

초음파 플립칩 접합 모듈의 위상최적화 설계 및 성능 실험

김 지 수* · 김 중 민* · 이 수 일**,[†]

*서울시립대학교 에너지환경시스템공학과

**서울시립대학교 기계정보공학과

Design by Topology Optimization and Performance Test of Ultrasonic Bonding Module for Flip-Chip Packaging

Ji Soo Kim*, Jong Min Kim* and Soo Il Lee**,[†]

*Dept. of Energy and Environmental System Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

**Dept. of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

[†]Corresponding author : leesooil@uos.ac.kr

(Received December 6, 2012 ; Revised December 14, 2012 ; Accepted December 17, 2012)

Abstract

Ultrasonic bonding is the novel packaging method for flip-chip with high yield and low-temperature bonding. The bonding module is a core part of the bonding machine, which can transfer the ultrasonic energy into the bonding spot. In this paper, we propose topology optimization technique which can make new design of bonding modules due to the constraints on resonance frequency and mode shapes. The designed bonding module using topology optimization was fabricated in order to evaluate the bonding performance and reliable operation during the continuous bonding process. The actual production models based on the proposed design satisfied the target frequency range and ultrasonic power. The bonding test was performed using flip-chip with lead-free Sn-based bumps, the results confirmed that the bonding strength was sufficient with the designed bonding modules. Also the performance degradation of the bonding module was not observed after the 300-hour continuous process with bonding conditions.

Key Words : Ultrasonic flip-chip bonding, Topology optimization, Bonding test

1. 서 론

플립칩 접합은 반도체 칩과 패드, 혹은 기판 사이에 금속 범프를 배열하고 열과 압력, 초음파(ultrasonic) 진동 에너지를 이용하여 접합하는 방법으로 반도체의 집적도와 생산 수율을 향상 시킬 수 있기 때문에 각광을 받는 패키징 기술이다¹⁾. 특히 초음파 접합을 이용한

플립칩 접합은 기존 열-압착(thermo-compression) 방법에 비해 접합 시간을 단축할 수 있고, 저온 접합이 가능하기 때문에 최근 많이 도입되고 있다²⁾. 이러한 초음파 접합을 수행하는 장비에서 직접 초음파 에너지를 접합부에 가하는 핵심모듈은 접합 모듈(bonding module)로 종진동 초음파(longitudinal vibration)를 접합부

에 가하는 방향에 따라 Fig. 1과 같이 수평형과 수직형의 두 가지 타입으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 저압력 접합에서 안정적인 성능을 보이는 수평형 타입을 설계 대상으로 하였다. 초음파 접합에서는 진동 주파수와 접합 모듈의 진동 모드를 잘 맞추어 설계해야 제대로 접합 성능을 발휘할 수 있기 때문에 접합 조건이 비교적 까다롭고 모든 경우에 단순 적용하기 어렵다는 단점이 있다^{3,4)}. 따라서 본 연구에서는 이러한 설계상의 어려움을 극복하고 효과적인 최적 설계를 도출하기 위하여 최근 구조 최적화 설계에 많이 활용되는 위상최적화⁵⁾ 방법을 접합 모듈의 설계에 적용하였다. 이를 위하여 3차원 설계 영역에 대하여 정식화 하고 직접 작성한 위상최적화 MATLAB 코드를 수행하여 최적 설계안을 도출하였다.

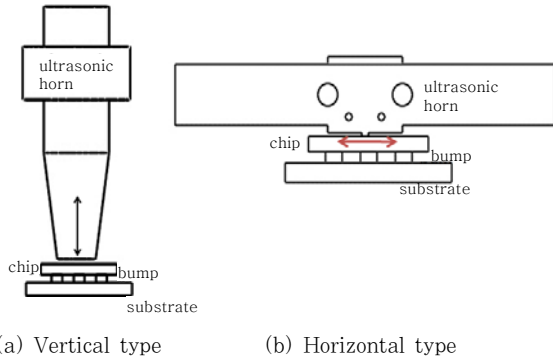


Fig. 1 Types of bonding modules

최적 설계 안을 바탕으로 실제 접합 모듈을 제작하여 범프 접합 실험 및 가혹환경 수명실험을 통하여 그 성능을 검증하였다. 실험용 모의 칩에 Sn계(Sn96.5wt%-Ag3.0wt%-Cu0.5wt%) 범프를 배열하고 초음파 접합을 실시하였다. 접합 조건에 따라 5가지의 실험을 진행하였으며 접합된 모의 칩의 전단력을 측정하였다. 또한 수명 신뢰성 확인을 위하여 3대의 제작 시료에 대하여 300시간의 가속 수명실험을 수행하였다. 수명실험 과정에서 매 10시간 마다 시료의 주파수와 진동 진폭을 측정하여 시료의 열화 여부를 확인하였다.

2. 접합모듈의 위상최적화 및 제작

2.1 위상최적화 설계

일반적으로 위상최적화 방법은 2차원 및 3차원 설계 영역에서 새로운 위상을 갖는 구조를 제한조건으로부터 최적화 과정을 거쳐 프로그램에 따라 자동 계산하는 방법으로 초음파 범위의 고주파의 동적 구조 최적화에는 적용이 쉽지 않은 것으로 알려져 있다⁴⁾. 본 연구에서는 새로운 접합모듈의 설계를 진행함에 있어 미세피치 접합에 대응하기 위하여 초음파 접합모듈의 목표 주파수 대역을 60kHz로 설정하고 위상최적화 정식화 방법 중 SIMP(Solid Isotropic Material with Penalization) 및 OC(Optimal Criterion) 알고리즘을 효과적으로 사용하여 3차원 설계 영역에 대한 위상최적화 계산을 MATLAB 상에서 구현하였다.

위상최적화 설계를 위하여 접합 모듈의 설계 영역을 각 단위 요소(혹은 셀)로 나누고 각 요소마다 0과 1 사이의 임의의 밀도를 설계 변수로 설정한다. 다음으로 SIMP방법의 식(1)에 대입하여 재료의 강성과 밀도를 결정할 수 있다⁴⁾.

$$\begin{aligned}
 E &= (x_e)^p \times E_0, \\
 \rho &= (x_e)^p \times \rho_0.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

위 식에서 지수 p 는 벌칙값(penalization)으로 설계변수의 지수곱 형태로 재료의 강성 및 밀도를 결정한다. 본 연구에서는 $p = 4$ 를 사용하였으며⁵⁾, x_e 는 각 요소별 설계 변수이다. E 와 ρ 는 각 단위 요소(셀)의 영률(Young's modulus)과 밀도이다. 다음으로 접합에 필요한 정확한 고유진동수를 갖는 접합 모듈을 설계하기 위하여 목적 함수 F 는 식(2)에서와 같이 주파수 차이를 최소화 하도록 설정하였다⁶⁾.

$$\begin{aligned}
 \text{최소화 : } F &= \frac{(\omega_i^2 - \omega_t^2)^2}{\omega_i^2} \\
 \text{제한조건: } \frac{V(x)}{V_0} &\geq f, \\
 [K - \omega_i^2 M] v_i &= 0, \\
 0 < x_{\min} &\leq x \leq 1.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

위에서 ω_t 는 목표 진동수, ω_i 는 최적화 중인 현재 모델의 고유진동수, V 는 설계영역의 전체 부피, $V(x)$ 는 현재 최적화된 형상의 부피이다. f 는 체적 변화율 제한 조건으로 접합부 및 고정부의 재료 분포를 고려하여 0.7로 하였다⁶⁾. M , K , v_i 는 각각 질량 행렬, 강성행렬, 고유벡터이다. x_{\min} 은 최소 설계변수 값으로 0.001을 사용하였다.

위상 최적화를 적용할 설계영역(design domain)과 고정구역(fixed region)은 Fig. 2과 같으며, 특히 Fig. 2(b)에서 고정부 길이 a 는 접합부 영역을 보존하기 위하여 본 연구에서는 16 mm 구역으로 설정 하였다. Sigmund⁷⁾의 99 line 코드를 기반으로 자체 작성한 MATLAB 코드를 이용하여 계산한 위상최적화 형상은 Fig. 3과 같다⁸⁾. 최적화 형상은 목표 주파수의 진동 모드 파장에 맞춰 단순히 길이만 줄어든 것이 아니라 설

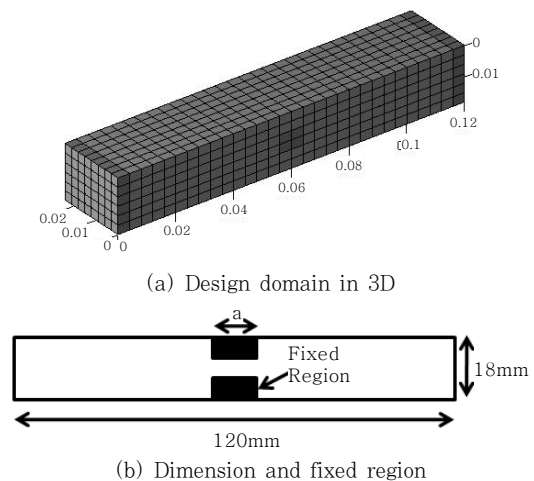


Fig. 2 Design domain for topology optimization

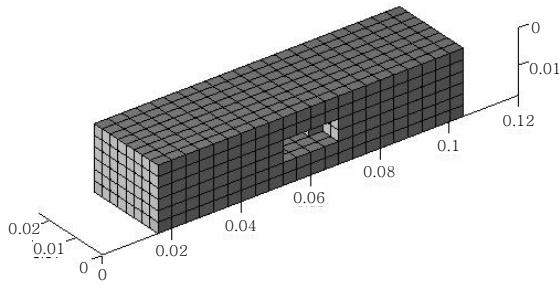


Fig. 3 Optimized model by topology optimization⁸⁾ (unit: m)

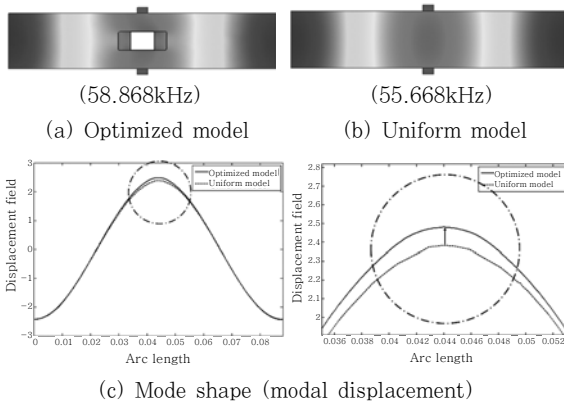


Fig. 4 Normalized vibration modes of the bonding module models

계영역에서 진동의 진폭이 가장 크게 될 중앙부에 I 자 구멍이 형성되는 것을 알 수 있다.

설계된 접합모듈의 진동 주파수와 모드 특성을 검증하고, 중앙부의 I 자형 구멍 효과를 알아보기 위하여 상용 유한요소 프로그램인 COMSOL을 이용하였다. Fig. 4 는 COMSOL에서 15,521개의 사면체 유한요소를 이용하여 고정부 없이 해석한 결과를 보이고 있는데, I 자형 구멍이 있는 최적화 모델(a)와 구멍이 없는 모델(b)의 모드 형상과 주파수를 비교하였다. 길이방향 cosine 전파장 모드의 고유진동수가 구멍이 없는 모델(b)의 경우 최적화 모델(a)보다 약 3.2kHz 낮게 나왔으며, 모드 형상의 경우도 최적화 모델의 경우 끝단에 위치한 진동변위 최대값보다 약 7% 크게 나타나 진동 에너지를 효율적으로 전달 할 수 있는 특징을 가지고 있다.

2.2 접합 모듈의 제작

최적설계 접합 모듈을 실제 제작하여 성능 실험을 수행하기 위하여 접합부와 고정부, 히터 및 온도센서 삽입부를 추가 설치한 프로토타입(설계제작 모델)의 형상과 제원은 Fig. 5 와 같다. 접합모듈의 고정부는 접합

Table 1 Natural frequencies of optimized and manufacturing prototype models by FEM (COMSOL) modal analysis

	Topology Optimization Model	Manufacturing Prototype Model	Diff. (%)
Frequency (kHz)	58.868	59.424	0.93

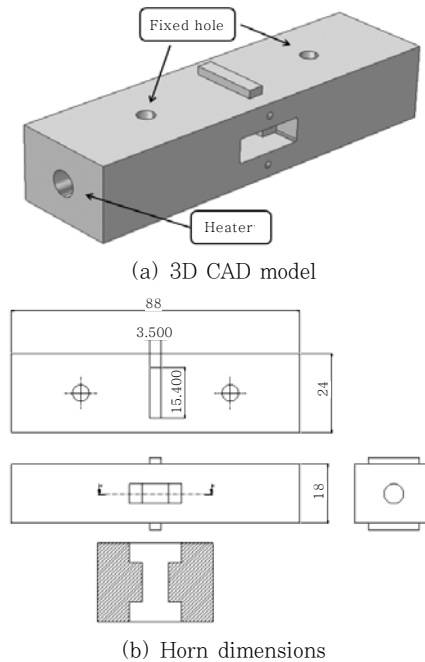


Fig. 5 Manufacturing prototype model (unit: mm)

모듈의 진동 변위가 0 이 되는 노드(node) 점을 기준으로 설정 하였으며, 초음파에 보조 열원을 추가한 열-초음파(thermo-sonic) 방식의 접합 실험을 위하여 히터와 온도 센서의 장착을 위한 삽입부를 추가하였다.

설계제작 모델의 유한요소 해석 결과는 Table 1 에서 나타낸 바와 같으며 최초 최적화 모델(Fig. 3) 대비 고유진동수가 약 0.93% 높게 나타났다. 이는 실제 장착을 고려해 고정부의 자유도를 구속하고 해석을 진행했기 때문으로, 고정부의 위치가 전파장 모드의 노드점이기 때문에 길이방향 모드 형상의 변화는 없었다.

이상과 같이 설계제작 모델의 추가 유한요소 해석과 분석을 통하여 초음파 주파수 및 모드 특성을 확인하고, 설계제작모델의 실제 가공 제작을 진행하였다. 스테인레스강(SUS220C) 재질을 와이어커팅 가공을 통해 제작된 실험용 시료는 Fig. 6 과 같다. 접합 및 신뢰성 실험에서 시료 편차를 고려하기 위하여 총 제작 대수는 3대로 하였다.

다음으로 접합 모듈 제작 시료를 Fig. 7 과 같이 접

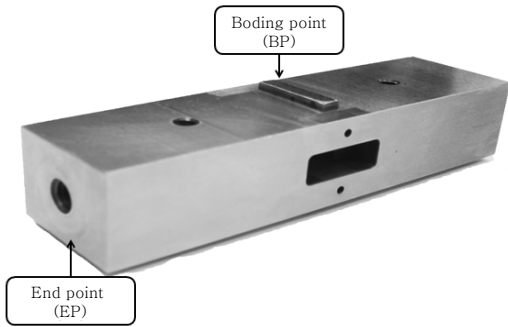


Fig. 6 Manufacturing prototype sample of bonding module

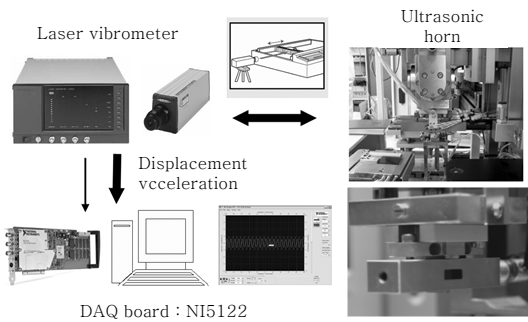


Fig. 7 Setup for vibration experiment

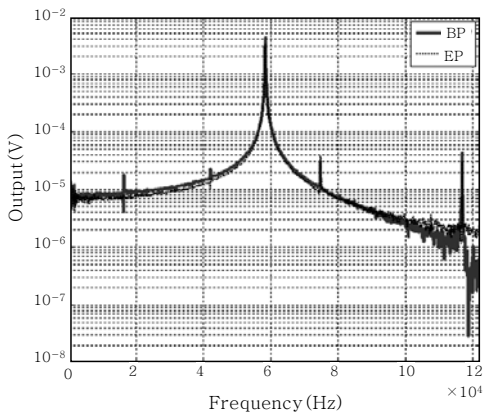


Fig. 8 Frequency spectrum measured at BP and EP of horn sample #1

합 장비 (flip-chip bonder)에 장착하고 실은 상태에서 레이저 진동계 (GRAPHTEC사 AT3700시리즈)를 이용하여 혼의 중앙 접합부와 끝단 부분의 주파수와 진동 변위의 진폭을 측정하였다. 시료의 접합부 (BP)와 끝단 (EP) 진동의 주파수 스펙트럼은 Fig. 8 과 같이 거의 동일하게 나타났다. Table 2 와 같이 3대 시료의 측정 평균 고유진동수는 BP에서 58.60kHz, 피크 (Peak-to-peak) 진폭 평균은 4.2 μ m이다. 고유진동수의 경우 Table 1 의 설계제작 모델의 유한요소 해석 고유진동수 59.424kHz와는 1% 미만의 차이로 일반적인 플립

Table 2 Natural frequency and amplitude of the manufacturing prototype samples

Sample #	#1	#2	#3	average
Natural frequency (kHz)	58.53	58.68	58.58	58.60
Peak Amplitude (μ m)	4.3	4.0	4.3	4.2

칩과 미세피치의 접합에 필요한 출력 조건은 충분히 만족시킬 수 있다.

3. 접합 모듈의 접합 및 신뢰성 실험

3.1 초음파 접합 실험

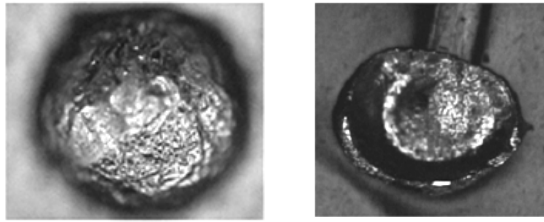
제작한 접합모듈의 접합 성능을 확인하기 위하여 3대의 접합모듈 시료 중 한 대 (#1)를 선정하여 Sn계 (Sn96.5wt%-Ag3.0wt%-Cu0.5wt%) 범프-Au패드 접합 실험을 실시하였다. 접합모듈 시료를 장착한 본더는 반자동 플립칩 본더 (ANI AUM-100) 기종으로 공압에 의해 접합 압력을 제어할 수 있으며 히터 온도 조절 장치와 플립칩 이송 및 위치조정 스테이지를 구비하고 있다.

접합 실험을 위하여 0.6 \pm 0.0254mm 크기를 가진 12개의 범프를 크기 25mm \times 25mm, 두께 1mm 기판 위에 6개씩 2열로 1.5mm 피치 배열하고 리플로우를 이용하여 제작하였다. 접합 실험은 가능한 접합 조건을 요인별로 분석하기 위하여 접합 모듈의 온도, 접합 압력, 가압 시간, 그리고 초음파 가진 시간의 4가지 변수 조건으로 총 5종류의 실험을 진행 하였고⁹⁾, Table 3 에 접합 조건별 접합 여부를 정리하였다.

Table 3 의 실험 결과로부터 초음파 접합 조건은 100 $^{\circ}$ C에서 3초 이상의 초음파 가진과 0.1MPa 가압 시간을 요구하며, 125 $^{\circ}$ C에서는 2초 이상의 초음파 가진과 0.1MPa의 가압 시간으로도 접합이 이루어짐을 알 수 있다.

Table 3 Flip-chip bonding test with different conditions

Test	Temp ($^{\circ}$ C)	Pressure (MPa)	Pressure duration (sec)	Excitation duration (sec)	Bonding result
1	150	0.2	2.0	2.0	○
2	150	0.1	2.0	2.0	○
3	125	0.1	2.0	2.0	○
4	100	0.1	3.0	3.0	○
5	100	0.1	2.0	2.0	×



(a) Initial bump (b) Breakage after shear test

Fig. 9 Flip-chip bumps in bonding test

접합 실험에서 접합 여부 판단은 접합력을 전단 강도를 측정하여 판단하였다. 접합 강도는 접합력 시험기 (PTR-1000, Rhesca Co., Japan)를 사용하였다. 전단 강도 실험 결과 Table 3에서 1번 실험 플립칩 시료의 초음파 접합 후 접합 강도는 범프 당 416.7gf로 나타났다. 이는 플립칩에서 Au-Au 열초음파 접합의 경우 접합강도가 평균 32.16gf임을 확인한 연구 결과¹⁰⁾와 비교하였을 때 매우 안정적인 접합 강도라고 할 수 있다. 또한 JEDEC 표준(JESD22-B116)을 준용하면 Au-Al 와이어 접합 평균 강도 기준은 95.1gf이므로 본 연구의 경우 범프의 크기 및 접합 방식의 차이가 있지만 충분히 안정적인 접합이 되었다고 판단할 수 있다. Fig. 9는 접합 실험에 사용된 범프의 접합 전 현미경 이미지와 전단 강도 실험 후 파괴된 단면을 보이고 있다.

3.2 접합 모듈의 신뢰성 실험

이상의 실험을 통해 제작된 접합모듈의 기본 초음파 특성과 접합 성능은 검증이 되었다고 판단하고, 다음으로 접합모듈의 신뢰성을 검증하기 위한 모의 공정실험을 진행하였다.

신뢰성 실험에는 제작된 총 3대의 제작 시료를 사용하였고 실제 공정 보다 빠른 실험을 위하여 Fig. 10과 같이 2초 ON으로 가압(0.2MPa) 및 가진(57.6kHz 기준)과 3초 OFF 휴지기를 갖는 5초 주기의 접합공정 프로파일을 설정하였다. 이는 기존의 플립칩 접합 공정이 이송 및 접합시간 포함 최소 15초 이상 걸리는 것보다 최소 3배 이상 빠른 공정이다. 이러한 프로파일에 맞춰 단속적인 주기 가진이 가능하도록 두 개의 타이머를 장착한 초음파 발생기를 제작하였다.

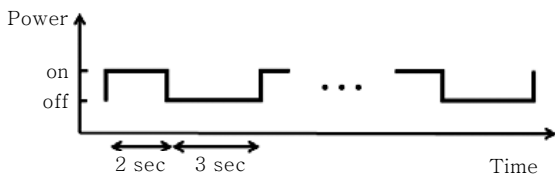


Fig. 10 Duty cycle profile for bonding process

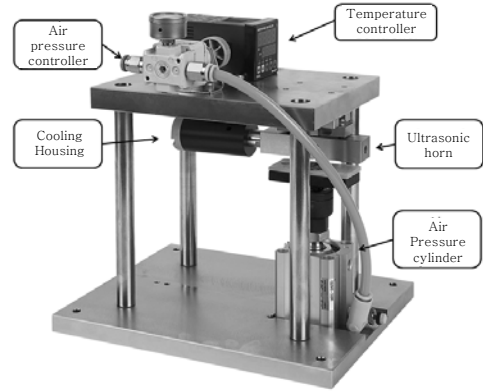
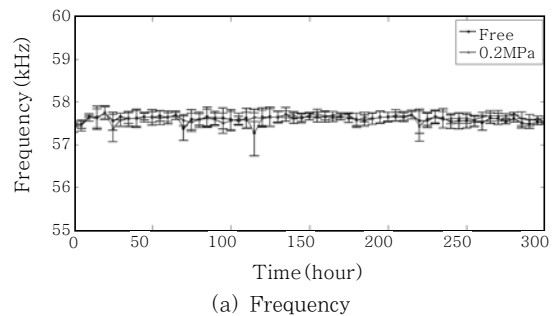


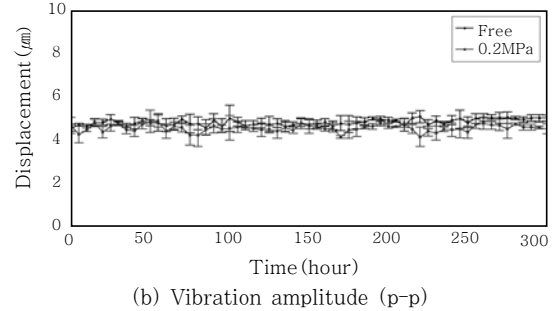
Fig. 11 Reliability test jig

또한 3대의 제작 시료를 동일한 조건으로 동시에 실험을 진행하기 위하여 Fig. 11 과 같은 신뢰성 실험 지그(jig)를 제작하여 실험을 진행하였다. 가능한 접합 조건 중 가혹 환경을 유지하기 위하여 카트리지 히터를 통해 시료를 150℃로 유지 하였으며, 가진 PZT액추에이터가 꾸준히 성능을 유지할 수 있도록 냉각 하우징을 통해 강제 공냉을 유지하였다. 실제 초음파 접합 공정에서는 접합모듈을 스테이지로 하향 이동하여 가압과 초음파 가진을 통해 접합을 수행한다. 그러나 본 실험에서는 접합 모듈 시료를 고정하고 공압 실린더를 통하여 가압되도록 모의 칩을 아래에서 위로 이동하도록 설계하였다.

Fig. 12 는 300 시간 연속 공정 동안 접합 모듈 시료 3대의 접합부 진동 주파수와 진폭을 10시간 단위로 측정된 분포를 나타낸다. 300 시간 동안 시료의 고유 진동수는 57.6±0.14 kHz 범위의 분포를 갖고, 접합



(a) Frequency



(b) Vibration amplitude (p-p)

Fig. 12 Data variation in reliability test

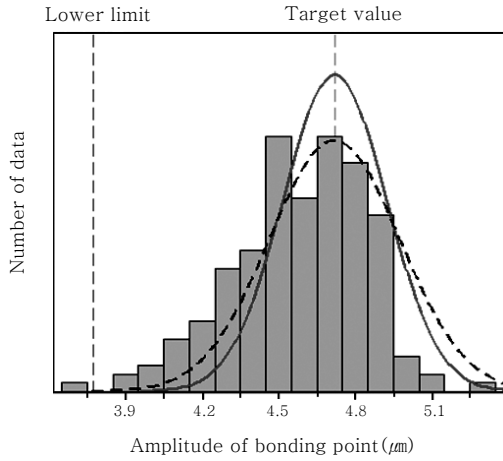


Fig. 13 Distribution and statistical estimations of vibration amplitude(p-p)

부의 진동 진폭(p-p)은 $4.3 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 범위에 분포함을 확인하였다. 또 비가압시 와 가압 시 진동 변위의 차이는 평균 $0.28 \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 이는 시료의 초음파 특성 변화와 성능 열화가 신뢰성 실험 시간 범위에서는 크지 않음을 알 수 있다.

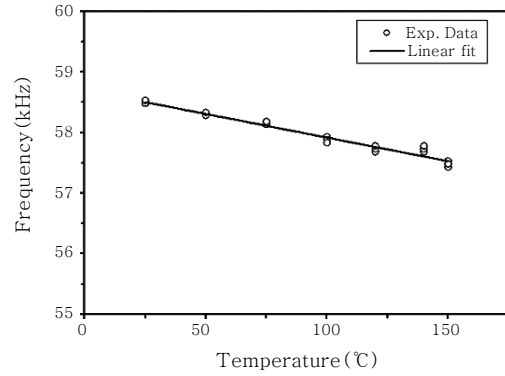
또한 Fig. 13은 Fig. 12(b)의 데이터를 활용하여 전체 진폭 빈도 분포와 통계적인 추정을 시도한 결과이다. Minitab¹¹⁾ 분석을 통해 설정한 진폭 목표 값인 $4.7 \mu\text{m}$ 를 기준으로 적색실선 가우스분포 곡선은 이상적인 분포를 나타내고, 점선 분포는 실제 실험 데이터에서 추정된 분포이다. 추정 분포의 분석 결과 공정능력지수(Cpk)는 1.55 PPM이며 추정 불량 총계는 백만 개 당 5464.48 로, 300시간 작동 기준 불량률이 약 0.55% 라는 통계적 추정 결과를 얻을 수 있다.

신뢰성 실험 전, 후의 온도에 따른 접합 모듈 시료의 고유진동수는 Fig. 14에서 확인할 수 있다. 실험은 최초 상태와 신뢰성 실험 종료 후 각 온도 별로 시료에 압력을 0부터 0.1 Pa 단위로 0.4 Pa까지 가하면서 고유진동수 변화를 측정 하였다.

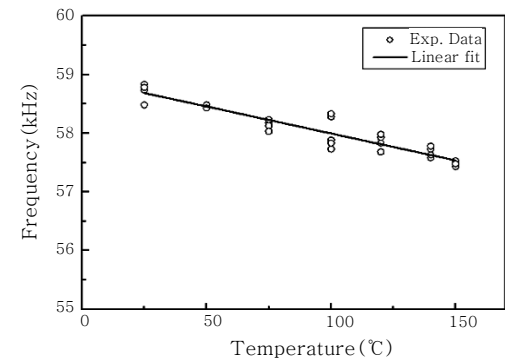
Fig. 14와 같이 가압에 따른 고유진동수 변화는 크지 않고 실온에서부터 150°C 까지 온도 변화에 따라 약 1 kHz 내외의 진동수 변화가 있음을 확인하였다. 그러나 그 변화 추세는 연속공정 실험 전, 후의 결과 모두 거의 동일하게 나타나 실험으로 특별한 성능 열화 현상이 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 Fig. 15는 이러한 신뢰성 연속공정 실험 종료 후 초음파 모듈의 사진을 나타낸다.

4. 결 론

위상최적화 기법을 이용하여 설계한 초음파 플립칩



(a) Initial state



(b) After 300 hour duty-cycle test

Fig. 14 Natural frequency variation due to temperature of bonding module

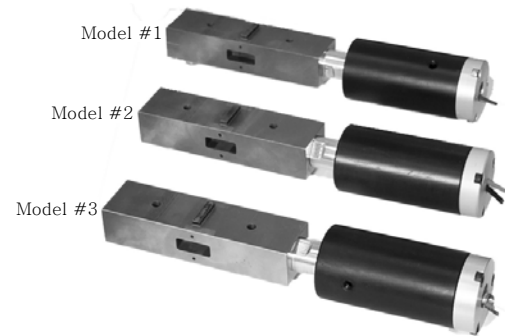


Fig. 15 Test samples after reliability test

접합모듈을 제작하여 성능을 검증하고, 접합 실험과 연속공정에 의한 신뢰성 실험을 수행하였다. 제시한 방법과 과정을 통하여 기존의 초음파 접합 모듈 설계의 한계를 극복하고 효과적이고 합리적인 설계 및 검증 과정을 제시하였다.

MATLAB 프로그램을 작성하여 3차원 영역의 접합 모듈을 60 kHz 대역의 고유진동수를 갖도록 위상최적화를 진행하였으며, 실제 제작 가능한 세부 모델에 대하여 상용 유한요소 프로그램인 COMSOL을 이용해 목표 진동수와 모드를 얻을 수 있음을 확인하였다. 가공 제작한 접합 모듈 3대 시료의 고유진동수는 평균

58.60 kHz이고, 진동 진폭(p-p)은 평균 4.2 μm 이었다.

제작한 접합 모듈은 접합 실험과 연속공정 실험을 통하여 성능과 신뢰성을 확인하였다. 접합 실험은 Sn계 무연 범프를 사용하여 접합된 범프의 전단력을 테스트하였다. 접합 강도 측정결과, 416.7 gf 로 측정되었으며 기존 연구결과와 비교를 하였을 때 충분한 접합 강도를 가짐을 확인하였다. 연속공정 실험은 실제 공정을 모사하여 테스트 할 수 있는 전용 지그와 초음파 발생기를 이용하여 3대의 시료를 300시간 동안 실험하였다. 실험 시간 동안 초음파 진동수와 진폭을 지속 관찰한 결과 성능 열화가 발생하지 않았으며, 이는 실제 공정에서도 동일 시간의 신뢰성을 검증했다고 할 수 있다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. P. Elenius, L. Levine : Comparing Flip-chip and Wire-bond Interconnection Technologies, *Chip Scale Review*, 4(2000), 81.
2. Q. Tan, W. Zhang, B. Schaible, L. J. Bond : Thermosonic Flip-chip Bonding Using Longitudinal Ultrasonic Vibration, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, **21** (1998), 53-58
3. S. Gao : New Technologies for Lead-Free Flip Chip Assembly, Ph.D. Dissertation, (2005), University of London
4. S. R. Kim, J. H. Lee, C. D. Yoo : Design of Cylinder Horn for Ultrasonic Welding, *Journal of KWJS*, **27-4** (2009), 60-66 (in Korean)
5. M. P. Bendsøe, O. Sigmund : *Topology Optimization*, Springer (2002)
6. C. Y. Ha : Vibration Design in Ultrasonic Horn Using Topology Optimization, M.S. Thesis, 2011, University of Seoul (in Korean)
7. O. Sigmund : A 99 Line Topology Optimization Code written in Matlab, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **21** (2001), 120-127
8. C. Y. Ha, S. I. Lee : 2D and 3D Topology Optimization with Target Frequency and Modes of Ultrasonic Horn for Flip-Chip Bonding, Submitted to the Transactions of Korean Society for Sound and Vibration Engineering, 2012 (in Korean)
9. J. M. Koo, J. W. Kim, J. W. Yoon, B. I. Noh, C. Y. Lee, J. H. Moon, C. D. Yoo, S. B. Jung : Ultrasonic Bonding Technology for Flip Chip Packaging, *Journal of KWJS*, **26-1**(2008), 31-36 (in Korean)
10. L. K. Cheah, Y. M. Tan, J. Wei, C. K. Wong : Gold to Gold Thermosonic Flip-Chip Bonding, SPIE proceedings series: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2001
11. T. A. Ryan : Minitab Reference Manual, Minitab, Inc., 1986.