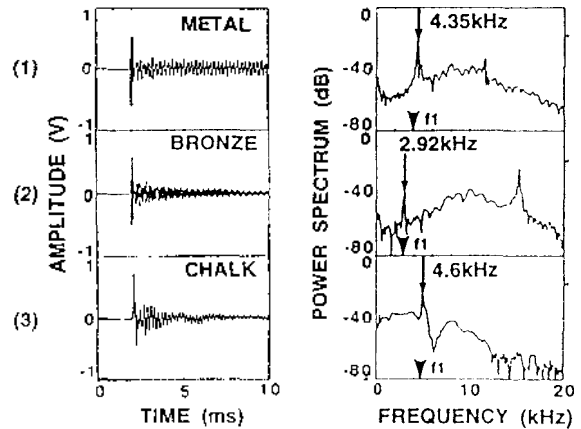


그림 2. 마이크로폰으로 수신된 파형과 스펙트럼  
Fig. 2. Waveform and its power spectrum for each object measured by a microphone

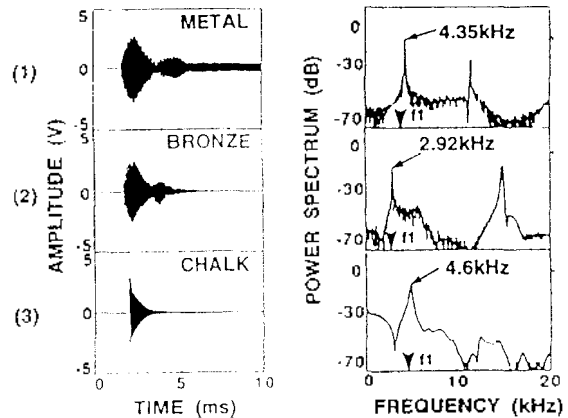


그림 3. 가속도 픽업에 의해 측정된 파형과 스펙트럼  
Fig. 3. Waveform and its power spectrum for each object measured by an acceleration pick-up

본 실험에서의 타격대상물은,

- (1) 길이 9.8cm, 단면반경 5.0mm의 철봉
- (2) 길이 10.0cm, 단면반경 3.5mm의 철봉
- (3) 길이 6.2cm, 단면반경 5.0mm의 chalk를 이용한다.

그림 2와 3에 본 실험의 결과를 제시한다. 마이크로 측정할 발생음의 파형과 스펙트럼을 그림 2에, 가속도 pick-up을 이용하여 분석한 경우를 그림 3에 나타낸다. 이 결과에서의 스펙트럼을 관찰하면, 그림 2와 3에서 동일하게 대상물 (1), (2) 및 (3)의 경우, 각각 4.25 kHz, 2.92 kHz 및 4.93 kHz의 위치에서 명확한 피크가 검출된다. 이와 같이 피크 주파수가 완전히 동일 위치에 존재한다는 것은, 발생음에 나타난 피크가 대상물의 진동에 기인한 것이라는 점을 뒷받침하고 있다.<sup>16)</sup>

다음에, 위의 피크 주파수를 대상물의 치수와 관계지어 고찰해 본 결과, 양단이 자유인 봉의 굴곡진동(bending vibration)과 거의 일치한다는 점을 발견하였다. 굴곡진동의 고유주파수는 다음 식과 같이 구해진다.<sup>17)</sup>

$$f_n = \frac{a \lambda_n^2}{4\pi l^2} v_l, (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$(\lambda_1 = 4.73, \lambda_2 = 7.85, \lambda_3 = 10.99, \dots)$

여기서,  $l$ 은 대상물의 길이,  $a$ 는 단면반경,  $v_l$ 은 종파속도이다.  $l$ 과  $a$ 는 상술한 바와 같고,  $v_l$ 에 있어서는, 대상물 (1)과 (2)인 철의 경우를 4350 m/s, chalk의 경우는 실험 측정치인 2100 m/s로 하여 계산한다. 위의 식에서,  $n=1$ 인  $f_1$ 의 이론치를, 그림 2와 3에서 화살표로 표시하였는데, 대상물에 따른 각각의 값이 (1) 4.03 kHz, (2) 2.71 kHz, (3) 4.93 kHz로서 실험치와 거의 일치하고 있다. 따라서, 각각의 피크는 굴곡진동 모드의 1차 고유주파수가 검출된 것이라고 할 수 있다. 이 때, 각각의 그림에서 1차 고유주파수의 피크 뒤에 나타나는 피크는  $n=2$ 인 경우 즉, 2차 공진주파수에 나타나는 피크이다. 이 결과로부터, 가청주파수의 범위내에서는, 본 실험에서 사용된 대상물이 충격을 받을 경우의 발생음의 특징이 굴곡진동으로 나타난다는 것을 실험적으로 알 수 있다.

2-2. 임상용 ESWL 장치에 의한 대상물 충격시의 발생음 분석

앞장에서는, 충격파가 아닌 타격 해머에 의한 충격을 주었을 때, 대상물로부터의 발생음 및 대상물의 진동을 분석하였다. 그것에 따른 결론으로, 가청주파수 범위에서 대상물을 구분할 수 있는 특징은 타격대상물의 굴곡진동으로 나타난다는 것이었다.

본 장에서는, 실제의 임상용 ESWL 장치에 의해 발생하는 충격파를 충격수단으로 이용할 때, 대상물 충격시에 발생하는 소리를 관측, 분석하는 실험을 행한다. 본 실험

에서 사용하는 ESWL 장치는 프랑스 EDAP사의 LT-01 이란 제품명의 압전식(piezoelectric) ESWL 장치이다. 이 장치는 320개의 압전소자를 구면상에 배열하여, 각각의 소자로부터의 초음파를 초점에서 집속, 최대파워 100 MPa의 충격파를 발생시킬 수 있는 장치이다.

실험대상물은 다음과 같다.

- (1) 길이 6.0cm, 단면반경 4.0mm의 황동봉
- (2) 길이 6.0cm, 단면반경 5.0mm의 철봉
- (3) 길이 6.2cm, 단면반경 5.0mm의 chalk

본 실험에서도 상술한 바와 같이 실험대상물의 한 종류로 chalk를 선택한다. 그 이유는 실제 요로결석(수산칼슘결석)의 음향 임피던스  $Z_k = 6.25 \times 10^5 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$  이므로, 본 실험에 이용된 chalk의 음향 임피던스  $Z_k = 6.13 \times 10^5 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$  와 유사하기 때문이다.<sup>11)</sup> 그 외의 대상물도 결석의 대용물로서 실험에 사용되는 chalk인 경우와 실험결과를 비교하기 위하여 chalk의 길이와 거의 동일한 6.0cm로 결정한다.

본 실험의 구성은 그림 4와 같다. 실험에서 사용된 수조의 크기가 소형이므로 발생음 수신을 위한 하이드로폰은 대상물의 측면 상단에 설치한다. 다음에, 대상물의 중앙에 초점을 맞춘 뒤, 충격파를 照射하여 대상물을 때림과 동시에 하이드로폰에 수신된 발생음을 FFT 애널라이저로 분석한다.

그 결과를 그림 5에 나타내고 있는데, 각각의 스펙트럼을 관찰하면, 화살표로 표시하고 있는 굴곡진동 고유주파수의 이론치와 거의 일치하는 (1) 6.4 kHz, (2) 10.6 kHz, (3) 4.6 kHz의 위치에서 뚜렷한 피크가 검출된다. 본 실험에서 사용된 대상물과 실제 결석의 크기에는 차이가 있지만 굴곡진동의 이론식을 사용하여 조사한 결과, 결석과 음향임피던스가 유사한 chalk의 경우, 단면반경 0.5cm,

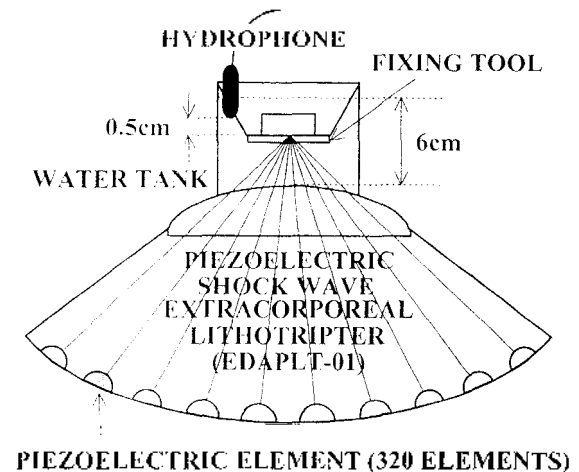


그림 4. 압전식 ESWL 장치를 이용한 실험의 구성  
Fig. 4. The configuration of the hydrophone and object in the piezoelectric ESWL

길이 3cm까지는 고유주파수가 가청주파수의 범위내에 포함된다. 따라서, 일반적인 결석과 거의 동일한 크기에 있어서도 골격진동의 고유주파수의 파크로 관측될 수 있을 것으로 추정된다. 이와 같은 결과로부터 실제 임상용 장치에서 발생시킨 초음파를 충격수단으로 사용 시에도, 가청주파수의 범위 내에서 대상물로부터 얻을 수 있는 발생음의 특징은 골격진동의 고유주파수에 있다고 판단된다.

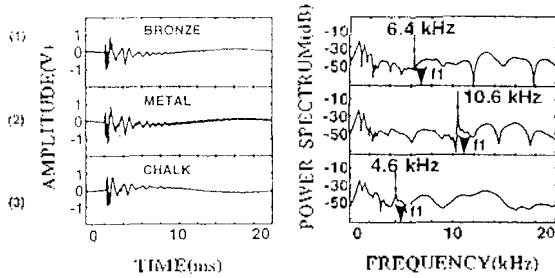


그림 5. 압전식 ESWL 장치에 의한 실험결과  
Fig. 5. Waveforms and their spectra in the experiments by the piezoelectric ESWL

### III. 대상물 파쇄과정의 관측

본 장에서는 ESWL 장치를 이용하여 대상물을 파쇄할 때에 파쇄상황에 동반하여 일어나는 현상을 실험적으로 관측하고, 파쇄과정에 따라 발생음이 변화한다는 가정을 뒷받침할 수 있는 이유에 대하여 조사한다. 그림 6에 본 실험의 구성을 나타낸다. 먼저, 파쇄대상물을 장치의 초점위치에 설치하는데, 본 실험에서도 결석의 모델로서 chalk를 대상으로 설정한다. 또한, 레이저 도플러 계측기를 이용하여, 대상물의 파쇄과정에서의 진동을 계측하기 위하여 파쇄대상물의 표면에 반사 테이프를 부착한다. 이 때, 반사 테이프는 그림 6의 원내에 표시한 것과 같이

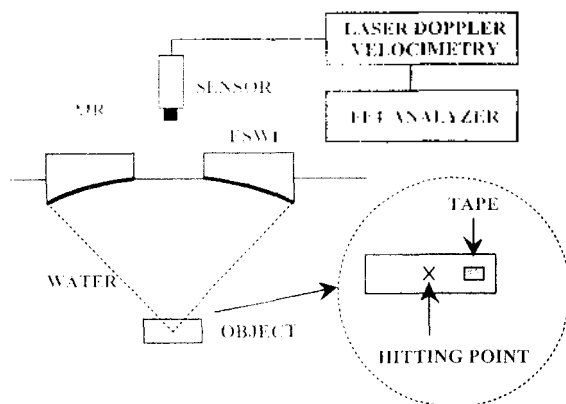


그림 6. 레이저 도플러 계측기를 이용한 실험의 구성  
Fig. 6. The configuration of the laser Doppler velocimetry used for measuring the vibration of phantom

초점의 위치로부터 약간 벗어난 지점에 부착하는데, 그 이유는 충격파 조사에 의하여 chalk가 파쇄됨과 동시에 반사 테이프가 손상되어 반사기능이 상실되거나, 대상물로부터 떨어져 나가는 것을 방지하기 위해서이다. 다음에, 레이저 도플러 계측기의 센서로부터 계측된 진동의 분석에는 FFT 에널라이저가 사용되었다.

실험방법을 설명하면, 충격파를 chalk에 照射하여 파쇄하면서, 그 과정에서의 대상물의 진동을 연속적으로 계측하는 것인데, 본 실험에서는 첫 번째의 충격파 조사로부터 1500회째의 조사까지, 100회 간격으로 대상물의 진동을 계측한다. 충격파간의 조사 간격은 2초로 설정한다. 이것은 충격파 조사에 따라 발생하는 cavitation 기포가 0.5초 정도의 시간경과후까지 초점부근에 잔재한다는 점을 감안하여 결정한 충격파 조사 간격이다.<sup>[8]</sup>

그림 7이 레이저 도플러 계측기로 측정된 대상물 파쇄 과정에서의 파형과 스펙트럼이며, 위에서부터 각각 1, 100, 300, 500, 700, 900 및 1500회째의 충격파를 조사한 순간에 대상물의 진동을 측정된 결과이다. 이 결과를 보면, 진동 스펙트럼에서의 뚜렷한 피크가 충격파 조사회수의 증가, 즉, 대상물의 파쇄량이 증가함에 따라 3.45 kHz로부터 0.85 kHz까지, 점차 낮은 주파수로 이동하는 모습을 명확히 관찰할 수 있다. 이 결과를 정량적으로 표현한 그래프가 그림 8이다. 그림에서의 횡축은 충격파 조사회수이고, 종축은 진동 스펙트럼의 피크 주파수이다. 따라서, 위의 결과는 ESWL 장치에 의한 대상물 충격시의 발생음은, 대상물이 파쇄될수록 저주파로 칭취될 수 있는 가능성을 보여주는 결과라고 생각된다.

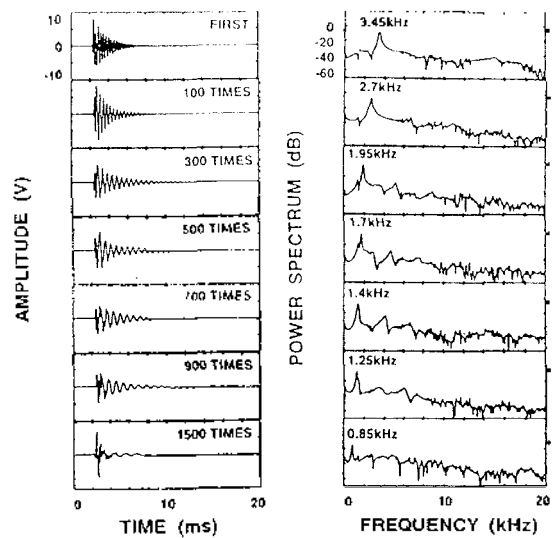


그림 7. chalk 파쇄과정에 있어서의 진동 계측 결과  
Fig. 7. The waveforms and the power spectra of the vibrations detected when shock wave is applied to the phantom in the piezoelectric ESWL

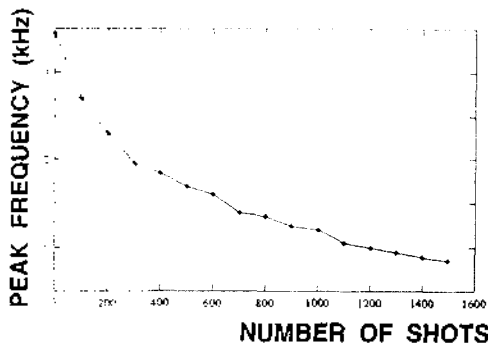


그림 8. chalk 파쇄과정에 있어서의 피크 주파수의 변화  
Fig. 8. The variation of the peak frequency with the increase of the shot number in the breaking process

#### IV. 결 론

본 논문은 결석치료에 중요한 위치를 점하고 있는 ESWL장치 사용시의 발생음을 관측, 분석하는 것으로부터, 그것에 포함되어 있는 정보를 알아내어, 아직까지 산재해 있는 ESWL장치의 문제점 해결 및 새로운 음향적 감시장치의 개발에 필요한 기초적 자료를 얻는 것을 목적으로 한 것이다.

본 논문에서는, 우선, 임상용 ESWL장치 사용자들의 경험에 착안하여, 대상물 타격시에 발생하는 음을 가청 주파수의 범위에서 분석하여 그 특징이 굴곡진동의 피크로 검출된다는 점을 알았다. 또한, 실제 임상용 장치로 사용되고 있는 압전용 ESWL장치를 사용하여 초음파의 깊이에 의한 충격파로 대상물을 충격할 때에 발생하는 음을 하이드로폰으로 수신, 분석한 결과, 앞의 실험결과와 동일하게, 굴곡진동의 고유주파수 피크가 검출되었다. 따라서, 본 논문의 실험에서 선정된 대상물과 유사한 형태라면, 충격파의 조사에 의하여 발생하는 음의 특징이 굴곡진동의 고유주파수 피크로 나타난다는 점을 알았다. 아울러, 실제 尿道결석과 음향 임피던스가 유사한 chalk를 파쇄대상물로 하여, 파쇄과정에서의 진동변화를 레이저 도플러 계측기로 측정된 결과, 대상물이 파쇄되어 갈수록, 방사음이 점차로 낮은 주파수로 변동해 가는 사실을 관측하였다. 이 결과로부터, 대상물의 파쇄과정에 있어서는 대상물이 파쇄되어 감에 따라 발생음이 점점 낮은 주파수로 들릴 수 있다는 점을 추정할 수 있다.

상술한 바와 같이, 본 논문에서는 임상용 ESWL장치를 같이 사용하여, 단발 충격파를 받을 때의 대상물로부터 방사되는 음에서 검출되는 특징을 조사하였고, 연속적인 충격파, 즉, 파쇄과정에서의 방사음에서 감지되는 현상을 정확히 관측, 분석하였다. 따라서, 본 논문의 결과들은 (1)지금까지는 경험에만 의존하던, 충격파의 조사를 받는 대상물과 방사음과를 연관지을 수 있는 정확한 근거를 부여하였고, (2)ESWL장치 사용시의 대상물 파쇄에 따라

방사음이 변화되어 가는 과정을 관측하여 분석한 결과를 제시한 것이므로, 실제 수술에의 응용 및 음향감시 시스템 개발의 기초 자료로서 활용 가능할 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. 棚橋善克他, "衝擊波結石破碎装置のすべて", 東洋書店, 東京, 1991.
2. P. T. Hunter, B. Finalyson, R. J. Hiroko, W. C. Voreck, R. Walker, S. Walack, M. Nasr, "Measurement of Shock Wave Pressures Used for Lithotripsy", J. Urology, Vol. 136, pp. 733~738, 1986.
3. 高山和喜, "衝擊波のおはな", 日本規格協會, 1990.
4. 高山和喜他, "水中衝擊波フォーカシングによる上部尿路結石破碎装置の開発", 病態生理, Vol. 5, No. 3, pp. 206~215, 1986.
5. N. G. Holmer, L. O. Almquist, T. G. Hertz, A. Holm, E. Lindstedt, H. W. Persson, C. H. Hertz, "On the Mechanism of Kidney Stone Disintegration by Acoustic Shock Waves", Ultrasound Med. & Biol. 17, 1991.
6. 長松昭男, "モード解析入門", コロナ社, 1993.
7. 早坂, 吉川, "音響振動論", 丸善, 1974.
8. A. J. Coleman, J. E. Saunders, L. A. Crum, M. Dyson, "Acoustic Cavitation Generated by an Extracorporeal Shock Wave Lithotripter", Ultrasound in Med. & Biol., Vol. 13, No. 2, pp. 69~76, 1978.
9. Hiroshi Kanai, Yun-Seok Jang, Noriyoshi Chubachi, Yoshikatsu Tanahashi, "Power Difference in Spectrum of Sound Radiation Before and After Break of Phantom by Piezoelectric Extracorporeal Shock Wave Lithotripter", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 33-1, No. 5B, pp. 3159~3161, May 1994.



#### ▲장 윤 석(Yun Seok Jang)

1985년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)

1988년 2월: 부산수산대학교 대학원 전자통신공학과(공학석사)

1995년 3월: 日本 東北大學 대학원 전기공학과(공학박사)

1996년 3월~현재: 부경대학교 전기공학과 전임강사



#### ▲박 무 훈(Mu Hun Park)

1990년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1993년 3월: 日本 東北大學 대학원 전기공학과(공학석사)

1996년 3월: 日本 東北大學 대학원 전기공학과(공학박사)

1996년 3월~현재: 창원대학교 공과대학 국책교수