

고주파 초음파 세정기의 파동 해석

⁰최성훈*, 김진오*, 김용훈**

Acoustic waves in a high-frequency ultrasonic cleaner

Sunghoon Choi, Jin Oh Kim, Yong-Hoon Kim

ABSTRACT

Ultrasonic cleaning at high frequency near 1 MHz, called megasonic cleaning, is commonly used to remove particles less than 1 μ m by generating accelerations on them. Ultrasonic waves generated from piezoelectric transducers are transmitted through a non-metallic inner container which is used to isolate a cleaning object from metallic ions. The transmission efficiency is improved by utilizing oblique incidence. In this work transmission characteristics of a double-structured megasonic cleaner on the variations of parameters such as the thickness and oblique angle of a inner container, chemical ratio of a cleaning agent and temperature and transmittivity are investigated. The results are used to determine an optimum cleaning condition.

1. 서론

초음파에 의한 세정에는 파동 전파에 따라 세정액이 고주파 진동을 하여 발생하는 캐비테이션(cavitation) 현상과 큰 진동 가속도 등이 활용된다 [1-5]. 수 μ m 정도 크기의 미립자 제거에 사용되는 수십 kHz 주파수의 초음파 세정기에서는 주로 캐비테이션 기포 작용에 의해 오염물질이 분리되는 반면에, 1 μ m 이하의 미립자 제거에 사용되는 MHz 단위의 주파수 범위에서 작동되는 초음파 세정기에서는 고주파 진동에 따른 큰 진동 가속도에 의해 세정이 이루어진다. 이 세정법은 현재 반도체 웨이퍼, 포토 마스크 등의 세정에 많이 이용되는데 메가소닉 세정이라고도 부른다. 이때 세정 대상체를 금속 이온 등의 불순물로부터 차단하기 위한 이중 구조로 된 세정장치를 사용한다 [6]. 진동자에 의해 발생한 초음파는 석영유리나 붕규산유리 등의 비금속 용기를 통과하여 세정 대상체에 도달하게 되는데 초음파 투과율을 높이기 위하여 수정용기 바닥이 그림 1에서와 같이 경사지게 제작되어 있다. 투과효율에 영향을 미치는 또다른 인자로는 세정액의 조성 및 온도가 있는데 이는 초음파의 전파속도를 변화시켜 투과효율에 영향을 미치게 되는 것이다

본 연구에서는 메가소닉 세정기의 진동자에서

발생되어 전파되는 초음파가 내조를 투과하여 전파되는 과정을 해석한다. 이때 내조 밀면의 경사각과 두께 및 세정액의 조성과 온도가 초음파 투과율에 직접 연관되므로 이들 인자들의 변화에 따른 투과율을 구한다. 이러한 과정을 거쳐 해석된 결과를 토대로 메가소닉 세정기의 성능을 극대화할 수 있는 최적 조건을 추출한다.

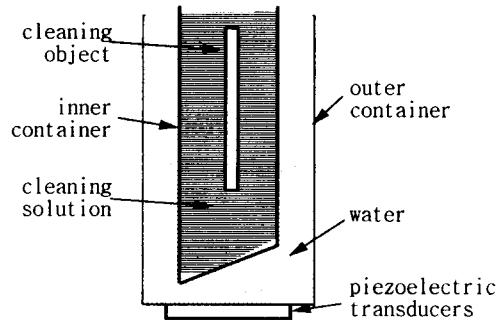


Fig 1 Configuration of a megasonic cleaner.

2. 초음파의 경사판 투과 현상

2.1 평면파의 입사, 반사 및 투과

그림 2에서와 같이 유체에 잠겨있는 평판의 x와 z방향 성분인 u 와 w 는 스칼라 퍼텐셜(scalar

*삼성종합기술원 수퍼컴응용LAB

**삼성전자(주) 반도체연구소

potential) ϕ 와 벡터 퍼텐셜(vector potential)의 한 성분인 ψ 를 써서 다음과 같이 표현된다 [7].

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w = \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

이때 ϕ 와 ψ 는 다음과 같은 파동방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c_l^2} \ddot{\phi} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{c_t^2} \ddot{\psi} \quad (2)$$

여기서 $c_l = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$ 는 compressional wave의 속도, $c_t = \sqrt{\mu / \rho}$ 는 shear wave의 속도이고 ρ 는 판의 밀도, λ 와 μ 는 Lamé 상수이다. 응력성분인 σ_{zz} 와 σ_{xz} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right)$$

$$\sigma_{xz} = \mu \left(2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right)$$

두께 $2d$ 의 평판에서 x 방향으로 전파되는 조화파인 파동방정식 (1), (2)의 해를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi = F(z)e^{i(kx - \omega t)} \quad (3)$$

$$\psi = G(z)e^{i(kx - \omega t)} \quad (4)$$

여기서 k 는 램파(Lamb wave)의 파동수(wave number), ω 는 각주파수(angular frequency)이다. 식 (3), (4)를 파동방정식 (1), (2)에 대입하면 다음과 같은 $F(z)$ 와 $G(z)$ 에 대한 미분방정식을 얻는다.

$$\frac{d^2 F(z)}{dz^2} - (k^2 - k_l^2)F(z) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d^2 G(z)}{dz^2} - (k^2 - k_t^2)G(z) = 0 \quad (6)$$

여기서 k_l 과 k_t 는 compressional wave와 shear wave의 파동수이다. ϕ 와 ψ 는 식 (5), (6)의 해의 선형 조합으로 다음과 같이 표현된다.

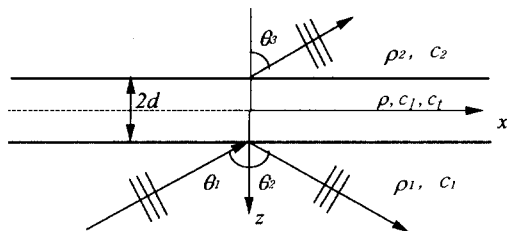


Fig 2 An elastic plate interfaced with fluids on both sides.

$$\phi = A_3 \cosh(qz)e^{ikx} + B_3 \sinh(qz)e^{ikx} \quad (7)$$

$$\psi = C_3 \sinh(sz)e^{ikx} + D_3 \cosh(sz)e^{ikx} \quad (8)$$

여기서 A_3, B_3, C_3, D_3 는 임의의 상수이고

$q = \sqrt{k^2 - k_l^2}$, $s = \sqrt{k^2 - k_t^2}$ 이다. 편의상 $e^{-i\omega t}$ 는 모든 식에서 생략한다.

평면파가 그림 2에서와 같이 판에 의해서 반사 또는 투과된다고 가정하면 입사파, 반사파, 그리고 투과파의 운동을 표현하는 스칼라 퍼텐셜 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 은 모두 파동방정식을 만족하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_1 = \Phi_1 \exp[ik_1(\sin\theta_1 x - \cos\theta_1 z)] \quad (9)$$

$$\phi_2 = \Phi_2 \exp[ik_1(\sin\theta_2 x + \cos\theta_2 z)] \quad (10)$$

$$\phi_3 = \Phi_3 \exp[ik_2(\sin\theta_3 x - \cos\theta_3 z)] \quad (11)$$

이 식에서 $k_1 = \omega / c_1$ 과 $k_2 = \omega / c_2$ 은 판의 아랫면과 윗면에 접해 있는 유체에서의 음파의 파동수이다. 유체내에서의 변위 및 음압은

$u = \partial \phi / \partial x$, $w = \partial \phi / \partial z$ 와 $p = -\rho_{1,2} \omega^2 \phi$ 로 주어지고 반사 및 투과각은 Snell's law인 $\sin(\theta_1) = \sin(\theta_2) = (k_2/k_1)\sin(\theta_3)$ 의 관계로 구한다.

반사파 및 투과파의 입사파에 대한 상대적 크기를 계산하기 위해서는 판과 유체의 접면에서의 경계조건을 적용해야 한다. 즉 $z = \pm d$ 인 평면에서 판과 유체의 접선방향의 변위는 같고, 유체내의 음압은 판에서의 응력성분 σ_{zz} 와 같으며, 응력성분 σ_{xz} 는 0이 되어야 한다. 식 (7)-(11)을 이용하여 판 및 유체내의 응력(또는 음압)을 표현하고 위의 경계조건을 적용하면 다음과 같은 6×6 의 행렬식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{16} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{26} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{36} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{46} \\ H_{51} & H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{56} \\ H_{61} & H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{65} & H_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 \\ B_3 \\ C_3 \\ D_3 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ik_1 \cos\theta_1 e^{-ik_1 \cos\theta_1} \Phi_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -(\rho_1 / \rho) k_t^2 e^{-ik_1 \cos\theta_1} \Phi_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 행렬의 성분 H_{ij} 는 다음과 같다.

$$H_{11} = -H_{21} = q \sinh(qd)$$

$$H_{21} = H_{22} = q \cosh(qd)$$

$$\begin{aligned}
H_{13} &= H_{23} = ik\cosh(sd) \\
H_{14} &= -H_{24} = ik\sinh(sd) \\
H_{15} &= -ik_1\cos\theta_2 e^{ik_1\cos\theta_2} \\
H_{16} &= 0 \quad H_{25} = 0 \\
H_{26} &= -ik_2\cos\theta_3 e^{ik_2\cos\theta_3} \\
H_{31} &= -H_{41} = 2ikq\sinh(qd) \\
H_{32} &= H_{42} = 2ikq\cosh(qd) \\
H_{33} &= H_{43} = -(k^2 + s^2)\cosh(sd) \\
H_{34} &= -H_{44} = -(k^2 + s^2)\sinh(qd) \\
H_{35} &= H_{36} = 0 \quad H_{45} = H_{46} = 0 \\
H_{51} &= H_{61} = (k^2 + s^2)\cosh(qd) \\
H_{52} &= -H_{62} = (k^2 + s^2)\sinh(qd) \\
H_{53} &= -H_{63} = 2ikss\sinh(sd) \\
H_{54} &= H_{64} = 2iksc\cosh(sd) \\
H_{55} &= -(\rho_1 / \rho)k_1^2 e^{ik_1\cos\theta_2} \\
H_{56} &= 0 \quad H_{65} = 0 \\
H_{66} &= -(\rho_2 / \rho)k_2^2 e^{ik_2\cos\theta_3}
\end{aligned}$$

판의 두께와 판과 유체의 밀도, 그리고 탄성파의 속도가 주어지면 임의의 주파수를 가지는 입사파에 대한 반사파 및 투과파의 상대적 크기를 식 (12)를 이용하여 구할 수 있다.

2.2 평판 경사각과 두께에 따른 투과율

이 절에서는 앞에서 기술한 탄성파와 음향파 사이의 관계식을 이용하여 유체에 잠겨있는 평판에 입사하는 음파의 투과율에 영향을 미치는 인자들에 대하여 알아보려 한다. 여기서 음파의 투과율 및 반사율은 입사파의 음압에 대한 투과파 및 반사파 음압의 크기의 비율로서 각각 $|\Phi_t/\Phi_i|$ 및 $|\Phi_r/\Phi_i|$ 로 정의한다. 식 (12)를 살펴보면 음파의 투과율 및 반사율에 영향을 미칠 수 있는 인자로는 탄성파와 음향파의 속도 즉, 판과 유체의 물리적 성질 이외에도 판의 두께와 입사각등의 기하학적인 상수 그리고 입사파의 주파수 등이 있다. 본 연구에서는 메가소닉 세정에 쓰이는 1 MHz의 주파수와 세정기의 내조의 재질인 석영유리(fused quartz)의 물리적 상수($\rho = 2,200\text{kg/m}^3$, $c_l = 5,900\text{m/s}$, $c_t = 3750\text{m/s}$)를 이용한다 [8]. 실제의 세정현상을 모델링하기 위하여 판의 밀면에는 순수가 뒷면에는 세정액이 접하고 있다고 가정한다. 순수 및 세정액의 밀도 및 음파속도는 다음절에서 실험한 속성을 통하여 구했는데 일반적인 세정조건인 40℃에서는 $\rho_v = 983\text{kg/m}^3$, $\rho_w = 985\text{kg/m}^3$, $c_v = c_w = 1531\text{m/s}$ 의 값을 사용한다.

그림 3은 식 (12)에 의하여 계산된 입사각 변

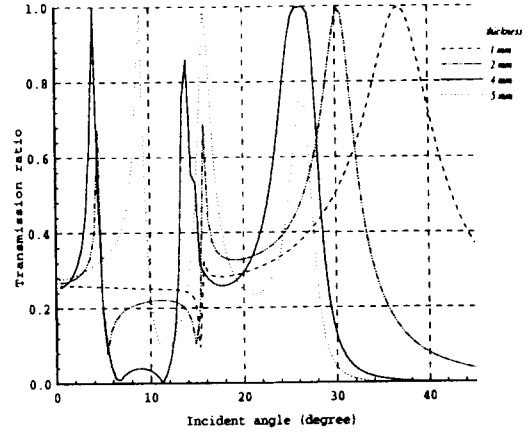


Fig 3 Transmission ratio of an incident wave.

화에 따른 투과율을 몇 가지 다른 판 두께에 대하여 보여준다. 각각의 그림에서 투과율은 각도 변화에 따라 몇 개의 최고치를 갖음을 알 수 있다. 이렇게 유한한 두께를 가지는 판에서의 음파의 투과특성은 판 내에 존재하는 램파(Lamb wave)의 분산 특성에 의해 설명할 수 있는데 이는 램파의 속도 및 판의 두께와 주파수의 곱 (ωd)에 의해서 결정된다 [7]. 본 연구에서는 고정된 주파수를 이용하므로 판의 두께변화에 따른 영향만을 고려한다.

램파는 자유경계면을 가지는 평판에서 판의 평면에 수직인 방향의 성분을 가지면서 판의 길이방향으로 진행하는 탄성파를 말하는데, 세정조의 경우에서와 같이 판의 양면에 유체가 접하는 경우에는 유체와의 상호작용에 의해 파의 주파수 특성이 변하게 된다. 램파의 주파수 특성은 이를 기술하는 운동방정식과 적절한 경계조건에 의하여 주어지는 특성식에 의해 주어지는데 여기서는 식 (12)의 좌변의 행렬의 determinant를 0으로 하는 식에 의하여 주어진다. 이 특성식의 해는 판의 두께방향으로 대칭 또는 비 대칭인 정상파 형태를 가지는 판 모드(plate mode)를 기술한다. 두께방향의 정상파의 차수에 따라서 대칭인 s_0, s_1, s_2, \dots 모드, 비 대칭인 a_0, a_1, a_2, \dots 모드 등으로 표시한다 [7]. 주파수(f)와 판의 두께($2d$)가 정해지면 그에 해당하는 각 모드의 전파 속도(c)가 램파의 분산관계에 의해서 얻어지고 $\lambda = c/f$ 의 관계에 의하여 파장이 결정된다. 유체와 인접하는 면에서의 판의 법선방향으로의 탄성파의 변위는 유체입자의 변위와 같으므로 판에서의 탄성파의 파장은 음파의 파장 및 입사각에 의하여 결정된다. 따라서 그림 4에서와 같이 진동자에 의해 발생

한 음파의 파장 λ_1 과 이 음파에 의해서 판 내에 유 기된 탄성파의 파장 λ_2 사이에는 $\lambda_1 = \lambda_2 \sin(\theta_1)$ 의 관계가 성립한다. 이 관계에 의하여 결정되는 탄성파의 파장이 판의 분산특성에 의해 결정되는 램파의 파장에 접근할수록 입사파가 판 내의 탄성파를 쉽게 발생시킨다고 볼 수 있다. 예를 들어 그림 3에서 4 mm 두께의 판의 경우 28° 에서 생기는 투과율의 최고치는 a₀모드의 램파의 파장이 그림 4와같이 음파의 위상과 일치한 결과라고 볼 수 있다. 입사각이 줄어들수록 차례로 파장이 큰 s₀, a₁ 모드들이 가진 되게 된다. 14° 및 4° 에서의 최고치가 이에 상응하는 결과이다. 램파의 분산특성이 판의 두께에 의해 결정되므로 각 판 모드에 의한 투과율의 최고치의 위치 또한 변하게 된다.

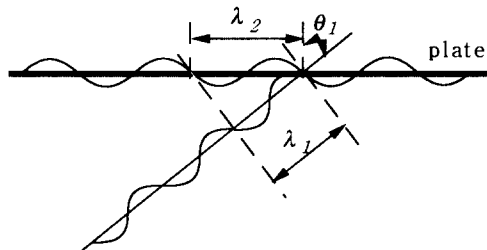


Fig 4 Relation between elastic waves in plate and fluid.

2.3 세정액 성분 및 온도변화의 영향

세정내조의 재질 및 형상 이외에 초음파의 투과율에 영향을 줄 수 있는 인자로는 세정액의 성분 및 온도에 의하여 결정되는 밀도 및 음파의 속도이다. 세정작용에 있어서 초음파의 음압에 의한 물리적인 세정작용 이외에도 세정액의 화학적 작용에 의한 세정작용도 중요한 역할을 한다. 따라서 여기서는 세정액의 성분 및 온도변화가 초음파의 투과율에 얼마나 영향을 미치는가를 알아보려고 한다.

현재 포토마스크의 세정공정에는 암모니아수(NH₄OH), 과수(Hydrogen peroxide, H₂O₂) 그리고 deionized water를 혼합한 용액을 사용하고 있다. 조성 변화에 따른 영향을 보기위해 용액 1~4의 암모니아수의 혼합비율을 1:2.5:5:10 으로 변화시켰으며 온도 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 20℃ 에서 60℃ 까지 10℃ 간격으로 측정하였다. 세정에서 음파의 속도는 음향 평면파가 반사되어 돌아오는 시간과 거리를 측정하여 구하였다. 이상의 측정 결과가 표 1에 정리되어 있다. 음파의 속도는 온도가 증가

Table 1 Measured sound speed and mass density.

	temperature(℃)	sound speed (m/s)	density (kg/m ³)
Pure Water	19	1482.5	997
	30	1509.9	
	40	1531.3	983
	50	1544.2	
	60	1553.0	978
solution 1	20	1490.5	998
	31	1518.2	
	41	1535.0	985
	52	1546.8	
	60	1550.6	970
solution 2	24	1499.6	997
	31	1513.3	
	40	1529.3	987
	50	1546.8	
	60	1558.1	971
solution 3	20	1490.6	1002
	30	1515.6	
	41	1531.4	985
	50	1550.0	
	60	1553.3	969
solution 4	20	1502.2	996
	31	1524.0	
	41	1542.3	987
	50	1554.0	
	60	1556.7	979

함에 따라 커지지만 성분변화에 따른 도의 변화는 상대적으로 작음을 알 수 있다. 용액 2의 경우에 하여 온도를 20℃, 40℃, 60℃로 변화시켰을 때 입사각에 따른 투과율의 변화를 그림 5에 보여주고 있다. 온도가 증가하면 음파의 속도와 파장이 증가하게 되어 투과율이 최고가 되는 입사각은 커지게 된다(그림 3 참조). 40℃의 온도변화에 따른 음속의 변화는 대략 50m/s정도이고 이에 따른 투과율이 최고가 되는 입사각의 차이는 2° 정도이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 조성 변화에 따른 음속의 차이는 20m/s 이내이므로 이 범위 내에서는 조성 변화가 투과효율에 미치는 영향을 무시 할 수 있을 것이다.

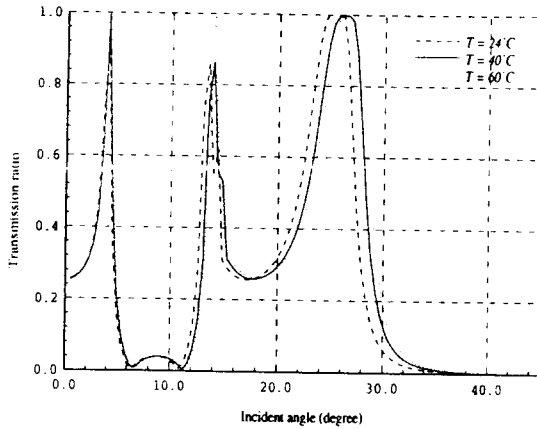


Fig 5 Effect of temperature variations on transmission ratio.

3 세정조 내의 음장해석

포토마스크의 세정에 쓰이는 메가소닉 세정기는 앞에서 설명한 경사입사의 원리를 적용하기 위하여 그림 1과 같은 2중 구조로 된 세정조를 사용한다. 진동자의 배열이 균일한 경우 진동자로부터 발생하는 초음파는 평면파로 가정 할 수 있다[3]. 또한 길이방향, 즉 그림 1에서 지면에 수직인 방향으로의 변화는 없다고 가정 할 수 있으므로 2차원 해석이 가능 하다. 평면파의 투과현상을 정확하게 해석하기 위해서는 판의 운동과 판의 양면에 접해 있는 유체의 상호작용을 고려하는 완전연성해석 (full coupling analysis)이 필요하다. 그러나 세정기의 사용주파수가 너무 높고 탄성과 및 음파의 파장이 세정기의 크기에 비해 매우 작기 때문에 모델링 하는데 필요한 요소의 수가 너무 커져서 해석에 필요한 H/W 및 S/W의 용량을 초과하게 된다. 따라서 본 연구에서는 진동자에 의해서 발생한 평면파가 내조의 밀면을 가진 하고 이에 의한 내조의 진동이 세정액내의 음장을 유발시킨다고 가정하고 이를 단계적으로 해석하는 일방연성해석(one-way coupling)을 수행하였다.

진동자에 의하여 발생한 평면파에 의한 내조의 진동을 계산하기 위해 상용 S/W인 ANSYS를 이용한다. 모델에 사용된 2차원 plain strain 요소의 크기는 0.40mm 이하로 하였는데 이는 내조의 재질인 석영유리(Fused Quartz)에서의 shear wave의 파장인 3.75mm의 1/6보다 작은 크기이다. 진동자에 의하여 발생한 평면파가 내조의 밀면에 도달하면 내조에 발생하는 램파와 상호작용하여 반사 또는 투과된다. 해석 편의상 평면파가 내조의 옆면에는 직접적인 영

향을 미치지 않는다고 가정 하에 옆면을 선형 요소로 모델링 하고 각 절점의 변위를 0으로하는 경계조건을 적용한다. 평면파에 의한 밀면의 가진은 그림 3에서와 같이 sinusoidal함수 형태로 생각하여 이를 유한요소해석의 외력으로 입력한다. ANSYS의 주파주 응답해석을 통하여 각 절점에서의 변위를 얻을 수 있다. 이 결과는 SYSNOISE 프로그램의 입력 데이터로 쓰이기 위해 *.rst file의 형태로 저장된다.

내조 내에서의 음장해석을 위해 상용 S/W인 SYSNOISE를 이용한 경계치 요소해석을 수행한다. 경계요소는 세정액의 경계를 2차원 선형 요소를 이용하여 모델링 하였고 요소 크기는 0.25mm 이하로 하였다. 내조의 밀면 및 옆면의 경계조건으로는 ANSYS로 구한 진동해석 결과를 사용한다. 경계요소 모델의 윗면은 자유수면 조건, 즉 음압이 0이 되는 조건을 주어야 한다. 그러나 본 해석에 사용한 SYSNOISE의 BEM DIRECT OPTION 으로는 압력 경계조건을 변위 경계조건과 함께 적용 할 수 없기 때문에 간접적인 방법으로 이 경계면에서의 admittance 값을 충분히 큰 값 ($10^6 \text{m}^2/\text{s}^2/\text{kg}$)으로 지정 하였다. 세정액의 물성치로는 2.3절의 실험에서 구한 용액 3의 40°C 에서의 물성치를 사용 하였다.

경계요소 해석을 통해서 내조 내의 음압분포 이외에도 음향파워(sound power)를 구할 수 있다. 이는 SYSNOISE 프로그램의 CONTRIBUTION ANALYSIS를 이용하여 구하는데 내조의 밀면을 통하는 음향파워 \bar{P} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \int_S \text{Re} [p v^*] dS \quad (13)$$

즉, 법선 방향의 음향세기 (acoustic intensity) 값을 밀면 S에 대하여 적분한 값이다. 따라서 이 값은 단위시간 ($T=1/f$) 동안 내조 밀면을 통해 세정액으로 전달되는 에너지를 나타낸다. 여기서 p, v는 법선방향의 음압 및 속도 이고 *는 복소수짜음을 표시한다. 2절에서 구한 경사각에 따른 투과율 변화를 검증하기 위해 내조의 경사각 변화에 대한 음향파워의 변화를 구하여 그림 6에 보여주고 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 경사각이 28° 일 때의 음향파워가 최대가 되는것을 알수있다. 이는 앞서 무한평판에 대하여 구한 값인 26° 에 근사 하는 값이다. 경사각이 28° 가 될 때 내조의 밀면에 발생하는 램파가 평면파와 상호작용을 일으켜 투과효율이 높아진 것이다. 현재 세정공정에 쓰이는 내조의 경사각은 24° 인데 그림 6에서 볼 수 있듯이 투과효율이 좋지 않음을 알 수 있다.

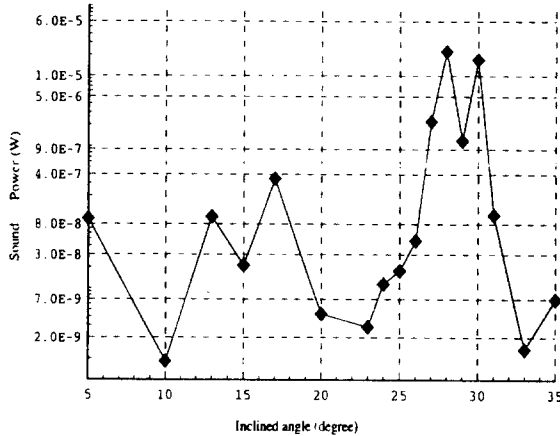


Fig 6 Radiated sound power vs. inclined angle.

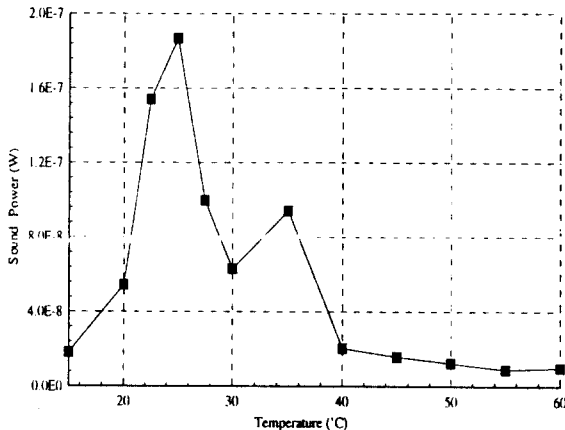


Fig 7 Radiated sound power vs. temperature for oblique angle of 24° .

현재 세정공정에 쓰이는 24°의 경사각을 가지는 세정기의 형상 및 두께를 유지한 상태에서 투과효율을 개선하기 위해서는 2.3절에서 구한 세정액에 대한 조건을 이용 할 수 있다. 세정액의 조성 변화는 초음파의 속도에 큰 영향을 주지 못하기 때문에 온도변화에 따른 투과율의 변화를 계산하였다. 그림 7에서는 용액 3에 대하여 온도를 변화시켜 가며 구한 방사음향파위를 보여준다. 이때 세정조 내의 순수의 온도도 세정액의 온도와 동일하다고 가정하였다. 그림 6의 결과에서 예측 할 수 있듯이 24°의 경사각에 대하여 최고의 투과율을 얻기 위해서는 28°의 경우에서보다 초음파의 속도가 느려야하므로 더 낮은 온도에서 세정이 이루어져야 한다. 본 해석에서는 25℃정도에서 최고의 투과효율을 얻을 수 있다.

4. 결 론

본 과제는 포토마스크의 세정에 쓰이는 이중 구조로 된 메가소닉 세정기의 세정 원리에 대한 이해를 통해 세정 효율을 극대화하는 최적 조건을 추출하기 위해 수행되었다. 메가소닉 세정기의 성능향상을 위한 연구로서 세정기 내조의 형상 및 세정액의 조성 및 온도 변화에 따른 초음파의 투과효율 및 내조내의 음압분포를 계산하였다. 진동자에 의해 발생한 초음파와 세정기의 내조에 발생하는 램파에 대한 해석을 통해 초음파의 입사각과 투과율 사이의 관계를 규명하였다.

참 고 문 헌

- [1] Mayer, A. and Shwartzman, S., "Megasonic Cleaning: A New Cleaning and Drying System for Use in Semiconductor Processing", Journal of Electronic Materials, Vol.8, No.6, pp.855-864 (1979).
- [2] 高橋典久, "メガソニック洗淨", 超音波TECHNO 7月号, pp.36-40 (1994).
- [3] 김진오, 김정호, 최주영, 조문재, "초음파 세정기의 진동/음향 해석에 의한 수명/성능 향상 연구", 대한기계학회논문집, 19권 11호, pp.2939-2953 (1995).
- [4] Hall, R. M., Jarvis, T. D., Parry, T., Li, L. and Hawthorne, R. C., "Investigating Particle, Metallic Deposition in Megasonic Wafer Cleaning", Micro July/August, pp.80-90 (1996).
- [5] Qi, Q. and Brereton, G. J., "Mechanisms of Removal of Micron-Sized Particles by High-Frequency Ultrasonic Waves", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.42, No.4, pp.619-629 (1995).
- [6] Hatano, H. and Kanai, S., "High-Frequency Ultrasonic Cleaning Tank Utilizing Oblique Incidence", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.43, No.4, pp.531-535 (1996).
- [7] Viktorov, I.A., Rayleigh and Lamb Waves, Plenum Press, New York (1967).
- [8] Weast, R.C., Astle, M. J. and Beyer, W. H., CRC Handbook of Chemistry and Physics, 68th ed., CRC Press, Florida (1987-1988).