

## 관 내 세정을 위한 초음파 음장 연구

### A Study on Ultrasonic Sould-fields for Cleaning in a Pipe

이 정 구\* · 김 진 오†

Jung Gu Lee and Jin Oh Kim

(2005년 2월 15일 접수 : 2005년 4월 14일 심사완료)

**Key Words** : Ultrasonic Cleaning(초음파 세정), Cylindrical Transducer(원통형 변환기), Sound Field(음장)

#### ABSTRACT

This paper presents some results of research for applying ultrasonic cleaning to an interior wall of cylindrical pipe. As the cleaning is achieved better for higher sound pressure, ultrasonic sound field in a cylindrical container is considered. The paper identifies nonuniform sound field established by the radiation of a cylindrical transducer driven at resonant frequency. Numerical analysis predicts the sound pressure distribution, and experiment verifies the trend of analysis results. Experiment observes the cleaning effect, and this paper suggests the possibility of using a cylindrical ultrasonic cleaning device.

#### 1. 서 론

열 교환기 또는 발전설비의 배관 내부에는 용수 중의 불순물 성분이 고온에서 화학작용을 일으켜 화합물질로 관 벽에 부착되어 간다. 스케일이라 불리는 이러한 물질은 열 전달률을 감소시켜 에너지 손실을 초래하고, 관 내 단면적을 감소시켜 용수의 흐름에 지장을 주게 된다. 스케일 제거(scaling)을 위해 여러 가지 방법이 시행되고 있으며, 현재 가장 일반적으로 이용되는 방법은 화학 물질을 사용하는 세관법이다. 그러나 이 방법은 조업 중단과 폐기물 처리 등의 문제를 안고 있다. 화학 물질을 사용하지 않는 물리적 세정 방법으로 초음파를 이용하는 스케일 제거 방법이 제안되고 있다. 화학적 세정법의 단점을 극복할 수 있는 장점이 있어 초음파 세정법이 관심을 끌고 있고,<sup>(1)</sup> 그 원리는 어느 정도 알려져 있다. 그러나 배

관과 같은 특정 분야에 대해서는 효율 향상 방안이나 구체적 시행 방안에 관해 보고된 바가 없어 이에 대한 연구가 필요하다.

초음파 세정에는 파동 전파에 따라 세정액(대개 물)이 고주파 진동을 하여 발생하는 캐비테이션(cavitation) 현상<sup>(2)</sup>과 큰 진동 가속도<sup>(3)</sup> 등이 활용된다. 세정액 내에 가하여 준 강력한 초음파는 소밀파가 되어 압축력(정압)과 팽창력(부압)이 반복적으로 나타나게 된다. 부압 주기 때에 액체 중의 미세한 이물질들 중심으로 기포가 발생하고, 이 기포는 다음의 압축 주기 때에 소멸한다. 이러한 기포는 1초에 수만 번씩 생성과 소멸을 거듭하면서 점점 구경이 커진다. 어느 일정 구경 이상이 되면 이 기포는 단번에 수축 파열하면서 매우 큰 충격파를 일으킨다. 이 충격파에 의해 캐비테이션 기포가 파열하여 이물질 사이에 틈을 만들고 그 틈으로 기포들이 침투하여 파열함으로써 완전하게 이물질이 분리되게 된다.<sup>(4)</sup>

이러한 초음파 세정은 TV 모니터 및 액정화면(LCD) 생산라인과 반도체 제조라인에서 여러 공정에 필수적으로 사용되고 있다.<sup>(4)</sup> 또한 보일러의 스케일 방지에 활용하고자 연구되고 있다.<sup>(5)</sup> 이와 같은

† 책임저자 : 정희원, 숭실대학교 공과대학 기계공학과  
E-mail : jokim@ssu.ac.kr  
Tel : (02) 820-0662, Fax : (02) 820-0668

\* 숭실대학교 대학원 기계공학과

초음파 세정 장치들은 공통적으로 용기의 외부에서 고주파 진동을 가하여 용기 내부의 액체에 초음파 음장을 형성시킨다. 이런 방식은 외부에서 진동을 가할 수 있는 용기에서는 효과적으로 사용될 수 있다. 그러나 배관이 다른 장치로 둘러싸여 있거나 땅 속에 묻혀 있는 경우에는 외부에서 진동을 가할 수 없다. 그래서 관 내부에 삽입되어 국부적으로 초음파 세정을 하고 차츰 이동되면서 배관 전 구간에 걸쳐 스케일링을 하는 초음파 세정 방법이 제안되어 있다.<sup>(6)</sup> 이 논문에서는 이 방법의 타당성을 이론적 및 실험적으로 검토하고 세정 성능을 향상시킬 방안을 제시하고자 한다. 초음파 세정의 효율은 캐비테이션 발생량과 직결된다. 보고된 바에 따르면 초음파 음압(부압)이 클수록 캐비테이션 기포 발생이 많아진다.<sup>(7,8)</sup> 따라서 해석을 통한 세정 효율 평가는 초음파의 반복적 정압/부압 크기인 음압을 계산함으로써 이루어 질 수 있다.

이 논문에서 대상으로 하는 배관과 그 내부의 초음파 발생기의 단면은 Fig. 1과 같다. 이는 단면이 원형인 용기와 그 내부 중앙의 원통형 진동부로 구성된다. 초음파 발생 장치로 막대형 진동부<sup>(9)</sup>가 소개된 바도 있는데, 이 논문에서는 원통형 압전 변환기<sup>(10,11)</sup>를 사용한다. 앞선 연구 보고<sup>(12)</sup>는 육면체형 초음파 세정기 한쪽 면에서 가해지는 고주파 진동에 의한 초음파 음장을 해석하여 초음파 세정 성능을 예측하고 성능 향상 방안을 제시하였다. 이러한 결과와 연계하여 이 논문은 원통형 용기에 해당하는 배관 내의 중앙에서 방사되는 고주파 진동에 의한 초음파 음장을 다룬다. 변환기에 의해 방사되는 초음파에 의한 배관 내부의 음장 형성을 밝히고, 수치해석에 의해 음압분

포 상황을 예측하며, 그 결과를 실험에 의해 입증한다. 그리고 원통 내벽의 이물질이 초음파에 의해 세정되는 효과를 확인한다. 또한 배관 내 액체에 대한 초음파 음장 해석결과에 근거하여 세정 성능을 향상시킬 방안을 제시한다.

## 2. 음장 평가 방법

변환기가 방사하는 초음파에 의해 원통 내부에 형성되는 불균일 음장을 예측하기 위하여, 경계요소법을 이용하는 수치해석으로 음압분포를 계산한다. 일반적인 상황에 대한 해석을 하기에 앞서 방법의 타당성을 검증하기 위하여, 원통형 관의 중심 축과 원통형 변환기의 중심 축이 일치하는 동심원통에 대해 해석하여 이론적 예측과 비교한다.

### 2.1 이론적 예측

축대칭으로서 반경방향으로 진동하는 1차원 파동에 대해서는 이론적 예측이 가능하다. 압축성 비점성 유체에서 탄성과 전파에 따른 압력 변화, 즉 음압  $p(r, t)$ 는 반경방향 좌표  $r$ 과 시간  $t$ 로 미분되는 파동 방정식의 지배를 받는다.<sup>(13)</sup> 구동진동수  $\omega$ 로 조화가진 되는 변환기에 의해 형성되는 파동의 음압을  $p(r, t) = P(r)e^{i\omega t}$ 로 변수분리하여 대입하면 파동 방정식은 다음과 같은 헬름홀츠(Helmholtz) 방정식으로 바뀌어 표현된다.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dP}{dr} \right) + k^2 P = 0 \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 파수(wavenumber)로서  $k = \omega/c$ 이고,  $c$ 는 파동 전파속도이다.

식 (1)은 베셀(Bessel) 방정식의 특수한 경우로서, 그 해는 다음과 같은 형태가 된다.

$$P(r) = A J_0(kr) + B Y_0(kr) \quad (2)$$

여기서  $J_0$ 와  $Y_0$ 는 각각 기저를 0으로 하는 제 1종 및 제 2종 베셀함수이고, 상수  $A$ 와  $B$ 는 경계조건에 따라 결정된다.

원통형 세정은 Fig. 1과 같이 중심 쪽 면( $r = a$ )에서 일정한 진동수  $\omega$ 의 조화가진  $p(a, t) = P_0 e^{i\omega t}$ 에 의해 이루어진다. 강체 벽면( $r = b$ )인 반사면에서는 입자 진동이 억제된다. 따라서 경계 조건은 다음

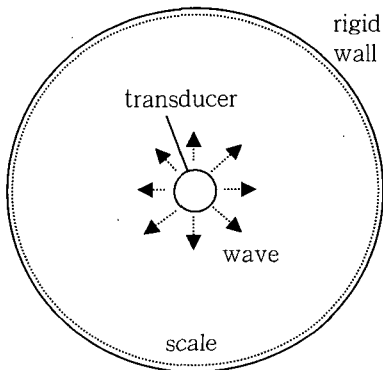


Fig. 1 Cross-sectional diagram of ultrasonic cleaning in a pipe

과 같다.

$$P(a) = P_0 \cdot \left. \frac{dP}{dr} \right|_{r=b} = 0 \quad (3a,b)$$

경계조건 (3a, b)를 만족시키는 A와 B를 구하여 식 (2)에 대입하면 P(r)은 다음과 같다.

$$P(r) = P_0 \frac{Y_1(kb)J_0(kr) - J_1(kb)Y_0(kr)}{Y_1(kb)J_0(ka) - J_1(kb)Y_0(ka)} \quad (4)$$

음압 p(r, t)에서 e<sup>iωt</sup>는 시간 변화에 따라 크기가 -1부터 1까지 주기적으로 변하는 양이므로, 식 (4)로 표현되는 음압의 크기는 변환기와 원통 벽면 사이에서 진동하는 정상파(定常波, standing wave)를 형성한다.

실제 원통의 벽면까지의 반지름 b(= 195 mm), 변환기의 바깥 반지름 a(= 15 mm), 물에서의 파동 전파속도 c(= 1490 m/s), 공진주파수에 해당하는 변환기 구동진동수 ω(= 2π × 36.8 × 10<sup>3</sup> rad/s)<sup>(10,11)</sup>을 식 (4)에 대입하여 P(r)을 계산한다. 반경 방향 위치에 따른 음압을 계산하고 최대값을 1로 정규화하여 Fig. 2에 실선으로 나타내었다. 이 음압분포는 벽면에서부터 거의 일정한 간격으로 극대값이 반복됨을 보여준다. 그 간격은 약 20 mm로서 파장의 1/2에 해당된다. 경계조건 (3b)의 적용을 받으므로 벽면에서 음압 극대값이 나타나는 것이 Fig. 2의 음압분포도에서 확인된다.

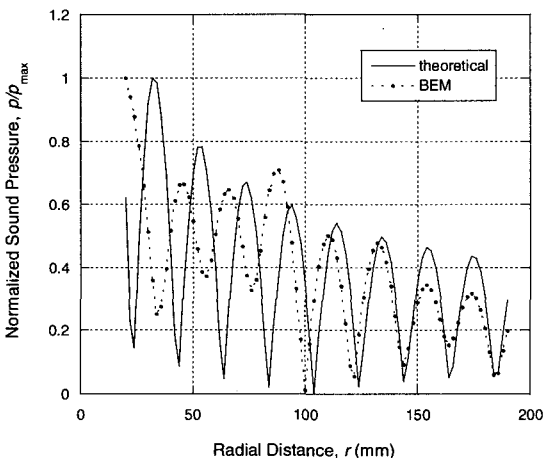


Fig. 2 Sound pressure graphs calculated by theoretical analysis and BEM

## 2.2 경계요소법에 의한 수치해석

앞 절에서 원통형 변환기의 중심이 관의 중심에 일치한 동심 원통에 대해서 관 내의 음압 분포를 이론적으로 구하였다. 일반적으로는 두 원통이 편심되어 있는데, 이러한 상황에 대해 이론적으로 해석하는 것은 너무 복잡하다. 그래서 경계요소법<sup>(14)</sup>에 의한 수치해석을 하며, 상용 프로그램인 SYSNOISE의 BEM Interior<sup>(15)</sup>를 이용하였다. 수치 해석이 타당하게 이루어지는지 확인하기 위하여, 동심 원통 내의 음압분포를 수치해석으로 구하고 이론적 예측과 비교한다. 해석 결과들은 다음 절에서 실험 결과와도 비교된다.

실제의 파동은 전파매질에서의 에너지 손실에 의해 크기가 감소한다. 특히 기체에서 손실이 있기 때문에 캐비테이션에 의해 발생된 기포를 초음파가 통과할 때 감쇄(attenuation)가 일어난다.<sup>(16)</sup> 그러나 이 논문에서는 이 영향을 무시하고 에너지 손실이 없는 전파에 대한 해석을 하였다.

편심되지 않은 원통 내의 음압 분포를 계산하여, 반경 방향 위치에 따른 음압을 Fig. 2에 점선으로 나타내었다. 이론적으로 예측된 바와 같이, 벽면에서 음압 극대값이 나타나고 음압 극대값이 거의 일정한 간격으로 반복적으로 나타난다. 세정은 원통 벽면에서 이루어지므로 벽면의 음압이 관심사이나, 이와 같은 음압 분포를 살펴봄으로써 해석결과가 타당함을 확인할 수 있다

## 3. 관 내 초음파 음장 및 세정 효과

앞 절에서 검증한 수치해석 과정을 이용해서, 일반적인 상황에 대하여 음압을 구하여 세정 가능성을 확인한다. 또한 실험을 통하여 초음파 세정을 시행함에 있어서, 음압분포를 측정하고 세정효과를 관찰한다

### 3.1 수치해석 결과

원통형 변환기의 중심 축이 원통형 관의 중심축에서 각각 5, 10, 20, 30 mm 편심된 경우에 대해서 경계요소해석을 하였다. 그 중 5 mm 편심된 원통 내의 단면의 음압 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 일반적 상황인 편심된 원통에서도 벽면에서 균일한 음압 극대값이 발생하는 것이 확인된다. 이 결과에서 알 수 있듯이 변환기 중심이 관 중심에서 떨어진 현실적 상황에서도 관 벽면 세정이 가능하다.

편심된 방향으로 위치에 따라 계산된 음압을 정규화하여 Fig. 4에 나타내었다. 이 경우에는 동심 원통에서처럼 정상파 형성에 따른 규칙적 음압 분포가 보여진다. 이를 통해 해석 결과의 타당성을 간접적으로 확인하고, 다음 절에서 실험 결과와 비교해 볼 수 있다.

### 3.2 음압분포 측정 실험

원통형 압전 변환기를 사용하여 원통형 관 내에서 초음파를 발생시킨다. 사용한 원통형 변환기는 아이에스텍(주) 제품으로서, 재질은 미국 EDO사의 PZT (EC-64)이고, 두께는 2.3mm이며 외부 반지름이 14.3mm이고 길이가 20mm이다. 세정액인 물의 음향 임피던스와의 정합 및 방수를 위해서 변환기의 바깥면을 우레탄으로 얇게 몰딩하였다. 원통형 압전 변환기의 사진을 Fig. 5(a)에 나타내었다. 이 변환기의 압전 고유진동수는 Impedance Gain/Phase Analyzer (HP 4194A)로 측정된 결과 36.8 kHz로서, 몰딩 전에 비해 2 kHz 낮아졌다.

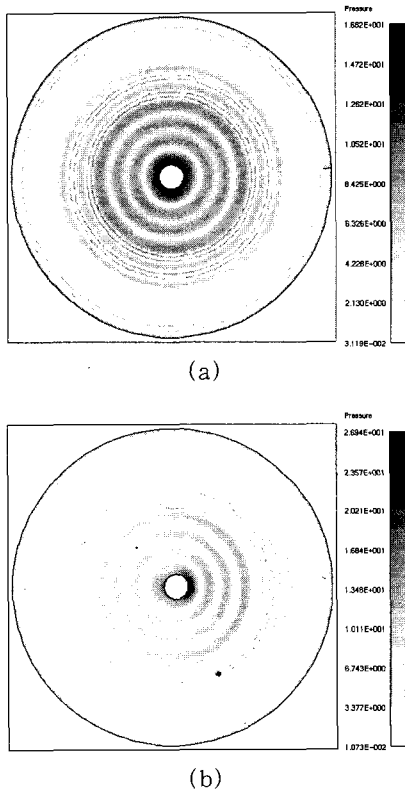


Fig. 3 Sound pressure distribution calculated by BEM. (a) concentric, (b) 5-mm eccentric cylinders

음압을 측정하기 위한 실험 장치는 Fig. 5(b)에 개략적으로 나타낸 바와 같이 구성된다. 신호 발생기 (Agilent 33120A)에서 변환기의 압전 고유진동수로 발생된 정현파 신호가 파워 증폭기(Eliezer HA400)를 거쳐 압전 변환기에 입력된다. 전기 신호를 받은 압전 변환기는 반경방향으로 진동하며 전파하는 초음파를 발생시킨다. 전파하던 초음파는 원통형 관의 벽면에서 반사되어 입사파와 중첩되어 관 내에 음장을 형성한다.

정밀이송장치(P&S Mechanics PSSG 3-330)에 설치된 하이드로폰(B&K 8103)에서 감지되는 음압 크기를 전하 증폭기 (B&K 2692)를 거쳐 오실로스코

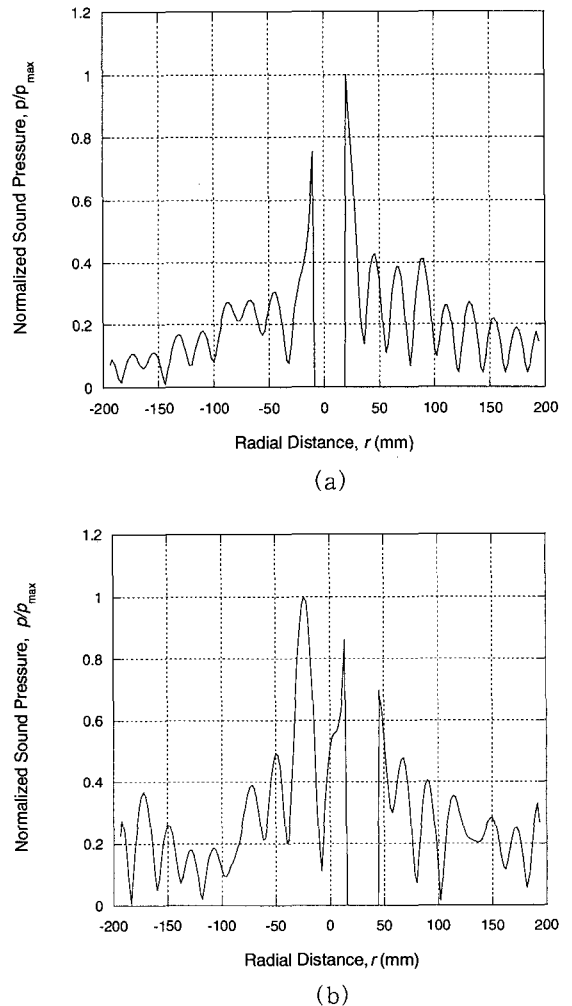


Fig. 4 Sound pressure graphs calculated by BEM. (a) 5-mm, (b) 30-mm eccentric cylinders

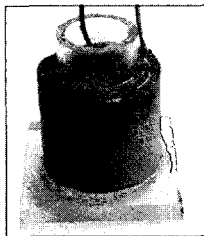
코프(Tektronix TDS3032)에서 관측한다. 반경 방향으로 2 mm 간격으로 하이드로폰을 이동해 가며 음압 크기를 측정함으로써 음압 분포를 구한다. 측정된 전압 값으로부터 환산하여 음압 값을 구할 수도 있으나, 이는 신호 발생기의 출력 크기나 파워 증폭기의 증폭률에 따라 달라지므로, 음압의 상대값에 의한 음압 분포 패턴을 보는 방식으로 하였다.

음압 측정에 사용한 하이드로폰은 지름이 10 mm 이므로 한 지점의 음압이라기보다는 지름 10 mm인 원 영역의 평균 음압이 측정된다. 초소형 하이드로폰이 갖추어지지 않아 이러한 한계를 감수할 수밖에 없었으나, 음압 분포의 경향을 파악할 수는 있다.

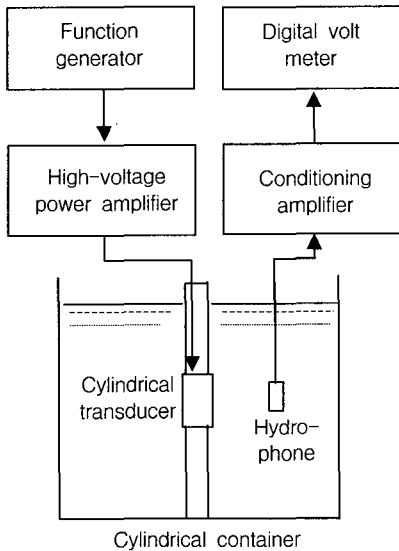
우선 동심 원통 내의 음압을 측정하였고, 3회 반복한 측정의 결과를 Fig. 6(a)에 나타내었다. 여기서 그

래프는 평균값으로 나타낸 것이고, 각 데이터 점에서 수직선은 표준편차를 나타낸다. Fig. 2의 해석결과와 마찬가지로 음압의 극대점이 일정한 간격을 두고 반복적으로 나타나고 벽면에서 음압의 극대값이 나타난다. 음압 극대점의 간격은 약 23 mm로서, 이론적 해석결과와는 약 2 mm 정도 차이가 난다. 이것은 직경이 10 mm인 하이드로폰을 이용하여 음압을 측정하는 과정 중 하이드로폰이 관내에 음장에 영향을 주기 때문이라 사료된다. 따라서 음압 측정 결과는 해석 결과와 정확히 비교되기는 어렵다.

5 mm 편심된 원통 내에서 중심에서 편심된 방향으로 이동해가며 음압을 측정하였다. 3회 반복한 측정 결과를 Fig. 6(b)에 나타내었다. Fig. 4(a)에 보인

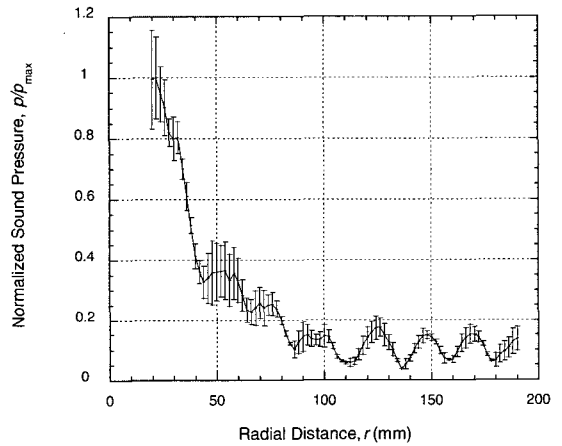


(a)

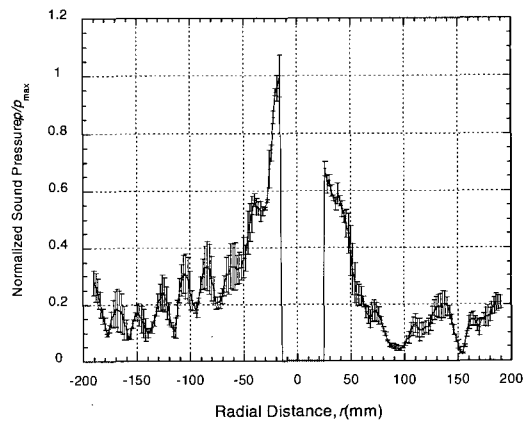


(b)

Fig. 5 Experimental apparatus. (a) photograph of a cylindrical transducer molded with urethane, (b) schematic diagram of a measurement system



(a)



(b)

Fig. 6 Measured sound pressure graphs. (a) concentric, (b) 5-mm eccentric cylinders

수치 해석 결과와 비교적 비슷한 양상을 보이며, 일정 간격으로 음압의 극대점이 나타나는 경향을 확인하였다.

### 3.3 세정 효과 관찰 및 성능 향상 방안

원통 벽에서 초음파에 의한 세정 효과를 확인하기 위해서, 투명한 원통 벽면에 이물질을 묻혀놓고 초음파를 가하였다. 사용한 이물질은 Bees-wax와 색소(유용성)의 혼합물로서, 물에 용해되지 않는 지용성이다. 36.8 kHz의 초음파를 발생시키면서 이물질의 변화를 관찰하였다. 초음파의 주파수는 원통 구조물의 고유진동수 보다 상당히 높으므로, 초음파가 가해지는 동안에도 원통 벽면은 강제와 같은 역할을 한다. 관찰된 변화를 시간 순으로 Fig. 7에 나타내었다. 초음파를 가하는 시간이 흐름에 따라 벽면에 붙어있는 이물질이 차츰 제거되는 것을 확인하였다.

이론적인 예측을 검토해 보면, 식 (4)의 분모를 최소화 하도록  $a$ 와  $b$ 의 값이 결정될 때 동일한  $P_0$  값에서도 음압이 최대가 된다. 따라서 관의 반지름이 주어져 있을 때 원통형 변환기의 반지름을 적절히 선정함으로써 동일한 변환기 입력 파워에 있어서도 더 큰 음압을 관 벽면에 형성시키고 세정 성능을 증대시킬 수 있다.

## 4. 결 론

원통형 관 내부 벽의 이물질을 제거하기 위하여 초음파를 활용하여 세정하는 방법을 다루었다. 원통형 용기 내에서 원통형 압전 변환기에 의해 형성되는 초음파 음장을 구하였고, 원통 벽면에서 음압 극대값이 나타나 세정이 이루어질 수 있음을 확인하였다. 벽면과 변환기 사이의 간격에 따라 벽면에서의 음압이 달라지며, 음압 크기를 최대화 하는 간격을 계산할 수 있음을 보였다. 원통 관 내부 벽면의 이물질이 초음파의 영향을 받아 시간이 지남에 따라 차츰 소멸하는 것을 관찰함으로써, 관을 외부에서 가질할 수 없는 경우에 관 내의 원통형 변환기로부터 방사되는 초음파가 관 내부 벽면의 이물질을 제거하는 데에 유용한 방법임을 입증하였다.

## 후 기

이 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌습니다. 실험에 사용하도록 변환기를 제공한 아이에스텍(주)에 감사합니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 森田克美, 1989, 超音波洗淨, 近代編集社, 東京, pp. 21~120.
- (2) 김진오, 김정호, 최주영, 조문재, 1995, "초음파 세정기의 진동/음향 해석에 의한 수명/성능 향상 연구", 대한기계학회논문집, 제 19 권, 제 11 호, pp. 2939~2953.
- (3) Choi, S., Kim, J. O. and Kim, Y.-H., 1997, "Acoustic Analysis of a High-Frequency Ultrasonic Cleaner", The Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 16, No. 1E, pp. 49~56.
- (4) 김진오, 1998, "초음파 기술 응용 사례", 기계저널, 제 38 권, 제 3 호, pp. 34~39.
- (5) 이양래, 1998, "초음파를 이용한 스케일 방지", 기계저널, 제 38 권, 제 3 호, pp. 44~48.
- (6) Laker, K. T., 2002, "Ultrasonic Cleanout Tool and Method of use Thereof," United States Patent 6,474,349 B1.
- (7) Akhatov, I., Parltitz, U. and Lauterborn, W.,

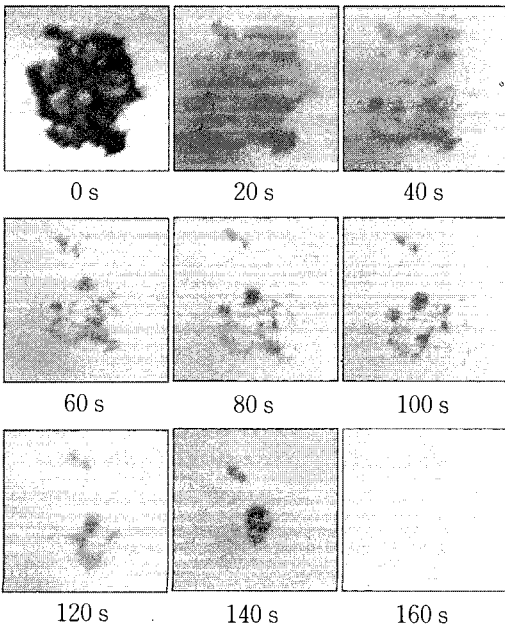


Fig. 7 Observation of ultrasonic cleaning

1994, "Pattern Formation in Acoustic Cavitation", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 96, No. 6, pp. 3627~3635.

(8) 박호영, 기포동역학, 2002, 드림미디어, 서울, 제 2 장.

(9) 윤양기, 강국진, 노용래, 2000, "유한요소해석을 이용한 푸쉬-풀형 고출력 초음파 트랜스듀서 설계", 한국음향학회지, 제 19 권, 제 4 호, pp. 107~114.

(10) 김진오, 정형근, 2001, "원통형 압전 변환기의 반경방향 진동 특성", 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 7 호, pp. 247~252.

(11) 황교광, 김진오, 2003, "원통형 압전 변환기의 반경방향 고유진동 특성 연구", 한국소음진동공학회 논문집, 제 13 권, 제 3 호, pp. 155~163.

(12) Kim, J. O., Choi, S. H. and Kim, J. H., 1999, "Vibroacoustic Characteristics of Ultrasonic Cleaners", Applied Acoustics, Vol. 58, No. 2, pp. 211~228.

(13) Dowling, A. P. and Ffowcs Williams, J. E., 1983, Sound and Sources of Sound, Ellis Horwood Ltd., Chichester, pp. 36~40.

(14) Ciskowski, R. D. and Brebbia, C. A., 1991, Boundary Element Methods in Acoustics, Elsevier Applied Science, New York.

(15) LMS International, 2000, SYSNOISE Manual, 1st ed., LMS International N. V., Leuven.

(16) Bhatia, A. B., 1985, Ultrasonic Absorption, Dover Publication, New York, Ch. 8.