

음선 기법을 이용한 초음파 음장 해석 Ultrasonic Field Analysis Using a Sound-Ray Method

○문병환* · 김진오**

Byung Hwan Moon and Jin Oh Kim

Key Words : Ultrasonic Field(초음파 음장), Sound Ray(음선), Phase(위상), Cleaning Container(세정조), Standing Wave(정상파), Sound Pressure(음압)

ABSTRACT

This paper deals with the application of a sound-ray method to the analysis of the sound field in an ultrasonic cleaner. In order to include the wave interference phenomenon, the method has been modified to consider the phase of sound rays. The improved algorithm has been implemented by developing a Visual C++ program. The algorithm has been verified by comparing the analysis results of BEM reported earlier. It has been shown that the algorithm can be used to calculate ultrasonic fields in a cleaning container with an object to be cleaned.

1. 서론

초음파의 응용 분야는 매질 내에서의 전파 속도를 이용한 계측(센서)분야와 역학적 에너지를 이용한 동력/제어(액추에이터)분야 등으로 구분할 수 있다.⁽¹⁾ 본 논문은 초음파를 동력으로 사용하는 분야의 하나인 초음파 세정을 대상으로 하며, 세정조 내의 음압 분포, 즉 음장을 해석하는 연구이다.

생산 공정에서 시행되는 세정은 과거에 주로 화학적 방법에 의존되었으나, 환경 오염에 대한 인식 증가에 따라 초음파의 캐비테이션을 이용한 역학적 세정이 더욱 관심을 끌고 있다. 초음파 세정이 캐비테이션에 의해 이루어지고 캐비테이션 강도는 음압 크기에 의존되므로, 음압 분포를 해석하면 세정 효과를 예측할 수 있다. 이를 위해 경계요소법을 이용한 연구보고가 있다.⁽²⁾ 그러나 세정조 내에 피세정물이 존재하여 기하학적으로 복잡한 경우에는 초음파의 짧은 파장으로 인하여 해석 분할 요소의 수가 너무 많게 된다. 즉, 요소 분할을 해야하는 경계요소법으로는 컴퓨터의 용량을 초과하거나 계산시간이 너무 오래 걸리는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하고자 본 연구에서는 음선기법을 택하여 초음

파 음장을 해석한다.

파동 음향학에서 음의 전파를 파면(wavefront)으로 표현하는 것에 반하여, 음선 기법은 음의 파면에 수직인 방향으로 음선이 진행되는 것으로 음파를 표현하는 기하음향학이다.⁽³⁾ 따라서 음선 기법은 초음파와 같이 주파수가 높고 파장이 매우 짧아 음의 파동성을 고려하지 않아도 되는 경우에 매우 효과적이다.

음선 기법에 의해 음장 해석을 하는 소프트웨어가 이미 상용화되어 사용되고 있으나⁽⁴⁾, 가청주파수 범위의 음장 해석용이며 음파의 간섭 현상을 반영하지는 못한다. 따라서 위상을 고려한 음선기법을 이용하여 초음파 음장 해석용 소프트웨어를 개발하고, 이를 초음파 세정조에 적용하여 성능 검증을 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 이론적 배경

음선은 주어진 초기 에너지 혹은 음압을 가지고 진행을 하며, 매질과 반사 경계면의 흡음(absorption)에 영향을 받게 되어 에너지나 음압이 감소해 간다. 이러한 과정에서 음선의 경로를 추적하는 알고리즘이 필요한데 대표적인 기법이 음선 추적법(ray-tracing method)과 영상 음원법(mirror image method)등이다. 본 논문에서는 음선 추적법을 택한 뒤 음의 간섭 현상을 반영하기 위하여 위상을 고려한 음선 추적법을 사용하였다. 또한 이 방법을 구현하는 프로그램 작성 시 몇 가지 사항을 보완하였다.

* 숭실대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 숭실대학교 공과대학 기계공학과

E-mail : jokim@saint.soongsil.ac.kr

Tel : (02) 820-0662 Fax : (02) 820-0668

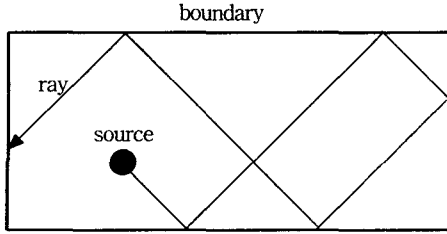


Fig. 1 Ray process way in boundary by using ray-tracing method

2.1 일반적인 음선 추적

음선 추적법은 Fig. 1과 같이 음선이 음원으로부터 방사하여 진행하면서 경계면을 만날 때마다 반사하여 진행된다는 것이 기본 개념이다.⁽⁵⁾ 그림에서 음원은 일정 표면적을 가지는 단위구로 간주되며, N개의 음선이 음원에서 발생한다. 이때 음선은 위치 벡터 \vec{R}_0 와 방향 벡터 \vec{R}_d 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{R}(d) = \vec{R}_0 + \vec{R}_d \times d \quad (1)$$

여기서 d 는 음선의 진행 변위를 의미한다.

음선이 반사하는 경계면은 평면의 법선 벡터 \vec{N}_i 와 경계면과 좌표축의 원점간의 거리 D_i 를 이용하여 다음같이 나타낸다. 이때 \vec{N}_i 는 원점을 향하는 방향과 그 반대 방향으로 구분되는데, 계산의 편의를 위하여 추적 음선과 내적값이 음의 값을 가지도록 방향을 유지한다.

$$\vec{N}_i \cdot \vec{X} + D_i = 0 \quad (2)$$

$$\vec{N}_i \cdot \vec{R}_d < 0 \quad (3)$$

여기서 \vec{X} 는 평면상의 임의의 한 점을 의미한다.

반사점은 추적 음선의 원점과 경계면 교점간의 거리 d_i 를 식(4)와 같이 계산하고 식(1)의 d 에 대입한다.

$$d_i = \frac{-(D_i + \vec{N}_i \cdot \vec{R}_0)}{\vec{N}_i \cdot \vec{R}_d} \quad (4)$$

경계면에서 추적 음선이 반사된 후에는 추적 음선의 새로운 방향 벡터와 위치 벡터로 갱신되는데 경계면에서의 반사점은 새로운 추적 음선의 원점으로 갱신되며, 추적 음선의 새로운 방향 벡터는 다음과 같다.

$$\vec{R}_d' = \vec{R}_d - 2(\vec{R}_d \cdot \vec{N})\vec{N} \quad (5)$$

새로운 방향 벡터 \vec{R}_d' 는 식(1)의 \vec{R}_d 을 갱신하여 새로운 음선이 정의된다. 위와 같은 과정을 정해진 반사 차수까지 반복한다.

2.2 위상이 고려된 음선

초음파 세정조와 같이 평행한 경계면이 있는 유한 공간

에서는 음의 증첩에 따른 정상파(定常波, standing wave) 현상이 존재하므로, 이를 제대로 해석하기 위해서는 음파의 위상도 고려해야 한다. 위상을 고려한 음선의 음압은 다음과 같이 표현된다.⁽⁶⁾

$$p = p_0 \exp(-0.5 mL) \prod_{i=0}^n (1 - a_i) \quad (6)$$

여기서 a_i 는 반사면 흡음계수이고, m 은 매질의 음파 감쇠계수이다.

수신 음압은 직접 전달된 음파와 반사된 음파의 합으로 표현된다.

$$p(\vec{d}) = p_{dir} + p_{refl} \quad (7)$$

여기서 p_{dir} 는 직접파에 의한 음압이고 p_{refl} 는 반사파에 의한 음압으로서, 위상 kd 를 포함하여 각각 다음과 같이 표현된다.

$$p_{dir} = p_0 \exp(-jk d_0 - 0.5 m d_0) \quad (8)$$

$$p_{refl} = p_0 \exp(-jk d_{tot} - 0.5 m d_{tot}) \prod_{i=1}^n R_i(\theta) \quad (9)$$

여기서 d_{tot} 는 n 번 반사까지의 음선의 이동 거리, d_0 는 음원으로부터 수신점까지의 직선 거리, p_0 는 초기 음압, k 는 파동수(wave number), m 은 매질의 감쇠계수, 그리고 $R(\theta)$ 는 평면파 입사시에 무한 경계 평면의 반사계수이다.

음파의 감쇠계수는 주파수 f 의 함수로서, 물에서는 다음과 같이 표현된다.⁽⁷⁾

$$m = 4.76 \times 10^{-13} \times (1 - 4.0 \times 10^{-2} T + 5.9 \times 10^{-4} T^2) \times (1 - 3.8 \times 10^{-4} P_0) \times f^2 \quad (10)$$

f 는 주파수[Hz]이고, T 는 대기온도[°C]이며, P_0 는 대기압[atm]을 뜻한다. 실제 적용시 음선의 이동 거리가 크기 않기 때문에 음의 흡음이 크지 않다.

2.3 알고리즘 보완

본 연구는 진동부가 면음원의 형태로 경계면에 존재하는 세정조를 대상으로 하였으므로 기하학적 특성을 고려하여 음원을 구현하였다. 또한 실제 프로그램 작성을 위해 물체를 기하학적으로 처리하는 방법을 고려하였다. 그리고 음원에서 방사하는 음선 개수와 반사차수 한계를 선정하였다.

2.3.1 초음파 진동부 구현

면음원인 초음파 진동부를 점음원의 집합으로 구현하였다. Fig. 2와 같이 면음원에서 중앙부위 음선은 진동부의 진동 방향을 향하도록 설정하고, 가장자리 부위의 음선만 양쪽 방향으로 퍼질 수 있도록 하였다. 음원의 각 지점에서 음원을 방향성을 지정하는 방법으로, 가장자리 음원의 초기 음압을 식(11)의 가우스 분포식을 이용하여 차등화 하였다.⁽⁸⁾

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (11)$$

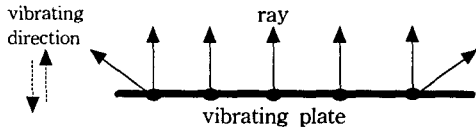


Fig. 2 Sound rays radiating from a vibrating plate

이때 σ_x 는 가우스 분포의 표준편차를 의미하고, \bar{x} 는 진동부의 진행방향인 $\pi/2$ 라디안을 이용하였다. Fig. 3은 $\pi/2$ 라디안, 즉 90° 를 기준으로 가우스 분포를 그린 그림이다. 이때 표준편차는 0.01과 0.02가 사용되었으며, 가장자리 음원에서의 음선의 방사각을 2° 씩 증가시켰다. 또한 Fig. 4는 모든 면이 강체로 이루어진 음장에서 Fig. 3에서 나타난 초기 음압을 이용하여 음선을 생성하였을 때 공간 내에 정상파가 형성되는 것을 보여주는 그림이다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 표준편차가 0.01인 경우는 완벽하게 음장내에 정상파가 형성되는 것을 보여주지만 실제 물리적인 의미에서는 모든 음선이 진동방향 즉, 진동부 면에서 수직방향으로만 전달되는 한계를 보여주고 있다. 결과적으로 표준편차의 값이 0.02인 경우가 수학적 뿐만 아니라 물리적으로도 타당하다는 것을 알 수 있다.

2.3.2 실제 교점과 가상 교점 구별

경계면과 음선간의 교점이 실제 경계면에 존재하는지를 판별하는 과정이 필요하다. 판별과정에 있어서 사용한 방법은 교점과 경계면의 각 꼭지점들 간의 벡터를 외적시켜서, 그 결과 값을 이용하게 된다. Fig. 5(a)에서는 점 p 가 영역 내부에 존재하는 것으로 가정하였다.

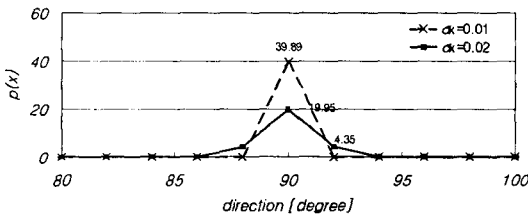


Fig. 3 Gaussian beam for $\sigma_x=0.01$ and $\sigma_x=0.02$

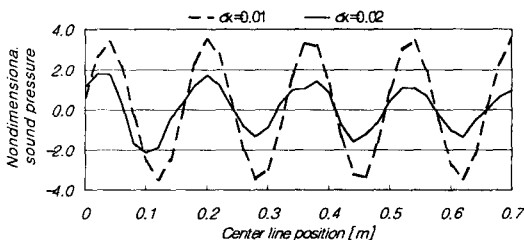


Fig. 4 Standing wave established by the Gaussian beam

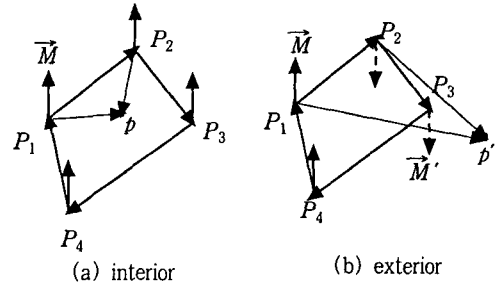


Fig. 5 Distinction between interior and exterior points

이 때 경계면의 각 꼭지점간에는 폐곡선을 이루고 있으므로 각 꼭지점은 서로 인접한 꼭지점과 벡터를 생성시킬 수 있다. 점 P_1 에서 점 P_2 로 향하는 벡터 $(\vec{P}_2 - \vec{P}_1)$ 와 점 P_1 에서 내부의 점 p 로 향하는 벡터 $(\vec{p} - \vec{P}_1)$ 간의 외적을 수행하면 새로운 벡터 \vec{M} 이 생성된다. 점 p 가 내부에 존재하는 것으로 가정되었기 때문에 새롭게 생성되는 벡터는 모두 동일한 방향을 갖게 된다.

Fig. 5(b)에서 점 p' 이 영역 외부에 존재하는 것으로 가정하였다. 위와 같은 방법으로 반복하였을 때 모든 꼭지점에서 동일한 방향의 새로운 벡터 \vec{M} 이 생성되지 않고 반대 방향의 새로운 벡터 \vec{M}' 가 발생하게 된다. 따라서 새로 생성되는 모든 \vec{M} 벡터의 방향이 동일한 경우에만 교점이 경계면 내부에 있다고 말할 수 있다.

2.3.3 반사 차수 및 음선 개수 결정

음선 해석 결과의 정확성을 위해서는 반사 차수를 높이고 음선 개수를 증가시켜 매질의 흡음에 의한 영향으로 음선의 음압이 기준치 이하로 내려간 후에 폐기를 시켜야 한다. 그러나 본 연구에서 적용되는 초음파 세정조는 흡음에 비하여 크기가 작기 때문에 진행되는 음선의 거리가 짧다. 따라서 흡음에 의한 음압 감소를 기준으로 음선을 폐기할 수 없는 상황이다. 또한 반사 차수와 음선 개수의 증가는 계산 시간이 증가하는 원인이 되므로 음장 해석 결과의 정확성을 고려하여 한정 시켜야 한다.

계산 시간이 증가하는 원인이 되므로 음장 해석 결과의 정확성을 고려하여 한정 시켜야 한다. 이를 위해 임의의 2차원 경계면에 대하여 한 개의 음원에서 음선의 반사 차수와 음선의 개수를 독립적으로 증가시켜 음장내 음압 분포의 수렴 정도를 검토하였다.

Fig. 6은 반사 차수 60회를 기준으로 음선의 개수를 증가시켜 얻은 그래프이다. 이때 수신 음압은 음선의 개수가 증가하여도 수렴정도가 변동하는 경향을 보여주고 있다. 따라서 상대적으로 수렴의 정도를 검토하여 음선의 개수를 90회 정하였다. Fig. 7은 음선 개수 60회를 기준으로 반사차수

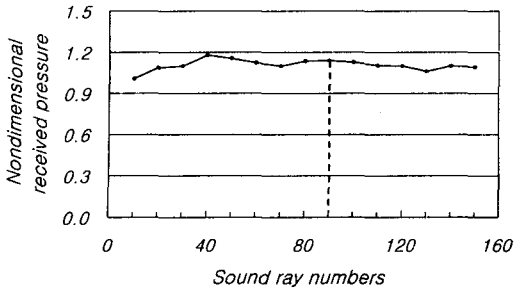


Fig. 6 Received pressure by sound ray numbers increasing

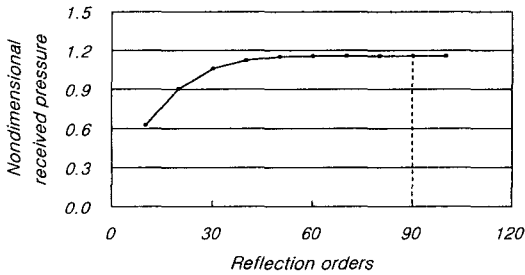


Fig. 7 Received pressure by reflection orders increasing

를 증가시켜 얻은 그래프이다. 이때 수신 음압은 반사차수 50회 이상에서 명확한 수렴 정도를 보여주고 있다. 그러나 Fig. 6의 음선 개수 검토에서 수렴 정도가 명확하지 않은 것을 고려하여 반사차수를 90회로 정하였다.

3. 해석 프로그램 구성

2절에서 정리한 위상을 고려한 음선 추적법을 적용하여 Visual C++을 이용하여 작성하였다. 본 프로그램은 음장 조건을 정의하는 과정, 음원에서 발생되는 음선의 경로를 추적하는 과정, 추적된 음선에 따른 음압 분포를 계산하는 과정, 그리고 음장 해석 결과를 저장하는 과정으로 이루어져 있다. 3차원 공간의 음압 분포를 해석하지만 결과는 2차원 평면에 나타내게 된다. 계산 결과는 text 파일로 저장될 뿐만 아니라, 음압 분포를 보여주는 GUI(Graphic User Interface) 형태로 화면 출력 및 bitmap 파일로 저장된다. 이때 각 수신점에 대한 수신 음압은 각 수신점에 대한 상대적인 음압분포이므로 초기에너지 설정에 따라서 절대 크기는 달라질 수 있다.

화면 출력을 위한 GUI 구현을 위하여 음압 분포를 나타낼 면을 바둑판 형태의 격자로 가정하고, 각각의 분할된 사각형 내부를 음압 크기에 해당하는 색깔로 채워주는 방법을 택하였다. 이때 수신점의 크기가 매우 작게 하여 음장을

Table 1 Overall process of the ray-method program

구성	세 부 사 항	비 고
음장 조건 정의	물리적 성질과 기하학적 모델링	1. 음장 구성 매질 정의 2. 내·외부 경계면 모델링 3. 면음원 성질 및 경계 모델링 4. 가우스 분포 표준편차 정의
	해석 조건	1. 반사 차수 선정 2. 수신면 정의
	초기 계산	파동수 계산
음선 경로 추적	수신점, 음원, 방사각 선정	1. 수신점, 점음원 위치 선택 2. 추적 음선의 방사각결정 3. 초기에너지 계산
	반사점 추적	1. 경계면 선택 2. 경계면 방향 벡터, 원점간의 거리 계산 3. 경계면과 음선간의 교점 계산 4. 교점의 내·외부 존재여부 결정 5. 선택된 교점들 중 최단거리 교점 선택
음압 분포 계산	추적 음선의 수신점 통과 여부	1. 음원, 수신점, 반사점 간의 거리 계산 2. 수신점 통과여부 검토
	에너지 감소식 계산	수신점 통과 여부에 따라 위상과 흡음을 고려
	새로운 음원의 위치벡터와 방향벡터 갱신	기존 추적 음선의 방향벡터와 반사면의 법선벡터를 이용하여 새로운 방향벡터 정의
해석 결과 출력	파일 형태의 출력 GUI 형태의 출력	수신면에 대한 2차원상의 결과 출력 (text file, bitmap file)

해석하여야 전체적으로 자연스러운 음압 분포를 표현할 수 있다. 그러나 수신점의 크기가 작다는 것에 비례하여 수신점의 개수가 많아지므로 계산 시간이 매우 길어지게 되는 한계가 있다. 이를 보완하기 위하여 한 개의 수신점에 해당하는 사각형 요소의 내부를 조밀한 분할요소로 나누어 각각의 음압 색깔을 부여하게 되면 자연스러운 음압 분포를 구현할 수 있는데, 이를 위해 선형 곡면 기법(bilinear surface method)을 이용한다.⁽⁹⁾

4. 초음파 음장 해석 결과

3절에서 설명한 프로그램을 이용하여 초음파 세정기의 음장을 해석한다. 먼저 세정조 내부에 피세정물이 존재하지 않는 경우에 대하여 해석한 결과를 제시하고, 선행 연구 보고⁽²⁾와 비교 검토를 한 후, 피세정물이 존재하는 경우에 대하여 해석한 결과를 제시한다.

4.1 초음파 세정조와 진동부의 모델링

경계요소법을 이용하여 초음파 세정조의 음장을 해석하고 그 결과를 실험을 통하여 검증한 연구 보고가 있다. 본 논문에서는 음선기법으로 음장 해석을 하고 선행 연구 보고와 비교하기 위하여 세정조의 기하학적 모델과 세정 조건을 연구 보고와 동일하게 하였다.

Fig. 8은 세정조의 전체적인 구조를 보여주는 그림이다. 세정조는 직육면체로 구현하였다. 세정조 내부 벽면은 흡음(absorption)이 일어나지 않는 반사면으로 가정하였다. 진동

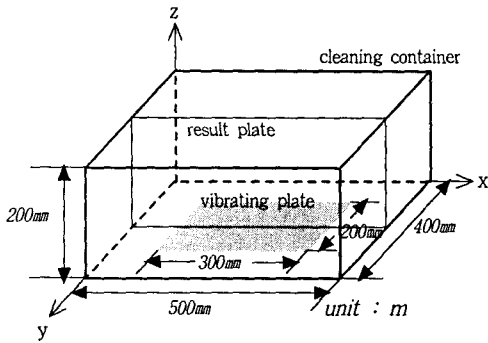


Fig. 8 Perspective drawing of the cleaning container

부와 마주보는 면은 자유 수면과 강제 벽면인 경우로 구분하였다. 4.2절에서는 세정조 내부에 피세정물이 없을 때의 음장을 해석하고, 4.3절에서는 피세정물이 있을 때의 음장을 해석하였다.

진동부에 해당하는 음원은 면음원으로 단순화하였으며, 구동 주파수는 28kHz를 사용하였다. 또한 면음원을 구성하고 있는 점음원의 간격을 10mm로 설정하였다. 면음원의 가장자리에 위치하는 점음원들의 방사각 가우스 분포를 위한 표준편차는 0.02로 설정하였다. 한 개의 점음원에서 발생하는 모든 음선의 초기 에너지의 합은 동일하다. 세정액에 해당하는 세정조 내부 구성 매질은 물로 선정하였고, 음속은 1481m/s로 설정하였으며 반사차수는 91회로 하였다. 음장 해석 결과가 표시되는 결과 면은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 x-z평면(가로-높이)에 평행한 중앙면으로 하였다.

4.2 피세정물이 없는 세정조의 음장 해석 결과

본 절에서는 피세정물이 존재하지 않는 세정조에 대한 음장을 먼저 해석하며, 진동부와 마주보는 면($z=200\text{mm}$)을 강제 벽면과 자유 수면으로 구분하였다.

먼저 $z=200\text{mm}$ 인 지점을 강제 벽면으로 설정하여, 음선이 도달하여도 위상의 변화가 없이 반사가 이루어지도록 하였다. Fig. 9는 Fig. 8의 결과면의 음압 분포를 보여준다. 그림에서 나타난 바와 같이 강제 벽면 지점에서 최대 음압이 발생하며, 강제 벽면을 기준으로 파장($\lambda=53\text{mm}$)의 1/2 간격으로 양(+) 또는 음(-) 음압의 극대값이 주기적으로 나타난다. 이는 위상이 고려된 정상파(定常波, standing wave) 음장이 형성됨을 보여주는 결과로서 경계요소 해석을 통하여 이루어진 기존 연구보고 결과와 잘 일치한다.

다음으로 $z=200\text{mm}$ 인 지점을 자유 수면으로 설정하여 음선이 도달하면 위상이 π rad 만큼 변하여 반사가 되도록 하였다. 즉 반사하면서 부호가 반대로 변한다. Fig. 10은 Fig. 8의 결과면의 음압 분포를 보여준다. 그림에서 나타난

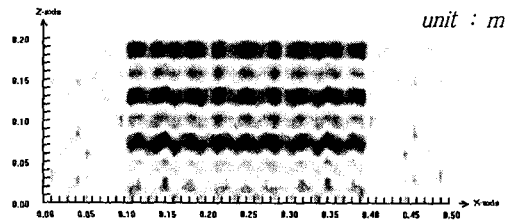


Fig. 9 Sound field calculated for the cleaning container with rigid-wall reflection

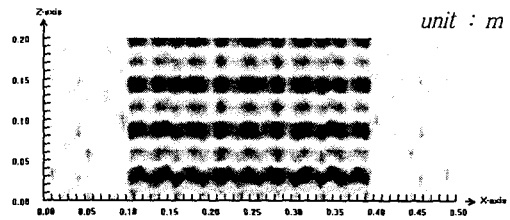


Fig. 10 Sound field calculated for the cleaning container with free-surface reflection

바와 같이 자유 수면 지점에서 음압이 0이며, 자유 수면을 기준으로 1/4 파장 아래 지점에 음압이 극대이다. 또한 강제 벽면과 마찬가지로 파장($\lambda=53\text{mm}$)의 1/2 간격으로 양(+) 또는 음(-) 음압의 극대값이 주기적으로 나타나는 정상파가 형성된다. 이는 선행 연구 보고 결과와 잘 일치한다.

4.3 피세정물이 있는 세정조

4.2절에서 제시된 피세정물이 없는 세정조의 음장 해석을 통해 검증한 해석 방법을 피세정물이 존재하는 세정조에 적용하여 음장 해석을 한다. 직육면체인 피세정물을 평행하게 배치하여 결과를 확인한 후, 피세정물을 두방향으로 기울여 입의 기울기로 피세정물이 존재하는 세정조에 대한 음장을 해석한다.

피세정물의 개략도는 Fig. 11에 보인 바와 같다. 여기서 피세정물을 세정조는 Fig. 8과 동일하다. 피세정물은 가로 340mm, 세로 240mm, 두께 20mm의 얇은 박판으로 모델링하였으며, 피세정물의 표면에서는 흡음이 발생하지 않는 것으로 설정하였다. 세정조 내에서의 피세정물은 $z=130\text{mm}$ 인 지점의 정중앙에 배치시켰다. 피세정물이 진동부에 평행하게 배치된 상태와 y축 및 x축을 기준으로 입의 방향으로 배치한 상태를 대상으로 세정조 음장을 해석한다.

피세정물이 세정조내에 진동부와 평행한 경우의 결과는 Fig. 12에 나타나 있다. 그림에서 내부 검은 테두리 부분이 피세정물을 나타낸다. 이때 피세정물 크기가 진동부의 크기보다 더 크기 때문에 진동부에서 수직으로 발생하는 음선이

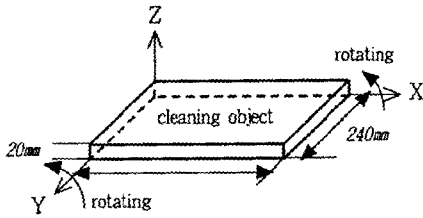


Fig. 11 Perspective drawing of the object to be cleaned

모두 피세정물의 밑부분에서 반사가 이루어지므로 4.2절의 피세정물이 존재하지 않는 강체 벽면 음장과 비슷한 결과를 나타낸다.

Fig. 13은 피세정물이 x축 방향으로 1° , y축 방향으로 5° 만큼 두 방향으로 기울어진 경우의 해석 결과이다. 임의의 방향으로 음선이 진행하기 때문에 전체적으로 불규칙적인 음장 결과를 확인할 수 있다. 상대적으로 $x=0.25\text{m}$ 에서 $x=0.5\text{m}$ 사이 영역이 다른 영역에 비하여 상대적으로 복잡한 음장 형태를 띠고 있다. 이러한 현상은 피세정물 기울어진 각도에 의한 기하학적 특성으로 인하여 음선이 복잡한 형태로 진행하였다는 것을 알 수 있다. 본 결과를 바탕으로 복잡한 음장을 형성하고 있는 $x=0.25\text{m}$ 에서 $x=0.5\text{m}$ 사이 영역에서 피세정물의 세정효과에 상대 지역보다 더 효율적이라는 것을 유추할 수 있다. 또한 2방향으로 기울어진 경우의 해석은 임의의 피세정물에 대하여 해석이 가능하다는 것을 확인하는 의미가 있다.

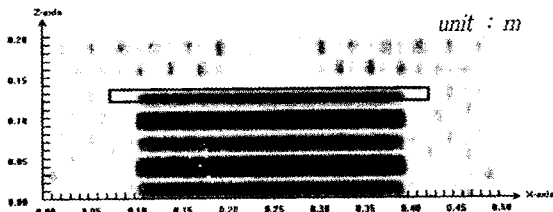


Fig. 12 Sound field calculated for the cleaning container with an object parallel to the vibrating plate

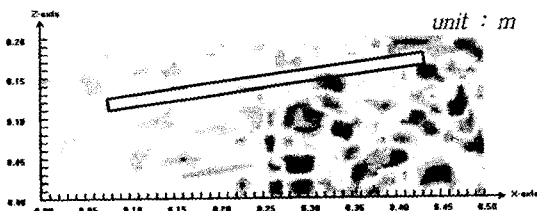


Fig. 13 Sound field calculated for the cleaning container with an object declined in two directions

5. 결론

세정액 내에서 높은 진동수의 음파가 전파되면서 양(+)의 음압과 음(-)의 음압이 반복되는 작용에 의해 이루어지는 초음파 세정의 성능을 예측하기 위해서, 세정액 내의 음압분포를 음선기법을 활용하는 과정을 정립하였다. 일반적인 음선기법을 개량하여 초음파 세정조에서의 음파의 중첩과 간섭을 제대로 해석하기 위해 음파의 위상을 고려하고, 세정조 내부 공간에 피세정물이 존재하는 대상도 해석할 수 있는 알고리즘을 구성하였다.

경계요소법으로 세정조 음장해석을 하여 보고된 결과들과 본 연구의 해석 결과를 비교함으로써 해석의 정확성을 검증하였다. 세정조 내에 피세정물이 임의로 존재하는 경우에 대해서 본 연구에서는 음선기법에 의해 원활히 해석할 수 있음을 밝혔다.

본 연구에서 해석용 프로그램을 작성하였으며 해석 결과를 수치 데이터로 저장하고, GUI 형태의 그래픽 처리를 통하여 분포도를 화면에 출력하는 등 해석 결과를 확인하는데 용이하도록 하였다.

후기

본 논문은 삼성종합기술원이 지원한 산학 연구과제를 수행하며 얻은 연구결과임.

참고 문헌

- (1) 김진오, 2000, "초음파를 이용한 센서 및 액추에이터" 한국소음진동공학회지, 제10권, 제5호, pp. 723~728.
- (2) 김진오, 김정호, 최주영, 조문재, 1995, "초음파 세정기의 진동/음향 해석에 의한 수명/성능 향상 연구", 대한기계학회논문집, 제19권, 제11호, pp. 2939-2953.
- (3) A. P. Dowling, J. E. Ffowcs Williams, 1983, Sound and Sources of Sound, Ellis Horwood Ltd.
- (4) LMS Numerical Technologies NV, 1998, RAYNOISE Rev. 3.0 Users Manual, LMS International.
- (5) A. S. Glassner, 1993, An Introduction to Ray-tracing, Academic Press, London.
- (6) 신호철, 1997, 위상이 고려된 기하 음향 모델에 의한 내부음장 해석, 한국과학기술원 석사학위논문.
- (7) L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, 2000, Fundamentals of Acoustics, 4th ed., John Wiley & Sons, New York.
- (8) L. Meirovitch, 1986, Elements of Vibration Analysis, 2nd ed., McGraw-Hill Book Co.
- (9) 이건우, 1996, 컴퓨터 그래픽과 CAD, 영진 문화사.