

## 유한전기회로요소모형(FECЕМ)을 리용한 볼트조임랑쥬뱅진동자의 최량구조설계

윤철혁, 박명일

볼트조임랑쥬뱅진동자는 흔히 에너지를 집초시키거나 나르는 역할을 하는 여러가지 형태의 폰과 결합되어 초음파세척이나 초음파용접, 초음파기계가공, 음향화학, 수중통신, 초음파수술과 같은 각이한 응용분야들에서 널리 리용된다.

폰의 구조를 합리적으로 설계하는것은 매질속에서 복사출력이 최대인 진동자를 설계하는데서 대단히 중요한 문제로 나신다.

선행연구들[1, 2, 4]에서는 메존(Mason)등가회로를 비롯한 전기회로리론과 유한요소해석(FEA)리론을 리용하여 볼트조임랑쥬뱅진동자의 구조를 설계하고 그것의 성능을 해석하였지만 보다 발전된 전기회로리론인 유한전기회로요소모형(FECЕМ: Finite Electrical Circuit Element Modeling)에 기초하여 매질속에서의 복사출력이 최대인 진동자의 기하학적구조를 설계하는 방법에 대하여서는 구체적으로 밝히지 않았다. 유한전기회로요소모형[3]은 진동자를 설계하고 해석할수 있는 두가지 기능을 다같이 갖춘 전기회로리론으로서 진동자의 기하학적구조를 설계할뿐아니라 응력분포나 출력손실과 같은 파라메터들을 해석할수 있는 우점을 가지고있다.

우리는 유한전기회로요소모형을 리용하여 주어진 동작주파수(20kHz)를 만족하면서도 매질속에서의 복사출력이 최대인 볼트조임랑쥬뱅진동자의 기하학적구조를 설계하고 유한요소해석방법(FEM)을 리용하여 비교검증하였다.

최량으로 설계하려는 랑쥬뱅진동자의 기하학적구조는 그림 1과 같이 압전사기, 앞질량부와 뒤질량부로 구성되어있다.

볼트조임랑쥬뱅진동자의 뒤질량부( $a$ )는 직경이  $\phi_a = 50\text{mm}$  이고 길이가  $L_a$  인 철재료로, 앞질량부( $d$ )는 앞머리부와 뒤머리부의 직경이 각각  $\phi_d = 80\text{mm}$  ,  $\phi_a = 50\text{mm}$  이고 길이가  $L_d$  인 알루미늄재료로, 원판형압전사기( $b, c$ )는 외경과 내경이 각각  $\phi_a = 50\text{mm}$  ,  $\phi_p = 13\text{mm}$  이고 두께가  $t_p = 5\text{mm}$  인 PZT-M재료로, 볼트는 직경  $\phi_b = 10\text{mm}$  인 볼수강재료로 되어있다. 그리고 진동체는 뒤면복사매질이 공기이고 앞면복사매질은 물로서 한면복사계이다.

유한전기회로요소모형을 리용하여 매질속에서 복사하는 랑쥬뱅진동자의 앞면(복사면)과 뒤면의 진동속도비가 최대로 되는 앞질량부와 뒤질량부의 기하학적크기를 설계하였다.

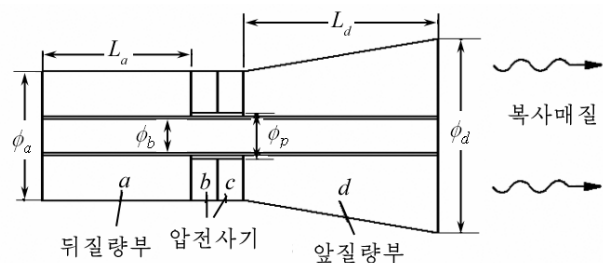


그림 1. 볼트조임랑쥬뱅진동자의 기하학적구조

그림 2에 볼트조임량주행진동자의 유한전기회로요소모형을 보여주었다.

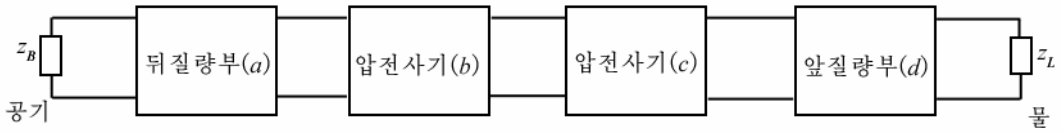


그림 2. 볼트조임량주행진동자의 유한전기회로요소모형

그림 2의 매 단자들에서 힘과 진동속도사이에는 다음의 식이 성립한다.

$$\left. \begin{aligned} F_1^a &= -z_B \cdot v_1^a \\ \begin{bmatrix} F_1^a \\ v_1^a \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A^a & B^a \\ C^a & D^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2^a \\ v_2^a \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} F_1^b \\ v_1^b \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A^b & B^b \\ C^b & D^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2^b \\ v_2^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A^b - 1 & B^b \\ C^b & D^b - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -NV \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} F_1^c \\ v_1^c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A^c & B^c \\ C^c & D^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2^c \\ v_2^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A^c - 1 & B^c \\ C^c & D^c - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -NV \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} F_1^d \\ v_1^d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A^d & B^d \\ C^d & D^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2^d \\ v_2^d \end{bmatrix} \\ F_1^d &= -z_L \cdot v_1^d \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서  $F_i^m$ ,  $v_i^m$  ( $i=1, 2$ ;  $m=a, b, c, d$ )은 물리적으로 볼 때 원기동형 또는 원추형진동요소경계면들에서의 힘과 진동속도이며  $ABCD$ 행렬식은 전저항과 다음의 관계가 있다.[3]

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} A^m & B^m \\ C^m & D^m \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} z_{11}^m / z_{21}^m & (z_{11}^m z_{22}^m - z_{12}^m z_{21}^m) / z_{21}^m \\ 1 / z_{21}^m & z_{22}^m / z_{21}^m \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} z_{11}^m & z_{12}^m \\ z_{21}^m & z_{22}^m \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A^m / C^m & (A^m D^m - B^m C^m) / C^m \\ 1 / C^m & D^m / C^m \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

여기서  $z_{11}^m$ ,  $z_{12}^m$ ,  $z_{21}^m$ ,  $z_{22}^m$ 는 매개 요소부분들의 전저항이다.

그림 2에서 진동자의 앞뒤면에서의 매질복사저항은 다음과 같다.

$$z_L = \rho_L c_L s_d \{ [1 - 2J_1(k_L \phi_d) / (k_L \phi_d)] + j2S_1(k_L \phi_d) / (k_L^2 \cdot \phi_d^2) \} \quad (3)$$

$$z_B = \rho_B c_B s_a \{ [1 - 2J_1(k_L \phi_a) / (k_L \phi_a)] + j2S_1(k_L \phi_a) / (k_L^2 \cdot \phi_a^2) \} \quad (4)$$

여기서  $\rho_m$ ,  $c_m$ ,  $s_m$ ,  $k_m$ ,  $L_m$  ( $m=a, b, c, d$ )은 진동자를 구성하는 부분소재재료들의 밀도, 음속도, 가로자름면적, 파수, 길이이며  $J_1$ 은 1차베셀함수,  $S_1$ 은 1차스트르베함수이다.

한편 식 (1)로부터 다음의 식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} F_1^a \\ v_1^a \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} F_2^d \\ v_2^d \end{bmatrix} + T_2 \begin{bmatrix} -NV \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 결수  $T_1$ ,  $T_2$ 는 각각 다음과 같다.

$$T_1 = \begin{bmatrix} A^1 & B^1 \\ C^1 & D^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^a & B^a \\ C^a & D^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^b & B^b \\ C^b & D^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^c & B^c \\ C^c & D^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^d & B^d \\ C^d & D^d \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} A^2 & B^2 \\ C^2 & D^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^a & B^a \\ C^a & D^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^b - 1 & B^b \\ C^b & D^b - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^c - 1 & B^c \\ C^c & D^c - 1 \end{bmatrix}$$

다음으로 진동자의 공진주파수를  $|T_1|=0$  으로부터 구하고 앞뒤질량부의 길이에 따르는 진동자앞뒤복사면에서의 진동속도비  $v_2^d/v_1^a$  를 고찰하였다. ANSYS를 리용하여 복사매질속에서 볼트조임랑쥬뻥진동자의 앞뒤질량부의 길이변화에 따르는 진동속도비를 유한전기회로요소모형에 기초한 등가회로리론결과와 비교하였다. ANSYS해석에 리용된 볼트조임랑쥬뻥진동자에서 압전사기와 앞뒤질량부들의 요소형태로는 축대칭2차원요소형태인 Plane13과 Plane42를 리용하였고 진동자의 전체 요소분할수는 약 3만개로 주었으며 경계조건으로 압전사기에 1V의 구동전압을 걸어주었다.

진동자앞뒤복사면에서의 진동속도비  $v_2^d/v_1^a$  가 최대로 되는 앞뒤질량부의 길이를 구하기 위하여 주파수방정식  $|T_1|=0$  을 만족하는 동작주파수 20kHz에서 앞뒤질량부의 길이변화에 따르는 진동속도비의 변화곡선을 고찰하였다.(그림 3)

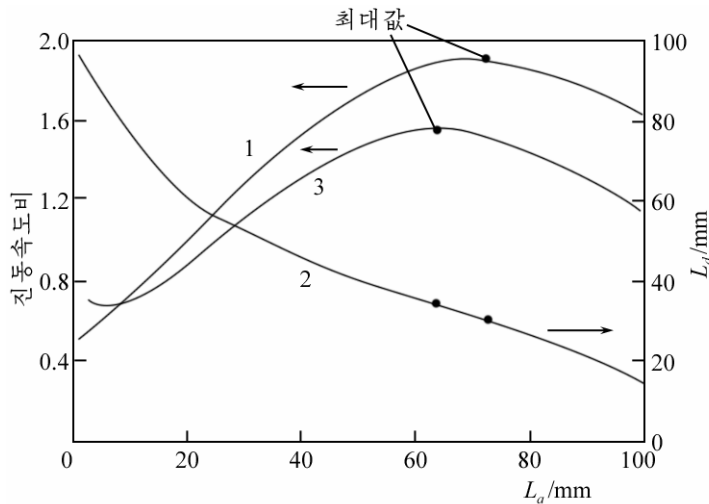


그림 3. 앞뒤질량부의 길이변화에 따르는 진동속도비의 변화곡선

1, 3은 유한전기회로요소모형과 유한요소해석으로 얻은 진동속도비,  
2는 앞뒤질량부의 길이사이관계

그림 3에서 보는바와 같이 유한전기회로요소모형을 리용하여 구한 매질속에서 한면 복사하는 볼트조임랑쥬뻥진동자의 앞뒤면의 진동속도비는 앞뒤질량부의 길이가 각각  $L_d = 30\text{mm}$ ,  $L_a = 72\text{mm}$  일 때 최대값을 가지며 유한요소해석을 리용하여 구한 진동속도비는 앞뒤질량부의 길이가 각각  $L_d = 34\text{mm}$ ,  $L_a = 64\text{mm}$  일 때 최대값을 가진다.

유한전기회로요소모형과 유한요소해석으로 구한 진동속도비의 차이는 1차원등가회로리론인 유한전기회로요소모형보다 2차원의 유한요소해석프로그램을 리용하는것이 더 현실적이며 구체적인 구조를 반영하기때문이라고 본다.

## 맺 는 말

매질속에서 최대복사출력을 보장하기 위하여 20kHz의 동작주파수를 만족하면서도 앞뒤면의 진동속도비가 최대인 볼트조임랑쥬벵진동자의 앞질량부와 뒤질량부의 기하학적크기를 유한전기회로요소모형에 기초한 등가회로해석과 유한요소해석으로부터 구하고 비교검증하였다. 복사출력이 최대인 볼트조임랑쥬벵진동자의 기하학적구조를 설계하는 이론을 반과장길이의 진동계에뿐만아니라 여러과장길이의 진동계에도 적용할수 있는 방법론을 주었다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. L. Peshkovsky et al.; Ultrasonics Sonochemistry, **14**, 314, 2007.
- [2] Z. Fu et al.; Ultrasonics, **52**, 578, 2012.
- [3] F. Ebrahimi; Advances in Piezoelectric Transducers, Intech, 1~15, 2011.
- [4] P. Kluk; Acta Physica Polonica, A **127**, 3, 719, 2015.

주체108(2019)년 6월 5일 원고접수

## Optimum Structural Design of Bolted Langevin Transducer Based on Finite Electrical Circuit Element Modeling(FECM)

*Yun Chol Hyok, Pak Myong Il*

We designed an optimal geometric structure of BLT with maximum radiating power for the given operating frequency of 20kHz in the medium using FECM and then identified its acoustic characteristics using FEM.

**Key words:** FECM, bolted Langevin transducer, radiating power