

횡 방향 플립 칩 초음파 접합 시 혼의 공차변수가 시스템의 진동에 미치는 영향

정하규⁺, 권원태*, 윤병옥⁺⁺
(논문접수일 2008. 8. 6, 심사완료일 2008. 11. 25)

Effect of the Tolerance Parameters of the Horn on the Vibration of the Thermosonic Transverse Bonding Flip Chip System

Ha Kyu Jung⁺, Won Tae Kwon*, Byung Ok Yoon⁺⁺

Abstract

Thermosonic flip chip bonding is an important technology for the electronic packaging due to its simplicity, cost effectiveness and clean and dry process. Mechanical properties of the horn and the shank, such as the natural frequency and the amplitude, have a great effect on the bonding capability of the transverse flip chip bonding system. In this research, two kinds of study are performed. The first is the new design of the clamp and the second is the effect of tolerance parameters to the performance of the system. The clamp with a bent shape is newly designed to hold the nodal point of the flip chip. The second is the effect of the design parameters on the vibration amplitude and planarity at the end of the shank. The variation of the tolerance parameters changes the amplitude and the frequency of the vibration of the shank. They, in turn, have an effect on the quantity of the plastic deformation of the gold ball bump, which determined the quality of the flip chip bonding. The tolerance parameters that give the great effect on the amplitude of the shank are determined using Taguchi's method. Error of set-up angle, the length and diameter of horn and error of the length of the shank are determined to be the parameters that have great effect on the amplitude of the system.

Key Words : Thermosonic bonding(열-초음파 접합법), transverse flip chip bonding(횡방향 플립칩 접합), Bent shape fixture(곡선형 클램프), Taguchi's method(다구치 방법)

+ 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원

* 교신저자, 서울시립대학교 기계정보공학과 (kwon@uos.ac.kr)

주소: 130-743 서울시 동대문구 전농동 서울시립대학교 기계정보공학과

++ 서울시립대학교 기계정보공학과

1. 서론

기술의 발달로 칩이 소형화, 집적화 되어감에 따라 결합방법도 발달되어 이전의 납 위주의 접합기술이 최근에는 플립 칩 본딩으로 대체되고 있다^(1,2). 플립 칩 본딩에는 열과 압축력에 의해 결합시키는 서머컴프레션 본딩, 초음파에너지에 의해 결합시키는 울트라 소닉 본딩, 열과 초음파에너지에 의해 결합시키는 서머소닉 본딩 등이 있다. 열과 압축력만을 사용하는 서머컴프레션 본딩에 비하여 초음파에너지를 이용하는 울트라 소닉 본딩과 서머소닉 본딩은 칩에 힘을 덜 가해도 되므로, 보다 많은 입출력을 가진 칩을 접합하는데 적합하다. 이는 초음파 연화 효과에 의하여 더 작은 응력 하에서 접합이 가능하기 때문이다⁽¹⁾.

서머소닉 본딩에서는 초음파에너지가 혼을 통해 범프에 전달되어 범프가 순간적으로 기판과 칩을 결합시킨다. 따라서 혼은 서머소닉 본딩 시스템에서 매우 중요한 부품이다. 혼은 전달된 초음파에너지를 증폭하는 역할을 하므로 효율을 높이기 위해서 고유진동수에서 진동하도록 설계한다. 혼의 고유진동수는 혼의 형상이나 재질, 가공 오차 등에 따라 매우 민감하게 변한다. 그러므로 혼은 매우 정교하게 제작하여야 한다. 게다가 혼을 고정하는 클램프의 형상에 따라 혼의 고유진동수가 변화하는 것이 본 연구결과 밝혀졌다.

이에 두 가지 연구를 수행하였다. 우선 혼을 고정하는 장치인 클램프의 형상이 진동에 미치는 영향을 연구하였다. 일반적으로 사용되는 직선형 클램프를 이 연구에서 제안된 곡선형 클램프와 비교하였다. 횡방향 플립 칩 본딩의 경우 곡선형 클램프를 사용함으로써 같은 혼을 이용하여도 진폭을 10%이상 향상됨을 보였다. 이때 고유진동수는 직선형 클램프를 사용하였을 때가 40.86kHz, 곡선형 클램프를 사용하였을 때가 40.12kHz로, 곡선형 클램프를 사용하였을 때 혼의 고유진동수가 더 낮았다. 두 번째는 혼의 가공 시 가공오차들이 서머소닉 플립 칩 본딩 시스템에 미치는 영향과 가공오차들의 민감도에 대하여 연구하였다. 다구치 방법을 사용하여 설계인자의 가공오차가 시스템의 성능에 미치는 영향과 그 중에서도 가장 큰 영향을 미치는 인자에 대하여 연구하였다. 결국 설계 시 가장 높은 정밀도를 가져야 하는 인자와 좀 덜 정밀해도 되는 인자를 구분함으로써 최소의 비용으로 최대의 성능향상을 이루는 방안을 제안하였다.

2. 수치해석을 위한 혼의 모델링

2.1 수치해석을 위한 혼과 생크의 설계

혼과 생크의 설계 방법에 따라 고유진동수와 입/출력 증폭비가 변화한다. 이 연구에서는 혼과 생크의 고유진동수가 40kHz를 갖도록 설계하였으며 그 모양이 Fig. 1에 주어졌다. 설계된 혼 조립품의 해석을 위해 상용 소프트웨어가 사용되었다. 혼과 생크의 메시는 툴의 자동생성기능으로 생성하였는데 이때 메시 사이저는 혼 부분을 0.003m, 생크 부분을 0.002m로 하였다. 혼과 생크의 재질은 티타늄으로 티타늄의 밀도는 4430kg/m^3 , 영률은 $1.17 \times 10^{11}\text{Pa}$, 포아송 비는 0.34이다.

2.2 클램프의 형상설계

클램프로 고정된 혼부분이 노달 포인트가 아니면 혼의 성능이 저하될 뿐 아니라, 고정된 부분에서 심한 응력이 발생하여 수명을 단축시키는 결과를 초래한다. 그러므로 혼을 고정시킬 때 혼의 노달포인트, 즉 진동이 발생하지 않는 부분에 클램프를 설치하여 혼의 진동에 영향을 주지 않고 클램프가 설치된 부분의 응력을 최소화하는 것이 중요하다. 본 연구에서 설계한 혼의 노달포인트가 어느 곳인지 파악하기 위한 연구가 먼저 수행되었다. 그 결과 생크가 달려있지 않은 혼의 노달포인트는 직선이지만(Fig. 2(a)), 생크가 달려게 되면 혼의 노달포인트는 생크의 영향으로 위쪽이 생크 쪽으로 기울어 음의 포물선모양을 갖게 되는 것이 밝혀졌다(Fig. 2(b)). 그러므로 생크가 있을 경우 노달포인트를 직선으로 가정하여 클램프를 설치하면 진폭이 감소할 뿐 아니라 고정부에 심각한 응력이 발생함을 예측할 수 있다. 혼의 진동수가 매우 높은 값인 40kHz인 것을 고려하면 직선클램프로 인하여 혼의 수명이 대폭 줄어들 것을 예상할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 클램프가 직선일 때와 곡선일 때의 응력과 진폭의 변화에 대하여 연구하였고, 적합한 클램프를 설계하였다.

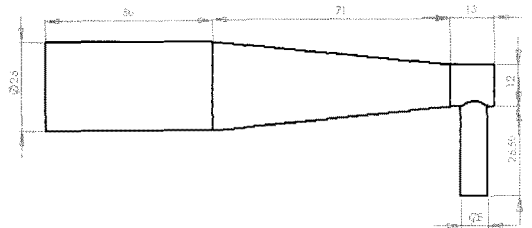
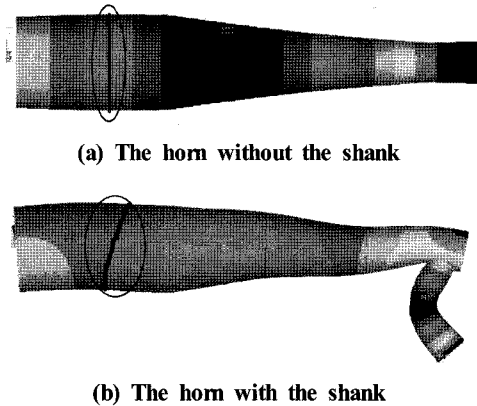


Fig. 1 Dimensional configuration of the horn and shank



(a) The horn without the shank

(b) The horn with the shank

Fig. 2 Comparison of the nodal points without and with shank

2.3 공차 매개변수

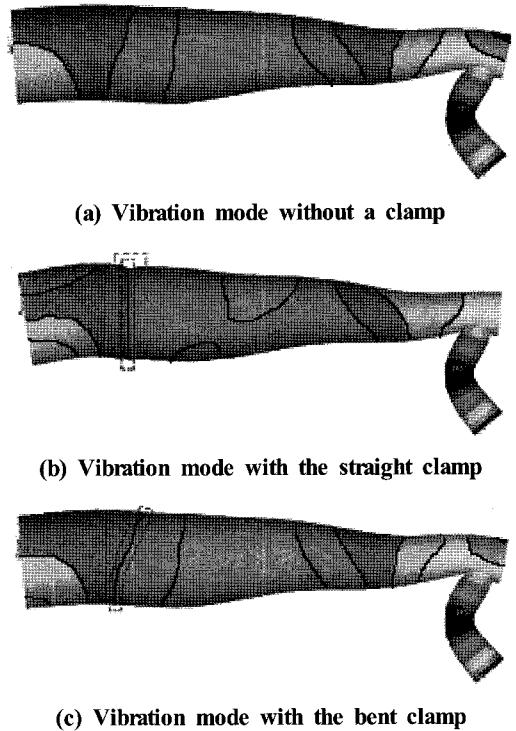
혼 시스템 제작과 조립 시 고려해야 하는 설계인자로 혼의 고정각도, 제작과정에서 생기는 혼의 형상, 혼과 생크의 밀도, 혼과 생크의 영률, 생크의 결합을 위한 구멍의 위치, 구멍의 진직도, 생크의 형상 등 7개로 설정하였다. 혼의 고정각도 오차는 혼 진동의 크기와 방향에 영향을 주는데 가공에 의한 오차나 조립에 의한 오차 또는 둘 다에 의하여 발생할 수 있다. 또한 혼의 형상오차(길이와 지름오차), 생크 구멍의 위치오차, 구멍의 진직도, 생크의 형상 등은 가공할 때 발생하는 오차로 진폭과 신호 증폭 비에 영향을 미친다. 또한 혼과 생크의 밀도와 영률의 변화도 고유진동수와 진폭에 영향을 미친다.

이 7개의 가공오차들의 영향을 알아보기 위해서 다구치방법을 사용하여 모사실험을 수행하였다. 다구치 방법은 연구 및 개발단계에서 생산성을 향상시켜 고품질의 제품을 신속하고 저렴하게 생산할 수 있도록 하는 일종의 공학적 방법론이다⁽²⁾. 장점은 직교배열을 실험계획에 적용하여 실험횟수를 줄여 시간을 절약하고 각 인자의 민감도를 측정할 수 있어 변동요인에 영향을 적게 받도록 최적화시키는 것이 가능하다. 또한 인자들 간의 교호작용에 대한 정보도 제공한다. 다구치 방법을 이용하여 7개의 가공오차들 중에 시스템에 가장 큰 영향을 미치는 인자를 발견하였다.

3. 결과

3.1 클램프가 시스템의 성능에 미치는 영향

혼을 클램프로 고정하였을 때 고정방법에 따라 혼의 진폭



(a) Vibration mode without a clamp

(b) Vibration mode with the straight clamp

(c) Vibration mode with the bent clamp

Fig. 3 Comparison of the vibration of the horn assembly according to the clamping method

의 크기가 달라진다. 이는 클램프를 설계할 때 혼의 노달포인트를 정확히 파악하지 않으면 실제 작동성능이 달라질 수 있음을 시사한다. 클램프에 따른 진폭의 변화량을 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3(a)는 클램프가 없는 상태에서 왼쪽 끝단에 진동이 주어졌을 경우의 자유진동을 나타내고, Fig. 3(b)는 현재 사용되고 있는 직선 클램프가 체결된 경우, Fig. 3(c)는 이 연구에서 제안된 곡선 클램프가 체결된 경우의 응력분포와 진동형태를 나타낸다.

왼쪽 끝단에서 주어진 입력과 생크 끝단에서 측정된 출력의 비가 클램프가 없는 자유진동의 경우에는 3.74, 직선클램프를 설치했을 때가 3.32, 노달 포인트를 따라서 클램프를 설치했을 때가 3.6이었다. 직선 클램프와 노달 포인트 클램프의 경우는 각각 자유진동의 경우와 비교하면 89%, 96%의 진폭비를 나타낸다. 직선 클램프의 경우 노달 포인트가 아닌 점들을 구속함으로써 진폭이 10%이상 줄어들었고 노달 포인트의 경우에는 4%만이 줄어들었다. 노달 포인트에 클램프를 설치한 Fig. 3(c)의 경우에도 진폭비가 줄어든 것은 설치된 클램프에 의하여 반경방향의 변위가 고정되어 포

아송 비에 해당하는 만큼의 축방향(또는 길이방향) 변위가 영향을 받았기 때문이다.

FEM 해석 결과 Fig. 3(b)에서 클램프를 설치한 부분이 반경방향으로 오목하게 함몰된 것으로 확인 할 수 있었다. 클램프에 의해서 줄어드는 변위의 크기는 클램프 부분의 변형률을 계산하면 알 수 있다. 변형률이 식 (1)~(3)에 주어졌는데 클램프를 강체로 가정하여 클램프가 체결된 부분의 반경방향, 즉 y축, z축 방향의 변형률을 0으로 하였다. 이를 이용하면 y, z축방향의 응력을 식 (4)와 같이, x축 방향의 변형률을 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)) \quad (1)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)) \quad (2)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)) \quad (3)$$

$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{\nu\sigma_x}{1-\nu} \quad (4)$$

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \left(\frac{1-\nu-2\nu^2}{1-\nu} \right) \quad (5)$$

$$\epsilon_y = \epsilon_z = -\frac{\nu\sigma_x}{E} \quad (6)$$

식 (5)는 Fig. 3(b)와 (c)에서 클램프를 따라서 오목하게 함몰된 부분의 x방향 변형률을 나타내는데 $\sigma_y = \sigma_z = 0$ 인 자유진동 시와 비교하면 $(\frac{1-\nu-2\nu^2}{1-\nu})$ 배로 줄어들었음을 알 수 있다. 포아송 비가 0.34인 것을 고려하면 식 (5)에 의하여 계산되는 변형률은 구속되지 않은 경우의 64.9%에 해당한다. FEM해석결과는 54%의 변형률을 보인다. 클램프에 의하여 구속되지 않은 부분의 y, z축 방향 변형률은 식 (6)으로 나타낼 수 있다. 이때 y, z축 방향의 변형률은 x방향 변형률의 34%에 해당한다. FEM해석결과는 y방향 변형률이 x방향 변형률의 31%, z방향 변형률이 x방향 변형률의 41%를 나타낸다. FEM 해석결과에서 얻은 값은 식 (5)를 사용한 값과는 차이가 있으나 노달 포인트에 클램프를 설치한 경우에도 진폭비가 줄어든 이유가 포아송 비에 있다는 것을 알 수 있다. 또한 포아송 비는 y방향, z방향 변형률이 생기게 하여 클램프를 따라서 오목하게 함몰하는 이유가 된다. 이때 클램프의 구속에 의하여 x축 방향 응력의 약 65%응력이 y축과 z축 방향으로 주어지고 반경방향으로는 약 92%의 응력이 주어짐이 밝혀졌다.

클램프를 곡선으로 교체함으로써 얻을 수 있는 이익은 진폭이 늘어난 것 뿐 아니라, 수명도 연장할 수 있다는 것이다. 혼의 진동수가 40kHz에 달하기 때문에, 직선 클램프를 사용

할 경우 클램프가 설치된 곳이 1초에 4만 번 진동을 한다. 그러므로 직선클램프를 사용할 때, 클램프부분의 응력이 0이 아니므로 피로현상에 의하여 혼의 수명이 매우 짧아질 수 있다. 반면에 이 연구에서 제안한 곡선클램프는 노달 포인트를 따라서 설치되어 진동이 거의 없기 때문에 수명이 대폭 늘어날 수 있다.

3.2 공차가 시스템의 성능에 미치는 영향

7개의 가공오차의 효과를 알아보기 위해서 다구치 방법을

Table 1 Orthogonal array for the simulation with 7 design parameters

No.	Error of the horn angle (A)(%)	Error of the hole displacement (E)(%)	Error of the shank angle (F)(%)	Error of the shank length (G)(%)	Error of the horn's length (B)(%)	Error of the density (C)(%)	Error of the Young's Modulus (D)(%)
1	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
2	-10	-10	0	0	0	0	0
3	-10	-10	10	10	10	10	10
4	-10	0	-10	0	10	10	10
5	-10	0	0	10	-10	-10	-10
6	-10	0	10	-10	0	0	0
7	-10	10	-10	10	0	0	0
8	-10	10	0	-10	10	10	10
9	-10	10	10	0	-10	-10	-10
10	0	-10	-10	-10	-10	0	10
11	0	-10	0	0	0	10	-10
12	0	-10	10	10	10	-10	0
13	0	0	-10	0	10	-10	0
14	0	0	0	10	-10	0	10
15	0	0	10	-10	0	10	-10
16	0	10	-10	10	0	10	-10
17	0	10	0	-10	10	-10	0
18	0	10	10	0	-10	0	10
19	10	-10	-10	-10	-10	10	0
20	10	-10	0	0	0	-10	10
21	10	-10	10	10	10	0	-10
22	10	0	-10	0	10	0	-10
23	10	0	0	10	-10	10	0
24	10	0	10	-10	0	-10	10
25	10	10	-10	10	0	-10	10
26	10	10	0	-10	10	0	-10
27	10	10	10	0	-10	10	0

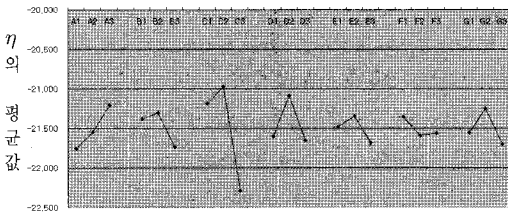


Fig. 4 Effect of the parameter on the amplification of the signal

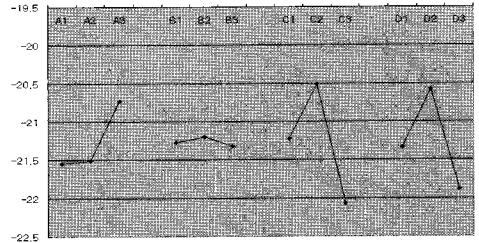


Fig. 5 Effect of the 4 parameter on the value of η

Table 2 Orthogonal array for the simulation with 4 design parameter

No.	Error of the horn angle (A)(%)	Error of the Young's Modulus (D)(%)	Error of the density (C)(%)	Error of the horn's length (B)(%)
1	-10	-10	-10	-10
2	-10	0	0	0
3	-10	10	10	10
4	0	-10	0	10
5	0	0	10	-10
6	0	10	-10	0
7	10	-10	10	0
8	10	0	-10	10
9	10	10	0	-10

이용해서 모사계획을 Table 1과 같이 작성하였다. 사용한 직교행렬은 $L_{27}(3^{13})$ 이다. 인자의 효과를 추정하기 위해서 평균분석을 실행하였다. 최종 통계량 η 를 식 (7)과 같이 정의하고 인자수준의 효과는 원하는 모사실험에 사용된 인자수준의 평균 최종통계량으로 나타낸다.

$$\eta = \log_{10} \frac{R_r}{R_0} \quad (7)$$

여기에서 R_0 는 목표 진폭비, R_r 은 모사실험결과 얻은 진폭비이다.

Fig. 4는 평균분석으로 계산된 각 인자의 수준에 따른 η 값의 평균이다. η 는 신호 대 잡음비라고도 부르며 이번 실험에서는 η 값을 최대화시키는데 초점을 두었다. Fig. 4에서 각 수준간의 차이가 큰 인자가 시스템에 더 큰 영향을 주는 것을 고려하면 혼의 밀도(C)가 중요한 요소임을 알 수 있다.

Table 3 ANOVA for the 4 design parameter of the horn and shank assembly

Design parameter	Degree of freedom	Sum of squares	Sum of average	F
Error of the horn angle (A)(%)	2	1.261	0.63	-
Error of the horn's length (B)(%)	2	0.02	0.01	-
Error of the density (C)(%)	2	3.636	1.817	-
Error of the Young's Modulus (D)(%)	2	2.606	1.303	-
Sum	8	7.523		

각각의 영향을 좀 더 알아보기 위하여 첫 번째 실험에서 영향이 큰 순서대로 혼의 밀도(C), 혼의 영률(D), 혼의 고정각도오차(A), 혼의 길이오차(B)를 인자로 택하였다.

Table 2는 4개의 가공오차의 영향을 알아보기 위해 작성한 실험계획으로 직교배열 $L_9(3^4)$ 이 사용되었고 모사실험의 결과가 Fig. 5에 주어졌다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 A3, B2, C2, D2 조건에서 가장 큰 진폭비를 얻을 수 있고 또한 혼의 밀도오차와 혼의 영률오차가 시스템의 성능에 끼치는 영향이 큰 것을 알 수 있었다.

여기서 특이할 만한 사항은 혼의 고정각도오차가 없는 것보다 10% 오차가 있는 경우에 더 큰 진폭비를 얻을 수 있는 것이다. 혼 끝단의 변위를 보면 x축 방향으로 0.785×10^{-7} 이고 y축 방향으로 -0.257×10^{-7} 이다. 따라서 혼의 진동은 0.826×10^{-7} 의 크기를 진폭으로 가지고 x축과 -18° 차이가 나는 방향으로 발생한다. 그러므로 고정각도오차가 +10%일 때 혼의 진동 방향이 x축과 이루는 각도가 감소하여 x축 방향의 진폭이 증가하게 된다. 이러한 이유로 고정각도 오차가 없는 경우보다 10% 있는 경우 더 큰 진폭비를 얻을 수 있다. 이론적으로는 고정각도가 -18° 일 때 최대진폭을 얻을 수 있

으나, 생크의 끝부분에 주어지는 힘에 의하여 혼이 휘어질 수 있으므로 생크에 작용하는 힘의 크기에 따라 다르게 고정각도를 결정하여야 한다. 4개의 가공오차가 시스템의 성능에 끼치는 영향의 크기의 순서는 첫 번째 실험과 동일하게 나타났다. 그러나 혼의 길이오차가 시스템의 성능에 끼치는 영향이 비교적 작게 나타났다. 4개의 가공오차가 η 의 변동에 기여하는 정도를 분산분석을 통해 얻은 후 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

여기서 혼의 고정각도오차는 16.75%, 혼의 밀도오차 48.33%, 혼의 영률오차 34.64%, 혼의 길이오차 0.26%가 η 의 변동에 기여함이 밝혀졌다.

4. 결론

본 연구에서는 가공오차가 서머소닉 본딩 시스템에 미치는 영향과 민감도를 알아보았다. 이 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 서머소닉 플립 칩 본딩 시스템을 구성할 때 직선형 클램프는 자유진동의 89%진폭을, 혼의 노달 포인트를 따라 설계한 곡선형 클램프는 자유진동의 96%의 진폭을 나타내어 곡선형 클램프 설치 시 시스템의 진폭이 7% 증가함을 알 수 있다. 또한 곡선형 클램프를 설치하면 직선형 클램프에서 발생할 수 있는 혼의 피로현상을 방지할 수 있다.
- (2) 곡선형 클램프를 설치하였을 때도 자유진동 시 발생하는 진폭의 100%를 나타내지 못하는 이유는 클램프를 설치하였을 때 반경방향으로의 변형이 구속되기 때문이다.
- (3) 오차 중에서 혼의 밀도, 혼의 영률, 혼의 고정각도 등의 영향이 크고 그 중에서 혼의 밀도오차와 혼의 영률오차가 가장 큰 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 생크의 구멍 위치, 생크의 고정각도의 영향은 비교적 적다.

후 기

이 연구는 2007~2008년 서울시 산학연 협력 사업으로 지원되었습니다.

참고 문헌

- (1) Kang, S. Y., Williams, P. M., McLaren, T. S., and Lee, Y. C., 1995, "Studies of thermosonic bonding for flip chip assembly," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 42, pp. 31~37.
- (2) McLaren, T., Kang, S. Y., Zhang, W., Hellman, D., Ju, T. H., and Lee, Y. C., 1995, "Thermosonic flip chip bonding for an 8x8 VCSEL array," *in proc. 45th ECTC*, pp. 393~400.
- (3) Madhay S. P., 1992, *Quality engineering using robust design*, Prentice Hall, NJ.
- (4) Li, H. L. M., Chan, L. W. H., and Liu, C. K. P., 2003, "Comparison of bonding defects for longitudinal and transverse thermosonic flip chip," *Electronics Packaging Technology. 2003 5th Conference*, pp. 350~355.
- (5) Neppiras, E. A., 1965, "Ultrasonic Welding of Metals," *Ultrasonics*, Vol. 3, pp. 128~135.
- (6) Mayer, M. and Schwizer, J., 2002, "Ultrasonic Bonding: Understanding How Process Parameters Determine the Strength of Au-Al Bonds," *Proc. Symposium on Microelectronics IMAPS '02*, Vol. 4931, pp. 626~631.
- (7) Kim, J. B., Chiao, M., and Lin, L., 2002, "Ultrasonic bonding of In/Au and Al/Al for hermetic sealing of MEMS packaging," *Micro Electro Mechanical System, 15th IEEE*, pp. 415~418.