

유리판용 초음파 물기 제거기 개발

Development of Ultrasonic Waterdrop Repellers for Glass Plates

정 이 봉*, 이 영 진*, 노 용 래**

(Yi-Bong Jung*, Young-Jin Lee*, Yong-Rae Roh**)

요 약

본 연구에서는 압전세라믹을 이용하여 외부에 노출된 유리판에 부착된 물방울을 효율적으로 제거할 수 있는 초음파 물기 제거장치를 개발하였다. 초음파 진동장치의 제작을 위하여 유한요소법을 사용하여 유리면의 진동특성을 분석하였고 이 결과를 바탕으로 최적의 효과를 얻을 수 있는 초음파 진동액츄에이터의 구조와 규격을 결정하였다. 진동장치의 제작에 있어서는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 진동의 균일한 분포를 위해서 보조진동판을 사용하였고 주어진 크기의 유리판의 최적조건을 찾기 위해 보조진동판과 유리판의 다양한 두께와 압전소자의 크기와 두께에 따라서 그 특성을 알아보고 성능을 평가하였다. 구동 발진기는 유리판의 공진점을 추적하기 위해 일정 주파수대역을 스위핑하는 가변주파수 발진기로 제작하였다.

ABSTRACT

In this work, we developed a new type ultrasonic dehumidifier with piezoelectric ceramics, which can efficiently repel waterdrops on outdoor glass plates exposed to raindrops. Through finite element analysis of a certain type of glass plates to analyze its dynamic behavior, the structure of the ultrasonic device was determined to get the optimal performance. A supplemental metal plate was attached to the glass plate for uniform cleaning. Based on the theoretical results, experimental samples were fabricated and evaluated with various dimensions of the glass plate and the piezoceramic vibrator. Driving circuit for the dehumidifier made use of the frequency sweeping technique to keep track of the resonant frequency of the glass plate that was variant with environmental conditions.

I. 서 론

외부에 노출된 유리판으로는 자동차용 사이드 미러 및 창유리, 오토바이의 사이드미러 외에도 선박이나 항공기의 전후좌우의 유리창 등이 대표적 예이다. 이들은 외부에 직접 노출되어 있기 때문에 비가 오거나 일기가 불순할 때에는 유리면에 형성되는 크고 작은 물방울 때문에 시야를 방해하여 대형사고를 일으킬 위험성이 있으므로 이를 제거하기 위하여 여러 가지 방법이 연구되어 왔다. 비교적 유리의 면적이 큰 자동차의 전면유리의 경우는 와이퍼를 사용하여 이를 효과적으로 해결할 수 있지만 그 크기나 위치 및 구조상 와이퍼를 사용할 수 없는 각종 사이드 미러와 같은 경우에는 다른 해결방법이 필수적이다. 따라서 이를 위해서는 보다 직접적인 기계식 가진 방법이 요구되는데 기계식 가진장치의 대표적인 예로서는

전자기장을 이용한 방법과 압전물질을 이용한 방법이 있다. 그 중에서도 압전물질을 이용한 가진방법은 그 구조가 간단하고 높은 진동에너지를 낼 수 있을 뿐만 아니라 초음파를 이용하여 시각과 청각에 대한 문제점도 해결할 수 있으므로 기존의 방법으로 해결할 수 없는 구조와 소형의 유리판에 대한 가진장치로서 적절하다고 하겠다.¹⁾ 따라서 본 연구에서는 압전 PZT를 이용한 초음파 물기 제거장치의 개발을 위하여 우선 압전 가진기의 구조를 규명하고, 나아가 유한요소법을 사용하여 유리판에 나타나는 진동에너지의 분포현황을 알아봄으로써 개발된 구조의 타당성을 알아보았다. 그리고 진동장치의 각 요소의 규격에 따른 진동 특성을 조사하여 최적의 조건을 알아보았다. 구동 발진기는 압전 PZT에 공급되는 교류전압을 발생하는 장치로서 공진점을 추적하기 위해서 가변주파수 발진기를 사용하였다.

*경북대학교 센서공학과

**경북대학교 전자공학과/센서공학과

접수일자: 1996년 12월 13일

II. 진동유리판의 작동에 관한 이론

II-1. 압전 가진기

압전물질이란 그에 가해지는 기계적 에너지와 전기적 에너지를 서로간에 변환시킬 수 있는 특성을 가진 재료를 말한다.^{2), 3), 4), 5)} 압전계수들을 이용해 압전 방정식을 나타내면 다음과 같다.²⁾

$$S = s^E T + dE \quad D = dT + \epsilon^T E \quad (1)$$

여기서 S는 변형율, T는 응력, E는 전기장, D는 전기변위장을 나타내고, s^E 는 일정한 전기장 E하에서 측정된 탄성 유연계수(elastic compliance), d는 압전계수, ϵ^T 는 일정한 응력 T하에서 측정된 유전율이다. 이 식은 행렬식으로서 본 연구에 직접 사용된 것은 이들 중 전기장과 변형의 관계를 나타내는 첫 번째 식으로서 이를 PZT에 대해서 구체적으로 적어보면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ & & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ & & & s_{44}^E & 0 & 0 \\ & & & & s_{55}^E & 0 \\ & & & & & s_{66}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 아래첨자인 1, 2, 3, 4, 5, 그리고 6은 각각 X, Y, Z, YZ, ZX, 그리고 XY 축 방향을 나타낸다.³⁾ 그리고 PZT의 경우 식 (2)에서 $s_{22}^E = s_{11}^E$, $s_{23}^E = s_{13}^E$, $s_{66}^E = (s_{11}^E - s_{12}^E)/2$ 이다.

그림 1은 본 연구에서 제작한 보조 진동판을 가지는 진동유리판의 구조를 나타낸다. 유리판의 후면에 유리판과 동일한 형상 및 면적을 갖되 유리판과 미소한 간격을 갖는 진동판을 부착하고, 그 진동판에 압전세라믹인 PZT를 다시 부착한 형태이며, 유리판과 진동판의 부착면은 지지부의 역할을 할 수 있도록 고정시켰다. 진동장치에 사용되는 압전 PZT의 형태는 원판형이고 사용 진동모드는 PZT의 상하단 즉 Z축 방향으로 가해진 전기장에 수직으로 변형을 일으키는 반경모드를 사용했다. PZT의 반경방향으로의 변형을 즉 X, Y 축 방향의 변형을 S_1 과 S_2 는 식 (2)에서 외부로부터의 입력장이 E_3 뿐이므로 다음과 같이 나타낸다.^{2), 3), 4)}

$$S_1 = d_{31} E_3, \quad S_2 = d_{32} E_3 \quad (3)$$

즉, Z방향에 전기장 E_3 가 가해지면 PZT는 전기장의 부호에 따라 수축과 팽창을 반복하며 PZT자체의 S_1 , S_2 를 발생시킨다. PZT와의 접촉부를 통하여 진동판의 아래면에 가해진 S_1 , S_2 는 접촉면의 수축과 팽창작용을 유도하여 진동판 접촉부에 반경 방향으로 일정량의 변형을 발

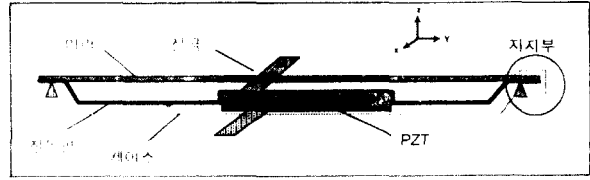
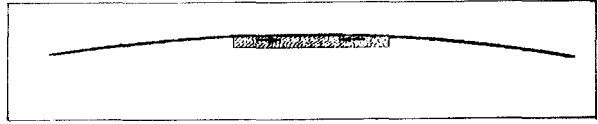
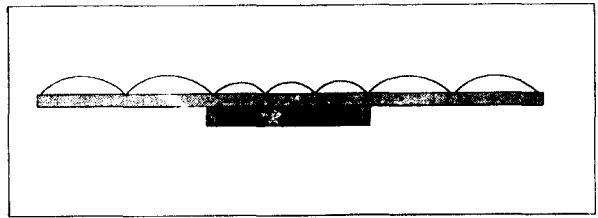


그림 1. 진동유리판의 구조



(a)



(b)

그림 2. 진동유리판의 진동원리

(a) 압전 소자에 의한 가진

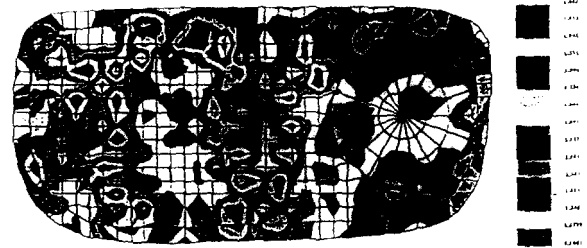
(b) 반사파에 의한 정재파 발생

생시킨다. 반면 진동유리판의 상단은 PZT의 변형힘을 받지 않으므로 진동유리판의 상하단 간의 팽창 및 수축력의 불균형으로 진동판은 그림 2(a)와 같이 PZT 접촉면을 중심으로 반경방향으로 휨이 발생한다.⁶⁾ 이러한 작용이 반복적으로 가해지면 압전소자 부위에서 발생된 변형은 진동판의 가장자리 즉 지지부로 전파되고, 전파된 파동은 지지부에서 반사되어 전면의 유리판으로 전파한다. 각각 마주 보는 두 지지부에서 반사되어 유리판 상으로 전파된 파동은 그림 2(b)와 같이 정재파로 형성되어 안정 상태에 도달하게 된다.^{7), 8)} 유리판의 가장자리 즉 지지부는 유리판의 모든 수평방향의 끝에 존재하므로 이 정재파는 유리판 전면에 고르게 발생될 것이다. 이상의 정재파 발생기구는 진동판 없이 유리판에다 압전소자를 바로 부착했을 때에 비해서 훨씬 효율적이며, 후자의 경우 적어도 압전소자가 부착된 지점에서는 세라믹의 높은 강성으로 인해 정재파가 제대로 발생이 되기 어려운 점이 있는데 보조 진동판을 사용하면 이러한 문제는 쉽게 해결이 될 수 있다. 또한 이 정재파는 압전소자의 두께 모드의 힘을 이용할 때 보다 훨씬 더 큰 힘을 발생하는데 그 이유는 두께모드의 변형보다 반경방향의 변형이 압전체의 규격상 훨씬 더 큰 힘을 발생하는데 그 이유는 두께모드의 변형보다 반경방향의 변형이 압전체의 규격상 훨씬 더 크기 때문이다.²⁾ 그리고 PZT의 두께모드를 직접 이용하는 것보다는 훨씬 용이하게 저주파 성분을 만들어낼 수 있는데, 통상 진동에너지는 주파수의 제곱에 반비례

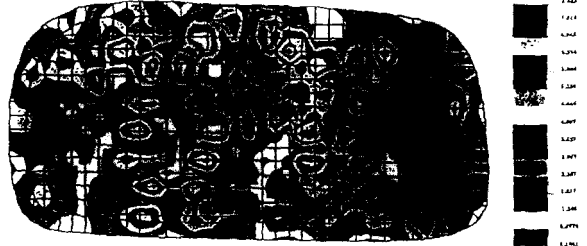
한다는 점을 고려하면 물기제거효과면에서 가능한 한 저 주파수를 이용하는 것이 효율적이고 이런 면에서 그림 2(b)의 방법은 적절한 방안이라 할 수 있다. 따라서 이 힘에 의해 유리판의 표면에 있는 물방울은 진동판에 수직인 방향으로 이탈되게 된다. 이상에서 설명한 조음파 불기 제거기의 구조는 다음 절의 유한요소 해석을 통하여 그 타당성을 검증한다.

II-2. 유한 요소해석

제작에 앞서 II-1절에서 개발한 구조의 타당성과 선택한 유리판에 대한 공진특성과 진동판의 영향을 보기 위하여 상용 유한요소 프로그램(NISA)을 사용하여 유리판의 진동특성을 조사하였다. 이상에서 설명한 구조를 실제 제작하는 일은 유리판과 진동판 그리고 압전소자의 대단히 정교한 가공과 조립작업을 필요로 하므로, 이 장치를 구현하기 위해 실험적으로 시행착오를 거듭하기는 상당히 힘들다. 따라서 제작에 앞서 앞에서 밝힌 구조가 과연 타당한 것인지를 밝히고, 유리판 표면 전면에 균일한 변형분포를 가져오고 최대효율을 얻기 위한 진동모드와 구동 주파수를 검색한다는 면에서 이 유한요소 해석은 효율적인 방안이라 할 수 있다. 먼저 진동판 없이 유리판에 직접 PZT를 부착했을 때의 유한요소 해석 결과가 3(a)에 나타나 있다. 예상한 바와 같이 PZT 부착부에 접점이 넓게 분포하고, 따라서 이 부분에 물방울이 붙었을 경우 제대로 떨어내기가 어려움을 알 수 있다. 다음으로 그림 3(b)은 진동판과 유리판을 부착했을 때의 유한요소 해석 결과이다. 그림에서 보듯이 진동이 전면에서 고르게 발생되므로 유리판에 압전체를 직접 부착했을 때의 문제는 해결되었음을 알 수 있다. 그림 4에서는 진동판이 부착된 유리판의 주파수특성을 보여준다. 약 45 KHz에서 최대 에너지를 발생함을 알 수 있다. 시뮬레이션에서



(a)



(b)

그림 3. 진동유리판의 유한요소 해석
(a) 유리판에 직접 압전소자 부착시
(b) 보조 진동판 사용할 때

진동판으로는 Titanium을 사용하였고, 압전소자는 PZT5H를 사용하였으며, 사용한 PZT의 물성은 표 1에 나타나 있다.^{2,3)}

II-3. 구동 발진기

압전가진기에 교류전압을 가해주기 위한 장치로서 가진기의 공진주파수를 찾을 수 있는 장치가 필요하다. 압전가진기는 그 음향 임피던스가 급격히 줄어드는 공진점이 존재하게 되는데 구동발진기는 이 공진주파수를 정확

표 1. 압전세라믹 PZT의 재료물성

유전상수 [F/m]	$[\epsilon^T] = \begin{bmatrix} 3130 \times 8.854 \times 10^{-12} & 0 & 0 \\ 0 & 3130 \times 8.854 \times 10^{-12} & 0 \\ 0 & 0 & 3400 \times 8.854 \times 10^{-12} \end{bmatrix}$
압전용역 상수[C/m ²]	$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 17.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17.0 & 0 & 0 \\ -6.5 & -6.5 & -23.3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
강성계수 [N/m ²]	$[c^E] = \begin{bmatrix} 12.6 & 7.95 & 8.41 & 0 & 0 & 0 \\ & 12.6 & 8.41 & 0 & 0 & 0 \\ & & 11.7 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2.3 & 0 & 0 \\ & & & & 2.3 & 0 \\ & & & & & 2.33 \end{bmatrix} \times 10^{10} = [s]^{-1}$
밀도 [Kg/m ³]	$\rho = 7500$

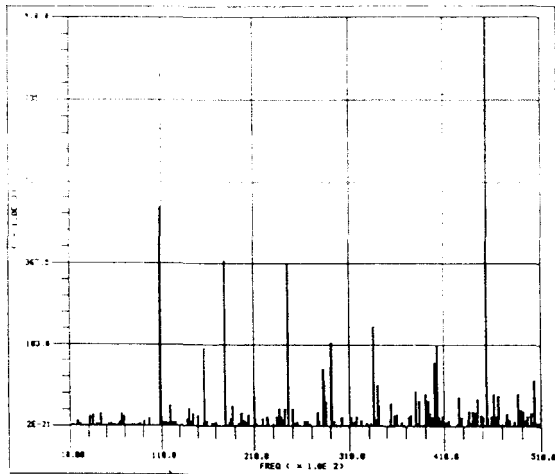


그림 4. 진동유리판의 주파수 특성

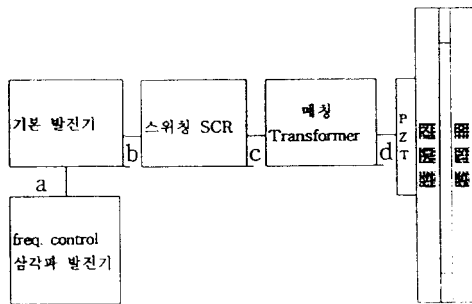
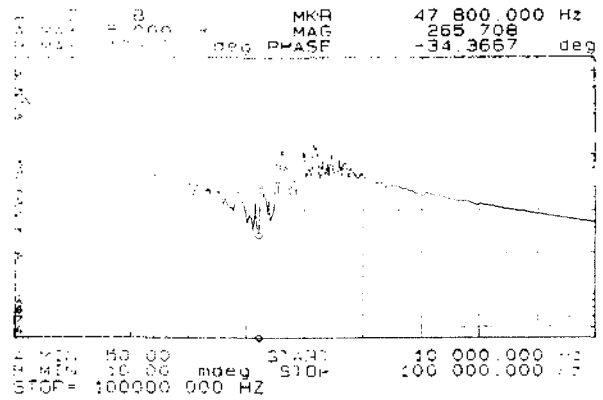


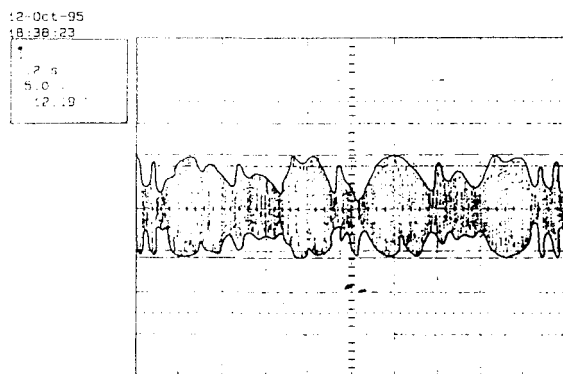
그림 5. 가변 주파수 발전기와 가진기

히 찾아서 구동해야 좋은 효율을 낼 수 있다. 즉, 그림 4는 발전기가 구동해야 할 유리판의 공진주파수를 찾는 결과를 나타낸다. 하지만 그림 4의 결과는 유리판 표면에 물방울이 전혀 없을 때의 특성을 구한 것이고, 실제의 경우 본 연구의 대상인 외부의 빛물에 노출된 유리판은 사용함에 있어서 표면에 불규칙한 물방울들이 부착되어 공진주파수도 변하게 되므로 고정주파수 발전기로는 공진점이 불일치하게 되어 충분한 효율을 얻을 수 없을 것이다. 그래서 본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위하여 공진주파수 근처를 일정폭을 두고 스위핑하는 가변주파수 발전기(VCO)를 이용한다.

이 가변주파수 발전기는 FM신호 발전기로 사용되는 장치로서 그림 5와 같은 구조를 갖는다.^{9), 10)} 본 연구에서 사용되는 주파수는 일정한 폭을 유지해야 하므로 주파수를 제어하는 그림 5의 a 지점에서의 신호전압으로 삼각파를 사용한다. 기본발전기에서 발생한 교류신호 b는 SCR을 거치면서 ± 12 V의 구형파를 형성하면서 공진주파수 근처를 스위핑하게 된다. 이 펄스신호는 PZT에 인가되기 전에 최대전력전송을 위해 임피던스 매칭을 이루어야한다. 일반적으로 전자회로단의 출력 임피던스는 수십옴 정도의 낮은 값을 취하는 반면 압전 PZT는 수십메가옴



(a)



(b)

그림 6. 압전소자(지름 50 mm) + 진동판(두께 1 mm) + 유리판(두께 1.1 mm)

(a) 임피던스 특성

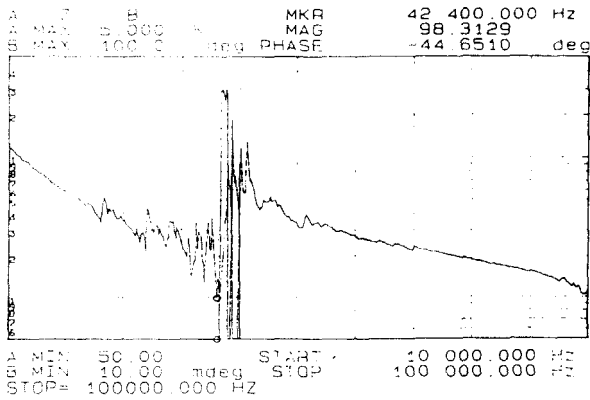
(b) 작동시 유리판 중심에서의 가속도

이상의 높은 저항성분을 가지고 있으므로 최대전력전송을 위하여 SCR에서 나온 전압을 높여주므로 임피던스를 매칭시킬 수 있다. 이 과정을 거쳐 송압된 전압은 PZT에 인가되고 공진주파수에서 유리판은 공전을 일으키면서 진동에너지를 낸다.

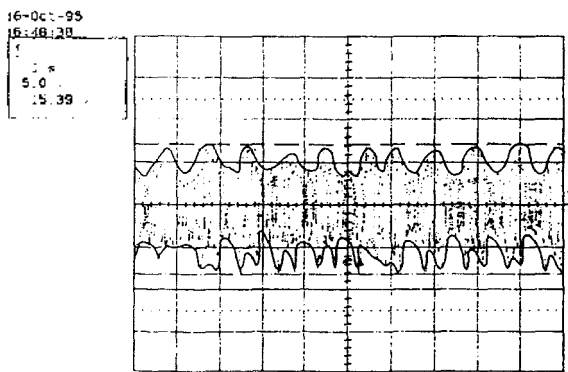
III. 초음파 물기제거기의 제작과 성능평가

III-1. 제 작

진동장치에 사용된 유리판의 규격은 가로(190 mm)×세로(104 mm)×두께(2 mm, 1.1 mm, 0.7 mm)를 사용했다. 보조진동판은 유리판과의 음향임피던스 매칭을 고려하여 티타늄을 사용하였고 그 규격은 유리판과 동일한 크기에 두께는 1 mm와 1.5 mm를 사용하였다. 보조진동판은 유리판과의 사이에 공간을 두기 위하여 가장자리의 접착부(폭 5 mm)를 1 mm의 높이로 블록가공하였다. 또 진동시 내부의 공기출입을 원활히 하기 위하여 중심에서 (-10 mm, 10 mm)의 지점에 지름 6 mm의 공기구멍을 냈다. 압전소자는 PZT를 사용하였고 규격은 두께 2.5 mm,



(a)



(b)

그림 7. 압전소자(지름 60 mm) + 진동판(두께 1 mm) + 유리판(두께 1.1 mm)

(a) 임피던스 특성

(b) 작동시 유리판 중심에서의 가속도

지름 50 mm, 60 mm를 사용하였다 PZT의 부착위치는 중심 부근이면 동일한 결과를 내므로 중심에서(30 mm, 0 mm) 위치에 부착하였다. 전극은 소자의 소결전극에 충분한 전류를 공급해 주면서 초음파의 진동에 유연하게 견딜 수 있고 동시에 진동에 제동을 주지 않기 위해서 전도성이 우수한 폭 10 mm, 두께 0.1 mm의 전도성 테이프를 사용했다. 각 부분의 접착은 전도성 에폭시를 사용하였고 미리와 진동판의 접착과, 진동판과 PZT의 접착은 금속형 에폭시를 사용하였다. 제작된 유리판의 케이스는 진동에 영향을 주지 않도록 가장자리부분에 아래위와 좌우 각각 네 곳과 두 곳을 점 접지하였다.

III-2. 성능평가

제작된 초음파 물기제거기의 성능을 실험하기 위하여 각 부품을 규격별로 제작하여 B&K 4375 가속도 센서를 사용하여 유리판의 중심에서 진동에너지를 측정한 결과 다음의 두 경우가 가장 양호한 특성을 나타내었다. 그림 6에서는 50 mm PZT, 1mm 진동판, 1.1 mm 유리판의 조합에 대한 임피던스 특성과 진동장치의 공진특성을 측정

한 결과이다. 발진기의 스위핑 폭은 30 kHz-60 kHz로 고정하였고 주기는 1초로 고정하였다. 이 경우에 공진은 약 46 kHz로 구동발진기의 한계주파수 내에 있음을 알 수 있고 진동가속도에 의한 측정전압은 12.19 V로 측정되었다. 그림 7에서는 60 mm PZT, 1 mm 진동판, 1.1 mm 유리판의 조합에 대한 임피던스 특성과 진동장치의 공진특성을 측정한 결과이다. 공진 주파수는 약 42 kHz로 역시 스위핑 대역에 있음을 알 수 있고 미리와 진동가속도는 약 15 V로 측정되었다. 두 경우를 비교해 보면 최대 사용전류 어느경우나 4.5 A로 측정되었지만 에너지 효율면에서는 공진특성이 한 점에 집중된 경우가 더 효율적이므로 60 mm의 소자를 사용한 경우가 우수하게 나타났고 유리판의 진동강도면에서도 60 mm 소자의 경우가 더 큰 진동을 냈으므로 최종적으로 60 mm의 PZT, 1 mm의 진동판, 1.1 mm의 유리판의 조합의 경우에 가장 효율적이고 높은 진동에너지를 발산하는 것으로 나타났다.

IV. 결 론

본 연구에서는 압전 액츄에이터를 이용한 유리판 물기제거기를 개발하였다. 개발을 위해서 유한요소법을 사용하여 유리판의 가진구조와 규격을 설계하였고 이를 바탕으로 실제 시제품을 제작하여 실험해 본 결과 가장 효율적인 조건은, 진동판 두께 1 mm, 유리판 두께 1.1 mm, 소자 지름 60 mm인 것으로 판명되었고 그 성능과 소모전력은 최고 12 V, 4.5 A로 저 전력을 소모하며 충분히 큰 진동특성을 보였다. 그리고 실험결과는 Simulation 결과와도 거의 일치하였으므로 Simulation을 이용하여 다양한 규격과 구조의 유리판에도 적용 가능할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. E. K. DIMITRIADIS, C. R. FULLER, C. A. ROGER, "Piezoelectric actuator for distributed vibration excitation of thin plates," *Journal of Vibration and Acoustics*, Transactions of the ASME 113, 100-107, 1991.
2. B. A. AULD Acoustic fields and waves in solids, VOL. 1. New York John Wiley & Sons, 1973.
3. Velimir M. Ristic, "Principles of Acoustic Devices," America, John Wiley & Sons, Inc., 1983.
4. J. F. Nye, F.R.S., "Physical Properties of Crystals," New York, Toronto, Oxford University Press, 1986.
5. Leo L. Beranek, "Acoustics," New York, The Acoustical Society of America, 1986[8] Francis S. Tse, Ivan E. Morse, Rolland T. Hinkle, "Mechanical Vibrations 2th," Allyn and Bacon, Inc. Boston, 1978.
6. S. S. Rao, "Mechanical Vibrations 2th", Addison Wesley, 1994
7. Philip M. Morse, K. Uno Ingard, "Theoretical Acoustics," New York, McGraw-Hill
8. Kinsler, Frey, Coppens, Sanders, "Fundamentals of Acous-

tics 3th," New York, John Wiley & Sons, 1982.

9. David A. Bell "Solid state pulse circuits," Prentice Hall, New Jersey

10. Jacob Millman, Arvin Grabell "Microelectronics," McGraw Hill New York, 1987.

▲정 이 봉(Yi Bong Jung)

1995년 2월:경북산업대학교 전자공학과(공학사)

1997년 2월:경북대학교 대학원 센서공학과(공학석사)

1997년 3월~현재:한국전자 종합연구소 세라믹연구센터

▲이 영 진(Youngjin Lee)

1995년 2월:경북대학교 전자공학과(공학사)

1997년 2월:경북대학교 대학원 센서공학과(공학석사)

1997년 3월~현재:경북대학교 대학원 센서공학과(박사과정)

▲노 동 래(Yongrae roh)

한국음향학회지 15권 5호 참조