

액체부하를 가진 랑쥬뱅형압전변환자의 진동특성

림춘길, 신윤섭

초음파기구들에서 리용되는 압전변환자에 미치는 부하의 영향을 정확히 해석하는것은 매우 어렵다.

선행연구[1]에서는 전기-기계등가회로모형에 기초하여 부하의 길이에 따르는 진동계의 공진주파수의 변화특성을 밝히고 랑쥬뱅형압전변환자에 미치는 고체와 액체부하의 영향을 고찰하였다. 이 방법의 부족점은 1차원리론에 기초하고있는것으로 하여 진동계의 가로크기의 영향은 취급하지 못한것이다. 특히 초음파세척과 같은 액체부하도 1차원구조로 제한하였다.

본문에서는 액체부하를 가진 랑쥬뱅형압전변환자의 진동특성을 3차원유한요소법[2, 3]에 기초하여 해석하고 그것들사이의 관계를 통하여 계산정확성을 밝혔다. 또한 3차원유한요소해석을 통하여 액체부하가 압전변환자에 미치는 영향을 액체매질의 음압분포와 연관시켜 연구하였다.

1. 랑쥬뱅형압전변환자의 공진주파수방정식

일반적으로 실전에서 리용되는 랑쥬뱅형압전변환자는 능동요소로서 압전사기원판과 앞뒤금속덮판으로 이루어져있다.(그림 1)

뒤쪽부하(공기매질)는 무시할수 있으므로 부하매질로 액체인 경우만을 고찰한다. 대표적인 실례는 초음파세척이다.

전기-기계등가회로리론으로부터 얻어지는 공진주파수방정식은 다음과 같다.

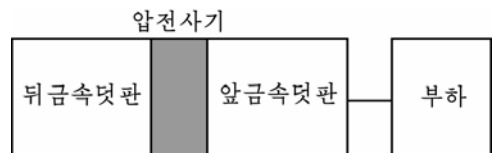


그림 1. 액체부하를 가진 랑쥬뱅형 압전변환자의 모형

$$\frac{z_m^2 \tan(k_m L_m) \tan \alpha - z_0^2 - z_0 z_m \tan(k_m L_m) \cot(k_0 L_0) - z_0 z_m \tan \alpha \cot(k_0 L_0)}{2 z_0 \tan(k_0 L_0 / 2) + z_m \tan(k_m L_m) + z_m \tan \alpha} = 0$$

여기서 $z_m = \rho_m C_m S_m$ 은 금속매질의 저항, $z_0 = \rho_0 C_0 S_0$ 은 압전사기의 저항, $\tan \alpha = \frac{z_m + z_l \tan(k_l L_l) \cot(k_m L_m)}{z_m \cot(k_m L_m) - z_l \tan(k_l L_l)}$ 은 부하에 관계되는 상수이며 $z_l = \rho_l C_l S_l$ 은 액체의 저항, ρ_m , C_m , S_m , L_m 은 각각 앞뒤 금속덮판의 밀도, 음속도, 자름면적, 길이이고 ρ_0 , C_0 , S_0 , L_0 은 압전사기의 정수, k_m , k_0 , k_l 은 금속매질과 압전사기, 액체부하에서의 파수, L_l 은 액체부하의 길이이다.

이 식은 주파수에 관한 초월방정식으로서 해석적으로는 풀이가 불가능하며 반드시 수치계산적방법으로만 가능하다.

2. 유한요소법에 의한 랑쥬뱅형압전변환자의 진동특성해석

방정식으로부터 계산되는 공진주파수는 진동자의 자름면적에는 관계없이 일정하며 자름면적이 큰 경우에는 계산된 공진주파수의 정확성을 담보할수 없다.

우리는 응용프로그램 ANSYS를 리용하여 1개의 랑쥬뱅형압전변환자와 액체부하가 있는 세척통으로 이루어진 간단한 구조의 초음파세척장치의 진동특성을 해석하였다.

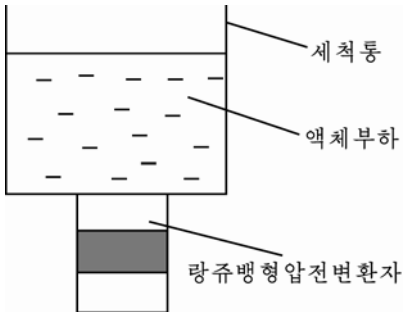


그림 2. 초음파세척장치의 기본구조

초음파세척장치의 기본구조는 그림 2와 같다.

우리는 진동자의 자름면적과 액체기둥의 자름면적이 같은 특수한 경우의 진동특성을 해석하였다.

해석대상은 고체와 액체가 결합된 련성계이며 액체기둥의 아래면이 진동자와 결합되어있고 윗면은 자유상태라고 볼수 있으며 액체기둥의 옆면은 대칭경계조건을 만족시킨다고 볼수 있다. 해석에서는 압전사기재료로 PZT4의 표준비등방성재료를 리용하였으며 금속과 액체(물)의 파라메터들을 다음과 같이 설정하였다.

$$\rho_m = 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, \rho_0 = 7.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, \rho_L = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3,$$

$$C_m = 5.1 \times 10^3 \text{ m/s}, C_0 = 2.95 \times 10^3 \text{ m/s}, C_L = 1.5 \times 10^3 \text{ m/s}$$

덧판과 압전사기, 액체기둥의 반경은 $R_m = R_0 = R_L = 20 \times 10^{-3} \text{ m}$ 이고 길이는 $L_m = 0.05 \text{ m}$, $L_0 = 0.01 \text{ m}$ 이다.

유한요소해석을 진행할 때 진동계의 대칭성을 고려하여 절반부분만을 계산하였다.

등가회로모형에 기초한 해석과 비교하기 위하여 방정식의 풀이와 유한요소해석에 기초한 공진주파수값을 한 그래프상에서 고찰하였다. 계산결과 여러가지 자름면적을 가진 액체부하의 길이에 따르는 공진주파수의 변화는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 공진주파수는 액체의 길이가 커짐에 따라 감소하는데 어떤 값에서 급격히 증가한다. 다시말하여 압전변환자의 공진주파수는 액체부하의 길이가 길어짐에 따라 감소하다가 급격히 뛰어올랐다 다시 점차 감소하는데 이런 특성이 주기적으로 반복된다. 이것은 선행연구 [1]결과와도 일치한다. 또한 액체부하의 반경이 변할 때 즉 자름면적이 변할 때 공진주파수도 일정한 경향성을 가지고 변화된다는것을 알수 있다. 다시말하여 어떤 구간에서는 자름면적이 클수록 공진주파수가 낮아지고 어떤 구간에서는 자름면적이 작을수록 공진주파수가 높아진다.

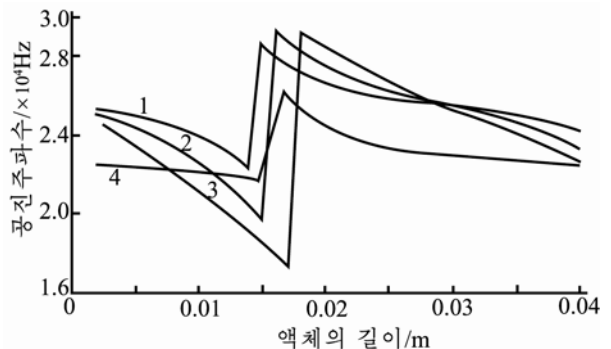


그림 3. 액체부하의 반경과 길이에 따르는 공진주파수의 변화

1-3은 액체반경이 각각 2, 3, 4cm일 때 방정식으로 계산한 공진주파수, 4-액체반경이 3cm일 때 유한요소해석법으로 계산한 공진주파수

이러한 특성이 바뀌는 액체부하의 길이는 공진주파수가 급격히 증가하는 위치 다음

에 존재한다. 이러한 경향성은 1차원해석과 유한요소해석의 경우와 같은데 공진주파수값은 약간 차이난다.

1차원리론에 의한 계산방법과 3차원유한요소법에 의한 계산방법의 정확성을 검토하기 위하여 선행연구[1]결과와 비교하였다. 이것을 위하여 선행연구[1]에서 측정한 액체부하가 결합된 압전변환자의 치수와 같은 변환자에 대하여 액체부하의 길이를 변화시키면서 공진주파수를 계산하였다.

계산한 랑쥬뱅형압전변환자와 액체부하의 치수는 다음과 같다.

$$R_m = R_0 = R_L = 30 \times 10^{-3} \text{ m}, L_m = 0.052 \text{ 3 m}, L_0 = 0.01 \text{ m}, l = 0.101 \sim 0.134 \text{ m}$$

계산결과 액체부하의 길이가 이 구역에서 변화될 때에도 길이가 길어짐에 따라 공진주파수는 서서히 감소하며 길이가 0.125m근방에서 급격히 뛰어올랐다가 다시 감소한다. 액체부하의 길이가 길어질 때 공진주파수가 급격히 증가하는것은 액체매질의 음마당특성과 관련된다. 유한한 길이를 가진 액체부하의 아래쪽은 압전변환자와 결합되어있고 윗쪽은 개방되어있으며 여기에 압전변환자를 통한 조화진동을 가하면 액체매질에는 정상파마당이 형성된다. 즉 액체부하의 양끝은 배로 되며 그사이에 마디부분들이 형성된다. 이때 액체부하의 길이가 길어지면 압전변환자의 공진주파수가 서서히 감소하다가 급격히 증가하는 위치에서 정상파의 차수가 커진다. 즉 마디의 개수가 1개 증가한다. 이것은 액체매질의 음압분포를 관찰해보면 보다 명백해진다.

실례로 모의에서 $l=0.113\text{m}$ 인 경우에는 액체부하내부에 있는 정상파의 마디가 2개이고 $l=0.134\text{m}$ 인 경우에는 정상파의 마디가 3개이다. 이렇게 액체부하가 결합된 랑쥬뱅형압전변환자에서는 부하가 없는 순수한 압전변환자의 공진주파수인 22kHz근방에서 정상파가 형성되는 음압분포를 가진 진동이 일어난다. 또한 압전변환자의 공진주파수가 급격히 뛰어오르는 구간에서 진동양상이 매우 복잡해지며 음압의 정상파모양이 뚜렷하지 않은 특성이 나타난다.

맺 는 말

액체부하가 결합된 랑쥬뱅형압전변환자의 진동특성을 전기-기계등가회로모형과 3차원유한요소법에 기초하여 해석하고 응용프로그램 ANSYS를 리용하여 모의하였다.

1) 액체부하의 길이가 클수록 공진주파수가 서서히 감소하다가 일정한 값구간에서는 급격히 뛰어오르는데 이러한 특성은 주기적으로 반복된다.

2) 액체부하의 자름면면적이 커질수록 액체매질속에 형성되는 음압분포가 매우 복잡해지는것으로 하여 압전변환자의 진동특성도 복잡하게 변화된다.

참 고 문 헌

- [1] Lin Shuyu; Ultrasonics, **43**, 365, 2005.
- [2] Xiaojun Xian et al.; Ultrasonics, **48**, 202, 2008.
- [3] Wenchu Ou et al.; Sensors and Actuators, A **222**, 220, 2015.

Vibration Characteristics of Langevin Piezoelectric Transducer with Liquid Load

Rim Chun Gil, Sin Yun Sop

We analysed the Langevin piezoelectric transducer with liquid load by electro-mechanical equivalent circuit and 3D finite element analysis. We investigated the accuracy of the 1D equivalent circuit and studied the effect of the liquid load on the vibration characteristics of the transducer.

Key words: piezoelectric transducer, liquid load, vibration characteristics