Transactions of the KSNVE, 23(1) : 84~91, 2013
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2013.23.1.084

한국소음진동공학회논문집 제 23 권 제 1 호, pp. 84~91, 2013
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

플립칩 접합용 초음파 혼의 목표 주파수와 모드를 고려한 2차원 및 3차원 위상최적화 설계

2D and 3D Topology Optimization with Target Frequency and Modes of Ultrasonic Horn for Flip-chip Bonding

하 창 용*·이 수 일†
Chang Yong Ha and Soo Il Lee

(Received November 19, 2012 ; Revised December 3, 2012 ; Accepted December 3, 2012)

Key Words : Topology Optimization(위상최적화), Ultrasonic Horn(초음파혼), Frequency Optimization(주파수 최적화)

ABSTRACT

Ultrasonic flip-chip bonding needs a precise bonding tool which delivers ultrasonic energy into chip bumps effectively to use the selected resonance mode and frequency of the horn structure. The bonding tool is excited at the resonance frequency and the input and output ports should locate at the anti-nodal points of the resonance mode. In this study, we propose new design method with topology optimization for ultrasonic bonding tools. The SIMP(solid isotropic material with penalization) method is used to formulate topology optimization and OC(optimal criteria) algorithm is adopted for the update scheme. MAC(modal assurance criterion) tracking is used for the target frequency and mode. We fabricate two prototypes of ultrasonic tools which are based on 3D optimization models after reviewing 2D and 3D topology optimization results. The prototypes are satisfied with the ultrasonic frequency and vibration amplitude as the ultrasonic bonding tools.

1. 서 론

초음파 접합은 마이크로시스템과 플립칩 반도체 패키징에서 널리 쓰이는 방법으로, 초음파 접합 장비에서 핵심 부품은 초음파 혼을 포함한 접합 모듈이라고 할 수 있다. 플립칩 접합에 이용되는 초음파 접합은 공구 혼(tool horn)의 초음파 진동 에너지를 접합부에 전달하여 접합하는 방식으로 단순히 열과 압력에 의한 기존 열압착(thermocompression) 방식에 비해 낮은 온도에서 빠른 속도로 접합이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 초음파 접합 조건이 까다롭고 쉽게 적용이 어려운 이유는 초음파 진동주파수와 혼 구조의 진동모드를 잘 맞추어 설계해야 제대로 성능을 발휘할 수 있기 때문이다. 최근 반도체는 그 종류가 매우 다양하며 새로운 제품이 빠르게 출시되고 있어서 반도체 패키징 부문에서도 생산되는 반도체의 빠른 대응을 위한 체계적인 공정 및 장비

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul
E-mail : leesooil@uos.ac.kr
Tel : +82-2-2210-5667, Fax : +82-2-2210-5575
* Graduate Student, Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul(Current address : Hyundai Motor Co., Ltd., Namyang, Kyunggi-do, Korea)

‡ Recommended by Editor Jin Oh Kim

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

설계가 필수적이다. 기존의 초음파 혼 설계와 제작 방식은 설계자의 경험에 의존하거나 단순 반복적인 해석을 통한 시도-오차(trial-and-error) 접근 방식이었다. 이러한 초음파 혼의 설계를 위해 최근에는 유한요소 해석을 이용한 진동모드 해석을 설계에 적용한 연구들이 발표되었다[1~3].

그러나 주파수와 진동모드의 파장만을 유한요소 해석으로 진행하는 설계로는 최적화된 설계를 바로 찾아내기가 어렵기 때문에 이 논문에서는 위상최적화[4] 기법을 적용하여 주파수 및 진동모드에 맞는 초음파 혼의 설계에 효과적이고 합리적인 과정을 수립하였다.

위상최적화는 주어진 목적함수와 제한조건에 맞는 최적의 위상(topology) 영역을 찾는 방법으로, Bendsøe 등[5]이 균질화법(homogenization method)을 이용한 위상최적화 방법을 소개하면서 널리 알려졌다. 그 후 SIMP(solid isotropic material with penalization)[6] 및 Level-set[7] 방법과 같은 다양한 기법들이 개발되었다. 이 논문에서는 종 방향 진동모드를 갖는 초음파 혼에 대하여 위상최적화 기법 중 SIMP 정식화와 OC(optimal criteria)업데이트 알고리즘을 적용하여 초음파 혼의 고유진동수를 특정 목표 주파수 대역으로 이동하는 목적함수로 최적화를 진행하였다. 또한 작동 주파수에서 접합에너지가 최대화 될 수 있도록 하는 공진모드가 보장될 수 있도록 MAC(modal assurance criterion)값을 추적하였다. 그 결과 설계영역 별로 두 가지 최적화 설계안을 도출하고 2차원 및 3차원 유한요소 해석과 실제 제작을 통해 설계안의 유효성과 초음파 혼의 성능을 검증하였다.

이 연구에서 설계 대상으로 정한 초음파 혼은 Fig. 1과 같이 최대 15 mm×4 mm 크기의 플립칩까지 접합을 목적으로 길이방향 코사인 함수 형태의 종(longitudinal) 진동모드를 갖는 대칭형 접합 모듈이다. 혼의 중앙에 접합부를 설치하여 한 쪽 끝단($x=0$ 위치) 압전 액추에이터에서 발생시킨 초음파 진동을 혼의 공진모드를 이용하여 칩과 접합부($x=L/2$ 위치)에 초음파 에너지 U를 전달한다. 또 두 군데의 노드(node) 위치($x=L/4$ 및 $3L/4$)를 접합 장비의 홀더부에 고정하여 접합 시 수직 방향으로 하중 압력 P를 부가하는 구조를 갖는다.

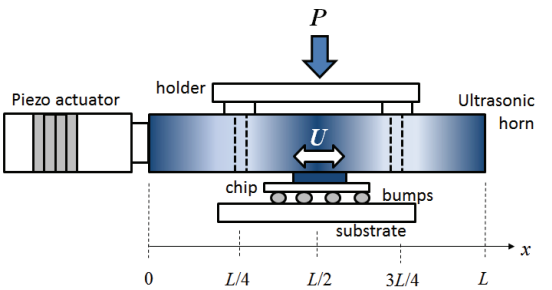


Fig. 1 Ultrasonic horn for flip-chip bonding(full-wavelength mode type)

2. 위상최적화

초음파 혼의 설계에 위상최적화 과정을 적용하기 위하여 먼저 설계 영역을 2차원 및 3차원 유한요소로 정식화하고 MATLAB에서 자체적으로 프로그래밍하였다. Fig.1과 같이 2차원 모델은 평면 응력 문제를 이용하여 표준 4-노드 사등변(quadrilateral)요소를, 3차원 모델은 8-노드 육면체(hexahedron)요소로 모델링 하였다. 2차원 및 3차원 모델 모두 등매개변수(isoparametric)[8] 정식화를 진행하였고 재질은 선형등방성으로 가정하였다.

위상최적화에 SIMP방법을 적용함에 있어 각 요소의 상대 체적밀도(relative volume density)가 설계변수가 되는데 반복 계산과정에서 각 요소의 질량과 강성 행렬은 다음 식 (1)과 같이 해당 요소의 체적밀도의 지수형태에 비례하는 값으로 나타난다[4].

$$\mathbf{M}^e = (x^e)^p \times \mathbf{M}^0$$
$$\mathbf{K}^e = (x^e)^p \times \mathbf{K}^0 \quad (1)$$

이 때 지수 p는 벌칙값(penalization)이라고 하는데

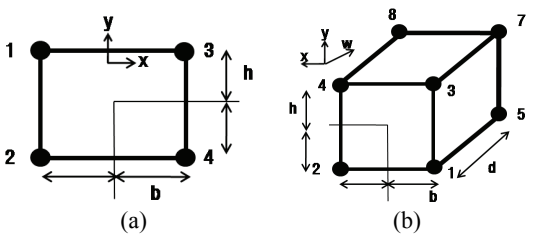


Fig. 2 Finite elements: (a) 2D 4-node quadrilateral element; and (b) 3D 8-node hexahedron element

일반적으로 3이상의 값을 사용하고[9] 이 논문에서는 $p=4$를 적용하였다.

일반적으로 동적 위상최적화에서는 고유진동수(공진주파수)를 최대화하거나 최소화하는 것이 일반적이다[10]. 그러나 이 논문에서는 식 (2)와 같이 목표 주파수 ω_t와 초기설정 주파수 ω_i사이 편차를 최소화하는 목적함수(objective function) F와 제한조건을 식 (2)와 같이 정의하였다.

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

여기서 f는 체적제한조건으로 70 %로 설정하였고, $x_{\min}$은 최소체적밀도로 0.001로 설정하였다.

이 연구에서 플립칩 접합에서 사용되는 초음파 혼의 진동모드는 길이(longitudinal)방향 종진동의 전파장(full-wavelength) 코사인(cosine)파형의 모드로 최적화 과정에서 유한요소 모델의 진동모드 중 지정한 모드형상을 추적하기 위하여 식 (3)과 같은 MAC(modal assurance criterion)[11]을 구하여 반복계산 마다 최대 MAC값을 갖는 모드를 선정하도록 하였다.

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

여기서 Φ_{ref}와 Φ_{pre}는 각각 기준 및 최적화 계산 과정의 비교 모드벡터를 나타낸다.

최적설계 과정에서는 설계목적에 맞는 설계변수를 갱신(update)하기 위해서 민감도(sensitivity)해석을 수행하게 된다. 식 (2)의 목적함수 F를 요소체적밀도 x^e에 대한 미분으로 나타내면 민감도 함수는 다음 식 (4)와 같이 표시된다.

$$\frac{\partial \omega_i^2}{\partial x^e} = \frac{v_i^T [\frac{\partial K}{\partial x^e} - \omega_i^2 \frac{\partial M}{\partial x^e}] v_i}{v_i^T M v_i}. \tag{4}$$

또한 설계변수를 효과적으로 갱신하기 위하여 이 논문에서는 OC(optimal criteria)방법의[12] 알고리즘을 이용하였다. OC방법은 민감도값에 따라 갱신되는 설계변수가 증가 또는 감소하도록 다음 식 (5)와 같은 조건식을 적용하게 된다.

$$x_e^{new} = \begin{cases} \max(x_{\min}, x_e - m) \\ \quad if \quad x_e B_e^{\eta} \leq \max(x_{\min}, x_e - m), \\ x_e B_e^{\eta} \\ \quad if \\ \max(x_{\min}, x_e - m) < x_e B_e^{\eta} < \min(1, x_e + m), \\ \\ \min(1, x_e + m) \\ \quad if \quad \min(1, x_e + m) \leq x_e B_e^{\eta}. \end{cases} \tag{5}$$

여기서 $x_{\min}$, x_e, m, B_e^{η}는 각각 최소체적밀도, 설계변수의 현재값, 설계변수의 최대 변화 한계, 민감도를 이용한 설계변수 갱신값을 나타낸다. 또 위 식 (5)에서 B_e^{η}는 동적 최적화 문제에서는 다음과 같은 식으로 바꾸어 적용하게 된다.

또한 설계변수를 효과적으로 갱신하기 위하여 본 논문에서는 OC(optimal criteria) 알고리즘을 이용하였다. OC방법은 민감도값에 따라 갱신되는 설계변수가 증가 또는 감소하도록 다음 식 (6)과 같은 조건식을 적용한다[13].

$$B_e = \frac{\max[0, (\partial(F_{obj})/\partial x_e)]}{\lambda(\partial V / \partial x_e)}. \tag{6}$$

여기서 F_{obj}, λ는 각각 목적함수와 라그랑지안 승수(Lagrangian multiplier)를 나타낸다.

3. 최적화 설계 결과

초음파 혼의 2차원과 3차원 모델의 위상최적화를 진행하기 위해 앞 절에서 언급한 과정으로 최적화 프로그램을 MATLAB으로 작성하여 계산을 수행하였다. 설계 목표는 기존 40 kHz에서 작동하던 초음파 혼의 형상을 기반으로 공진 및 작동 주파수 대역을 60 kHz까지 증가시키는 것으로 하고, 동시에 초

기 모델이 가지고 있던 전파장 코사인 모드는 동일하게 유지하도록 하였다. 초음파 혼에서 작동주파수가 증가하면 동일 초음파 에너지에 필요한 진동 진폭이 감소하기 때문에 미세피치 접합에 유리하며, 동일한 비율의 진동모드를 유지하는 이유는 기존 접합장비와 모듈 간의 호환성을 보장하기 위해서이다.

위상최적화에서는 위상의 변화를 허용하는 설계영역(design domain)과 항상 일정한 밀도를 유지하는 보존구역(fixed region)을 설정하여 진행하게 된다. 이 논문에서는 보존구역의 크기에 따른 위상최적화 양상의 차이를 살펴보기 위해 Fig. 3과 같이 보존구역 길이를 a로 설정하고, 각각 8 mm(PF8) 또는 16 mm(PF16)로 하는 모델로 나누어 최적화를 진행하였다. PF8과 PF16의 2차원 모델에 대하여 위상최적화 과정을 수행한 결과, 수렴 위상의 형상은 각각 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 두 모델 사이에는 중앙의 구멍 크기 및 형상, 그리고 양 끝단부에 약간의 차이가 있다.

위상최적화 모델의 진동 특성 검증을 위하여 유한요소 모드해석을 진행하였다. Table 1에는 최적화 프로그램 자체에서 계산 수렴한 고유진동수와 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용해 계산한 결과를 비교하였다. ANSYS 모델은 2차원 삼각형 요소를 사용하였고, 두 해석 모델은 모두 영율(Young's modulus)은 200 GPa, 푸아송비(Poisson ratio)와 밀도는 각각 0.3과 7800 kg/m^{3}를 사용하였다. 두 모델 모두 목표주파수에 근접하는 결과와 함께 편차가 1 % 내외로 나타났다. 또한 Fig. 6은 ANSYS 모드해석에서 구한 종방향 모드 변위를 나타내는데 두 경우

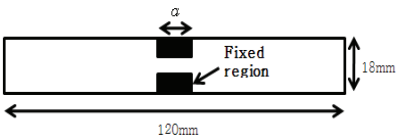
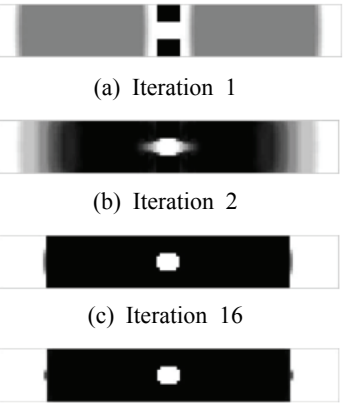


Fig. 3 Design domain(white) and fixed region(black)

Table 1 Natural frequency of 2D models

Model	Optimization model (2,400 elements)	ANSYS model (3,491 elements)	Difference
PF8	60.006 kHz	59.309 kHz	1.1%
PF16	59.869 kHz	59.022 kHz	1.4 %



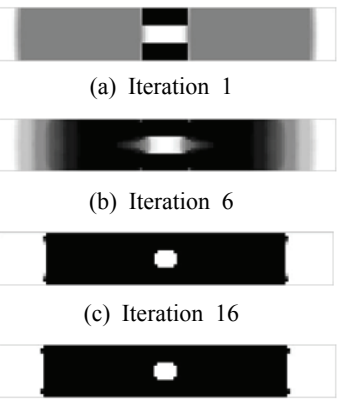
(a) Iteration 1

(b) Iteration 2

(c) Iteration 16

(d) Iteration 26(final)

Fig. 4 2D topology optimization process: PF8



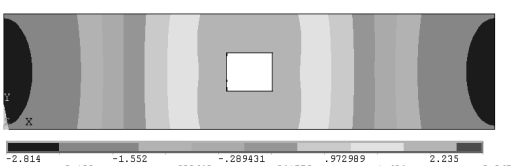
(a) Iteration 1

(b) Iteration 6

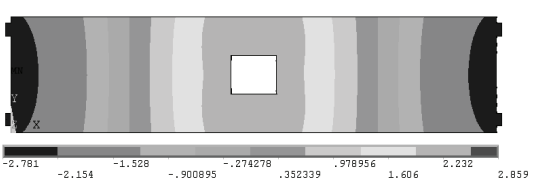
(c) Iteration 16

(d) Iteration 25(final)

Fig. 5 2D topology optimization process: PF16



(a) PF8



(b) PF16

Fig. 6 Longitudinal vibration modes of 2D optimized models(ANSYS/modal displacement)

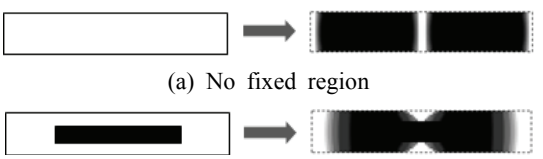
모두 양 끝단과 중앙부의 위상이 반대인 종진동의 전파장 코사인모드가 형성되는 것을 알 수 있다.

2차원 모델의 위상최적화 결과 모두 동일하게 중앙부에 구멍이 형성되는 형상이 얻어지는데 이는 전파장 모드를 제한조건으로 사용하는 최적화와 보존구역의 위치에 따른 것으로 판단된다. 일반적으로 목표 주파수로 상승시키는 최적화 과정에서 혼의 전체 길이는 감소하고, 모드 변위가 큰 부분의 밀도를 제거하는 형태가 나타난다.

이러한 경향을 검토하기 위해 보존구역을 전혀 설정하지 않은 모델과 중앙의 중심부를 보존구역을 설정한 모델로부터 앞서와 동일한 조건의 위상최적화를 진행하면 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. 보존구역이 전혀 없을 경우(Fig. 7(a))에는 중앙부 밀도가 감소하여 결국 구조가 분리되는 현상이 나타난다. 중앙 중심부를 보존구역으로 할 경우(Fig. 7(b))는 보존구역을 제외한 부분의 밀도가 감소하여 나비넥타이와 같은 형상이 나타난다. 그러나 두 경우 모두 실제 제작 가능한 형상이 아니므로 적절한 보존영역의 설정이 필요하다.

이상의 비교로부터 이 연구에서는 Fig. 3과 같이 실제 제작이 가능하도록 중앙 상하부를 보존구역으로 두었기 때문에 Fig. 4와 Fig. 5처럼 이 부분을 제외하고 중심부에 구멍이 형성된 최적화 형상이 얻어진 것으로 이해할 수 있다.

Table 2는 최적화 전 초기 설계 영역의 1차와 2, 3차 길이방향 고유진동수와 최적화 후의 고유진동수를 나타낸다. 목표 주파수 해당 모드는 2차 길이방향 모드인 코사인 전파장 모드로, 최적화 과정 후 1차, 3차 모드 주파수도 2차와 같이 모두 증가하였다. Table 2에서 λ는 진동모드의 파장이다.



(a) No fixed region

(b) Central fixed region

Fig. 7 Shape dependence due to fixed regions

Table 2 Natural frequency of longitudinal mode of 2D model PF8(ANSYS)

Mode	Before optimization	After optimization
1st(λ/2-cosine)	21.014 kHz	27.716 kHz
2nd(λ-cosine)	41.929 kHz	59.309 kHz
3rd(3λ/4-cosine)	62.512 kHz	100.94 kHz

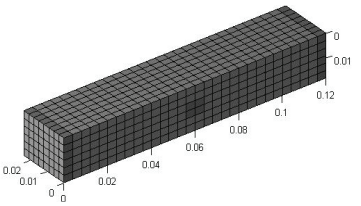
2차원 모델의 위상최적화를 통하여 상당히 만족할 만한 결과를 얻었지만, 2차원 모델의 경우는 지면 두께방향으로 일정한 형상만 가능하다는 단점이 존재한다. 또 이를 바탕으로 최종 가공하여 제작하기 위해서는 3차원 최적화 결과와 비교하여 보다 실제 적용 가능한 형상인지를 검증하는 것이 필요하게 된다. 따라서 이 연구에서는 40 kHz 초음파 혼의 기본 형상을 바탕으로 직육면체 형태의 설계영역을 설정하고 2차원 프로그램을 확장한 MATLAB 코드를 이용하여 최적화 계산을 수행하였다.

3차원 모델의 최적화 과정 및 최종 수렴 결과는 Fig. 8과 10에 나타낸 것과 같다. 주파수 증가에 따라 혼의 전체 길이는 2D의 경우와 동일한 비율로 감소하지만 Fig. 8의 PF8 모델에서 양 끝단에 대칭형의 분리된 슬롯이 발생하는 경우나 Fig. 10의 PF16 모델에서 중앙 구멍부에 H자 형태의 구멍이 형성되는 경우는 2차원 모델에서는 구현이 불가능한 3차원 모델만의 특징이다. 이러한 3차원 모델의 위상최적화를 통해 최적화 모델의 시각적 검증이나 대칭성과 관련한 최종 설계안을 보다 쉽게 도출할 수 있고, 바로 해석이나 설계 후 제작이 가능한 형태를 찾을 수 있는 장점이 있다.

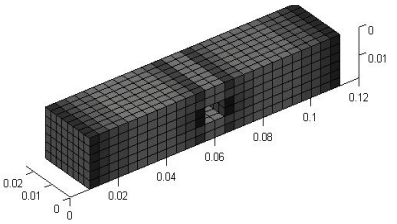
4. 설계 검증 및 제작 실험

위상최적화 결과의 실제 적용을 위하여 3차원 위상최적화 결과를 바탕으로 ANSYS에서 PF8 및 PF16 모델의 모드해석을 진행하고, SUS440C 스테인레스 스틸 재질을 와이어커팅 가공을 이용하여 실물을 제작하였다(Figs. 9, 11). 3차원 위상최적화 최종 수렴 안과 초음파 혼 실물과의 차이는 초음파 접합 장비에 장착하여 실험을 하기 위해 접합부 단차를 상하 대칭으로 설치하고 노드 위치에 나사 고정부를 추가한 것이 전부이다. 해석 결과 고정부가 초음파 혼의 모드와 고유진동수의 미치는 영향은 무시할 수 있음을 확인하였다.

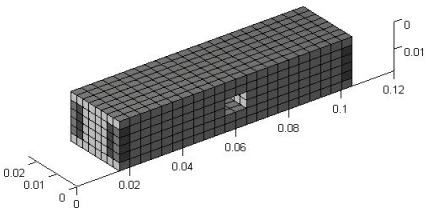
제작된 초음파 혼의 진동 실험은 플립칩 접합 장비에 장착한 위상최적화 설계 모델 PF8 및 PF16에



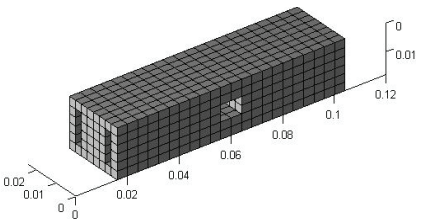
(a) Iteration #1



(b) Iteration #6

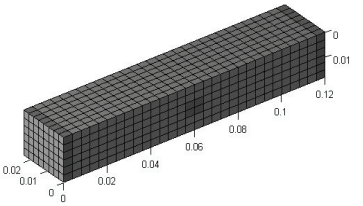


(c) Iteration #12

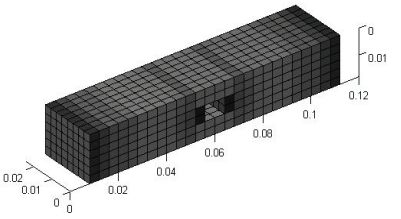


(d) Iteration #18

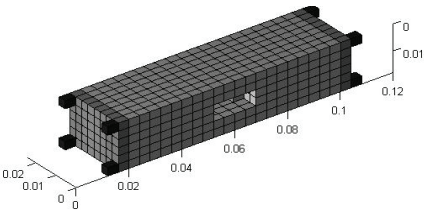
Fig. 8 3D topology optimization process: PF8



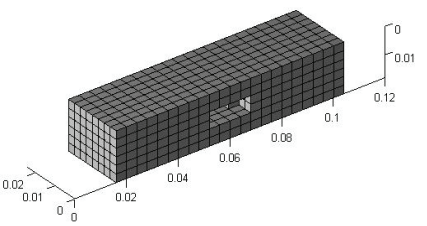
(a) Iteration #1



(b) Iteration #6

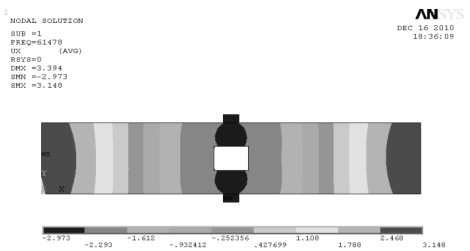


(c) Iteration #12

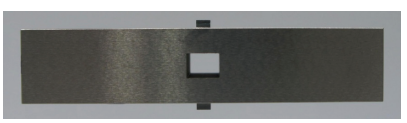


(d) Iteration #18

Fig. 10 3D topology optimization process: PF16

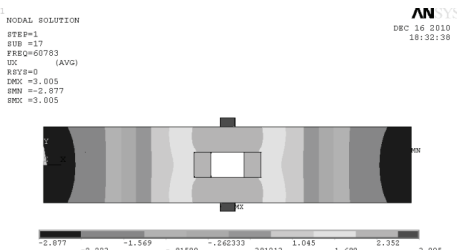


(a) Modal amplitude(ANSYS)

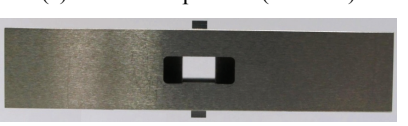


(b) Photo of manufactured prototype

Fig. 9 Optimized model PF8



(a) Modal amplitude (ANSYS)



(b) Photo of manufactured prototype

Fig. 11 Optimized model PF16

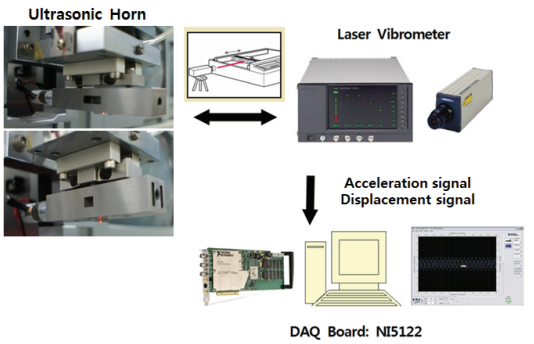
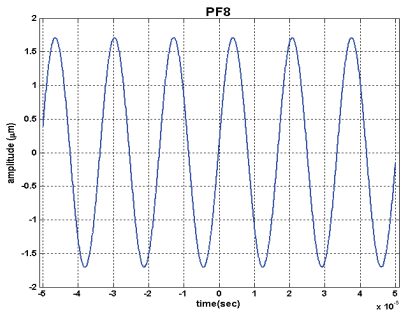


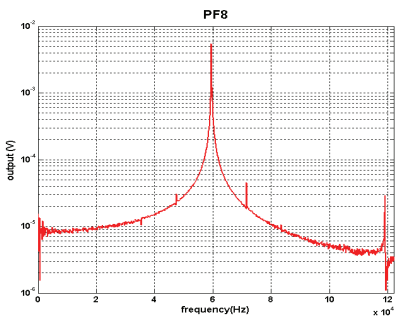
Fig. 12 Setup for vibration experiment

Table 3 Frequency of 3D optimization model and prototype experiment

Model	Optimized Model frequency (kHz)	Experiment frequency (kHz)	Experiment amplitude (μm)
PF8	59.135	59.448	3.42
PF16	58.868	58.349	4.06



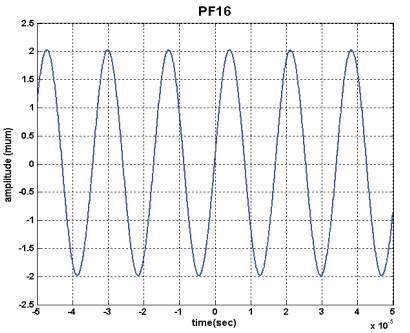
(a) Time domain response



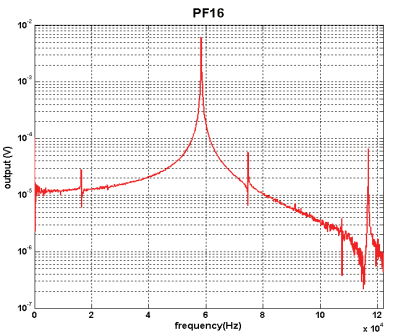
(b) Frequency spectrum

Fig. 13 Vibration experiment of PF8 model

대하여 Fig. 12와 같이 레이저 진동계(GRAPHTEC AT3700)을 이용해 혼의 중앙 접합부에서 종(longitudinal) 방향 진동변위를 측정하였다. 측정한 데이터는 MATLAB을 이용하여 주파수 변환 등 후처리 하였다. Fig. 13과 14는 각각 PF8 및 PF16 프로토타입 제작품의 접합부 위치에서 초음파 시간응답과 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 이 결과는 Table 3에 정리되어 있는데 최적화 모델 주파수와 실험 주파수 및 실험에서 구한 최대진폭 값이다. 실험 결과 최초 목표로 한 주파수와 1 % 미만의 오차를 확인 할 수 있었고, 진동 피크 진폭은 4 μm 정도로 접합에 필요한 충분한 초음파에너지를 발생할 수 있는 영역에 해당하는 것을 알 수 있었다.



(a) Time domain response



(b) Frequency spectrum

Fig. 14 Vibration experiment of PF16 model

5. 결 론

이 논문에서는 위상최적화를 이용하여 특정 주파수와 모드를 갖는 초음파 접합 혼을 설계하는 방법에 대하여 살펴보았다. 위상최적화의 정식화를 위하여 SIMP방법을 사용하였고 설계 변수의 갱신을 위하여 OC 알고리즘을 적용하였다. 또한 각 반복계산에서 원하는 모드를 추적하기 위하여 MAC값을 활

용하였다. 2차원의 최적화된 모델과 3차원의 모델을 비교하여 3차원 모델을 기반으로 실물 프로토타입을 제작하였으며 위상최적화로 설계한 초음파혼의 성능을 입증하기 위하여 접합부의 진폭과 고유진동수를 측정 하였다. 설계 목표 주파수와 제작 실물로부터 측정한 고유진동수는 1 % 미만의 차이가 나타났으며 이를 통해 초음파 혼의 성능을 입증할 수 있었다. 또한 초음파 영역의 고주파 동적 구조물의 최적화에도 위상최적화 방법을 이용한 설계가 유효함을 검증하였다.

후 기

이 연구는 서울시 산학연 협력사업(10890)과 중소기업청에서 지원하는 2011년도 산학연공동기술개발사업(No.00045000-1)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

(1) Lee, B. G., Kim, K. L. and Kim, K. E., 2008, Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 17, No. 6, pp. 63~70.

(2) Seo, J. S., Jang, S. M. and Beck, S. Y., 2012, One-wavelength Ultrasonic Horn Design for Ultrasonic Machining of Mobile Phone Battery Terminal Welding, Transactions of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 21, No. 1, pp. 70~75.

(3) Gao, S., 2005, New Technologies for Lead-free Chip Assembly, Ph.D. Thesis, University of London.

(4) Suzuki, K. and Kikuchi, N., 1991, A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 93, No. 3, pp. 291~318.

(5) Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N., 1988, Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, No. 2, pp. 197~224.

(6) Rozvany, G. I. N., Zhou, M. and Biker, T., 1992, Generalized Shape Optimization without Homogenization, Structural Optimization, Vol. 4, No. 3-4, pp. 250~254.

(7) Sethian, J. A. and Wiegmann, A., 2000, Structural Boundary Design via Level Set and Immersed Interface Methods, Journal of Computational Physics, Vol. 163, No. 2, pp. 489~528.

(8) Logan, D. L., 2007, A First Course in the Finite Element Method, CENGAGE Learning.

(9) Bendsøe, M. P. and Sigmund, O., 2004, Topology Optimization: Theory, Method, and Applications, Springer-Verlag, Berlin, Germany.

(10) Lee, J. W. and Kim, Y. Y., 2008, Topology Optimization-based Partition Design for Maximizing or Minimizing the Eigenfrequency of a Double Cavity, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 11, pp. 1118~1127.

(11) Ewins, E. J., 2000, Modal Testing, 2nd Ed. Research Studies Press.

(12) Bendsøe, M. P., 1989, Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 1, No. 4, pp. 193~202.

(13) Seyranian, A., Lund, E. and Olhoff, N, 1994, Multiple Eigenvalues in Structural Optimization Problems, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 8, No. 4, pp. 207~227.

Soo Il Lee received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Department of Mechanical Design and Production Engineering from Seoul National University, Seoul, Korea in 1991, 1993, and 1997, respectively. During 1997-2000, he was a Senior Research Engineer with Samsung Electronics, Suwon, Korea. During 2001~2003, he was a Postdoctoral Research Associate with Purdue University, West Lafayette, IN, U.S.A. He is currently an Associate Professor with the Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea. His research interests include multiscale dynamics and nonlinear vibrations in mechanical, electromechanical, and biological systems.