

의료용 충격파에 의한 대상물의 파쇄진행에 따른 진동해석

Vibration Analysis During Breaking Process of Phantom Induced by Shock Wave for Medical Treatment

장 윤 석*, 박 규 칠**
(Yun-Seok Jang*, Kyu-Chil Park**)

*부경대학교 전기제어공학부, **부경대학교 전자컴퓨터 정보통신공학부
(접수일자: 2005년 7월 27일; 수정일자: 2005년 10월 14일; 채택일자: 2005년 11월 18일)

압전식 충격파 쇄석기를 사용하여 대상물을 파쇄하는 과정에서 발생하는 음의 특성을 조사한 결과, 대상물이 파쇄됨에 따라 방사음이 더욱 저주파대로 이동한다는 실험적인 결과가 발표되었고[2], 이 결과를 입증하기 위하여 실제의 대상물이 파쇄되어가는 과정을 모델링하여 제작한 대상물을 사용한 실험에서도 동일한 결과가 관측되었다[3]. 본 논문에서는 이와 같이 실험적으로 밝혀진 연구결과를 이론적으로 확인하고자 한다. 따라서, 유한요소법을 이용한 수치 시뮬레이션을 실험과 유사하게 모델링한 대상물에 실행하였고, 시뮬레이션에서 관측된 결과를 제시하여 실험적으로 관측된 결과가 이론적으로도 유효하다는 것을 입증하였다.

핵심용어: 압전식 충격파 쇄석기, 방사음, 파쇄과정, 유한요소법, 피크 주파수

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.7)

When the vibration of a phantom induced by Extracorporeal Shock Wave Lithotripter (ESWL) was investigated, we found the fact that the peak frequency in the power spectrum shifts from high frequency to low frequency as the number of shots increases[2]. The fact was confirmed experimentally by detecting the peak frequency obtained from the vibrations of bronze models[3]. This paper investigates the experimental results. For the purpose, we carried out the computer simulation using the finite element method. It is found that the results from the experiments are confirmed by computer simulation.

Keywords: Piezoelectric Extracorporeal Shock Wave Lithotripter, Radiated Sound, Breaking Process, Finite Element Method, Peak Frequency

ASK subject classification: Ultrasonic and Elastic Waves (4.7)

I. 서론

압전식 충격파 쇄석기를 사용하여 결석을 치료할 때는 항상 음이 발생한다. 이 발생음에는 대상물이 충격파에 충격됨으로써 발생하는 방사음이 포함되어 있다[1]. 이 충격파에 의한 방사음에 관련된 연구로는, 압전식 쇄석기에 충격당할 때에 발생하는 대상물의 진동과 방사음을 비교하여 대상물이 파쇄되어 가는 과정을 방사음으로 추

정 가능하다는 사실을 제시한 것[2], 또한 음원의 위치를 추적하여 대상물이 바로 방사음의 발생지라는 사실을 관측하여 결과를 제시한 것[3] 등이 있다.

대상물의 진동과 방사음의 관계를 추정한 연구에서는, 압전식 충격파 쇄석기로 충격파를 발생시켜, 결석과 거의 동일한 음향 임피던스를 가지고 있는 모델에 조사(照射)하면서 대상물이 파쇄되어 가는 과정을 관찰한 결과, 대상물의 파쇄형태에 따라 대상물의 진동이 보다 저주파대로 이동한다는 사실을 실험적으로 입증하고 있다 [2]. 아울러, 재현성있는 재질로 파쇄과정의 3가지 상황에 대응되는 모델을 제작하여 대상으로 사용한 실험에서

는, 파쇄된 정도에 따른 세 가지 상황의 피크주파수를 관찰한 결과, 파쇄되는 대상물에서 실험한 것과 동일한 결과를 확인하였다[3].

본 연구에서는 앞서 서술한 바와 같이 실험적인 방법으로만 제시되었던 연구결과가 이론적으로도 유효하다는 사실을 입증하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해서는, 실험에서 사용한 것과 같은 형태 즉, 파쇄의 진행에 따른 대상물의 세 가지 형태를 모델링한 다음, 유한요소법에 의한 수치적 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 얻은 결과를 제시한다.

II. 대상물의 파쇄과정에 대한 모델링

처음에, 압전식 충격파 쇄석기를 사용한 실험에서는

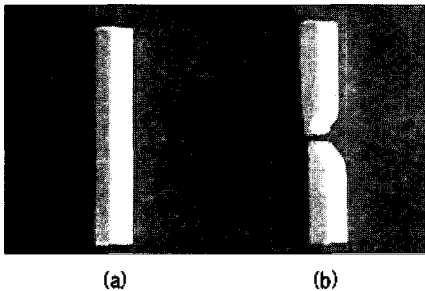


그림 1. 파쇄 전후의 초크의 형태 (a) 원래의 초크 (b) 630회의 조사 후 파쇄된 초크

Fig. 1. The shapes of chalk before and after break (a) the original chalk, (b) the broken chalk after 630shots of ESWL.

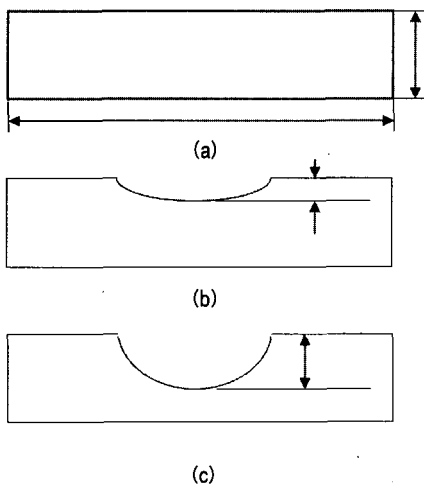


그림 2. 실험에 사용된 대상물 (a) 원래의 형태, (b) 약 200회 조사 후의 형태, (c) 약 600회 조사 후의 형태

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.

6.2cm의 초크를 사용하여 파쇄실험을 수행하였다. 초크를 사용한 이유는 초크의 음향 임피던스가 결석의 음향 임피던스와 유사하다는 데에 있다[4].

실험에서는, 초크를 압전식 충격파 쇄석기의 초점 위치에 두고, 초크가 부러질 때 까지 충격파를 1초에 1회씩 계속해서 조사하였다. 이 실험에 사용되었던 압전식 쇄석기는 일본 Toshiba사의 압전식 충격파 쇄석기로서, 초점에서 최고 82MPa의 압력을 나타내는 충격파를 발생할 수 있는 장치이다. 이 실험에서 관찰된 결과는 충격파가 조사될 때, 초크에서 초점이 위치한 부분이 천천히 깎여나간다는 사실이다. 따라서, 파쇄과정은 시간이 진행됨에 따라 초크의 형태가 달라진다는 데에서 관찰할 수 있다. 이 실험에서는 630회의 충격파를 조사한 후, 초크가 파괴되었다. 그림 1은 충격파를 조사하기 전의 초크 형태와 충격파에 조사되어 형태가 변화해 가다가 최종적으로 부러진 후의 초크 형태를 사진으로 촬영한 것이다. 그림 1. (b)에서 보면, 대상물이 어떤 형태로 점점 파쇄되어 가는 지를 추정할 수 있다.

이 실험의 과정 및 결과를 보고, 본 연구에서 대상으로 하는 세 가지 형태의 대상물을 정할 수가 있었다. 즉, 시간에 따른 대상물의 변화 형태를 구분짓는 것이다. 우선 이런 점을 분명히 고려하여 분명한 방사음을 관측하기 위하여, 음의 재현이 가능한 대상물을 선정하였다. 초크와 같이 점점 파쇄되는 이유 때문에 충격파 1회마다 대상물의 방사음이 달라질 가능성이 있는 대상물이 아니라, 충격파를 조사하더라도 외관의 변화가 없는 그림 2. (a)-(c)와 같이 세 가지 형태의 황동봉을 모델로 선정하였다. 이와 같은 황동봉을 대상으로 하여 방사음을 측정하는 실험에서 나온 결과를 순서대로 그림 3 (a)-(c)에 나타내었다. 그림에서 왼쪽은 방사음의 파형이고, 오른쪽은 동일 방사음의 스펙트럼을 관측한 것이다. 그림 3.

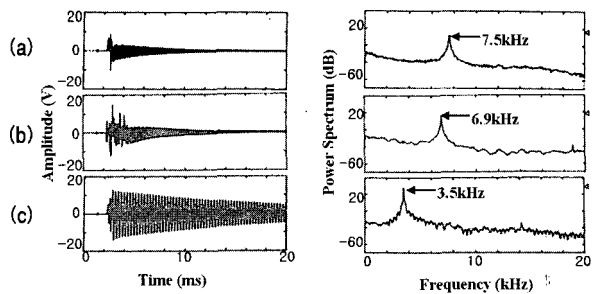


그림 3. 그림 2의 대상물을 사용하여 계측된 파형과 스펙트럼 (a) 그림 2의 (a) 모델, (b) 그림 2의 (b)모델, (c) 그림 2의 (c)모델

Fig. 3. The waves and the spectra from the results for the object in Fig. 2 (a) the model (a) in Fig. 2., (b) the model (b) in Fig. 2. (c) the model (c) in Fig. 2.

(a)-(c)의 스펙트럼에 나타나 있는 피크를 보고 추정할 수 있는 사실은 대상물이 깎인 부분이 클수록 대상물의 진동이 보다 저주파로 나타난다는 것이다.

따라서, 본 논문에서는 그림 1 및 2와 같이 실험에서 관찰된 사실을, 이론적으로 확인할 수 있는 결과를 제시하고자 한다. 이를 위하여 앞의 실험에서 사용하였던 대상물의 형태는 그대로 유지하여 유한요소법에 의한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다.

III. 유한요소 모델링 방법

유한요소법이란 관심이 있는 영역을 작은 요소로 분할하고, 그 작은 요소를 간단한 모델 또는 수식으로 근사시켜 이것을 전체적으로 조합하여 구하는 수치해석 기법의 하나이다[5-9].

복잡한 기하학적 형상과 하중 그리고 재료의 성질을 가지고 있는 문제들에 대하여 해석적인 해를 구하는 것이 불가능하므로, 적절한 근사해를 구하기 위해서는 유한요소법과 같은 수치해석에 의존할 수 밖에 없다.

외부에서 가해지는 힘이 있는 3차원 탄성체의 진동의 경우, 계 전체의 방정식은 다음과 같이 주어진다.[8-10]

$$L = V - T - W = \frac{1}{2} \int_V (S)^T (T) dV - \frac{1}{2} \int_V \omega^2 \rho (u)^T (u) dV - \int (u)^T (T) dA \quad (1)$$

여기서 V, T, W는 각각 위치 에너지, 운동 에너지 및 표면에 행해진 일을 나타내며, {S}, {T}, ω, ρ, {u}는 왜곡(또는 변형) 벡터, 응력 벡터, 각주파수, 밀도 및 요소내의 임의의 점에 대한 변위 벡터를 각각 나타낸다. 본 논문에서는 요소로서 8절점 육면체 형상을 채용하므로, 각 절점에는 x, y, z의 세 방향의 변위가 존재한다. 여기서 {u}={ux1 uy1 uz1 ... ux8 uy8 uz8}로 주어진다. 또한, 후크의 법칙{T}=[c]{S}에 의해

$$L = \frac{1}{2} \int_V (S)^T [c] (S) dV - \frac{1}{2} \int_V \omega^2 \rho (u)^T (u) dV - \int (u)^T (T) dA \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서 [c]는 탄성정수 행렬을 나타낸다. 유한요소법은 대상물을 요소로 분할하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \sum_e L_e \quad (3)$$

이 식에서

$$L_e = \frac{1}{2} \int_e (S)^T [c] (S) dV_e - \frac{1}{2} \int_e \omega^2 \rho (u)^T (u) dV_e - \int_e (u)^T (T) dA_e \quad (4)$$

로 주어지고, e는 요소 영역을 나타낸다. 요소내의 임의의 점에 대한 변위 벡터 {u}는 보간함수 [N]를 이용하여 요소 절점에 대한 변위 벡터 {d}_e에 관한 다음 식을 적용시킨다.

$$\{u\} = [N] \{d\}_e \quad (5)$$

또한,

$$\{S\} = [B] \{d\}_e \quad (6)$$

로 나타난다. 여기서

$$[B] = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ \dots \ A_8] \quad (7)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

또한, 보간함수 [N]의 각 성분은 국소좌표변수 ε, ζ, η에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{8}(1+\epsilon)(1-\zeta)(1+\eta), & N_2 &= \frac{1}{8}(1+\epsilon)(1+\zeta)(1+\eta) \\ N_3 &= \frac{1}{8}(1+\epsilon)(1-\zeta)(1-\eta), & N_4 &= \frac{1}{8}(1+\epsilon)(1+\zeta)(1-\eta) \\ N_5 &= \frac{1}{8}(1-\epsilon)(1-\zeta)(1+\eta), & N_6 &= \frac{1}{8}(1-\epsilon)(1+\zeta)(1+\eta) \\ N_7 &= \frac{1}{8}(1-\epsilon)(1-\zeta)(1-\eta), & N_8 &= \frac{1}{8}(1-\epsilon)(1+\zeta)(1-\eta) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (5), (6)을 식 (4)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$L_e = \frac{1}{2} (d)_e^T [K]_e (d)_e - \frac{1}{2} \omega^2 (d)_e^T [M]_e (d)_e - (d)_e^T (f)_e \quad (10)$$

여기서,

$$[K]_e = \int_e [B]^T [c] [B] dV_e \quad (11)$$

$$[M]_e = \rho \int_e [N]^T [N] dV_e \quad (12)$$

$$(f)_e = \int_e [N]^T (T) dA_e \quad (13)$$

그러므로, 계 전체의 방정식은

$$L = \sum_e L_e = \sum_e \left\{ \frac{1}{2} (d)^T [K]_e (d)_e - \frac{1}{2} \omega^2 (d)^T [M]_e (d)_e - (d)^T (f)_e \right\} = \frac{1}{2} (d)^T [K] (d) - \frac{1}{2} \omega^2 (d)^T [M] (d) - (d)^T (f) \quad (14)$$

로 주어지고, 에너지 정류의 원리($\partial L = 0$)에 의해

$$\frac{\partial L}{\partial (d)} = [K](d) - \omega^2 [M](d) - (f) = 0 \quad (15)$$

가 얻어진다. 그러므로, 진동체의 이산화된 방정식은[8,9]

$$([K] - \omega^2 [M])(d) = (f) \quad (16)$$

으로 주어지게 된다. 여기서 [K], [M]은 각각 계의 강성 행렬 (stiffness matrix), 질량 행렬 (mass matrix)이고, (f)는 각 절점에 작용하는 외력 벡터이다.

IV. 유한요소법에 의한 컴퓨터 시뮬레이션

그림 4는 유한요소법 계산을 위한 3차원 요소분할 모델로서, 각 요소는 직육면체의 형태이며, 원통형 황동봉에 최대한 가깝게 요소 분할하였다. 그림 4의 (a)는 각각 1회도 충격파를 조사하지 않은 원래대로의 초크 상태, (b)는 200회 정도의 충격파를 조사하여 2mm 정도가 부서져 나간 상태, 그리고 (c)는 600회 이상의 충격파를 조사하여 6mm 정도가 부서져 나간 상태를 고려하여 계산 모델로 선정한 것이다.

실험적인 방법에서 선정된 재료가 원기둥형태의 황동

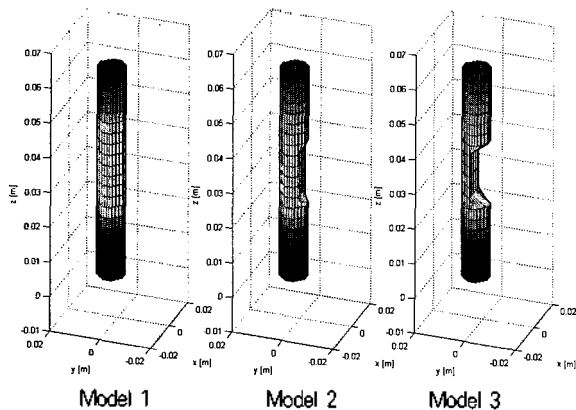


그림 4. 유한요소법에 의한 계산 모델

(a) 원래 상태의 대상물에 의한 계산 모델, (b) 약 200회 조사후의 대상물에 의한 계산 모델, (c) 약 600회 조사후의 대상물에 의한 계산 모델

Fig. 4. The calculation model of the finite element method

(a) The calculation model of the object under original condition, (b) The calculation model of the object after 200 shots, (c) The calculation model of the object after 600 shots.

표 1. 각 모델에 대한 요소 및 절점 수

Table 1. The total numbers of elements and nodes for the calculation models.

	Model 1	Model 2	Model 3
Total Element Number	1,520	1,460	1,232
Total Node Number	2,037	1,965	1,713

봉이었으므로, 사용된 재료정수로는 재질을 황동 (Brass)으로 선택하였고, 영률 (Young's Modulus)은 $9.02 \times 10^{10} [N/m^2]$ 이며, 포아송 비 (Poisson's Ratio)는 0.3, 그

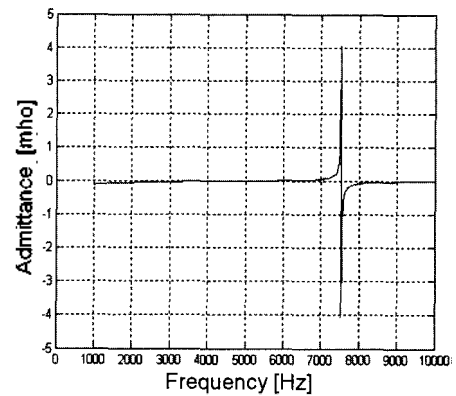


그림 5. 대상물 (a)의 입력 어드미턴스 특성

Fig. 5. The input admittance of the object (a)

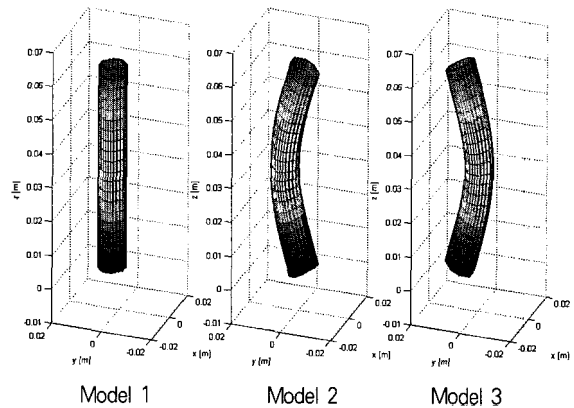


그림 6. 대상물 (a)의 제 1 공진주파수에서의 진동 모드

Fig. 6. The vibration mode at 1st resonance frequency of the object in (a).

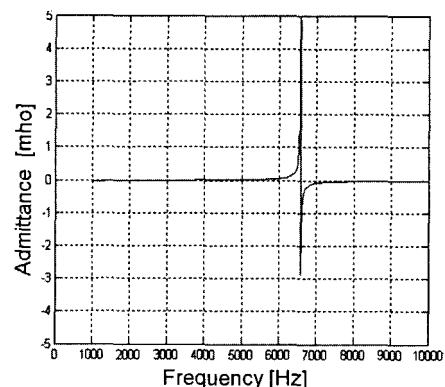


그림 7. 대상물 (b)의 입력 어드미턴스 특성

Fig. 7. The input admittance of the object (b).

표 2. 파쇄 부분의 두께에 의한 피크 주파수의 실험치 및 계산치의 변화 비교
 Table 2. Comparisons of the peak frequency variations between the experimental results and the computer simulation results.

공진주파수	구분	실험치(kHz)	계산치(kHz)	오차(%)
대상물 (a)		7.5	7.525	0.33
대상물 (b)		6.9	6.570	4.78
대상물 (c)		3.5	2.895	17.28

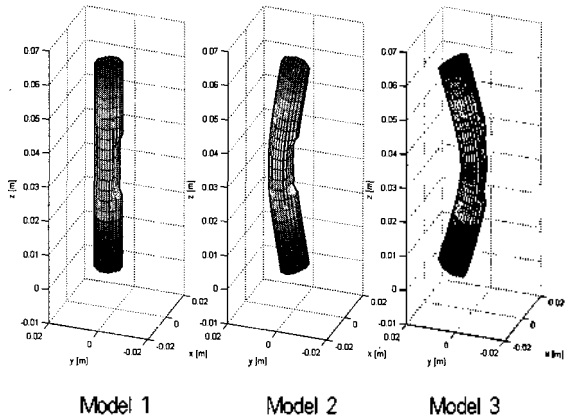


그림 8. 대상물 (b)의 제 1 공진주파수에서의 진동 모드
 Fig. 8. The vibration mode at 1st resonance frequency of the object in (b).

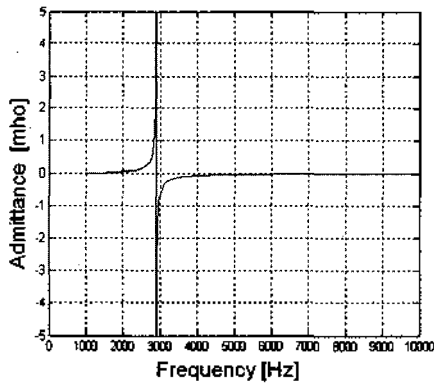


그림 9. 대상물 (c)의 입력 어드미턴스 특성
 Fig. 9. The input admittance of the object (c).

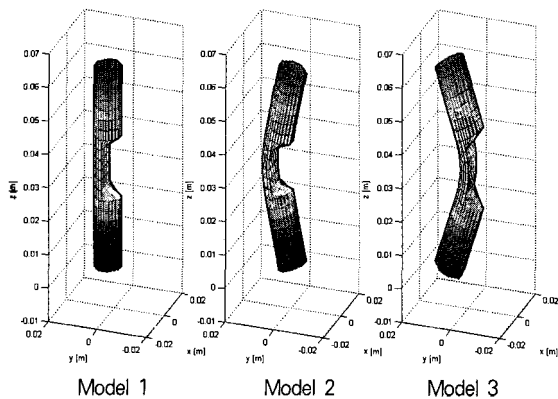


그림 10. 대상물 (c)의 제 1 공진주파수에서의 진동 mode
 Fig. 10. The vibration mode at 1st resonance frequency of the object in (c).

리고 질량의 밀도는 8440[kg/m³]으로 크기는 반경 5mm, 높이 60mm이다.

그림 5, 그림 7 및 그림 9는 유한요소법에 의한 계산 결과로서, 식(1)의 (f)에 1[N]의 힘을 입력한 것에 대한 변위 속도 (d)를 나타낸 것으로 입력 어드미턴스의 허수부분에 해당되며, 1kHz에서 10kHz의 주파수 대역에 걸쳐 10Hz 간격으로 계산한 결과이다. 그림 5는 그림 4의 (a)를 대상으로 한 계산결과로서 7.525kHz에서 피크주파수가 표시되고 있으며 그림 7은 그림 4의 (b)를 대상으로 한 계산 결과로서 이것 또한 6.570kHz에서 피크주파수가 표시됨을 알 수 있고, 또한 그림 9는 그림 4의 (c)를 대상으로 한 계산 결과로서 2.895kHz에서 역시 피크주파수가 표시된다. 그림 6, 그림 8 및 그림 10은 대상물 (a), (b) 및 (c)를 대상으로 하여 각각의 피크 주파수에서 진동 모드를 나타낸 것이다. 각 대상물의 진동 모드는 같은 형상을 보이며, 제1진동 모드임을 알 수 있다. 각 그림에서 왼쪽 그림은 대상물에 힘을 가한 방향을 나타내며, 나머지 두 그림은 피크주파수에서 최대 변위를 가지는 진동 형상을 나타낸 것이다.

이상의 시뮬레이션 결과로부터 대상물의 형태에 따른 피크 주파수의 변화를 확실히 알 수 있다. 표 2와 그림 10은 계산치와 실험치의 결과를 보다 정량적으로 나타낸 것이다. 이것들은 대상물의 초점영역이 부서져 없어진 부분의 크기에 따라 피크 주파수가 어떻게 변화하는지를 비교하기 위한 것이다.

여기서, 각 결과에 대한 오차율은 |(실험치 - 계산치) / 실험치| × 100%의 식으로 계산한 것이다.

V. 결론

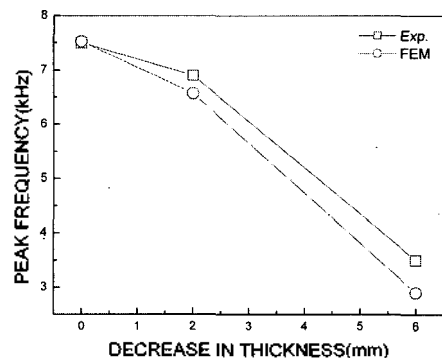


그림 11. 파쇄 부분의 두께에 의한 피크 주파수의 변화
 Fig. 11. The variation of the peak frequency to the decrease in thickness at the focus.

유한요소법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션의 결과로부터 논문에서 선정된 대상물의 형태에 따라 피크 주파수가 점점 저주파측으로 변화한다는 사실을 분명히 알게 되었다. 각각의 대상물은 피크 주파수에서 제1공진 모드의 형상을 가짐을 알 수 있었다. 이 결과는 파쇄되는 대상으로 실험에서 관찰한 파쇄과정을 그대로 재현한 모델을 대상으로 한 결과이므로, 파쇄가 진행됨에 따라, 피크 주파수가 점점 낮아진다는 사실을 분명히 확인한 것이다. 이 결과는 황동봉을 사용하여 진행한 실험에서 나타난 결과와 완전히 동일한 결과이다.

위의 결과에 따라, 본 논문에서는 파쇄가 진행됨에 따라 피크 주파수가 점차 낮아진다는 실험적인 결과를 이론적으로도 타당하다는 사실을 분명히 확인하였다. 이 결과는 본 논문의 목적에서 밝힌대로 방사음에 대한 실험적인 방법을 사용하여 관측된 결과가 이론적으로도 유효하다는 것을 분명히 입증한 것이다. 차후 방사음에 관계된 연구 면에서 이 결과가 참고가 될만한 많은 연구가 진행되기를 기대해 본다.

참고 문헌

1. Hiroshi Kanai et al, Power Difference in Spectrum of Sound Radiation before and after Break of Phantom by Piezoelectric Extracorporeal Shock Wave Lithotripter, JJAP, 33 (5B), 3159-3161, 1994.
2. 장운석, 박무훈, 체외 충격파 결석 파쇄 장치에 의한 대상물 파쇄 시의 발생음의 측정과 해석, 음향학회, 16 (6), 36-40, 1997.
3. 장운석, 압전식 충격파 체외 쇄석기 사용시 초점위치에 따른 대상물의 진동과 파쇄효율과의 상관성, 음향학회, 19 (5), 35-40, 2000.
4. 榎岡善克他, 衝撃波結石破砕装置のすべて, 東洋書店, 1991.
5. Matthew N. O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, (CRC Press, 1992).
6. O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The Finite Element Method*, (McGraw-Hill, 1989).
7. J. L. Volakis, A. Chatterjee and L. C. Kempel, *Finite Element Method for Electromagnetics: Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications*, IEEE Press, 1998.
8. 加川幸雄, 有限要素法による振動・音響工学/基礎と應用, 培風館, 1995.
9. 加川幸雄, 村井忠邦, 山淵隆夫, 土屋隆生, FEM Programs (3) 音場・電磁場生振動場—2次元/軸対称/3次元, 森北出版, 1998.
10. Yukio Kagawa et al, Numerical Simulation of a Piezoelectric Ultrasonic Motor and its Characteristic, Simulation, 8 (3), 69-76, 1989.

저자 약력

• 장운석 (Yun-Seok Jang)

1985. 2: 부산대 전자공학과 (공학사)
 1988. 2: 부경대 전자공학과 (공학석사)
 1995. 3: 일본 토호쿠대 전기 및 통신공학 (공학박사)
 1996. 4~현재: 부경대 전기전자공학부 부교수
 ※주요연구분야: 의용초음파, 음향신호처리

• 박규철 (Kyu-Chil Park)

1993년 2월 부산수산대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1995년 2월 부산수산대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 2000년 3월 일본 오카야마대학 자연과학연구과 졸업(공학박사)
 2000년 4월~2002년 2월 일본 아키타현립대학 시스템과학기술학부 연구원
 2002년 3월~현재 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 조교수로 재직중
 ※주관심분야: 음향신호처리, 수치해석, 최적화 및 역문제