

종진동모드 초음파 액추에이터의 위상최적화 설계

Topology Optimization of Ultrasonic Actuator for the Longitudinal Mode

김지수* · 이수일†
Ji Soo Kim , Soo Il Lee

1. 서 론

초음파 액추에이터는 와이어본더에 사용되는 핵심 부품으로 와이어의 절단과 접합 순간 초음파 에너지를 전달하는 역할을 한다. 초음파 액추에이터의 설계를 경험이나 직관적인 방법으로 설계하거나 기존 형상의 설계를 단순히 답습하는 지금까지의 방법은 새로운 공정 적용에 한계가 있고, 시행착오를 많이 거치기 때문에 비효율적이다. 본 연구에서는 초음파 액추에이터를 설계하는 더욱 효율적인 방안을 제시하기 위하여 위상최적화 기법을 시도하였다.

위상최적화란 구조물의 설계조건을 이용하여 목적 함수를 만족하는 구조물의 설계 기법이다⁽¹⁾. 본 연구에서는 초음파 액추에이터의 종진동 모드 중 3차 모드의 주파수 이동 위상최적화를 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 COMSOL과 MATLAB을 연동하여 위상최적화 설계를 위한 몇 가지 알고리즘을 비교하였고 그 적용 가능성을 확인하였다.

2. 액추에이터의 동적 위상최적화 적용

구조물의 위상최적화를 위해서 각 FEM요소의 상대 밀도를 0과 1 사이의 값으로 계산하는데, 이러한 상대밀도를 이용하여 모델의 밀도 및 강성을 업데이트하기 위한 보간함수(interpolation function)로 널리 쓰이는 SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization)와 RAMP (Rational Approximation of material properties) 두가지 방법은 다음과 같다. 식(1a)는 SIMP, 식(1b) RAMP 식을 나타낸다.

$$K^e = (x_e)^{p_stiff} K^0, \tag{1a}$$

$$M^e = (x_e)^{p_mass} M^0.$$

$$K^e = \frac{x_e}{1+q(1+x_e)} K^0, \tag{1b}$$

$$M^e = \frac{x_e}{1+q(1+x_e)} M^0.$$

동적 문제에서 위상최적화를 위하여 주파수를 3차 종진동 모드 고유진동수로 이동하기 위한 목적 함수를 사용하였다. 목적 함수는 식 (2)와 같다.

$$\min : F = \frac{\omega_i^2 - \omega_1^2}{\omega_1^2}. \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \text{Subject to : } & \frac{V(x)}{V_0} \geq f, \\ & : [\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M}] \mathbf{v}_i = 0, \\ & : 0 < x_{\min} \leq x \leq 1. \end{aligned}$$

위상최적화 과정 중 설정한 종진동 모드의 추적을 위하여 많은 연구에서 사용하고 있는 MAC (Modal Assurance Criterion)⁽²⁾과 WMAC (Weighted MAC)⁽³⁾을 비교 하였다. WMAC은 위상최적화 과정 중 상대밀도가 매우 작은 요소의 거동이 실제 물리적으로 불가능한 거동이 나올 경우를 감안하여 각 요소의 상대밀도를 가중치로 이용하여 가중치를 두어 모드를 비교하는 방법이다. 각각의 식은 식(3a), (3b)와 같다.

$$MAC(\Phi_{ref}, \Phi_{pre}) = \frac{|\Phi_{ref}^T \Phi_{pre}|^2}{(\Phi_{ref}^T \Phi_{ref})(\Phi_{pre}^T \Phi_{pre})}. \tag{3a}$$

$$WMAC(\Phi_{ref}, \Phi_{pre}) = \frac{|\Phi_{ref}^T D_\rho \Phi_{pre}|^2}{(\Phi_{ref}^T D_\rho \Phi_{ref})(\Phi_{pre}^T D_\rho \Phi_{pre})}. \tag{3b}$$

† 교신저자; 이수일, 서울시립대학교 기계정보공학과

E-mail : leesooil@uos.ac.kr

Tel : 02-2210-5251, Fax : 02-2210-5575

* 서울시립대학교 대학원 에너지환경시스템공학과

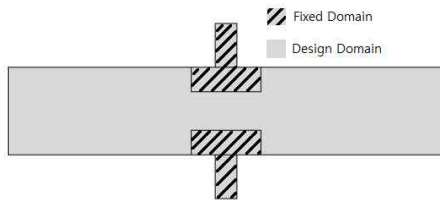


Fig. 1 Model of wire bonder transducer

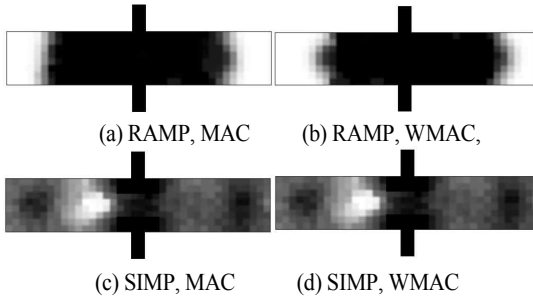


Fig. 2 Optimized model using RAMP and SIMP algorithms

각 위상최적화 알고리즘을 비교하기 위하여 와이어 본더용 트랜스듀서의 2차원 모델을 Fig. 1 과 같이 설정하였다. 적용한 모델의 고정영역(Fixed domain)은 트랜스듀서의 고정부를 위하여 상대 밀도가 1로 고정된 부분이고 설계영역(Design domain)은 최적화를 진행하는 부분이다.

Fig. 2(a) ~ (d)는 설계 모델이 가지고 있는 기존 길이방향 3차 모드의 고유진동수를 200kHz로 이동시키는 목적함수를 이용하여 각각 RAMP와 SIMP 알고리즘을 적용 시킨 결과이다. 또한 Table 1은 최적화 모델의 최종 수렴 고유진동수이다. RAMP 방법을 이용한 위상최적화 모델은 MAC 및 WMAC 제한조건을 사용한 두 경우 모두 회색 영역이 보이지만 길이방향에 형상변화가 확실하며 주파수 또한 10% 이내로 수렴하였다. 하지만 SIMP 방법을 이용한 모델의 경우 MAC과 WMAC 두 경우 모두 체커보드(Checker-board) 패턴이 지배적으로 보이고 주파수 역시 수렴하지 않았다.

한편 Fig. 3 은 RAMP 모델의 최적화 과정 중 추적한 모드 변화를 반복(iteration)별로 나타내고 있는데 MAC의 경우 24번째 Iteration까지 일정한 모드를 찾지 못하고 발산하지만 WMAC의 경우 13번 모드에 수렴하였다. COMSOL 해석결과 13번 모드가 3차 중진동 모드임을 확인하였다.

Table 1 Eigenfrequency of optimized models by COMSOL

	RAMP	SIMP
MAC	201kHz	123kHz
WMAC	213kHz	123kHz

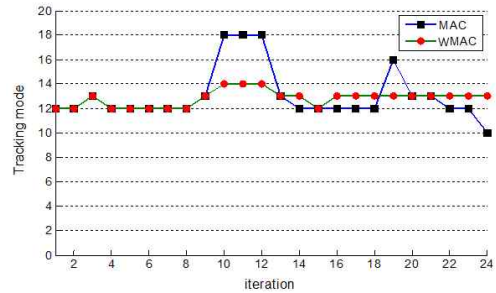


Fig. 3 Tracking mode during optimize iteration of RAMP model

3. 결론

본 연구에서는 와이어 본더용 초음파 트랜스듀서를 2차원 모델로 근사화하여 위상최적화 가능성을 고찰하였다. 위상최적화에는 길이방향 3차 모드의 주파수 이동에 관한 목적함수를 사용하였다. 또한 SIMP 및 RAMP 결과를 비교하였고, 진동모드의 추적을 위하여 MAC과 WMAC의 차이 또한 비교하였다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2011년도 산학연공동기술개발사업(No.00045000-1)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- (1) Bendsøe, M. P., Kikuchi, N., 1988, "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, pp.197-224.
- (2) Yoon Young Kim, Tae Soo Kim, 1999, "MAC-based mode-tracking in structural topology optimization", Computers and Structure, Vol 74, pp.375-383.
- (3) R.J. ALLEMANG, 2002 "The modal assurance criterion (MAC): twenty years of use and abuse", the International Modal Analysis Conference, pp. 397-405