

압전식 충격파 체외 쇄석기 사용시 초점위치에 의한 대상물의 진동과 파쇄효율과의 상관성

The Relativity between Vibration of Phantom and Its Break Efficiency Due to Position of Focus Induced by Piezoelectric Extracorporeal Shock Wave Lithotripter

장 윤 석*

(Yun Seok Jang*)

요 약

본 연구에서는 먼저 압전형 쇄석기에 의한 충격파 조사시에 발생하는 파쇄대상물의 진동과 그 때 들려오는 방사음과의 관계에 대하여 검토한다. 다음에 대상물에 있어서의 초점위치와 고유진동과의 관계에 대해서도 조사한 결과를 제시한다. 아울러 동일한 실험을 파쇄가능한 대상물에 시행하여 대상물의 진동과 그 파쇄효율과의 관계에 대해서도 실험적으로 검토한다. 그 결과, 초점위치에 따른 대상물 고유진동의 피크 주파수 파워와 파쇄효율과의 상관성을 명확히 확인할 수 있었다.

핵심용어: 압전형 쇄석기, 충격파, 굴곡진동, 조사회수, 초점위치, 피크주파수, 파쇄효율

투고분야: 초음파 및 탄성과 분야(4.7)

ABSTRACT

In this paper, the relation between the radiated sound and the vibration due to piezoelectric ESWL(Extracorporeal Shock Wave Lithotripter) is examined and the results of the experiments are represented. Next, the relation between the focal point and the vibration of the objects is examined. The same experiments with the objects that can be broken are done and the relation between the vibration and the break efficiency of the phantom is experimentally investigated. These results show that the relativity between the power of the peak frequency and the break efficiency can be confirmed.

Key words: Extracorporeal Shock Wave Lithotripter, Shock wave, Bending vibration, Shot number, Focal point, Peak frequency, Break efficiency

I. 서 론

체외 충격파 쇄석기(Extracorporeal Shock Wave Lithotripter)는 현재 결석 치료에 많이 이용되고 있는 의료장비이다. 체외에서 충격파를 발생시키는 방법에도 여러 가지가 있고, 따라서 많은 종류의 충격파 쇄석기가 선을 보이고 있지만 [1-3], 장치의 종류에 따라 결석파쇄 및 배석에 있어서 장단점이 존재하는 것도 사실이다[2, 5, 6]. 본 연구에서 사용된 압전식 쇄석기는 압전소자 배열을 이용하여 각 소자에서 방사된 초음파가 초점 부근에서 충격파로 변환되는 방법을 사용하는 장치로서, 파쇄된 결석을 체외로 빠져나가게 하는 데에 장점이 있는 장비로 잘 알려져 있다. 그 이유는, 어떤 장치이든 이미 체내에서 충격파에 의해 부러지기는 하지만 그 크기가 문제가 될 수 있는 데, 압전식 장치는 애초에

파쇄되기 시작할 때부터 체외로 배석될 수 있을 정도의 크기로 잘게 부서지게 하는 성질을 가지고 있다는 점에 있다. 따라서 본 연구에서는 압전식 체외 충격파 쇄석기를 이용하여 실험을 행하였다.

체외 충격파 쇄석기에 있어서 해결되어야 할 문제는 아직도 여러 가지가 산재해 있다고 생각된다. 그 중에서 대표적인 것을 꼽는다면, 무엇보다도 우선적으로 인체 조직에 영향을 주게되는 일을 줄이는 일이다. 간단히 얘기하자면 안전성 문제이다. 현재, 이에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다. 예를 들면, 수중 충격파에 당연히 함께 붙어 다니는 캐비테이션 문제[7, 8], 결석이 아닌 다른 조직에 충격파가 조사되었을 때의 문제, 그런 점을 고려하여 대상물에 충격을 주었을 때 발생하는 음으로 결석의 존재유무를 사전에 판별하는 방법등의 문제등이다. 이런 문제의 해결을 위하여 인체에의 영향 유무에 관한 조사, 영향이 있을 것을 대비한 충격파 조사직전의 결석 유무 감시법에 대하여 연구보고가 되고 있다. 이런 연구등과 더불어 충격파 쇄석기를 사용할

* 부경대학교 전기제어계측공학부

접수일자: 2000년 1월 10일

때 발생하는 소리를 분석하여, 가청 주파수 범위내의 고유 진동 피크의 검출 및 대상물의 파쇄과정을 감시할 수 있는 연구결과도 발표된 바 있다[9, 10].

앞서 예를 든 방사음에 관한 연구에서는, 결석을 대신한 모델로서 음향 임피던스가 요도결석과 유사한 초크를 대상으로 사용하여 그 파쇄과정에서의 스펙트럼 변화를 분석하였다. 그 결과, 대상물이 파쇄되어 갈수록, 방사음이 점차 낮은 주파수로 변동해 가는 사실을 관측할 수 있었다.

본 연구에서는 앞선 결과를 뒷받침할 수 있는 재현성있는 결과를 얻기 위하여, 충격파에 파괴되지 않는 금속재질을 가진 물체를 대상으로 선정하여 대상물 위의 초점 위치와 대상물의 진동과의 관계에 대하여 조사한다. 또한 그 결과를 바탕으로 하여, 아직 연구된 바가 없는 충격파에 조사된 대상물의 진동과 파쇄가능한 대상물에 있어서의 파쇄효율과의 상관성을 실험적으로 조사·분석한 결과를 제시한다.

II. 대상물 파쇄과정을 모델링한 실험

2.1. 실험방법

본 장에서는, 앞서 보고된 연구결과인 대상물 파쇄과정에서의 스펙트럼 변화에 대하여 해석한다. 대상물로서는, 재현성 있는 실험결과를 위해, 극단적이기는 하지만, 금속재질인 황동봉을 선정한다. 본 연구에서의 실험 구성도를 그림 1에 나타낸다. 본 실험에 쓰인 압전식 쇄석기는 일본 Toshiba사의 시험용 압전식 충격파 발생장치를 이용한다. 아울러, 대상물의 진동을 보다 직접적으로 계측하기 위하여, 레이저 도플러 계측기(Laser Doppler Velocimetry)를 사용하고, 레이저 도플러 계측기의 센서로 계측된 진동을 분석하기 위하여는 2채널 FFT 애널라이저를 이용한다.

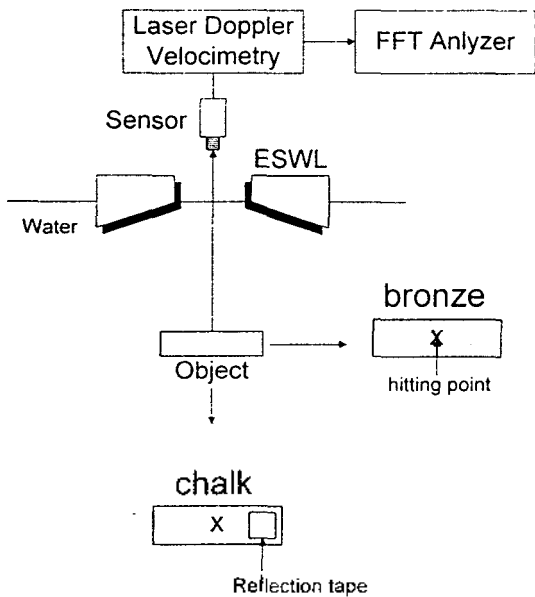


그림 1. 대상물 진동 계측을 위한 레이저 도플러 계측기를 사용한 실험구성도

Fig. 1. The configuration of the laser Doppler velocimetry used to measure the vibration of objects.

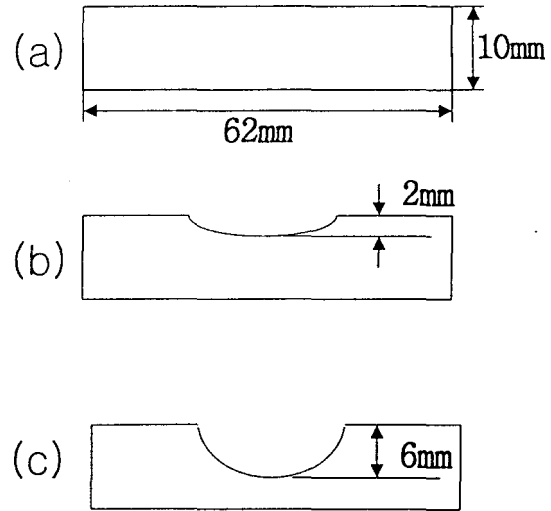


그림 2. 실험에 사용된 대상물

- (a) 원래의 형태, (b) 약 200회 조사후의 형태
- (c) 약 600회 조사후의 형태

Fig. 2. The objects used in the experiment simulated;

- (a) the original shape, (b) the shape after about 200 shots and (c) the shape after about 600 shots.

실험대상물은, 그림 2 (a), (b), (c)에 나타낸 것과 같은 형태의 3종류 황동봉을 선정한다. 결석대신에 선정된 초크의 파쇄과정을 관찰한 결과, 대상물 표면의 초점영역 부분이 충격파가 조사되는 횟수에 따라 점차 부서져 없어지는 것을 알 수 있다. 따라서, 파쇄될 수 있는 대상물의 경우, 파쇄가 진행됨에 따라 부서져 없어져 버리는 점을 가정하여, 파쇄과정에 있어서 시간에 따른 3가지 순간의 외형을想定한 금속모델을 제작한 것이다. 초크를 대상으로 사용한 때를 고려하여, 초크와 동일한 크기인 길이 6cm, 단면 반경 0.5cm의 황동봉을 사용한다. 또한, 상술한 3순간이란 1회도 충격파를 조사하지 않은 초크의 원 상태(그림 2. (a)), 200회 정도의 충격파를 조사하여 2mm정도가 부서져 나간 상태(그림 2. (b)) 및 600회 이상의 충격파를 조사한 경우를 가정하여 6mm정도가 부서져 나간 상태(그림 2. (c))를 모델링한 것이다. 즉, 그림 2. (a), (b), (c)의 순서대로 충격파 조사회수가 많아서 파쇄된 부분이 많은 대상물의 형태를 가정한 것이다.

대상물의 설치 위치를 표현하기 위하여, 그림 3과 같은 구성에 있어서, d_x 이라는 새로운 파라미터를 설정한다. 여기서 $d_x=0$ 는, 대상물을 설치할 때 대상물의 중앙과 초점 위치가 일치하는 상태를 나타내고, 대상물 중앙의 위치가 초점으로부터 쇄석기측으로 기울어져 있는 방향을 d_x 이 음(-)인 방향, 초점에서 쇄석기의 반대방향으로 기울어져 있는 방향을 d_x 이 양(+)인 방향으로 설정해 둔다.

먼저, 각 대상물을 $d_x=0$ 에 맞추어서 충격파를 조사한 경우의 대상물의 진동을 레이저 도플러 계측기로 측정함과 동시에 하이드로폰으로 그 때의 방사음을 관측한다. 이 때, 하이드로폰은 대상물에서 약 5cm 떨어진 수조 밑바닥에 설치한다.

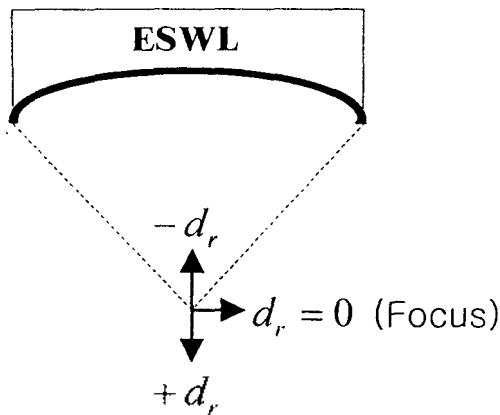


그림 3. 쇄석기의 초점과 대상물 간의 상대적 위치를 나타내는 구성도
 Fig. 3. The relative positions of the object and the focus of piezoelectric ESWL.

다음에는, 그림 3과 같은 좌표에서 $d_r = -10mm$ 로부터 $+10mm$ 까지 각각의 대상물에 대한 초점의 위치를 이동시켜 가면서 충격파를 조사하여, 각 대상물에 대한 진동의 변화를 조사·분석한다.

2.2. 실험결과

본 장에 있어서의 실험결과를 그림 4, 그림 5 및 그림 6에 나타낸다. 그림 4는 그림 2. (a)를 대상으로 한 실험결과로서, (a)는 레이저 도플러 계측기로 측정한 대상물의 진동파형과 스펙트럼, (b)는 하이드로폰으로 관측한 방사음의 파형과 그 스펙트럼, (c)는 (a)와 (b) 스펙트럼 간의 코히런스(coherence) 함수를 나타낸다. 이 때, 스펙트럼의 평균회수는 16회로 설정하였다.

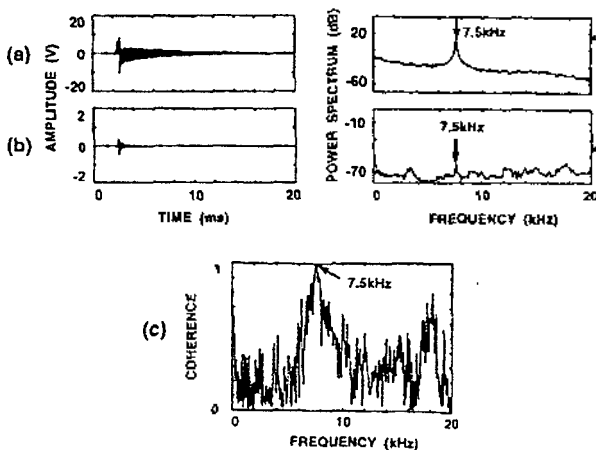


그림 4. 그림 2. (a)의 대상물을 사용한 실험결과. (a) 진동의 파형 및 스펙트럼 (b) 하이드로폰으로 검출한 방사음의 파형 및 스펙트럼 (c) 스펙트럼간의 코히런스
 Fig. 4. The experimental results for the object in Fig. 2 (a); (a) The waveform and the power spectrum of the vibration, (b) the waveform and power spectrum for the sound detected by hydrophone and (c) the coherence between the spectra.

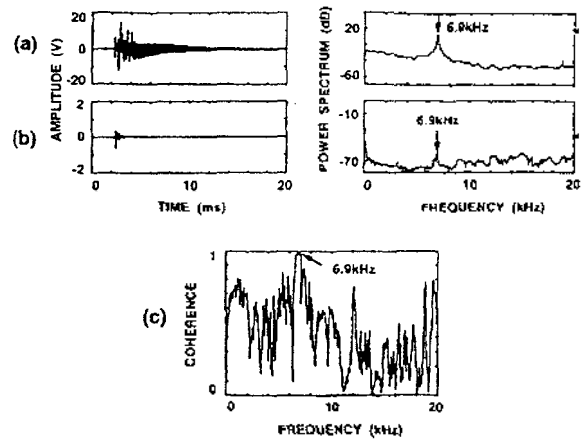


그림 5. 그림 2. (a)의 대상물을 사용한 실험결과 (a) 진동의 파형 및 스펙트럼 (b) 하이드로폰으로 검출한 방사음의 파형 및 스펙트럼 (c) 스펙트럼간의 코히런스
 Fig. 5. The experimental results for the object in Fig. 2 (b). (a) The waveform and the power spectrum of the vibration, (b) the waveform and power spectrum for the sound detected by hydrophone and (c) the coherence between the spectra.

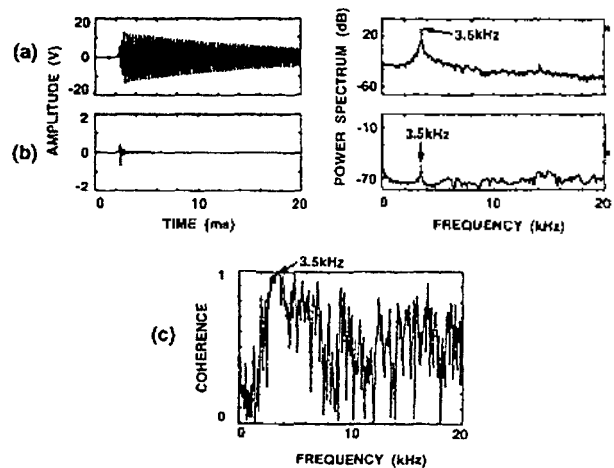


그림 6. 그림 2. (a)의 대상물을 사용한 실험결과. (a) 진동의 파형 및 스펙트럼 (b) 하이드로폰으로 검출한 방사음의 파형 및 스펙트럼 (c) 스펙트럼간의 코히런스
 Fig. 6. The experimental results for the object in Fig. 2 (c); (a) The waveform and the power spectrum of the vibration, (b) the waveform and power spectrum for the sound detected by hydrophone and (c) the coherence between the spectra.

이 결과를 살펴보면, 진동 및 방사음의 스펙트럼 양쪽 모두 동일하게 7.5 kHz에서 명확한 피크가 검출되고 있고, 코히런스에 있어서도 7.5 kHz에서만 1에 가까운 값이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 피크의 값을 이론적으로 조사해 보면, 굴곡진동(bending vibration)의 1차 고유주파수의 피크와 일치한다. 굴곡진동의 고유주파수를 나타내는 식은 다음과 같다[5].

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

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

이 때, l 은 대상물의 길이, a 는 단면반경, v_l 은 대상물 재질의 종파속도를 나타내며, 본 실험에서 사용된 황동의 종파속도는 $3,300 \text{ m/s}$ 이다. 위 식으로 계산된 이론치는 스펙트럼에서 화살표로 표시하고 있다. 그림 5는, 그림 2. (b)를 대상으로 한 실험결과인 데, 여기서도 (a), (b)의 스펙트럼 및 (c)의 코히런스에서 6.9 kHz 에 분명한 피크가 검출된다. 그림 6은, 그림 2. (c)와 같은 형태를 대상으로 한 실험 결과로서, 여기서도 스펙트럼 및 코히런스에서 3.5 kHz 에 명확한 피크가 관측되고 있다. 그림 5 및 그림 6의 피크도 그림 4에서와 같이 대상물의 굴곡진동 피크인 것으로 추정된다. 이런 결과로부터, 대상물에 있어서 초점영역 부분이 부서져 없어질수록 피크 주파수가 더욱 낮아진다는 결과를 분명히 관측할 수 있다. 이들 결과를 보다 정량적으로 나타내기 위하여, 대상물의 초점영역이 부서져 없어진 부분의 크기에 따른 피크 주파수의 변화를 나타낸 그래프가 그림 7이다. 이 그래프를 보면, 파쇄가능한 대상물일 경우, 대상물이 파쇄되어 초점영역 부분이 부서져 없어질수록 피크 주파수가 저주파측으로 변동할 것이라는 예상된 결과를 확실히 관측할 수 있다. 결론적으로, 파쇄가능한 대상물인 초크를 대상으로 했던 이전 연구결과와 정확히 일치하는 사실을 재현성있는 실험으로 확인할 수 있었다.

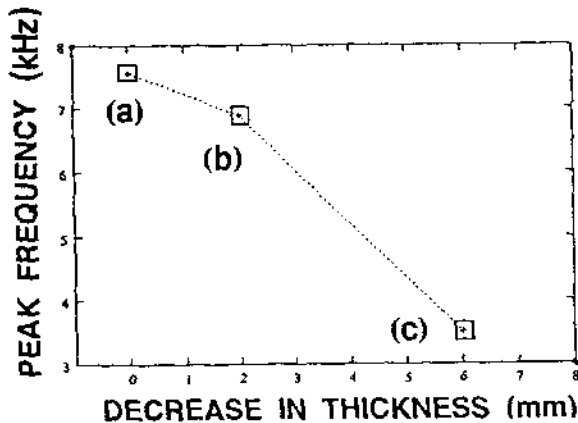


그림 7. 파쇄 부분의 두께에 의한 피크 주파수의 변화.
Fig. 7. The variation in the peak frequency due to the decrease in thickness at the focus.

다음에, 대상물과 초점의 상대적인 위치에 따른 실험의 결과를 그림 8에 제시한다. 이것은 대상물과 초점에 있어서의 상대적인 위치 d_r 을 일정한 간격으로 이동해 가면서, 그 위치에서 충격파를 조사한 결과로 발생하는 대상물 진동 스펙트럼에서 고유주파수에 나타나는 피크의 파워를 측정하는 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 그림 2. (a), (b), (c) 대상물 모두가 쇄석기축에 가까운 초점영역에서의 피크 주

파수 파워가 쇄석기에서 멀어지는 쪽의 파워보다 상대적으로 약 10 dB 이상 큰 경향을 보이고 있다. 또, 그림 2. (a)와 (b) 대상물의 경우, $d_r=0$ 부근 즉, 대상물의 중앙과 쇄석기의 초점이 일치하는 위치 부근에서는 피크 주파수의 파워가 상대적으로 감소하고 있다. 이런 현상은 굴곡진동의 진동 모드를 이용하여 해석할 수 있다. 대상물의 정중앙은 이론적으로 절점(node)이 되는 부분이므로, 실제 실험에서 정중앙에만 충격파가 도달하는 것은 아니겠지만 그 부근에 충격파를 조사하여도 여진되기 어려운 점인 것은 분명하다. 따라서, d_r 이 양 또는 음의 값을 가질 때인 중앙 1점보다 초점영역이 넓은 경우 즉, 절점인 정중앙 외에도 충격을 가하고 있는 경우가 거의 정중앙만을 충격하고 있는 경우보다 파워가 크게 나타나는 것은 당연하다고 생각된다.

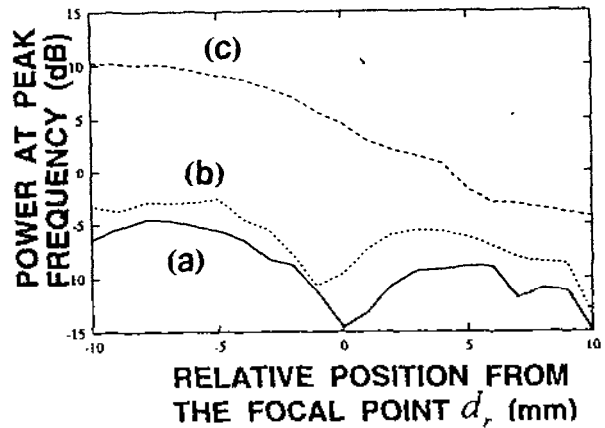


그림 8. $d_r = -10 \text{ mm}$ 에서 $d_r = +10 \text{ mm}$ 까지의 피크 주파수의 파워 변화. (a) 그림 2. (a)의 대상물 (b) 그림 2. (b)의 대상물 (c) 그림 2. (c)의 대상물을 사용한 실험결과.
Fig. 8. The power at the peak frequency from $d_r = -10 \text{ mm}$ to $d_r = +10 \text{ mm}$ (a) The results for the object in Fig. 2 (a), (b) the results for the object in Fig. 2 (b) and (c) the results for the object in Fig. 2 (c).

III. 대상물 충격시의 파쇄효율에 관한 실험

본 장에서는 초크를 파쇄대상물로 하여 충격파를 조사한 경우, 고유진동의 피크 주파수의 파워 변화와 파쇄효율과의 관계를 조사·분석한다. 즉, 대상물에 있어서의 초점위치에 따른 고유진동의 피크 주파수의 파워와 초크가 파괴되기까지의 충격파 조사회수에 관한 측정치를 비교하는 방법을 사용한다.

실험방법을 먼저 설명하면, 그림 3의 설정에 따라 6.2 cm 의 초크를 대상물로 하여 각각의 위치에 의한 피크 주파수의 파워를 측정한다. 단, 초크는 부서지는 재질이므로, 그림 1에서 나타난 바와 같이 레이저 도플러 계측기용 반사 테이프를 충격파를 받게 되는 대상물의 중앙이 아닌 끝부분에 접착하여 사용한다. 따라서 설정한 위치에 초크를 고정한 후, 쇄석기로부터 충격파를 1회 조사시 발생하는 초크의 진

동을 레이저 도플러 계측기를 이용하여 관찰하는 실험방법을 사용한다. 그 실험결과를 그림 9에 나타낸다.

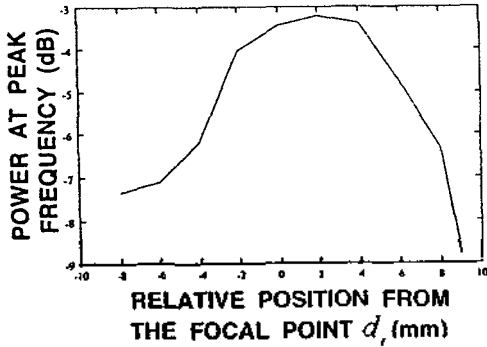


그림 9. 초점위치에 따른 초크의 피크 주파수 파워의 변화
Fig. 9. The power at the peak frequency due to the position of the focus in the experiment with chalk.

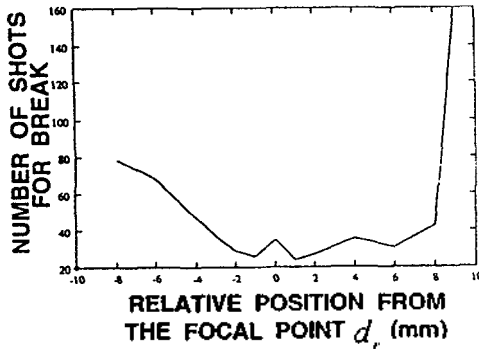


그림 10. 초점위치에 따른 초크 파쇄까지의 충격파 조사회수
Fig. 10. The shot number due to the position of the focus to break chalk.

다음에는, 이 결과와 비교하기 위하여 초점 위치의 변경에 따른 파쇄효율을 측정하는 실험을 행한다. 먼저, 대상물에 있어서의 초점의 위치를 바꾸어 가면서 초크가 부러질 때까지의 충격파 조사회수를 조사한다. 본 실험에서는, 이 과정을 5회 반복하여 평균한 결과를 그림 10에 나타낸다. 그림 10의 형태로서는 그림 9와 비교가 곤란하다고 판단되므로, 파쇄까지의 충격파 조사회수를 파쇄효율로 변환할 수 있는 파라미터를 설정할 필요가 있다. 따라서, 충격파 조사회수와 파쇄효율이 서로 반비례 관계라는 것에 착목하여,

$K = \frac{1}{N}$ 과 같이 정한다. 여기서, K 는 파쇄효율, N 은 대상물이 부러지기까지의 충격파 조사회수이다. 이와 같이 그림 10의 그래프를 변환한 결과를 나타낸 것이 그림 11이다. 이 그림을 보면, 전체적인 경향이 그림 9에서 나타낸 고유진동의 피크 주파수의 파워변화와 유사하게 보이는 것을 알 수 있다. 따라서, 고유진동의 피크 주파수의 파워와 파쇄효율과의 상관성을 직접적으로 나타내어 확인하기 위하여 고유진동의 피크 주파수의 파워를 세로축, 파쇄효율을 가로축으로 한 그래프를 그림 12에 제시한다. 그림 12의

결과를 보면, 피크 주파수의 파워와 파쇄효율이 거의 선형적으로 비례하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 대상물에 발생하는 고유진동의 피크 주파수에서의 파워가 크면 클수록 파쇄효율도 비례적으로 향상되는 것을 분명히 확인할 수 있다.

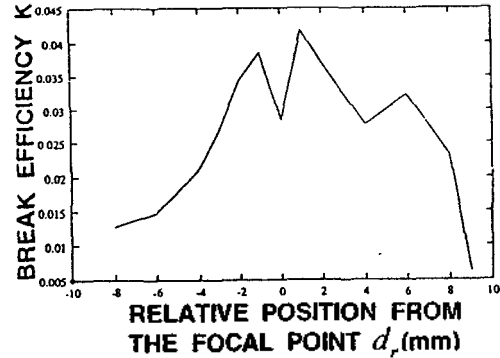


그림 11. 초점위치에 따른 파쇄효율
Fig. 11. The break efficiency due to the position of the focus.

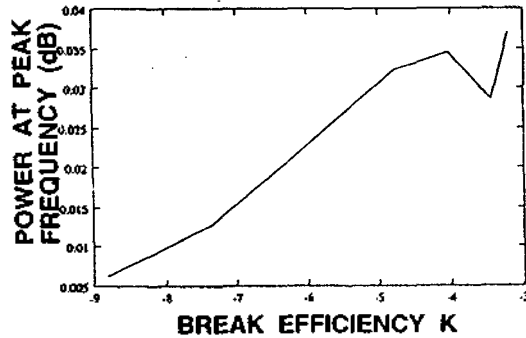


그림 12. 피크 주파수의 파워와 파쇄효율과의 상관관계
Fig. 12. The relation between the power of the peak frequency and the break efficiency.

IV. 결론

본 연구에서는 파쇄과정에서 대상물이 파쇄될수록 대상물 고유진동의 피크가 고주파에서 저주파로 낮아지는 연구결과에 주목하여, 금속봉을 대상으로 한 재현성있는 실험을 통하여 진동주파수 변동이유를 실험적으로 확인하였다. 그 결과에서, 대상물의 파쇄과정에 있어서 대상물이 파쇄되는 데 따라 대상물로부터의 방사음이 점점 낮게 들릴 가능성을 관측할 수가 있었고, 아울러 대상물과 초점과의 상대적 위치에 대한 파라미터 d_f 를 설정하여, d_f 에 의한 대상물의 피크 주파수의 파워변화를 조사한 결과, 쇄석기의 초점을 대상물의 정중앙에 맞추는 것보다 대상물의 표면이나 이면(裏面)에 맞추는 경우 즉, d_f 이 음이나 양의 값을 가지는 경우의 피크 주파수 파워가 증가한다는 점을 발견하였다. 또한, 굴곡진동의 이론적 모드로 이 현상을 해석할 수가 있었다. 이러한 특성으로 미루어 볼 때, 쇄석기의 초점을 대

상물의 정중앙보다 전후 표면에 두는 경우가 충격파에 더욱 큰 진동을 하게 됨에 따라 파쇄효율이 커지게 될 가능성을 추정할 수 있었다.

이런 결과에 따라 더욱 직접적인 파쇄효율을 평가하기 위하여, 파쇄가능한 대상물을 선정하여 동일한 d_r 에 있어서의 고유진동의 피크 주파수 파위와 파쇄되기까지 충격파 조사회수로 표현되는 파쇄효율에 대한 실험을 행하고, 그 결과를 비교하였다. 그 결과, 피크 주파수의 파위가 큰 위치와 파쇄효율이 좋은 위치가 거의 대응되는 것을 확인할 수가 있었다.

위의 결과로부터, 대상물에 있어서 파쇄효율이 좋은 초점위치는 그 대상물의 고유진동이 생기기 쉬운 위치라고 추정할 수 있다. 따라서, 대상물의 외형에 의한 진동 모드와 파쇄효율과의 직접적인 상관성이 뚜렷이 존재한다는 사실로부터 대상물의 파쇄에 최적인 초점 위치를 추정할 수 있음을 실험적으로 관측할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. P. T. Hunter, B. Finlayson, R. J. Hirko, W. C. Voreck, R. Walker, S. Walck, M. Nasr, "Measurement of Shock Wave Pressures Used for Lithotripsy," *J. Urology*, 136, pp. 733~738, 1986.
2. 棚橋善克他, 衝撃波結石破砕装置のすべて (東洋書店, 東京, 1991).
3. 高山和喜他, "水中衝撃波フォーカシングによる上部尿路結石破砕装置の開発," *病態生理*, 5, No. 3, pp. 206~215.
4. J. W. S. Rayleigh, *The Theory of Sound Vol. 1* (Dover, New York, 1945), Chap. 8, pp. 255~305.
5. L. Olsson, L. O. Almquist, A. Grennberg, N. G. Holmer, "Analysis and Classification of Secondary Sounds from the Disintegration of Kidney Stones with Acoustic Shock Waves," *Ultrasound Med. and Biol.*, 17, 1991.
6. E. Heusler, W. Kiefer, "Destruction of Kidney Stones by means of Autofocused Guided Shock Waves," In 2nd European Cong. on Ultrasonics and Medicine, Munich, 1975.
7. A. J. Coleman, J. E. Saunders, L. A. Crum and M. Dyson, "Acoustic Cavitation Generated by an Extracorporeal Shock Wave Lithotripter," *Ultrasound in Med. & Biol.*, 13, No. 2, pp. 69~76, 1978.
8. C. C. Church, "A Theoretical Study of Cavitation Generated by an Extracorporeal Shock Wave Lithotripter," *J. Acoust. Soc. America*, 86, No. 1, pp. 215~227, 1989.
9. Hiroshi Kanai, Yun-Seok Jang, Noriyoshi Chubachi and Yoshikatsu Tanahashi, "Power Difference in Spectrum of Sound Radiation before and after Break of Phantom by Piezoelectric Extracorporeal Shock Wave Lithotripter," *JJAP*, 33-1, No. 5B, pp. 3159~3161, May 1994.
10. 장윤석, 박무훈, "체외충격파결석파쇄장치에 의한 대상물 파쇄시의 발생음의 측정과 해석," *한국음향학회지*, 16권 6호, pp.36~40, 1997.

▲ 장 윤 석(Yun-Seok Jang)

한국음향학회지 제16권 6호 참조