

공차설계에 의한 플립칩 접합용 초음파 혼의 제작 비용 최적화

Manufacturing Cost Optimization of Ultrasonic Horn for Flip-chip Bonding using Tolerance Design

김종혁¹, 권원태^{2,✉}, 이수일²

Jong-Hyok Kim¹, Won Tae Kwon^{2,✉}, and Soo-Il Lee²

¹ 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원 (Department of Mechanical Information Engineering, University of Seoul)

² 서울시립대학교 기계정보공학과 (Department of Mechanical Information Engineering, University of Seoul)

✉ Corresponding author: kwon@uos.ac.kr, Tel: 02-2210-2403

Manuscript received: 2011.10.21 / Revised: 2012.3.3 / Accepted: 2012.5.13

The ultrasonic horn used for bonding of flip chip has been designed to vibrate at a natural frequency. The ultrasonic horn must be manufactured accurately in physical terms, because the small change of mechanical properties may result in the significant change of natural frequency. Therefore, tight tolerance is inevitable to keep the natural frequency in acceptable range. However, since tightening of the tolerance increases the manufacturing cost significantly, trade-off between the cost and accuracy is necessary. In this research, an attempt was made to design the ultrasonic horn within acceptable natural frequency while the manufacturing cost was kept as low as possible. For this purpose, among the 18 tolerances of physical terms of the ultrasonic horn, the most important 4 factors were selected using Taguchi method. The equation to relate those main factors and the natural frequency was made using response surface method. Finally, optimal design scheme for minimum manufacturing cost without a loss of performance was determined using SQP method.

Key Words: Ultrasonic Horn (초음파 혼), Tolerances (공차), Manufacturing Cost (제작 비용), Taguchi Method (다구치 방법), Response Surface Method (반응표면법), Optimization (최적화)

기호설명

A = Tolerance of Length of Horn

ZZ = Tolerance of Length position of center of Hole 1

ZZZ = Tolerance of Length position of center of Hole 2

Y = Young's Modulus

f = Natural Frequency

1. 서론

최근의 패키지 분야에서는 와이어를 이용하지 않고 칩을 기판에 직접 접합하는 플립칩 접합 기

술에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다.^{1,2} 플립칩 접합 방식은 크게 열과 압력을 동시에 가하는 열압착 방식과 열과 압력 및 진동에너지를 동시에 가하는 열초음파 방식으로 나눌 수 있다.¹ 초음파 혼은 액추에이터의 전기적 에너지를 기계적인 에너지로 바꾸어 접합부에 전하는 열초음파 방식의 핵심 부품이다.

초음파 혼을 이용해 플립칩을 접합하는 플립칩 접합장치는 Fig. 1 에서와 같이 초음파 혼과 가진부를 구비한다. 가진부는 통상적으로 압전 진동자를 이용한다. 초음파 혼의 접합부는 칩을 흡착하는 접합부를 구비하며, 접합부는 공압을 이용해 칩을

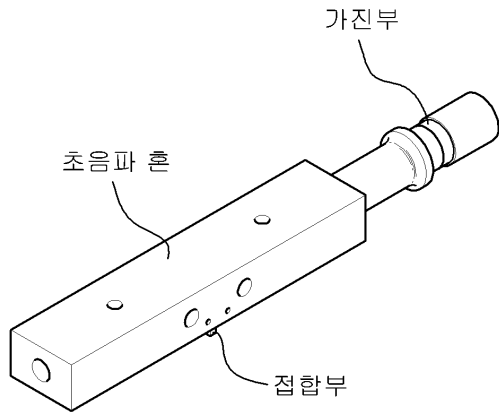


Fig. 1 Apparatus for bonding flip chip

흡착한다. 압전 진동자는 초음파 혼의 종방향 진동 모드를 생성시키는 고유진동수의 조화 가진을 발생시킨다.

초음파 혼은 진동에너지를 효율적으로 전달하기 위해 고유진동수에서 진동하도록 설계된다.³ 고유진동수는 초음파 혼의 형상이나 재질 등에 따라 민감하게 변하기 때문에 초음파 혼의 제작은 매우 정밀해야 한다. 일반적으로 제작 과정에서 공차를 작게 할수록 제품의 성능 향상에는 유리하나 전체적인 제작 비용은 증가한다.⁴ 따라서 높은 정밀도가 요구되는 초음파 혼은 제작 비용이 비싼 문제점이 있다.

그러나 종래의 연구에서는 제작 비용에 대한 고려 없이 초음파 혼의 제작 공차가 초음파 혼의 고유진동수에 미치는 영향에 대해서 주로 연구하여, 초음파 혼이 목적하는 고유진동수에서 동작할 수 있도록 초음파 혼을 제작하는 것에 대해서만 집중하였다.^{3,5}

본 연구에서는 초음파 혼의 제작 공차 중에서 초음파 혼의 고유진동수에 영향을 많이 미치는 인자들을 결정하고, 이러한 인자들을 이용한 고유진동수의 추정식을 구한 후, 목적하는 고유진동수의 공차 범위 내에서 초음파 혼의 제작 비용을 최소화하는 최적화를 실시하였다.

2. 실험 방법

2.1 초음파 혼 모델링

본 연구에서는 실제의 초음파 혼을 이용한 실험이 아닌 ANSYS 11.0 프로그램을 이용한 가상

실험을 통해 초음파 혼에 대한 연구를 실시하였다. 본 연구에 적용된 초음파 혼의 형상은 Fig. 2에 도시된 것과 같다. 초음파 혼의 재질은 SUS440C 로 하였다.

FEM 해석을 위한 모델링은 초음파 혼에 압전 진동자가 부착된 형태로 하였다. 압전 진동자는 두랄루민, PZT-5A, SUS316 의 재질을 사용하였다.

본 연구에서 초음파 혼의 목적하는 고유진동수는 40KHz 로 결정하였고, 이에 따른 초음파 혼의 재원은 Table 1 과 같다.

2.2 제작 공차 결정

본 연구에서는 초음파 혼을 실제로 제작할 때 발생할 수 있는 제작 공차를 18 개로 설정하였다.

설정된 제작 공차들은 Fig. 3에 도시된 바와 같으며, 이를 구체적으로 살펴보면 길이 공차(A), 폭 공차(B), 높이 공차(C), 평면 평행도 공차(D), 측면 평행도 공차(E), 정면 평행도 공차(F), 홀 1 중심의 폭 위치 공차(XX), 홀 1 중심의 길이 위치 공차(ZZ), 홀 1의 반지름 공차(CR), 홀 2 중심의 폭 위치 공차(XXX), 홀 2 중심의 길이 위치 공차(ZZZ),

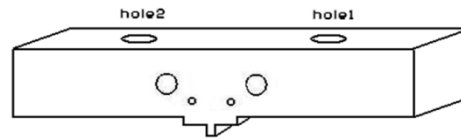


Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic horn

Table 1 Specification of ultrasonic horn

Length	0.1268 m
Width	0.0131 m
Height	0.0168 m
length position of center of hole 1	0.03170 m
width position of center of hole 1	0 m
radius of hole 1	0.0025 m
length position of center of hole 2	0.0951 m
width position of center of hole 2	0 m
radius of hole 2	0.0025 m
starting position of bonding part	0.0624 m
ending position of bonding part	0.0644 m
height of bonding part	0.0023 m
Young's modulus	2.05×10 ¹¹ N/m ²
Density	7,750 Kg/m ³
Poisson's ratio	0.33

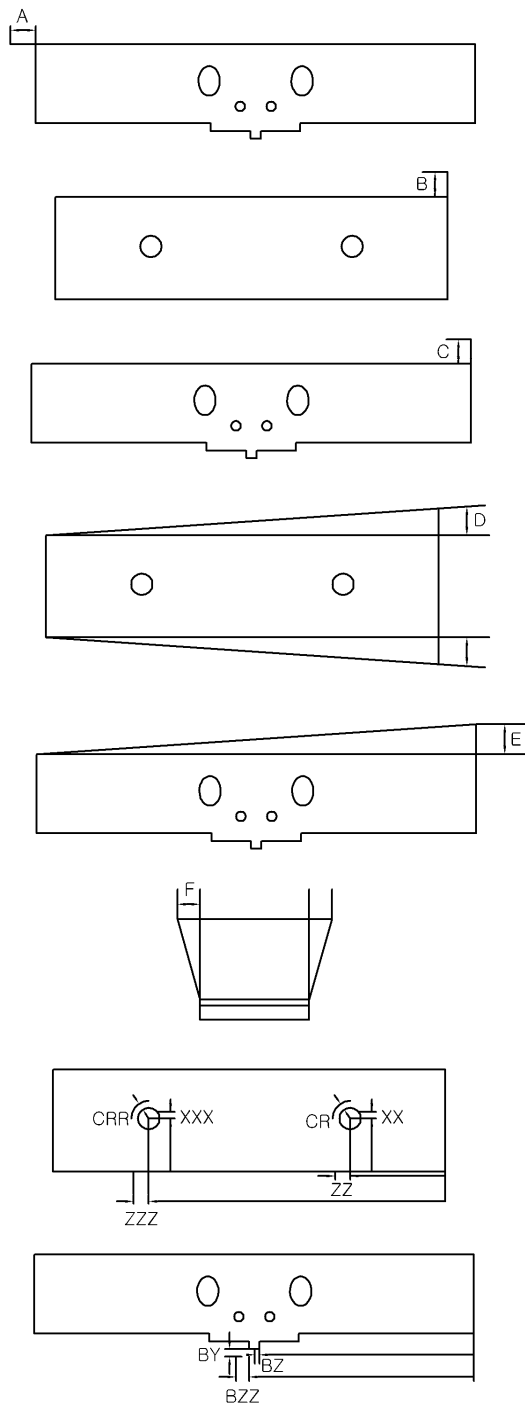


Fig. 3 Manufacturing tolerances of ultrasonic horn

홀 2 의 반지름 공차(CRR), 접합부의 시점 길이측 위치 공차(BZ), 접합부의 종점 길이측 위치 공차

(BZZ), 접합부의 높이 공차(BY), 영률(Y), 밀도(DE), 포아송비(P)이다.

2.3 고유진동수에 영향을 미치는 인자 결정

초음파 혼의 제작 공차 중 고유진동수에 많은 영향을 미치는 인자를 결정하기 위해 다구치 방법을 사용하였다.⁶

제작 공차로 결정된 18 개의 인자들이 각각 3 개의 수준을 가지는 것으로 하여 최소 실험수는 54 회로 하였다. 18 개의 인자들에 대한 수준은 실제 초음파 혼의 제작시 제작 공차가 재료의 1% 이내에서 발생할 것으로 판단하여, 기본적으로 재료의 $\pm 1\%$ 로 하되 그 값이 $500 \mu\text{m}$ 가 넘는 경우 $500 \mu\text{m}$ 로 하였으며, 영률·밀도·포아송비는 재질을 물성치가 변하지 않는 범위로 하기 위해 유효숫자 범위 내로 하였다. 즉 Table 2 에서 보듯이 제작자가 제공한 공칭영률이 2.050×10^{11} 일 때, 3 수준을 2.046×10^{11} , 2.050×10^{11} , 2.054×10^{11} 으로 하여 반올림하면 모두 2.050×10^{11} 이 되도록 수준을 잡았다. 18 개 인자에 대한 수준은 Table 2 와 같다. 다구치 방법을 실행 한 후 영향을 많이 미치는 인자들을 선정하고 이 인자들을 이용하여 고유진동수와 인자

Table 2 Level of 18 variables of ultrasonic horn

Variable	Level		
	1	2	3
A	-0.0005	0	0.0005
B	-0.000262	0	0.000262
C	-0.000168	0	0.000168
D	-0.000131	0	0.000131
E	-0.000262	0	0.000262
F	-0.000131	0	0.000131
XX	-0.000317	0	0.000317
ZZ	-0.000317	0	0.000317
CR	-0.000025	0	0.000025
XXX	-0.000317	0	0.000317
ZZZ	-0.000317	0	0.000317
CRR	-0.000025	0	0.000025
BZ	-0.0005	0	0.0005
BZZ	-0.0005	0	0.0005
BY	-0.000002	0	0.000002
Y	2.046×10^{11}	2.050×10^{11}	2.054×10^{11}
DE	7,746	7,750	7,754
P	0.31	0.33	0.35

들의 상관관계를 나타내는 수식을 유도하였다. 수식은 2 차 비선형식으로 구성하였으며, 이를 위해 반응표면법을 이용하였다. 주요인자들은 Table 3 에 주어진 4 개가 선정되었는데, 자세한 과정은 3.1 절에 주어졌다.

Table 3 Experimental plan for RSM technique

Number	Coded variable			
	A	ZZ	ZZZ	Y
1	-0.0005	-0.000317	0	2.05×10 ¹¹
2	0.0005	-0.000317	0	2.05×10 ¹¹
3	-0.0005	0.000317	0	2.05×10 ¹¹
4	0.0005	0.000317	0	2.05×10 ¹¹
5	0	0	-0.000317	2.046×10 ¹¹
6	0	0	0.000317	2.046×10 ¹¹
7	0	0	-0.000317	2.054×10 ¹¹
8	0	0	0.000317	2.054×10 ¹¹
9	-0.0005	0	-0.000317	2.05×10 ¹¹
10	0.0005	0	-0.000317	2.05×10 ¹¹
11	-0.0005	0	0.000317	2.05×10 ¹¹
12	0.0005	0	0.000317	2.05×10 ¹¹
13	0	-0.000317	0	2.046×10 ¹¹
14	0	0.000317	0	2.046×10 ¹¹
15	0	-0.000317	0	2.054×10 ¹¹
16	0	0.000317	0	2.054×10 ¹¹
17	-0.0005	0	0	2.046×10 ¹¹
18	0.0005	0	0	2.046×10 ¹¹
19	-0.0005	0	0	2.054×10 ¹¹
20	0.0005	0	0	2.054×10 ¹¹
21	0	-0.000317	-0.000317	2.05×10 ¹¹
22	0	0.000317	-0.000317	2.05×10 ¹¹
23	0	-0.000317	0.000317	2.05×10 ¹¹
24	0	0.000317	0.000317	2.05×10 ¹¹
25	0	0	0	2.05×10 ¹¹
26	0	0	0	2.05×10 ¹¹
27	0	0	0	2.05×10 ¹¹

2.4 반응표면법을 이용한 추정식

고유진동수에 대한 추정식을 구하기 위해 반응표면법 중에 박스-베켄(Box-Behken) 방법을 선택하여 전산모사를 실행하였다.⁷ 이를 위해 Table 3 의 실험을 ANSYS 11.0 프로그램을 이용해 수행하였으며, MINITAB 14.12.1 을 이용하여 고유진동수(f)에 대한 추정식 (1)을 구하였다. 여기서 β는 추정식을 구하기 위해 가정한 임의의 상수이다.

$$\begin{aligned}
 f = & \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2(ZZ) + \beta_3(ZZZ) \\
 & + \beta_4 Y + \beta_5 A^2 + \beta_6(ZZ)^2 + \beta_7(ZZZ)^2 \\
 & + \beta_8 Y^2 + \beta_9 A(ZZ) + \beta_{10} A(ZZZ) \\
 & + \beta_{11} AY + \beta_{12}(ZZ)(ZZZ) \\
 & + \beta_{13}(ZZ)Y + \beta_{14}(ZZZ)Y
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

2.5 제작 비용 최적화

현장에서 홀을 가공할 때, 필요이상으로 엄격한 공차를 설정하면 가공하기도 어렵거니와 시간도 많이 걸려 비용의 상승으로 경쟁력이 저하된다. 그러므로 필요한 성능이 보장되는 범위에서 최소의 비용으로 가공하는 것은 경쟁력 강화에 필수적이다.

이를 위해, 반응표면법을 이용하여 찾아낸 고유진동수에 대한 추정식 (1)을 이용하여 고유진동수가 목적하는 고유주파수의 5% 범위 이내가 되도록 하면서 제작 비용이 최소화되도록 하였다.

이를 위해, 반응표면법을 이용하여 찾아낸 고유진동수에 대한 추정식 (1)을 이용하여 고유진동수가 목적하는 고유주파수의 5% 범위 이내가 되도록 하면서 제작 비용이 최소화되도록 하였다. 이는 FEM 모델에서 얻을 수 있는 공진주파수와 실제 제작된 초음파 혼의 공진주파수는 약 5%의 오차를 보이기 때문이다.⁸

일반적으로 제작 공차가 크면 클수록 제작 비용은 작아지지만, 이는 가공 공정이나 사용되는 기계의 특성에 따라 달라질 수 있다. 또한 동일한 기계를 사용하는 경우라도 작업환경이나 작업자의 숙련도에 따라 제작 비용이 달라질 수 있다. 이와 같이 제작 비용은 상황에 의존하기 때문에 정확한 제작 비용 모델을 만드는 것은 매우 어렵다. 일반적으로 제작비용은 공차의 역수에 비례한다고 알려져 있다.⁹ 따라서 본 연구에서는 초음파 혼 제작 비용이 제작 공차의 크기에 반비례한다는 전제 하에 제작 비용을 식 (2)와 같이 제작 공차의 역수의 합으로 결정하였다. 이 경우 제작 공차가 기준값에 대해 음(-)의 값을 가지는 경우도 있으므로 제작 공차의 절대값을 이용하기로 한다.

$$\text{cost} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{|b_i|}
 \tag{2}$$

이와 같은 최적화를 수행하기 위한 방법으로 SQP(Sequential Quadratic Programming)를 선택하였다.¹⁰ SQP 는 최적화 방법 중에 수학적으로 가장 강력한 기법으로 알려져 있다.¹¹ SQP 는 비선형 방정식을 풀기 위하여 반복계산을 통해 최적해를 구한다. 각 반복계산시 라그랑지 함수의 2 차 근사치로 구성되는 목적 함수에 의해 정의되는 2 차 부속 문제의 해를 구한다. 탐색 방향으로의 강하 함수를 최소화하여 이동거리를 구하는 방법으로 Taylor 근사에 의해 문제 정의는 식 (3) 내지 식 (5)와 같다.

$$\text{Minimize } q(x) = c^T p_k + 0.5 p_k^T H_k p_k \quad (3)$$

$$\text{Subject to } \nabla g_i^T + g_i^k \leq 0 \quad i \in I_1 \quad (4)$$

$$\nabla h_i^T + h_i^k = 0 \quad i \in I_2 \quad (5)$$

여기서, H_k 는 라그랑지 함수의 2 차 도함수(Hessian)의 근사치를 나타내며, x_k 는 현 반복계산에서의 설계변수 값을 나타내고, p_k 는 현 반복계산에서의 부속 문제에 있어서 구해진 해를 나타낸다. 새로운 설계 변수의 값 x_{k+1} 은 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$x_{k+1} = x_k + a_k p_k \quad (6)$$

여기서 a_k 는 탐색방향 p_k 로의 이동거리이며 라인 서치(line search)를 실시함으로써 구한다. 최적조건이 얻어지면 계산을 종료하고 그렇지 못하면 H_k 가 BFGS(Broyden Fletcher Goldfarb Shanno Method)에 의해 개선되어 반복계산을 수행하게 된다. BFGS 법은 비제약설계의 계산 시 매 반복 회마다 헤시안행렬(Hessian Matrix)을 수정하는 방법으로 정확한 라인서치법이 사용되면 양정의 근사 헤시안행렬을 유지함을 보일 수 있는데 이 방법을 Quasi-Newton Method 라고 한다.

3. 실험 결과

2 장에서 소개된 방법을 이용하여 전산모사를 실시한 결과가 3 장에 주어졌다.

3.1 고유진동수에 영향을 미치는 인자

제작 공차로 결정된 18 개의 인자들 각각을 3 개의 수준으로 하여 다구치 방법을 적용하였다. 실제 실험에서는 Fig. 1 에서와 같이 초음파 혼에 가진을 위한 압전 진동자가 부착된 형태로 실험을 하였다. 압전 진동자는 피에조 물질로 형성하였다. FEM 결과는 ANSYS 프로그램을 통한 시뮬레이션 결과 나타나는 진동 모드 중에서 초기 제원에 따라 모델링 된 초음파 혼과 동일한 진동 모드를 나타내는 경우의 고유진동수를 결과로 채택하였다. 그러나 시뮬레이션 결과로 나타나는 진동 모드가 초기 제원에 따라 모델링 된 초음파 혼의 진동 모드와 일치하는 것인지 확인할 필요가 있다. 이를 위해 MAC(Modal Assurance Criterion)을 도입하였다.¹²

MAC 은 서로 다른 두 개의 진동모드가 얼마나 일치하는가를 계산하는 방법이다. MAC 은 0 과 1 사이 값을 가지며, 일치하는 경우에는 1 이고 불일치하는 경우에는 0 이다. MAC 은 식 (7)과 같이 계산한다.

$$MAC(\Phi_{ref}, \Phi_{pre}) = \frac{|\Phi_{ref}^T \Phi_{pre}|^2}{(\Phi_{ref}^T \Phi_{ref})(\Phi_{pre}^T \Phi_{pre})} \quad (7)$$

여기서 Φ_{ref} 는 초기 제원에 따라 모델링된 초음파 혼의 코사인 진동 모드를 나타내는 벡터이며, Φ_{pre} 는 각각의 실험 조건에 따라 모델링된 초음파 혼의 코사인 진동 모드를 나타내는 벡터이다.

MAC 은 전체 실험 중에서 실험 조건의 변화가 다른 일부 실험을 샘플로 하여 계산하였다. 계산 결과 전체적으로 99.9% 이상의 일치도를 나타내어 초기 제원에 따라 모델링된 초음파 혼의 진동 모드와 각각의 실험 조건에 따라 모델링된 초음파 혼의 진동 모드가 일치함을 알 수 있었다.

다구치 방법에 따른 실험 결과는 Fig. 4 및 Table 4 와 같다. 여기서 y 축은 고유진동수를 의미한다. 실험 결과 분산비(F)가 혼의 길이 공차(A)가 압도적으로 높게 나타났으며, 홀 2 의 길이 공차(ZZZ), 영률(Y), 홀 1 의 길이 공차(ZZ) 순으로 100 이상의 값을 보였다. 그 외의 다른 인자들은 상기 4 개의 인자들과 비교하여 값이 현저히 작게 나타났다.

또한 분산비(F)의 신뢰도를 나타내는 지수(P)가

상기 4 개 인자들의 경우 0 으로 나타남으로써 이 인자들은 다른 인자들과 확연하게 구분된다는 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 초음파 혼의 고유진동수에 많은 영향을 미치는 인자는 혼의 길이 공차(A), 홀 1 의 길이 공차(ZZ), 홀 2 의 길이 공차(ZZZ), 영률(Y)이다. 이러한 4 개의 인자들은 다

른 인자와 비교하여 초음파 혼의 고유진동수에 미치는 영향이 현저하게 높으므로 반응표면법을 이용하여 고유진동수에 대한 추정식 구하는 실험에서는 상기 4 개의 인자들에 대해서만 고려하였다.

이 4 개의 인자가 고유진동수에 미치는 영향은 95.0%(=2475.51/2606.21)에 이른다.

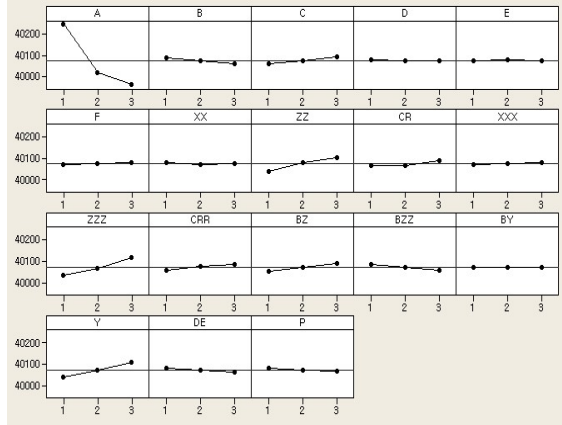


Fig. 4 Result of Taguchi Method (x axis : level, y axis : natural frequency(Hz))

Table 4 Result of ANOVA about Natural frequency

	DF	F	P
A	2	2,018.84	0
B	2	13.46	0
C	2	20.11	0
D	2	1.54	0.243
E	2	0.46	0.639
F	2	1.23	0.317
XX	2	1.01	0.384
ZZ	2	100.9	0
CR	2	13.99	0
XXX	2	0.84	0.451
ZZZ	2	145.8	0
CRR	2	19.83	0
BZ	2	30.91	0
BZZ	2	14.65	0
BY	2	0.08	0.92
Y	2	109.97	0
DE	2	6.58	0.008
P	2	6.01	0.011
error	17	-	-
total	53	-	-

3.2 반응표면법을 이용한 고유진동수 추정식

다구치 방법에 따라 초음파 혼의 고유진동수에 많은 영향을 미치는 인자들에 대해서 Table 3 의 실험을 실시하였다. 초음파 혼의 길이 공차, 홀 1 의 길이 공차, 홀 2 의 길이 공차, 영률로 이루어진 고유진동수에 대한 추정식은 ANSYS 11.0 프로그램을 이용한 FEM 결과를 MINITAB 14.12.1 프로그램을 구하였다. 초음파 혼의 고유진동수에 대한 추정식은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 f = & -1097624 + 112227A \\
 & - 225055(ZZ) - 98983(ZZZ) \\
 & + 1100755Y + 3.32 \times 10^8 A^2 \\
 & - 2.7 \times 10^7 (ZZ)^2 + 17427281(ZZZ)^2 \\
 & - 266250Y^2 - 4.9 \times 10^7 A(ZZ) \\
 & - 1.2 \times 10^8 A(ZZZ) - 197500AY \\
 & - 3.4 \times 10^7 (ZZ)(ZZZ) + 153785(ZZ)Y \\
 & + 110410(ZZZ)Y
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

3.3 제작비용의 최적화

최적화를 위해 PIAno Max 3.3 프로그램을 사용하였으며, 최적화 기법은 SQP 를 적용하였다. 최적화를 위한 혼의 길이 공차(A), 홀 1 의 길이 공차(ZZ), 홀 2 의 길이 공차(ZZZ), 영률(Y)의 제한 조건은 Table 2 에 기재된 범위로 하였다. 또한 목적하는 공진주파수가 40KHz 이므로, 공진주파수(f)의 제한 조건은 40±0.2KHz 로 하였다. 제한 조건을 정리하면 Table 5 와 같다.

실험 결과는 Table 6 에 나타난 바와 같이 초음파 혼의 길이 공차(A)가 0.000492(m), 홀 1 의 길이 공차(ZZ)가 -0.000099(m), 홀 2 의 길이 공차(ZZZ)가 0.000078(m), 영률(Y)이 2.047×10¹¹(N/m²)일 때 고유진동수가 약 39.92KHz 를 나타내면서 제작 비용이 최소가 되었다.

고유진동수가 목적하는 범위 이내면서 제작 비용을 최소로 하기 위해 각 인자별로 허용되는 공차의 비율은 Table 6의 최적값을 Table 1의 제원으로 나누어서 계산하였다. 계산 결과 초음파 혼의 길이 공차(A)는 0.39%, 홀 1의 길이 공차(ZZ)는 0.32%, 홀 2의 길이 공차(ZZZ)는 0.09%, 영률(Y)은 0.15%이다.

Table 5 Constraints for optimization

$$\begin{aligned}
 & -0.0005 \leq A \leq +0.0005 \\
 & -0.000317 \leq ZZ \leq +0.000317 \\
 & -0.000317 \leq ZZZ \leq +0.000317 \\
 & 2.046 \times 10^{11} \leq Y \leq 2.054 \times 10^{11} \\
 & 39.80 \times 10^3 \leq f \leq 40.20 \times 10^3
 \end{aligned}$$

Table 6 Result of optimization

	A	ZZ	ZZZ	Y
Starting point	3×10^{-4}	1×10^{-4}	-3×10^{-4}	2.050×10^{11}
Optimal value	4.92×10^{-4}	-9.90×10^{-5}	7.80×10^{-5}	2.047×10^{11}

따라서 초음파 혼이 목적하는 고유진동수를 갖도록 제작하면서도 제작 비용을 줄이기 위해서는 초음파 혼의 길이, 홀 1 중심의 길이 위치, 홀 2 중심의 길이 위치, 영률을 정확히 맞추는데 비용을 사용해야 한다. 이 경우 홀 2의 길이 위치, 영률, 홀 1의 길이 위치, 혼의 길이 순으로 공차가 작아지도록 비용을 사용하는 것이 바람직하다.

4. 결론

본 연구에서 ANSYS 11.0 프로그램을 이용하여 초음파 혼을 모델링하고 다구치 방법을 적용하여 초음파 혼의 고유진동수에 영향을 많이 미치는 인자를 결정하였으며, 반응표면법을 이용하여 초음파 혼의 고유진동수 추정식을 구하여, 초음파 혼의 제작 비용을 최소화하면서 초음파 혼이 목적하는 고유진동수를 갖도록 하는 최적화를 실시하였다.

(1) 초음파 혼의 제작시 발생할 수 있는 길이 공차(A), 폭 공차(B), 높이 공차(C), 평면 평행도 공차(D), 측면 평행도 공차(E), 정면 평행도 공차

(F), 홀 1 중심의 폭 위치 공차(XX), 홀 1 중심의 길이 위치 공차(ZZ), 홀 1의 반지름 공차(CR), 홀 2 중심의 폭 위치 공차(XXX), 홀 2 중심의 길이 위치 공차(ZZZ), 홀 2의 반지름 공차(CRR), 집합부의 시점 길이측 위치 공차(BZ), 집합부의 중점 길이측 위치 공차(BZZ), 집합부의 높이 공차(BY), 영률(Y), 밀도(DE), 포아송비(P) 중 초음파 혼의 고유진동수에 많은 영향을 미치는 인자는 길이 공차(A), 홀 1 중심의 길이 위치 공차(ZZ), 홀 2의 길이 위치 공차(ZZZ), 영률(Y)이다.

(2) 초음파 혼의 길이 공차(A), 홀 1의 길이 위치 공차(ZZ), 홀 2의 길이 위치 공차(ZZZ), 영률(Y)로 구성되는 초음파 혼의 고유진동수에 대한 추정식을 구하였다.

(3) 초음파 혼 제작시 목적하는 고유진동수를 가지면서 제작 비용을 최소화하기 위해서는 초음파 혼의 길이, 홀 1 중심의 길이 위치, 홀 2 중심의 길이 위치, 영률을 정확히 맞추는데 비용을 사용하는 것이 바람직하다.

(4) 특히 한정된 비용으로 초음파 혼을 제작하는 경우 홀 2의 길이 위치, 영률, 홀 1의 길이 위치, 혼의 길이 순으로 공차가 작아지도록 비용을 사용하면 정해진 비용 내에서 초음파 혼의 성능을 높일 수 있다.

(5) 초음파 혼의 제작 비용을 절감하기 위해 나머지 공차에 대한 정확도는 높이지 않아도 초음파 혼의 성능에는 큰 영향이 없다.

후 기

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

참고문헌

1. Kang, S. Y., Williams, P. M., McLaren, T. S., and Lee, Y. C., "Studies of thermosonic bonding for flip chip assembly," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 42, No. 1, pp. 31-37, 1995.
2. McLaren, T., Kang, S. Y., Zhang, W., Hellman, D., Ju, T. H., and Lee, Y. C., "Thermosonic flip chip bonding for an 8x8 VCSEL array," *Proc. 45th ECTC*, pp. 393-400, 1995.
3. Jung, H. K., Kwon, W. T., and Yoon, B. O., "Effect of

- the Tolerance Parameters of the Horn on the Vibration of the Thermosonic Transverse Bonding Flip Chip System,” Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 18, No. 1, pp. 116-121, 2008.
4. Choi, M. S. and Lee, D. Y., “Concurrent Optimization of Design and Machining Tolerances with Accumulated Scrap Cost Model(ASCM),” Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 25, No. 3, pp. 452-460, 2001.
 5. Jung, H. K., Kwon, W. T., Rhee, G. H., Shim, H. S., Jung, J. H., and Lee, H. W., “Effect of the temperature and the tolerance parameter on the horn of the thermosonic bonding system,” Proceeding of the KSMTE Spring Conference, pp. 480-485, 2008.
 6. Lee, B. C., Moon, J. H., Kang, Y. S., and Yang, D. Y., “A study on the Formability Estimation of Deep Drawing Process by Using Taguchi Method,” J. of KSPE, Vol. 14, No. 11, pp. 17-24, 1997.
 7. Park, J. S., Lee, D. J., and Im, J. B., “The Study for Construction of the Improved Optimization Algorithm by the Response Surface Method,” J. of the Korean Society for Aeronautical Science and Flight Operation, Vol. 13, No. 3, pp. 22-33, 2005.
 8. Ha, C. Y., Kim, I. K., and Lee, S. I., “Vibration Analysis and Design of Ultrasonic Horn for Flip-Chip Bonding,” Proceeding of the KSPE Spring Conference, pp. 525-526, 2009.
 9. Choi, J. H., Lee, S. J., and Choi, D. H., “Reliability-Based Tolerance Optimization of Mechanisms,” Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 23, No. 5, pp. 751-762, 1999.
 10. Shin, K. C., Kim, C. J., and Kim, D. G., “A Study on a Robust SQP Algorithm for Nonlinear Optimal Control Analysis,” Proceeding of the KSAS Spring Conference, pp. 469-474, 2011.
 11. Lee, H. W. and Kwon, W. T., “Global Optimization of the Turning Operation Using Response Surface Method,” Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 19, No. 1, pp. 114-120, 2010.
 12. Kim, T. S. and Kim, Y. Y., “Mac-based mode tracking in structural topology optimization,” Computers and Structures, Vol. 74, No. 3, pp. 375-383, 2000.