

초음파 세정기의 음장

최주영^{*}, 김정호^{**}, 김진오^{**}, 조문재^{***}

(Acoustic Field in an Ultrasonic Cleaner)

(Jou Young Choi, Jung Ho Kim, Jin Oh Kim, Moon Jae Jho)

1. 서론

초음파의 활용은 동력적 활용과 계측적 활용 및 통신적 활용으로 분류될 수 있는데, 이중 동력적 활용의 한 예가 초음파 세정이다. 초음파 세정에는 파동 전파에 따라 세정액이 고주파 진동을 하여 발생하는 캐비테이션(cavitation)현상과 큰 진동 가속도 등이 활용된다 [1-4]. 액체 내에 가하여 준 강력한 초음파는 소밀파가 되어 압축력(정압)과 팽창력(부압)이 반복적으로 나타나게 된다. 부압 주기 때에 액중의 미세한 이물질들을 중심으로 기포가 발생하고, 이 기포는 다음의 압축 주기에 소멸한다. 이러한 기포는 1초에 수만번 씩 생성과 소멸을 거듭하면서 점점 구경이 커진다. 어느 일정 구경 이상이 되면 이 기포는 단번에 수축 파열하면서 매우 큰 충격파를 일으킨다. 이 충격파는 큰 압력을 발생시키며 동시에 순간적인 고열을 발생시켜 액체 내에 여러 가지 물리적 작용을 일으키고 화학적 작용을 촉진한다. 즉, 캐비테이션 기포가 파열하여 오염물질 사이에 틈을 만들고 그 틈으로 기포들이 침투하여 파열함으로써 완전하게 오염물질이 분리되게 된다.

초음파 세정기는 투입식 또는 단조식 등의 여러 종류가 있는데, 일반적으로 두 부분 -발전기와 진동부- 로 구성되어 있다 [3]. 발전기는 일정 주파수로 진동하는 고주파 전기 신호를 발생시켜 진동부로 보낸다. 진동부는 진동판과 여러개의 진동자로 이루어져 있다. 세정기에 사용된 진동자는 원통형이거나 원추형의 모양을 하고

있는데, 여기에서 발생된 진동은 진동판을 수직으로 가진한다. 진동판의 고주파 진동은 인접 액체인 세정액에 초음파를 발생시켜 세정액에서 초음파가 전파된다. 초음파의 전파경로 중에 세정 대상체가 놓이면 앞에서 설명한 원리에 의해 세정이 이루어진다. 이러한 초음파 세정은 TV 브라운관 생산라인이나 반도체 제조라인에서 여러 공정에 필수적으로 사용되고 있다.

초음파 세정 과정에 관해서, 피세정물에 부착된 이물질을 구형으로 이상화시켜 수치해법으로 해석한 논문이 보고되어 있다 [5-6]. 초음파 세정기를 장시간 사용할 때의 수명에 관련해서는, 캐비테이션에 의한 세정기 진동판의 침식(erosion) 손상을 저감하기위한 연구가 수행된 바 있다 [7]. 한편, 같은 세정 장치를 사용하더라도 세정 성능과 효과의 향상을 이룰 수 있는 연구도 필요하다. 이를 위해서 본 논문에서는 세정액 내의 음압(acoustic pressure) 분포를 평가하였다.

세정기 종류와 주파수 범위 및 파워 등의 선정은 세정 대상체와 오염물질에 따라 다른데 현장의 실무 경험에 많이 의존된다. 본 연구의 대상으로 삼은 초음파 세정기는 현재 브라운관 제조 공정에서 사용되고 있는 것으로서, Fig.1(a)와 같이 직육면체의 형태를 갖는 투입식이다. 작동 주파수는 28kHz이고 출력은 600W이다. 진동부의 진동자는 진동판 밀면에 부착되어 있다. 이러한 진동부가 Fig.1(b)에 보인 바와 같이 세정조 바닥에 설치되거나 벽면에 설치된다.

본 논문에서는 이러한 세정기에 의한 세정액 내 초음파 음압 분포를 파악하기 위해서, 탄성파 전파 이론을 바탕으로 1차원 단순모델에 대한 해석을 하여 물리적 현상을 이해하고, 실제 모델에 대하여 수치해석에 의해 음

* 삼성종합기술원 CAE팀 (현재, 삼성자동차 연구개발팀)

** 삼성종합기술원 수퍼컴응용실 CAE팀

***한국표준과학연구원 음향진동연구실

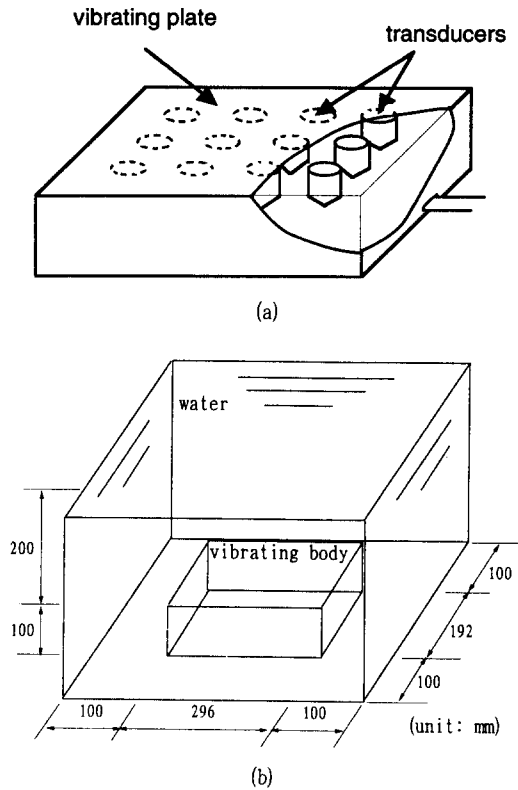


Fig. 1 Schematic diagram of an ultrasonic cleaner; (a) vibrating body, (b) cleaning tank with a vibrating body and a liquid.

압 분포를 구하였으며, 실험에 의해 해석결과를 입증하였다.

2. 탄성파 전파 이론

압축성 비점성 유체 내에서 탄성파 전파에 따른 압력변화, 즉 음압 $p(\vec{r}, t)$ 는 다음과 같은 파동 방정식의 지배를 받는다 [8].

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

여기서 \vec{r} 과 t 는 각각 공간좌표축과 시간좌표축을 나타내고, ∇^2 은 공간좌표에 대한 2차 미분(Laplacian)이며, c 는 파동 전파속도이다.

일정한 각주파수 ω 의 파동에서 음압 $p(\vec{r}, t)$ 가 시간에 대해 조화함수 형태로 변한다면 $p(\vec{r}, t) = P(\vec{r}) \exp(i\omega t)$ 라고 표현할 수 있으므로, 식(1)은 다음과 같이 헬름홀츠(Helmholtz) 방정식으로 표현된다.

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \quad (2)$$

여기서 k 는 파동수(wave number)로서 $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ 이다.

초음파 세정기에 의한 세정액 내의 파동 전파는 Fig. 2에 보인 바와 같은 두가지 경우로 단순화할 수 있다. Fig. 2(a)는 세정조 바닥에 수평으로 놓인 진동부로부터 수직방향으로 파동이 전파하여 수면에서 반사되는 경우이고, Fig. 2(b)는 세정조 수직벽면에 설치된 진동부로부터 수평방향으로 파동이 전파하여 다른쪽 벽면에서 반사되는 경우이다. 이와같이 평면파가 전파할 때에는 x 축 좌표만으로 공간좌표를 표현하여 식(2)를 다음과 같이 1차원화 할 수 있다.

$$\frac{d^2 P(x)}{dx^2} + k^2 P(x) = 0 \quad (3)$$

Fig. 2(a)와 같이 한쪽면($x=0$)에서 일정한 각주파수 ω 의 정현파 가진 $p(0, t) = P_0 \exp(i\omega t)$ 를 받고 다른쪽면($x=l$)에서 자유수면을 유지하는 경우, 경계조건은 다음과 같다.

$$x = 0 \text{ 에서 } P(0) = P_0 \quad (4a)$$

$$x = l \text{ 에서 } P(l) = 0 \quad (4b)$$

경계조건 (4a, b)를 만족시키는 식(3)의 해는

$$P(x) = \frac{P_0}{\sin kl} \sin k(\ell - x) \quad (5)$$

이므로 음압 $p(x, t)$ 는 다음과 같다.

$$p(x, t) = \frac{P_0}{\sin kl} \sin k(\ell - x) \exp(i\omega t) \quad (6)$$

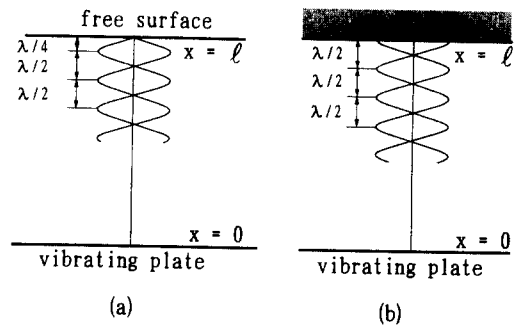


Fig. 2 One-dimensional models of plane wave propagation; (a) free-surface reflection, (b) rigid wall reflection.

한편 Fig. 2(b)와 같이 $x=l$ 인 반사면에서 입자진동이 억제되는 경우 진동속도 $v=0$ 이므로, 경계조건은 다음과 같다.

$$x = 0 \text{ 에서 } P(0) = 0 \quad (7a)$$

$$x = l \text{ 에서 } dP/dx (= -i\omega\rho v) = 0 \quad (7b)$$

경계조건 (7a, b)를 만족시키는 식 (3)의 해는

$$P(x) = \frac{P_0}{\cos kl} \cos k(\ell - x) \quad (8)$$

이므로 음압 $p(x, t)$ 는 다음과 같다.

$$p(x, t) = \frac{P_0}{\cos kl} \cos k(\ell - x) \exp(i\omega t) \quad (9)$$

식 (6)과 (9)에서 $\exp(i\omega t)$ 는 시간 변화에 따라 -1부터 1까지 주기적으로 변화하는 양이므로, 식 (6)과 (9)로 표현되는 음압의 크기는 공간에서 각각 Fig. 2(a)와 (b)에 보인 바와 같이 반사면으로 부터 시작하는 두 sine곡선 (또는 cosine곡선) 사이를 진동하는 정지파(靜止波, standing wave)를 형성한다. 정지파가 형성되면 Fig. 2에서와 같이 음압이 항상 0인 지점과 항상 최대인 지점이 일정 거리 간격으로 나타난다.

3. 세정액 내 음압분포 해석

세정기 진동부는 세정조 안에 Fig. 1(b)와 같이 놓이게 된다. 이런 경우 세정액 내의 음압분포를 해석할 때에는 앞절에서 설명한 1차원 파동 해석으로는 불충분하다. 2차원 또는 3차원 파동의 해석을 함에 있어서 영역의 형상이 Fig. 1(b)와 같이 약간이라도 복잡한 경우에는 수치해법에 의해 파동 방정식의 해를 구하게 된다. 본 논문에서는 반사면이 Fig. 2(a)와 같이 자유수면인 경우와, Fig. 2(b)와 같이 강제벽면인 경우에 대해 해석하였다.

3.1 경계요소법에 의한 수치해석

수치 해석을 위해 본 논문에서는 경계요소법을 이용하였으며, 상용 프로그램인 SYSNOISE의 BEM Interior를 사용하였다. 요소 분할에는 상용 프로그램인 IDEAS의 SUPERTAB을 사용하였고, 요소의 크기는 파장의 1/5이내로 하여 약 5000개의 셸(shell)요소와 약 5400개의 절점이 형성되었다. 진동판(스테인레스강)의 음향 임피던스가 세정액(물)의 음향 임피던스보다 훨씬 커서

세정액에서의 초음파가 진동판의 진동에 영향을 거의 미치지 못하므로, 일방 연성(one-way coupling) 문제로 간주하였다.

앞선 논문 [7]에서는 28kHz로 가진되는 진동판의 진동변위가 NASTRAN을 사용한 유한요소 해석에 의해 구해졌다. 그결과를 본 논문에서는 진동판 면에서의 진동속도로 환산하여 세정액의 경계조건으로 받아들였다. 다른 경계에서는 자유수면인 경우 음압 p 가 0이고 강제벽면의 경우 진동속도 v 가 0인 조건을 설정하였다. 각 경계조건을 부과한 후 해석영역을 둘러싼 면에서의 음압과 진동속도를 구하고 그 결과를 바탕으로 원하는 위치에서의 음압을 계산하였다.

실제의 파동은 전파 매질에서의 에너지 손실에 의해 크기가 감소한다. 특히 기체에서 손실이 크기때문에 캐비테이션에 의해 발생된 기포를 초음파가 통과할 때 감쇄가 일어난다. 그러나, 본 해석에서는 이 영향을 고려할 수 없어 에너지 손실이 없는 전파에 대한 해석을 수행하였다.

3.2 수치해석 결과

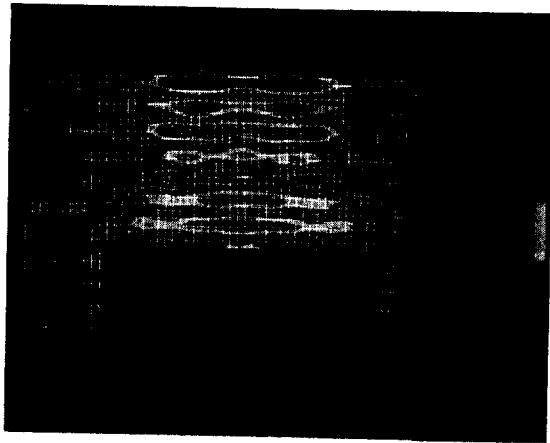
Fig. 1(b)에 보인 3차원 공간에서의 음압분포 계산 결과를 두가지 평면에 표현하였다. 즉, 진동판의 장축방향 수직대칭면과 단축방향 수직대칭면에서의 음압분포를 표현하였다.

A. 자유수면의 경우

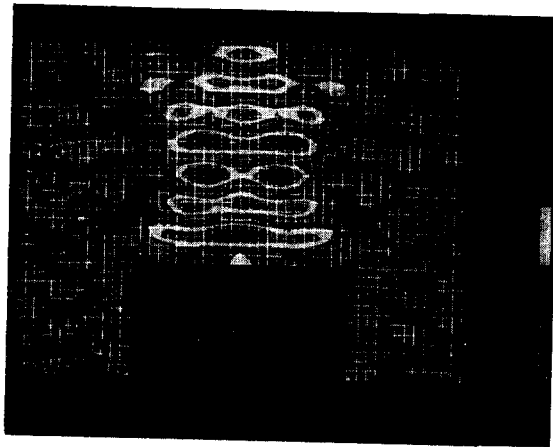
음압이 0인 조건의 자유수면을 경계로 하는 경우에 대한 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 (a), (b)는 각각 장축방향과 단축방향의 수직대칭면에서의 음압 분포이다. 이들 그림에서 보면 수면에서는 0에 가까운 음압분포를 보이며 최대 음압이 거의 일정한 거리 간격으로 반복적으로 나타남을 알 수 있다. 이 거리 간격은 28mm로서 파장의 1/2에 근사하다. 이는 1차원 파동 해석에 의해 예견된 Fig. 2(a)의 경향과 일치한다.

B. 강제벽면의 경우

진동부가 한쪽 벽면에 설치되어 있어 초음파가 다른 쪽 벽면에서 반사하는 경우에 대한 해석결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 음압분포가 극대인 위치는 강제벽면으로부터 1/2파장 거리간격으로 반복적으로 나타나고 있다. 이는 1차원 파동 해석에 의해 예견된 Fig. 2(b)의 경향과 일치한다.

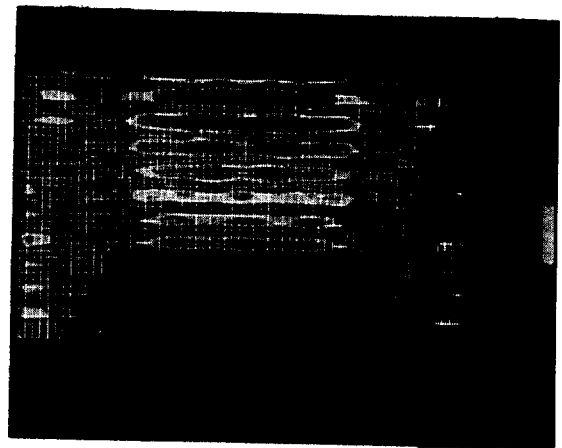


(a)

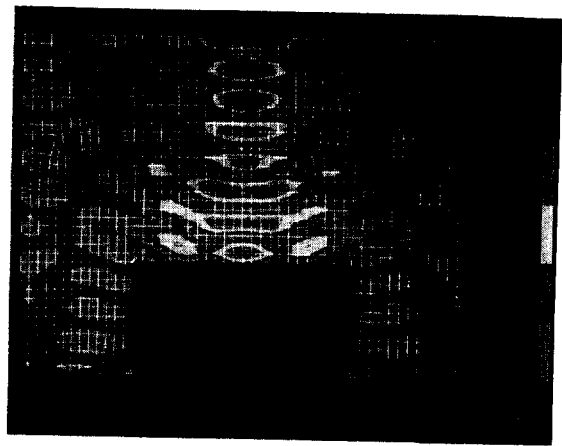


(b)

Fig. 3 Calculated acoustic pressure distribution on the vertically-symmetric planes in the cleaning tank with free-surface reflection; (a) major-axis plane, (b) minor-axis plane.



(a)



(b)

Fig. 4 Calculated acoustic pressure distribution on the vertically-symmetric planes in the cleaning tank with rigid-wall reflection; (a) major-axis plane, (b) minor-axis plane.

4. 음압 분포 측정 실험

수치해법으로 구한 결과의 타당성을 확인하기 위하여 세정조 세정액 내의 초음파 음압분포를 측정하였다. 반사면 조건은 Fig. 2 (a)와 같이 자유수면인 경우에 한하였다.

4.1 실험 방법

하이드로폰으로 수중 음압을 감지하고 음압크기를 초음파미터 (NTK UTK-30)로 전압으로 환산하여 DVM에서 전압크기를 읽었다. 세정기 진동부는 무향수조에 설치하여 벽면과 바닥에서의 초음파 반사를 배제하였고, 자

유수면의 상태에서 두 수직대칭면에서 측정을 행하였다.

하이드로폰 팁의 길이가 약 20mm이므로 수면으로부터의 수직거리 20mm부터 105mm까지의 범위에서 측정하였다. 진동판과 수면과의 거리인 214mm 범위를 다 포함하여 측정하려면 상당한 시간이 걸리게 되어 이에 따른 오차를 수반할 가능성이 있기 때문에 105mm까지로 제한하였다. 음압의 크기는 측정에서 구한 전압값으로부터 환산하여 구할 수 있으나 측정장치의 교정에 어려움이 있어 정확한 음압 절대치를 산출하기는 어려우므로, 음압의 상대치에 의한 음압분포패턴을 보는 방식으로 활용하였다.

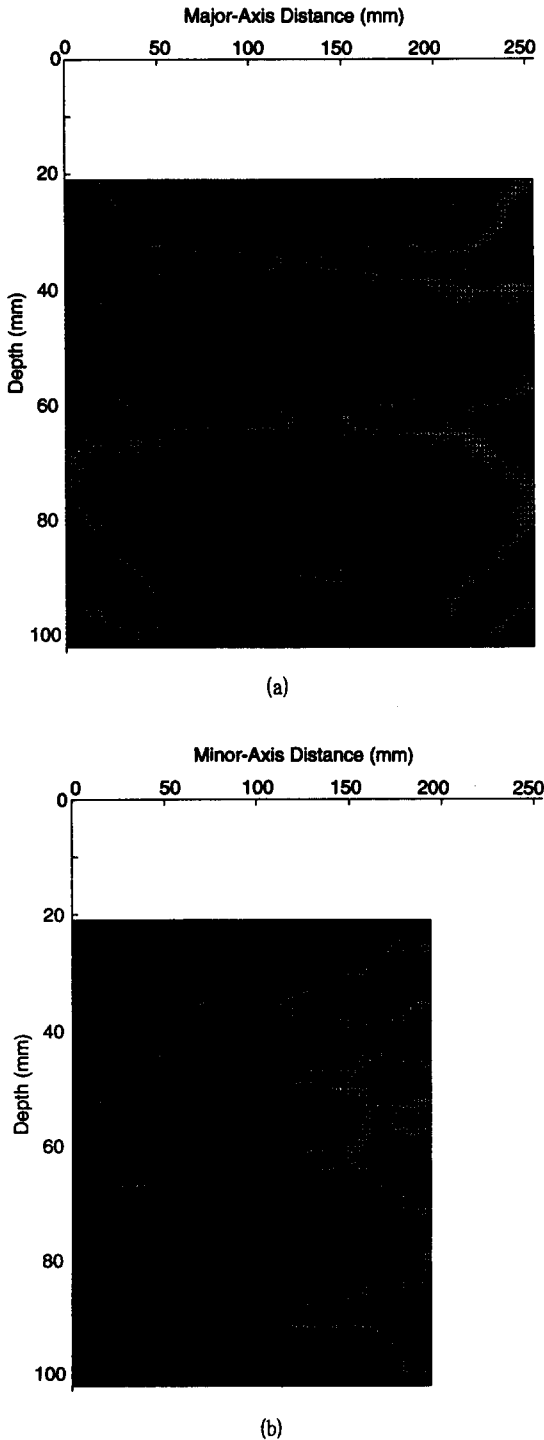


Fig. 5 Measured acoustic pressure distribution on the vertically-symmetric planes in the cleaning tank with free-surface reflection; (a) major-axis plane, (b) minor-axis plane.

4.2 실험 결과

음압 분포 측정결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 (a), (b)는 각각 장축방향과 단축방향 수직대칭면의 음압 분포이다. 이 실험결과에서 보면 음압이 극대 (또는 극소)인 위치는 약 28mm 거리간격을 보이고 있다. 실제 측정된 초음파 주파수는 27.1kHz였고 물의 온도를 고려한 음파의 전파속도는 1490m/s이므로 [9], 이에 따른 파장의 1/2은 27.5mm가 된다. 따라서 측정된 음압분포 결과는 평면파 이론에 근거한 음압분포 계산치와 유사하게 반파장 간격으로 음압 크기가 주기성을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 5 (a), (b)의 실험결과는 앞절의 수치해석 결과인 Fig. 3 (a), (b)와 비교된다. Fig. 3 (a), (b)에서 진동판과 수면의 거리는 200mm이므로 수면으로부터 진동판까지의 반 정도의 거리가 실험이 행해진 거리와 일치한다. 계산에서는 초음파의 주파수를 28kHz로 하였고 실험에 실제 사용된 주파수는 27.1kHz이나 파장에서 3%의 차이 밖에 안된다. 수치해석에 의한 결과와 실험에 의한 결과가 유사한 경향을 보이고 있다. 따라서 이론적으로 계산된 음압분포는 타당성을 가지며 어느정도 정확성을 가지는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

초음파 세정기에 의한 세정 성능의 향상을 위한 연구로서, 세정조 내에서의 초음파 전파 현상을 이론적으로 밝히고, 수치해석에 의해 실제 상황의 음압 분포를 구하였으며, 실험에 의해 세정액 내 음압 분포를 확인하였다. 세정액 내의 음압 분포는 세정기 진동판으로부터의 거리에 따라 반파장 간격으로 극대점 또는 극소점이 반복된다. 이에 근거하여 세정 성능 향상 대책이 제시될 수 있게 되었다 [10].

참 고 문 헌

1. 島川正憲, 1975, 超音波工學, 工業調査會, 東京, pp. 441-479.
2. 井出正男, 1980, 超音波應用 (增補改訂版), 電波實驗社, 東京, pp. 8-62.
3. 森田克美, 1989, 超音波洗淨, 近代編集社, 東京, pp. 21-120.

4. 日本電子機械工業會, 1993, 超音波工學, 코로나社, 東京, pp. 230-255.
5. L. G. Olson, 1988, "Finite element model for ultrasonic cleaning", Journal of Sound and Vibration, Vol. 126, pp. 387-405.
6. L. G. Olson, 1993, "A simplified finite element model for ultrasonic cleaning", Journal of Sound and Vibration, Vol. 161, pp. 137-156.
7. 김정호, 최주영, 김진오, 1995, "초음파 세정기의 진동과 손상", 대한기계학회 95년계학술대회 논문집.
8. F. Fahy, 1985, Sound and Structural Vibration, Academic, London, p. 6.
9. V. A. Del Crosso and C. W. Mader, 1972, "Speed of Sound in Pure Water", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 52, pp. 1442-1446.
10. 김진오, 김정호, 최주영, 조문재, "초음파 세정기의 진동/음향 해석에 의한 수명/성능 향상 연구", (준비 중).