

의료용 충격파에 의해 발생하는 음원 위치의 확인

장윤석 · 김석재*

부경대학교 공과대학 전기·제어계측공학부, 한국해양수산연구원*
(2003년 7월 23일 접수, 2003년 10월 9일 채택)

Identification of Sound Source Location Generated by Shock Wave for Medical Treatment

Yun Seok Jang, Suk Jae Kim*

Department of Electrical Engineering, Pukyong National University,
Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology*

(Received July 23, 2003. Accepted October 9, 2003)

요약: 압전식 쇄석기를 이용하여 충격파를 대상물에 조사할 때 들리는 소리의 발생지가 바로 충격당하는 대상물이란 사실을 실험을 통하여 확인하였다. 하이드로폰과 소리가 발생하는 음원과의 거리 및 방위각을 추정함으로써 방사음의 위치를 추정하는 방법을 이용하였으며, 센서로서는 한 개의 하이드로폰을 사용하였다. 또한, 진동 특성이 뚜렷한 금속모델을 대상으로 선정하여 그 대상으로부터의 방사음과 진동과의 관계를 조사한 결과를 제시하여, 방사음이 대상물에 관한 정보를 포함하고 있다는 사실을 보다 명백히 검증하였다.

Abstract: When the piezoelectric extracorporeal shock wave lithotripter is operated, sounds are generated. In this paper, we present a fact that the sounds are radiated undoubtedly from the object to be hit by the shock waves. For this results, we use the method to identify the sound source location of the radiated sounds by estimating the distance and the bearing from the sound source using one hydrophone. In addition, we investigate the relation between the radiated sounds and the vibrations of the objects using bronze models of disc type with clear vibrating characteristics and present the results of experiments to be analyzed.

Key words: Piezoelectric, Extracorporeal shock wave lithotripter, Sound source, Radiated sound, Resonance frequency, Peak frequency

서 론

충격파를 발생시켜 의료용으로 사용하는 기술은 50년 이상의 역사를 가지고 있으며, 1950년, 구 소련의 Eutokin이 방전에 의한 충격파로 방광결석을 파쇄하려 하였던 것이 최초의 시도였다[1]. 체외에서의 에너지를 체내의 물체에 집속시켜 파괴하는 방법에 대해서는 1958년부터 연구가 진행되어 왔으며, 1971년에 Heusler와 Kiefer[2]는 고에너지 충격파가 비접촉적으로 물체를 파괴할 수 있다는 사실을 실험적으로 증명하였다. 1972년에는 구 서독의 Dornier사가 수중방전으로 발생시킨 충

격파를 이용하여 결석을 파쇄하는 데에 성공하였고, 1974년부터 Schmidt와 Chaussy[3]가 동물의 체내에서 실험을 진행함으로써 인체내의 결석치료를 시작하게 된 동기가 되었다. 1979년 9월에는 최초로 인체용 쇄석기가 완성되었고, 1980년 2월에는 Chaussy[4]에 의해 환자의 우측 신장에 생성되어 있는 1.5cm크기의 결석을 처음으로 완전히 파쇄하는 결과를 얻게 되었다.

충격파를 이용하는 연구가 진행됨에 따라, 충격파를 발생시킬 수 있는 에너지원과 충격파의 집속 방법에 관해서도 많은 연구가 진행되었으며, 현재 사용되고 있는 여러 가지 종류의 체외 충격파 쇄석기가 개발되었다. 본 논문에서 이용된 충격파 쇄석기는 압전식으로 충격파를 발생시키는 방법을 이용한 것이다. 구면 상에 압전소자를 나열해서 순간적으로 전압을 걸면 각 압전소자에서 초음파가 발생하게 되고, 이 초음파가 구의

통신저자: 장윤석, (608-739) 부산광역시 남구 용당동 산 100
부경대학교 공과대학 전기·제어계측공학부
Tel. 051)620-1422, Fax. 051)620-1425
E-mail. jangys@pknu.ac.kr

중심에 집중되면서 충격파로 바뀌게 되는데, 이런 방법으로 충격파를 발생시키는 쇄석기 방식을 압전식이라고 한다[5].

압전식 쇄석기에 관한 연구보고도 여러 가지 목적에 따라 다양하게 발표되고 있다. 그 중에서도 압전식 쇄석기를 사용하여 수술할 때 들려오는 소리를 듣고 결석의 파쇄 유무 등을 알 수 있다는 전문가들의 진술에 따라, 파쇄 대상물에 대한 정보가 그 소리에 포함되어 있는지를 알아보기 위하여 방사음을 분석하는 연구도 진행되고 있다[6, 7]. 하지만 쇄석기가 동작할 때는 기계음과 같은 소리도 들리고, 파쇄 대상물이 없이 빈 곳에 충격파를 조사하는 경우에도 소리가 들리는 것을 경험할 수 있다. 이러한 이유 때문에 쇄석기로 수술을 할 때 들려오는 소리가 과연 파쇄 대상물로부터 방사되는 것이 사실인지에 대한 의문도 제기된다.

따라서 본 연구에서는 쇄석기로 충격파를 발생시켜 대상물을 파쇄할 때 들리는 소리가 대상물로부터의 방사음이라는 사실을 확인하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여, 먼저 쇄석기로부터 발생하는 충격파를 계속하여 초점영역에서 나타나는 충격파의 특성을 분석한다. 이어서 대상물에 충격파를 조사하여 들려오는 방사음원의 위치를 하이드로폰으로 추정하는 방법을 사용하여 방사음의 발생지가 대상물인지 아닌지의 여부를 확인한다. 또한 방사음과 파쇄 대상물의 진동을 동시에 계속하여 진동주파수의 피크를 관측·비교함으로써 앞서 관찰된 사실을 명백히 검증하고자한다.

충격파 및 방사음의 계측을 위한 기본 시스템 구성

본 연구에서는 일본 Toshiba사 제품인 ECOLITH ESL 500-A에서 이용되고 있는 24채널의 압전식 쇄석기의 시험용 장치를 사용한다. 최대파워가 실제장치의 82% 정도인 것만 차이가 있을 뿐 다른 모든 기능은 실제 장치와 거의 동일하게 제작된 장치이다. 본 연구에서 사용된 장치의 최대 파워는 82 MPa이다.

압전식 쇄석기를 이용한 전체적인 실험의 구성도는 그림 1과 같다. 그림 1에서 나타낸 바와 같이 쇄석기는 수조의 아래 방향으로 설치되어 있고, 펄스 발생기를 이용하여 충격파의 조사 간격을 제어하였다. 초점영역의 위치는 쇄석기의 중앙에서 약 25cm정도 떨어져 있는 하단에 위치하고 있으며, 쇄석기의 파워를 제어하기 위해서는 파워 증폭기를 사용하였다. 충격파 및 방사음을 계속·분석하기 위한 장치로는 디지털 오실로스코프 및 FFT 분석기(FFT analyzer)를 이용하였다. 또한, 충격파 계측을 위한 하이드로폰이나 파쇄 대상물의 위치 변동 시에는 0.05mm까지 미세조정이 가능한 기계식 3상 스테이지(3-axis stage)를 사용하였다.

먼저 기하학적인 쇄석기의 초점 부근에서 충격파의 파워를 측정하여 쇄석기의 초점영역을 조사한다. 그림 2는 하이드로폰으로 측정된 충격파의 파워를 나타낸 것으로서, 그림 1에서 나타낸 z축, 즉 충격파가 진행되는 방향으로 나타나는 파워를 계측한 것이다. 그림 2를 보면 임의의 한 점을 초점이라고 정의

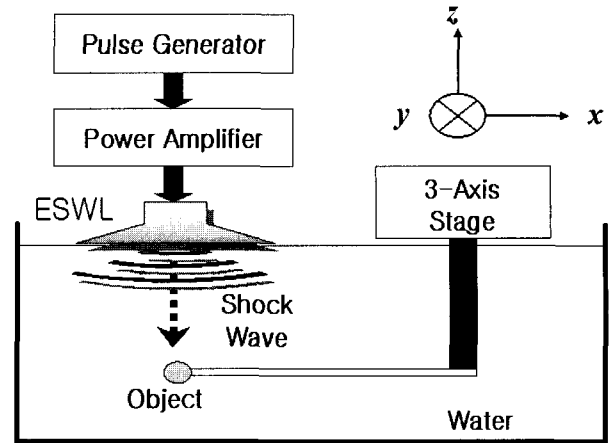


그림 1. 기본 실험 시스템 구성
Fig. 1. The basic configuration for the experiments

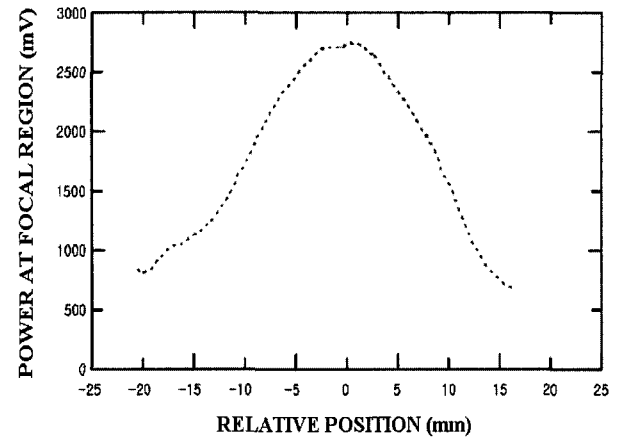


그림 2. 초점영역에서 계측한 충격파의 파워
Fig. 2. The power of the shock wave measured in the focal region

하기는 어려울 정도로 초점으로 예상되는 그래프의 상단의 일정 부분이 거의 평탄하게 나타나고 있다. 이 부분을 구체적으로 조사하면 최대치의 90% 이상의 파워가 나타나는 영역이 약 8mm 정도로 나타난다는 점이다. 이런 결과에서, 충격파가 진행되는 방향으로 약 1cm 정도의 영역을 본 실험에서 사용된 압전식 쇄석기의 초점영역으로 추정할 수 있다고 판단된다.

방사음원 위치의 확인 실험

방사음의 해석에 관한 연구에서, 방사음의 정의는 충격파에 조사된 후 대상물로부터 발생한 음을 의미하는 것으로 생각된다. 쇄석기를 사용할 때 들리는 소리 전부가 충격당한 대상물로부터 발생하는 것은 아니지만, 초점영역에 있는 대상물에도 음원이 위치하고 있는지 아닌지에 대해서는 종종 의문이 제기되기도 한다. 실제로 압전식 쇄석기에서 충격파가 조사될 때 초점위치에 파쇄 대상물이 없는 경우에도 소리가 들려오기 때

문이다.

애초에 방사음을 해석하여 대상물에 관련된 정보를 얻겠다는 기본적인 발상은 체외 충격파 쇄석기를 사용하는데 익숙한 전문가들의 음향적 평가에 의해서 시작된 것이었다. 수술사의 소리에 익숙해지면 쇄석기로부터 조사된 충격파가 결석에 명중하고 있는지, 빗나가고 있는지의 적중 유무와 결석의 파괴 유무까지도 대략 추정이 가능하다는 것이었다. 그러므로 대상물로부터 발생하는 소리가 틀림없이 존재한다는 가정 하에, 방사음의 해석에 관한 연구가 진행되었다. 하지만 그러한 사실이 정확히 확인되지 않은 이상, 과연 대상물로부터 정보가 될 수 있는 방사음이 발생하고 있는가라는 부분은 가장 기본적인 의문점이 될 수 있고, 현재까지 그런 사실을 해명한 연구 결과는 없었다고 생각된다. 따라서 의문점의 해답이 될 수 있는 확실한 결과를 제시하는 것이 궁극적으로 방사음 해석에 관한 연구의 기본을 분명히 하는 것으로 생각된다. 본 연구에서는 쇄석기 사용 시 계속되는 방사음이 대상물에서 발생된다는 사실을 확인하기 위하여, 그 음원의 위치를 추정하는 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 방사음원의 위치 추정을 위해서 Carter[8], Kanpp[9] 및 Nishimura 등[10]이 연구하여 발표한 이론을 응용하였다. 그림 3은 음원의 위치를 추정하기 위한 실험의 기본 구성도이다. 음원의 위치를 추정하기 위한 센서로는 하이드로폰을 사용하는데 본 실험에서는 하이드로폰 배열(hydrophone array)을 사용하지 않고, 1개의 하이드로폰을 사용하였다. H_1, H_2, H_3 는 하이드로폰이 이동하는 위치이고, D_1, D_2 는 하이드로폰간의 이동거리이다. 본 연구에서는 일정한 하이드로폰간의 거리를 임의로 선택하여 이동거리 D 를 사용한다. 즉, 단일 하이드로폰의 위치를 이동하여 가면서 각 위치에서 방사음을 측정한 후, 그 측정치로부터 방사음원의 위치를 계산·추정하는 방법을 사용하였다.

음원의 위치를 추정하기 위한 거리 R_s 와 방위각 θ_s 는 식 (1)과 같다.

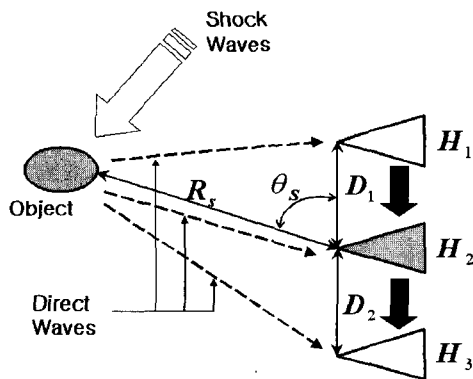


그림 3. 방사음의 위치동정 실험 구성
Fig. 3. The experimental configuration for the identification of the sound source

$$R_s = \frac{D_1 \left[1 - \left(\frac{C\tau_{21}}{D_1} \right)^2 \right] + D_2 \left[1 - \left(\frac{C\tau_{32}}{D_2} \right)^2 \right]}{2 \left(\frac{C\tau_{32}}{D_2} - \frac{C\tau_{21}}{D_1} \right)}$$

$$= \frac{1}{\tau_{32} - \tau_{21}} \left[\frac{D}{C} - \frac{C}{2} (\tau_{32}^2 + \tau_{21}^2) \right] \quad (1)$$

$$\theta_s = \cos^{-1} \left[\frac{D_2^2 - 2RC\tau_{32} - (C\tau_{21})^2}{2RD_2} \right]$$

$$= \cos^{-1} \left[\frac{D^2 - 2RC\tau_{32} - (C\tau_{21})^2}{2RD} \right]$$

식 (1)에서 τ_{21} 은 H_1 과 H_2 사이의 지연시간이고, τ_{32} 는 H_3 와 H_2 간의 지연시간이며, C 는 음속이다. 그러므로 두 번째로 이동하는 하이드로폰의 위치인 H_2 에서 대상물까지의 거리 R_s 과 방위각 θ_s 에 따라 방사음원의 위치가 결정되는 것이다. 본 실험에서는 이동거리 D_1 과 D_2 를 일정하게 $D=10\text{cm}$ 로 고정하였으며, 음속 C 는 일반적으로 사용되는 수중에서의 음속인 1500m/s 로 계산하였다. 또한 실험치와 이론치를 비교하기 위하여 거리와 방위각이 각각 18.0cm 및 0.63π 인 곳에 대상물을 위치시켜서 충격파를 조사하였다. 그림 4 (a), (b), (c)는 각각의 위치에서 단일 하이드로폰으로 측정된 방사음의 파형이다. 이 결과로부터, 지연시간 τ_{21} 및 τ_{32} 가 각각 $20\mu\text{s}$ 및 $45\mu\text{s}$ 인 것을 알 수 있다. 지연시간의 값을 식 (1)에 대입하면, 거리 R_s 는 19.4cm , 방위각 θ_s 는 0.64π 의 값을 가진다.

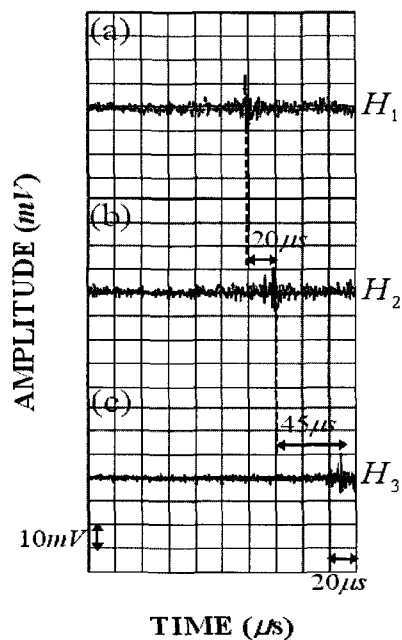


그림 4. (a) H_1 , (b) H_2 , (c) H_3 위치에서 측정된 방사음 파형
Fig. 4. The sounds measured by a hydrophone at (1) the position H_1 , (2) the position H_2 , and (3) the position H_3

이와 같이 음원의 위치를 추정한 이론치들이 H_2 까지의 거리와 방위각을 측정된 실험치인 18.0cm 및 0.63π 와 거의 일치하고 있으므로, 압전식 쇄석기 사용시의 방사음이 초점영역에 있는 대상물로부터 발생한다는 사실을 확인할 수가 있다.

대상물의 진동 및 방사음의 동시 관측 실험

음원의 위치를 추정한 실험치 및 이론치의 비교에 의해 방사음원의 위치에 대한 의문은 해결될 것으로 판단된다. 아울러 방사음을 해석할 때에는 파워 스펙트럼으로 대상물의 특성을 분석하는 방법이 주로 사용되고 있으므로, 이론적으로 고유진동수의 확인이 용이한 모델을 쇄석기의 충격 대상물로 사용하여, 그 방사음으로부터 대상물의 특성을 알아낼 수 있는지를 확인하는 실험을 진행하였다. 본 실험에서는 재현성이 있는 실험결과를 위하여 금속 모델을 대상물로 하였으며, 방사음을 분석하여 대상물의 특성을 파악할 수 있다는 결과를 제시함으로써, 방사음이 대상물로부터 발생한다는 사실을 보다 명백히 검증하기 위한 목적에서 진행되었다.

본 실험에서는 재현성 있는 결과 및 명백한 진동특성을 나타낼 수 있도록 황동으로 제작된 원반형태를 채용하였고, 각 대상물의 진동과 방사음을 동시에 측정하기 위해서는 레이저 도플러 계측기(laser Doppler velocimeter)와 하이드로폰을 각각 이용하였다. 4종류의 원반을 실험대상물로 사용하는데 반경은 일정하게 15mm로 고정하고, 두께만을 (a)5mm, (b)3mm, (c)2mm, (d)1mm로 바꾸어 가면서 실험하였다. 실험 시, 쇄석기의 초점은 항상 원반의 중앙에 위치하도록 조절하여 충격파를 조사하였다. 또한, 레이저 도플러 계측기의 사용을 위하여 원반의 가장자리에 레이저광 반사 테이프를 부착하였다. 이 실험을 위한 기본 구성도를 그림 5에 나타낸다.

원반의 고유진동수는 식 (2)와 같이 표현된다[11].

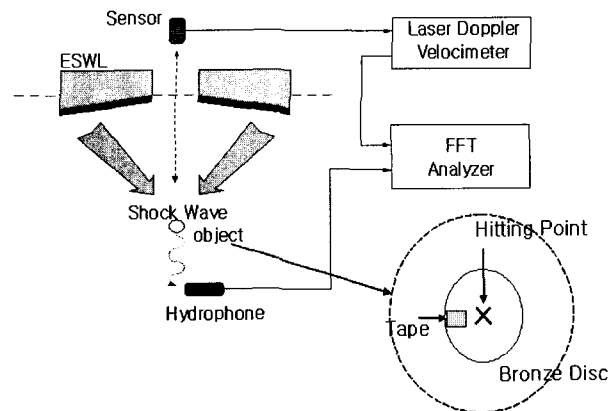


그림 5. 방사음과 진동의 측정 실험 구성
Fig. 5. The experimental configuration for the radiated sounds and the vibrations

$$f = \frac{0.412d}{a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad (2)$$

여기서, a 는 원반의 반경, d 는 두께, E 는 young율, ρ 는 밀도 그리고 σ 는 poisson비이다.

실험결과는 그림 6과 그림 7에 표현하였는데, (a)에서 (d)의 순서에 따라 두께 5mm에서 1mm의 원반을 충격대상물로 사용하여 계측한 응답신호를 차례로 나타내고 있다. 이 실험은 반복 수행하여도 거의 동일한 형태의 스펙트럼이 계속 검출되며, 고유진동수의 피크가 뚜렷이 나타난다. 따라서 파형이나 스펙트럼을 가산평균하지 않고, 임의 신호의 파형 및 스펙트럼을 대표적인 결과로서 제시한 것이다. 그림 6은 레이저 도플러 계측기를 사용하여 대상물의 진동을 측정된 것이고, 그림 7은 하이드로폰을 사용하여 충격파로 대상물을 조사할 때의 방사음을 측정된 것으로서 각각 측정된 응답신호의 파형과 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림 6과 그림 7에서 화살표와 숫자로 나타낸 곳은 각 계측기로 측정된 피크주파수의 정확한 위치와 값을 나타내기 위한 것이다.

이 결과에서 대상물의 두께가 얇을수록 고유진동수를 나타

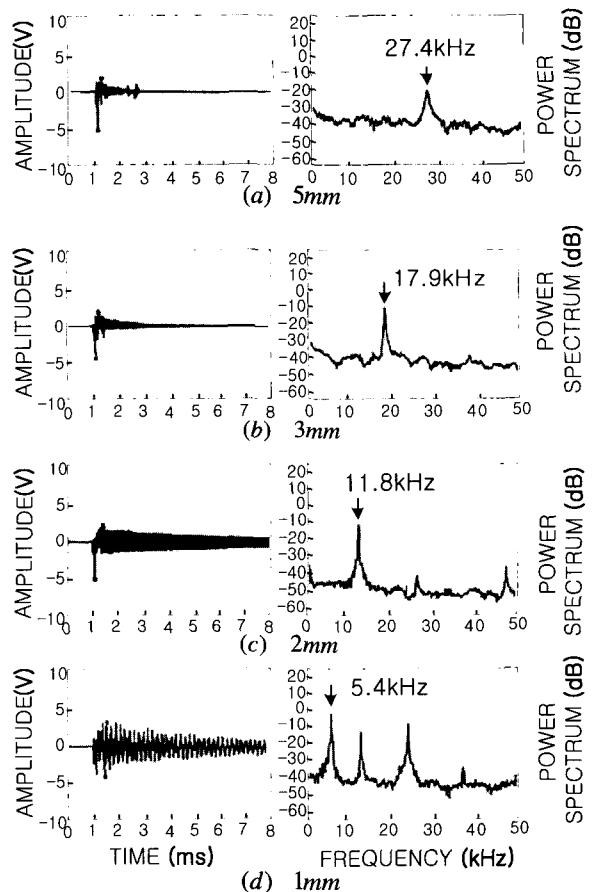


그림 6. 레이저 도플러 계측기를 이용하여 측정된 진동 파형과 스펙트럼
Fig. 6. The vibrations and its power spectra measured by a laser Doppler velocimeter

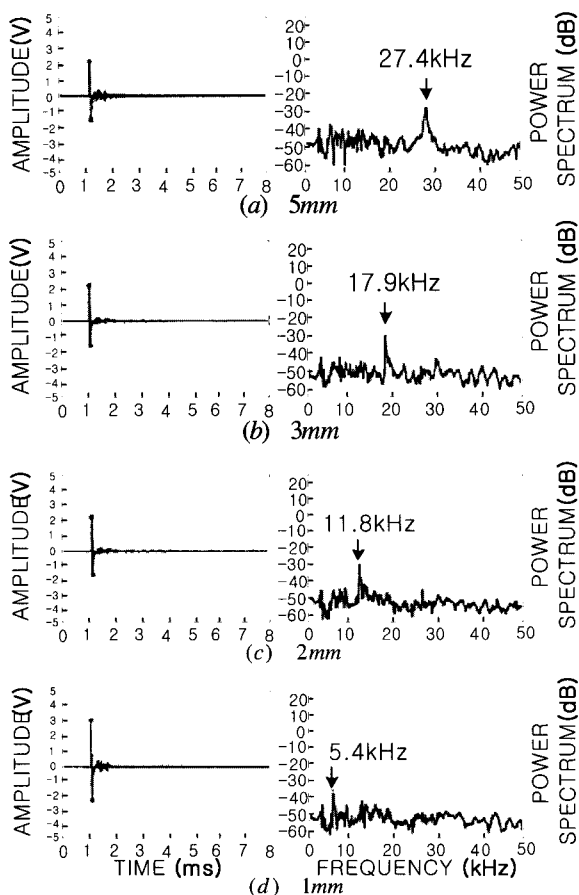


그림 7. 하이드로폰을 이용하여 측정된 방사음의 파형과 스펙트럼
Fig. 7. The waveforms and its power spectra of the radiated sounds measured by a hydrophone

내는 피크가 낮은 주파수대역으로 이동한다는 사실을 알 수 있다. 대상물의 형상에 따른 피크주파수의 변화 및 피크주파수의 이론치와 실험치를 비교하기 위하여 나타낸 것이 그림 8이다. 그림 8에서 실선은 이론치이고 점선은 실험치를 나타낸 것이므로, 이론치와 실험치가 거의 일치한다는 사실을 분명히 확인할 수 있다. 따라서, 쇄석기를 사용하여 대상물에 충격파를 조사할 때 들리는 방사음에는 대상물에 대한 정보가 포함되어 있다는 사실을 알 수 있으며, 역으로 방사음이 대상물로부터 비롯된다는 본 연구의 목적이 되는 사실을 분명히 확인할 수 있다.

결론 및 고찰

압전식 충격파 쇄석기를 이용한 결석치료 시, 방사음이 발생하는 음원의 위치가 파쇄하려는 대상물에 존재한다는 사실을 실험을 통하여 조사하였다. 이를 위하여 방사음원의 위치를 단일 하이드로폰을 사용하여 추정하는 방법을 사용하였다. 실험을 통하여 음원의 위치를 정확히 대상물에 있다는 사실을 알 수 있었고, 또한 충격파 조사 시의 방사음과 대상물의 진동을 동시에 관측·분석하는 실험을 수행한 결과, 동일한 주파수에

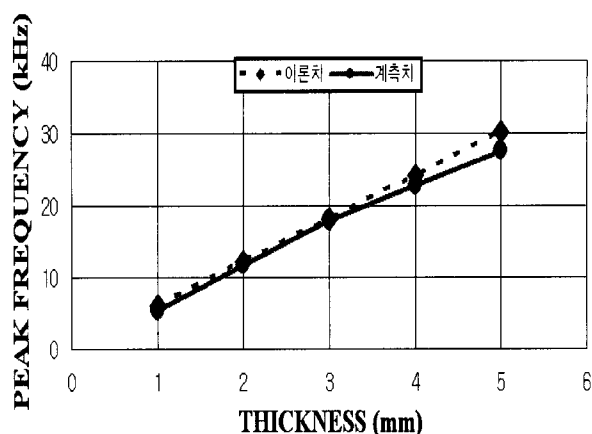


그림 8. 대상물의 두께변화에 따른 피크주파수의 변화
Fig. 8. The variation of the peak frequency due to the change in the object's thickness

서 뚜렷한 피크를 검출할 수 있었고, 충격대상물의 두께가 감소할수록 고유진동수를 나타내는 피크가 저주파 대역으로 이동하는 사실도 확인하였다.

실험결과를 통하여 본 연구의 목적이었던 쇄석기를 사용하여 수술할 때 방사음원의 위치는 대상물에 있다는 사실을 확인할 수 있었을 뿐만 아니라, 대상물의 파쇄 유무의 판단, 파쇄 과정의 추정 등 파쇄 대상물의 상태를 나타내는 정보를 방사음이 가지고 있을 것이라는 종래의 가정을 기본적으로 뒷받침할 수 있는 결과라고 생각된다.

참고 문헌

1. 高山和喜, 衝撃波のおはなし, 東京, 日本規格協會, 1990
2. E. Heusler and W. Kiefer, "Destruction of kidney stones by means of autofocused guided shock waves", In 2nd European Cong. on Ultrasonics and Medicine, Munich, 1975
3. Ch. Chaussy and E. Schmidt, "Shock wave treatment for stones in the upper urinary tract", The Urologic Clinics of North America, Vol. 10, No. 4, pp. 743-750, 1983
4. 棚橋善克 et al, 衝撃波結石破碎のすべて, 東京, 東洋書店, 1991
5. N.G. Holmer, L.O. Almquist, T.G. Hertz, A. Holm, E. Linstedt, H.W. Persson and C.H. Hertz, "On the mechanism of kidney stone disintegration by acoustic shock waves", Ultrasound Med. & Biol., 17, 1991
6. H. Kanai, Y.S. Jang, N. Chubachi and Y. Tanahashi, "Power difference in spectrum of sound radiation before and after of phantom by piezoelectric extracorporeal shock wave lithotripter", Jpn. J. Appl.

- Phys., Vol. 33-1, No. 5B, pp. 3159-3161, 1994
7. Y. S. Jang, T. Akasaka, M. Sato, H. Kanai and N. Chubachi, "Measurement and Analysis of Vibrations on Surface of Phantom Induced by Piezoelectric Extracorporeal Shock Wave Lithotripter", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 35, No. 5B, pp. 3163-3166, 1996
 8. G.C. Carter, "Time delay estimation for passive sonar signal processing", IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Processing, Vol. 29, No. 3, pp. 463- 470, 1981
 9. C.H. Knapp and G.C. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay", IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Processing, Vol. 24, No. 4, pp. 320-327, 1976
 10. S. Nishimura, T. Usagawa, M. Ebata and J. Okda, "Analysis of a moving sound source-orbit estimation using linear sensor array", ICASSP86, Tokyo, pp. 1897-1900, 1987
 11. 早坂壽雄, 吉川昭吉郎, 音響振動論, 東京, 丸善, 1974