

**研究論文**

## 3차원 납 접합부 형상을 이용한 표면실장기술의 적정 납량 결정

최 동 필\* · 김 성 관\* · 유 중 돈\*\*

### Determination of Adequate Solder Volume using 3D Solder Joint Configuration in SMT

T. P. Choi\*, S. G. Kim\* and C. D. Yoo\*\*

**Keywords** : Surface Mount Technology, Design criteria, Finite Element Method, Solder Joint configuration, Solder volume, Pad and lead dimension, Bond number.

#### Abstract

In order to provide proper SMT design criteria in a systematic way, a mathematical formulation has been developed to predict the configuration of the solder fillet formed between the gullwing type lead and rectangular pad. Effects of SMT design parameters such as the solder volume and pad dimension on the solder profile are investigated using the FEM that calculates the 3D configuration by minimizing the energy due to surface tension and gravity in the equilibrium state. Design criteria of QFP and SOP are illustrated by plotting the acceptable range of the solder volume with respect to the length and width ratios of the pad and lead. The results show that the acceptable design range increases with increase in the pad length and width. The pad length has more significant effects on design criteria compared with the pad width, and Bond number can be utilized to predict the joint quality.

#### 1. 서 론

최근, 전자 반도체 기술의 급속한 발전으로 제  
 1. 서 론

위하여 표면실장기술(Surface Mount Technology:  
 SMT)이 널리 사용되고 있다. SMT는 보드 표면에  
 전자부품을 직접 접합하는 기술로서, 종래의 Pin-  
 In-Hole (PIH)기술과 비교하여 공정 단가, 집적  
 도, 생산기술 등의 관점에서 장점이 있어 PIH 기

\* 비회원, 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과

\*\* 정회원, 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과

술을 꾸준히 대체하고 있는 추세이며, SMT의 응용이 더욱 확대될 것으로 예측된다. 납 접합부의 건전성 (integrity)에 관한 연구로서 열 및 기계적 반복 하중하에서 발생하는 접합부의 피로 현상에 관한 해석과 수명예측 등이 진행되고 있으며<sup>1)</sup>, 이러한 연구는 접합부의 형상을 알고 있다는 가정을 전제로 한 것이다. 그러므로 접합부 형상의 정확한 예측은 접합부 구조의 건전성 평가와 SMT 설계 기준에 기초가 된다<sup>2)</sup>.

종래의 납 접합부 형상에 관한 모델링은 평형상태에서의 접합부 형상을 예측하였으며, 다양한 조건하에서 2차원 필렛 (fillet) 형태에 관한 해석이 있었다<sup>3,4)</sup>. Racz 등은 에너지 범함수를 최소화시키는 3차원 접합부의 형상을 유한요소 프로그램 (Surface Evolver)을 사용하여 예측하였고<sup>5)</sup>, 이를 이용하여 패드 면적 변화에 대한 적정 납량을 도출하여 설계영역을 구하였다<sup>6)</sup>. Nigro<sup>7)</sup> 등은 미지의 접합부 표면을 수치화 하기 위하여 유한요소법을 이용한 수치적 방법을 제안하여 2차원의 필렛 형상을 계산하였다. Lee<sup>8)</sup> 등은 3차원 형상을 2차원 적분형태의 유한요소법으로 모델링하여 접합부의 형상을 예측하였다.

본 연구의 목적은 기존의 SMT 설계기준<sup>9,10)</sup> 과 유한요소 프로그램<sup>8)</sup>을 이용하여 구한 평형상태에서의 3차원 납 접합부 형상으로 부터 SMT 설계기준을 제안하고자 한다. 이와 같은 설계기준을 gullwing 형태의 리드 (lead)에 적용하여, 납의 부피와 패드 (pad) 크기 등의 설계변수가 납 접합부의 형상 및 본드 수 (Bond number)에 미치는 영향을 고려한 설계 기준을 모색하고자 한다.

## 2. 표면 실장 설계 기준

### 2.1 기존의 설계 기준

SMT 공정상의 설계 사양에 대한 정량적인 기준 및 설계 변수의 영향에 관한 정량적인 분석이 미흡한 실정이지만, 실제 설계상 이용되고 있는 기준<sup>9,10)</sup>을 참고하여 이를 본 연구의 설계기준 및 접합부의 양/불량 판정 기준에 참고하는 것이 필요하다. 일반적인 접합부의 양/불량 판정 기준은 실장 구성요소의 리드와 패드 사이의 접합부 형상으로 납

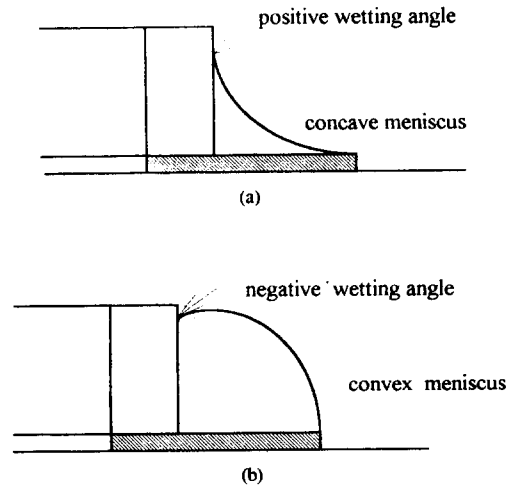


Fig. 1 Solder Joint Profile

(a) acceptable (b) inadequate configuration

으로 젖는 접촉각 (wetting angle)과 오목한 (concave) 형상 여부가 판단기준이 된다 (Fig. 1). 양의 접촉각이면서 오목한 형상을 이룰 경우 (Fig. 1a), 접합부에 균열이 발생할 확률이 낮고, 브리지 (bridge) 등에 의하여 단락 될 위험이 적다. 반대로 접촉각이 음으로 볼록한 (convex) 형상을 이룰 경우 (Fig. 1b), 접합부는 불량으로 판정된다.

리드가 있는 실장 구성요소와 리드가 없는 구성 요소에 따라 각각 그 설계기준이 다르며, 본 연구에서 해석하고자 하는 리드가 있는 구성 요소에 대한 설계기준은 다음과 같다. 납 접합부는 최소한

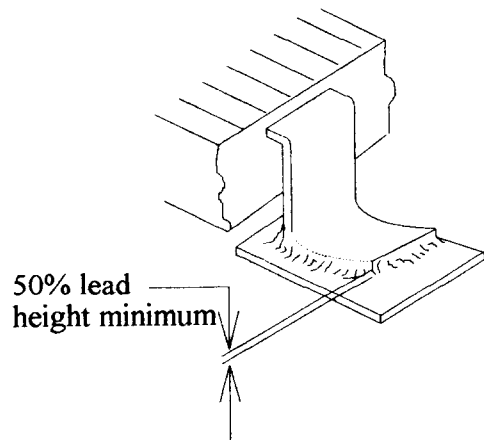


Fig. 2 Solder Shape Acceptance Criteria for Lead Type

리드의 네 측면 중 세 부분 이상을 젖어야 하며, 적어도 리드 두께의 50% 이상을 덮어야 하고 오목한 형상을 이뤄야 한다(Fig. 2). 또한, 인접한 리드 사이의 간격이 좁은 파인 피치 패키지(fine pitch package)인 경우, 패드의 길이는 리드의 폭보다 3배에서 5배 정도의 크기로 설정하고 있으며, 패드의 폭은 인접하는 리드 피치 간격의 절반 정도의 크기로 설계되고 있다<sup>10)</sup>.

### 2.2 설계 변수 및 기준의 선정

SMT 설계 변수로서 (1) 리드의 형상 및 크기, (2) 납의 물성치, (3) 패드 표면의 물성치, (4) 납의 부피, (5) 패드의 형상 및 크기 등을 고려할 수 있다. 이와 같은 설계변수 중에서 일반적으로 리드는 공업 규격에 의해 결정되어 있고, 납과 패드 표면의 물성치도 일반적으로 고정되어 있으므로 설계자가 변경시키기 어렵다. 그러므로 리드의 규격과 물성치가 정해지면, 양질의 납 접합부를 확보할 수 있는 패드 크기, 형상 및 납의 부피를 SMT 설계 변수로 선정하였다.

본 연구에서의 SMT 설계기준은 기존의 설계기준을 참고하여 다음과 같이 설정하였다.

- (1) 접합부의 형상은 오목하여야 한다.
- (2) 접합부는 리드와 만나는 면에서 리드 두께의 75% 이상 덮어야 한다.
- (3) 패드의 폭은 단락을 고려하여 대략 리드 피치의 1/2 이내로 결정하며, 파인 피치 패키지인 경우, 피치가 작기 때문에 패드 폭은 피치의 1/2보다 다소 클 수 있다.

기준(2)의 75%는 기존의 설계기준인 50%와 비교하여 납의 체적이 증가한다. 이는 본 연구의 해석과정에서 리드와 패드 사이에는 간극이 없다는 가정이 도입되므로 실제 경우와 비교하여 체적이 감소하는 점을 고려하여 안전한 설계기준을 설정하기 위한 것이다. 일반적으로 납 접합부의 형상을 나타내는 특성길이(characteristic length)  $H_c$  와 이에 영향을 미치는 물성치인 표면장력  $\gamma$ , 와 중력  $g$ , 사이의 관계는 무차원 수인 본드 수( $Bo = \rho g H_c^2 / \gamma$ )를 이용하여 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 본드 수와 설계 기준의 관계를 정량적으로 구하여 설계기준의 참고자료로 사용가능여부를 알아 보고자 한다.

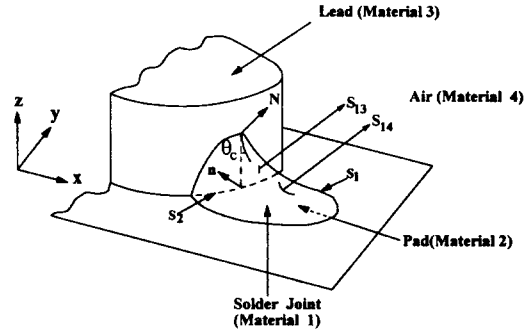


Fig. 3 Solder Joint in SMT

### 3. 납 접합부의 유한 요소 해석

본 연구에서는 널리 사용되고 있는 gullwing 형태의 리드를 대상으로 납 접합부의 형상을 유한요소 방법을 이용하여 구하였다. 평형상태에서 납 접합부는 접합부에 작용하는 표면장력과 중력에 의한 에너지를 최소화하는 형상이 된다<sup>3,5)</sup>. 모델링을 위하여 리드와 패드 사이의 간극이 없고, 패드에 접하는 리드는 수직면을 유지하며, 납의 물성치는 일정하며, 납과 패드 사이의 접촉각은 90도 보다 작다고 가정하였다. Fig. 3 에 보인 접합부의 체적은 일정하며, 접합부의 중력과 표면장력에 의한 접합부의 에너지는 아래의 식으로 나타낸다.

$$E_{tot} = \int \gamma dA + \int \rho g z dV \tag{1}$$

$$V_o = \int dV \tag{2}$$

이때, S는 납의 표면,  $V_o$ 는 주어진 납의 부피,  $\gamma$ 는 표면장력,  $\rho$ 는 납의 비중을 나타낸다. Fig. 3 에 나타난 납과 대기 그리고 리드의 삼중점 즉, 두 평면  $S_{13}$ 과  $S_{14}$ 의 교선에 따른 접촉각은 주어진다 가정한다. 또한, 납과 패드의 접촉면  $S_{12}$ 은 주어져 있거나 고정되어 있다고 가정한다. 체적 제한 조건인 식(2)를 에너지 식에 포함시키기 위하여 Lagrange multiplier  $\lambda$ , 를 도입하고, 식(1)에서의 표면 자유 에너지 적분 형태를 접촉면과 관련된 모든 요소를 포함하여 정리하면 아래와 같은 에너지 범함수(energy functional)를 구할 수 있다.

$$F = \int_{\Gamma} (\gamma_{13} - \gamma_{34}) dA + \int_{\Gamma} \gamma_{14} dA + \int_{\Omega} \rho g z dV + \lambda (V_0 - \int_{\Omega} dV) \quad (3)$$

이때,  $\gamma_{ij}$  는 접촉면  $S_{ij}$  의 표면 장력을 나타낸다.

식 (3) 에 포함되어 있는 체적 적분을 면적 적분으로 변환하기 위하여 높이 함수를 도입하고 ( $z = \zeta(x, y)$ ), 납과 리드 그리고 대기가 접하는 삼중점에서의 정적 평형 조건인 Young의 식, ( $\gamma_{13} + \gamma_{14} \cos \theta_c = \gamma_{34}$ ) 을 적용하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$F = \int_{\Omega} (\sqrt{1 + \zeta_x^2 + \zeta_y^2} + \frac{1}{2} \rho g \zeta^2 - \lambda \zeta) dx dy - \int_{\Gamma} \gamma \cos \theta_c ds + \lambda V_0 \quad (4)$$

$$\zeta_x = \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad \zeta_y = \frac{\partial \zeta}{\partial y}$$

이때,  $\theta_c$  는 접촉각,  $s_2$  는 패드 면에서 납과 리드의 경계선을 나타내며 (Fig. 3), 표기의 단순화를 위해  $A = S_{12}$ ,  $\gamma = \gamma_{14}$  로 정의한다. 접합부의 경계 조건은 다음과 같다.

- (1) 패드의 둘레  $s_1$ , 를 따라  $\zeta = 0$ ,
- (2) 리드와 패드의 경계  $s_2$ , 를 따라  $\zeta$  가 리드의 두께  $H$ , 보다 높아지면,  $\zeta = H$ , 이 된다. 경계 조건 (2) 는 납의 부피가 큰 경우, 평형상태에서 접합부의 높이가 리드의 두께보다 커져 물리적으로 타당하지 않게 되는 문제점을 보완하기 위한 것이다.

2차원 적분 형태로 에너지 범함수가 기술되면, 유한요소 수식화는 다음과 같은 과정으로 이루어진다. 높이 함수는 절점값  $Z_i$  와 형상함수,  $\phi(x, y)$ , 로 보간 할 수 있다.

$$\zeta(x, y) = \sum_i Z_i \phi^i(x, y) \quad (5)$$

에너지를 최소화하는 범함수의 극한 조건에 해당하는 대수 방정식은 다음 식으로 부터 얻어진다.

$$\frac{\partial F(Z, \lambda)}{\partial Z_i} = 0, \quad \frac{\partial F(Z, \lambda)}{\partial \lambda} = 0 \quad (6)$$

3차원 유한요소의 해를 구하는 과정과 접합부의 건전성 판정과정을 간략히 기술하면 다음과 같다. 먼저, 패드 면의 mesh data와 초기 임의로 주어지는 해인  $Z_i$  등의 매개변수 값을 준다. 식 (6)에 경계 조건을 부과하여 새로운 와  $Z_i$  를 구하고, 와  $Z_i$  가 수렴할 때까지 반복하여 평형상태의  $Z_i$  를 구한다. 3차원 접합부의 형상과 리드에 덮힌 접합부의 높이 등을 고려하여 양/불량을 판정한다.

### 4. 결과 및 고찰

유한요소법을 이용하여 계산된 3차원 형상으로 부터 설계기준을 선정하기 위한 대상으로 Fig. 4 에 나타난 64 QFP-1414 (Quad Flat Package) 와 28 SOP-375 (Small Outline Package) 를 정하였다. 설계 변수 인자는 사각형 패드의 폭과 길이 및 납의 부피이고, 리드가 실장 되는 위치는 패드의 중심 부근으로 설정하였다. 계산에 사용된 물성치인 납 (63Sn/37Pb) 의 표면장력은 490dyne/cm, 비중은 9

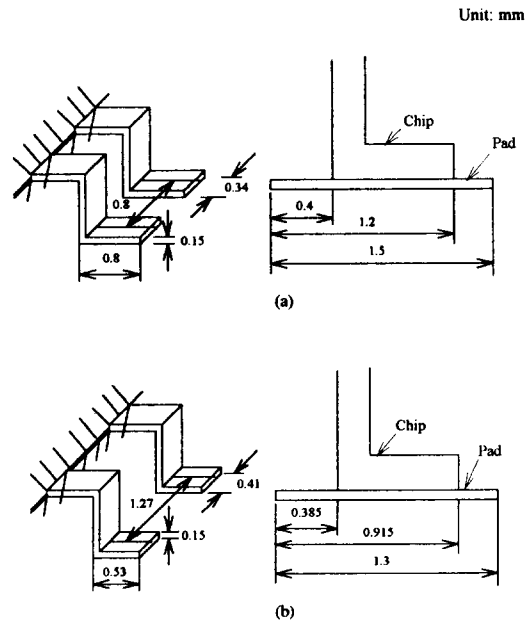
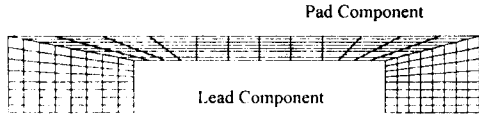


Fig. 4 Simulation Model and Dimension  
(a) 64QFP-1414 (b) 28SOP-375

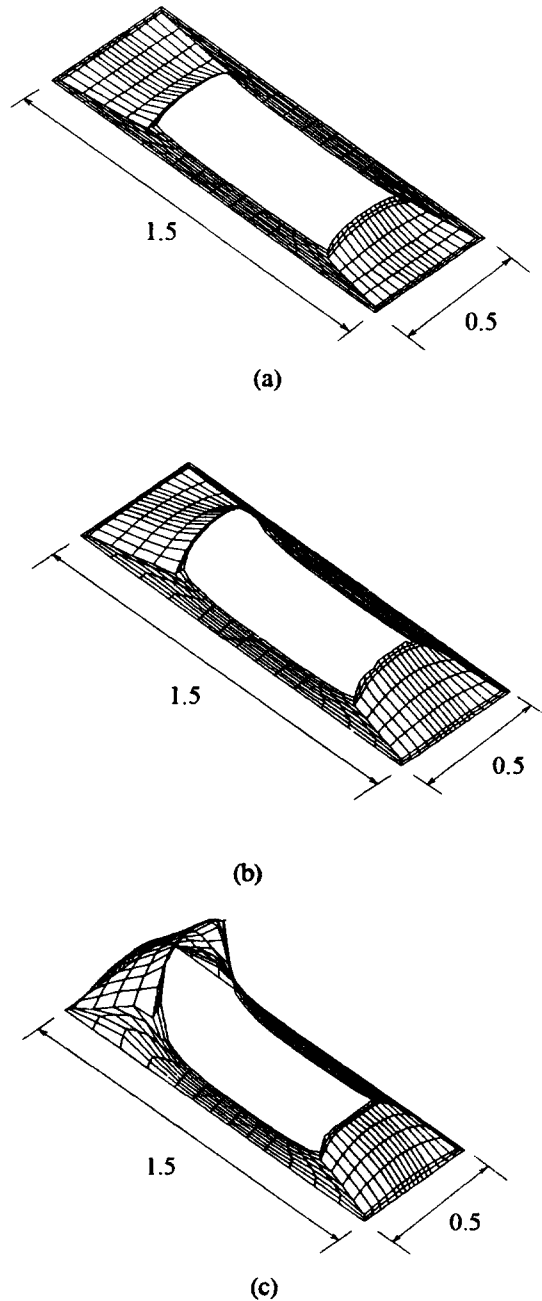


**Fig. 5** Mesh Pattern for Rectangular Pad  
224 Elements and 261 Nodes

$g/cm^3$ 이고, 온도에 대하여 일정하며 접촉각은 45도로 가정하였다. 접촉각 45 도는 구조의 건전성 측면을 고려한 것으로서, 오목한 필렛 형상이 이 각도를 이룰 때 납 접합부 구조가 최대의 신뢰성이 확보되기 때문이다<sup>10)</sup>. 유한요소 프로그램은 FORTRAN 언어를 이용하여 PC486에서 수행하였다. 접합부의 형상은 대칭이므로 사각형 패드의 반을 Fig.5 에 나타난 바와 같이 224개의 요소로 나누어 계산하였다. 요소의 갯수를 늘린 경우에도 접합부의 형상은 큰 차이가 없으므로 본 연구에서는 이 요소망을 기본으로 하여 계산을 수행하였다. 아울러 본드 수가 설계 기준 산정에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 특성 길이  $H_c$  를 제한 높이 경계 조건이 주어지지 않는 리드 상단 부분의 절점 중 그 값이 최대인 점의 높이로 정하여 계산한다.

QFP의 리드가  $1.5 \times 0.5$  mm의 패드에 실장되는 경우, 납의 부피에 따라 미납, 정상, 과납에 대한 형상 해석 결과를 Fig.6에 각각 나타내었다. 양/불량의 판정기준은 전술한 설계 기준에 의하여 접합부의 높이가 리드 두께 0.15mm 의 75% 인 0.11 mm 보다 크고, 접합부의 형상이 오목 할 때 양질의 접합으로 판정하였다. 미납인 경우 (Fig. 6a), 납의 부피가  $0.002mm^3$ 이며 리드 말단에 형성된 접합부의 형상은 오목하지만 접합부의 높이가 0.082mm로 75% 이하이므로 불량으로 판정된다. 납의 부피가  $0.02mm^3$ 인 경우 (Fig. 6b), 리드의 말단 부분의 접합부 형상이 오목하고 높이가 75% 이상이므로 양질의 접합부로 판정하였고, 납의 부피가  $0.056mm^3$ 인 경우 (Fig. 6c), 리드 말단이 불룩한 형상을 이루어 과납에 의한 불량으로 판정하였다.

이와 같은 판정기준을 이용하여 QFP 리드에서 납의 부피,  $V$ , 와 패드와 리드의 길이와 폭 방향의 비 ( $L_p/L_w$ ,  $W_p/W_w$ )가 접합부의 형상에 미치는 영향을 Fig.7 에 나타내었다. 패드 크기를 길이 방향 ( $L_p$ )으로 변화시킬 경우 (Fig. 7a), 납의 부피를  $0.001 mm^3$  씩 증가시키며 구한 접합부 형상으로부터



**Fig. 6** Result Gullwing Chip Shape  
(a) Insufficient Volume ( $0.002mm^3$ )  
(b) Acceptable Volume ( $0.02mm^3$ )  
(c) Excessive Volume ( $0.056mm^3$ )

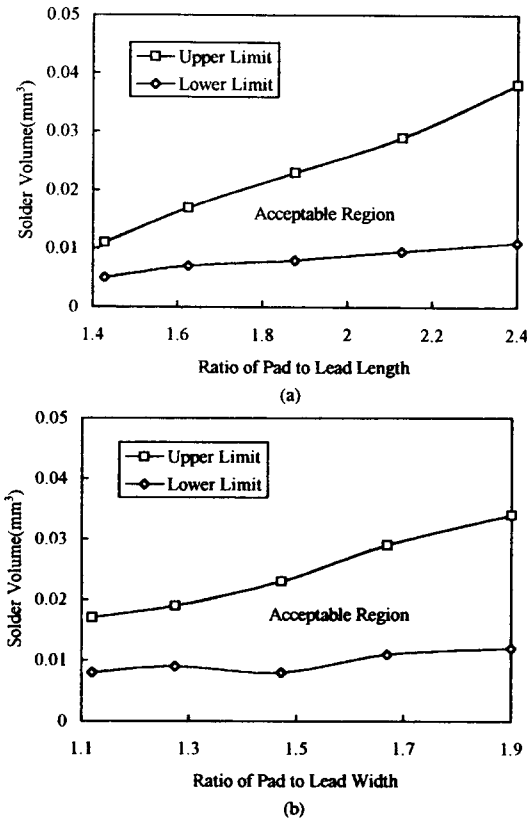


Fig. 7 Design Criteria for Solder Volume and Pad Dimension of QFP  
(a) Pad Length (b) Pad Width

터 양/불량을 판정하여, 적절한 접합부 확보에 필요한 납 부피의 범위를 설계영역으로 정하여 상한선과 하한선으로 표시하였다. 패드 크기를 길이 방향으로 ( $L_p$ ) 으로 변화시킬 경우 (Fig. 7a), 길이 방향의 비  $L_p/L_w$ , 가 증가할 수록, 설계 영역이 급격히 증가함을 알 수 있다.

폭 방향의 비  $W_p/W_w$ , 가 변화하는 경우 (Fig. 7b), 길이 방향과 유사하게 폭 방향비가 증가함에 따라 설계 영역은 증가한다. 그러나, 적정 설계 영역은 길이 방향의 영향이 폭 방향에 비하여 더 크게 작용하므로, 패드 설계에 있어서 길이 인자를 폭 인자보다 더 신중하게 고려해야 한다. QFP와 같은 파인 피치인 경우에는 리드 피치가 작으므로 폭 방향으로 패드의 크기를 증가시키면 회로상 단락이 발생할 확률이 높아진다. 따라서 패드 크기의 변경이 요구될 경우, 피치 간격을 고려하여 패드

폭을 결정하고, 설계영역을 고려하여 패드 길이를 결정하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 납의 부피는 공정상의 오차와 모델링의 가정을 고려하여 허용 설계 영역의 중간값으로 결정하는 것이 바람직하다.

동일한 방법으로 SOP 리드를 대상으로 패드 크기  $1.3 \times 0.6$  mm를 기준으로 패드의 길이와 폭을 변화시킬 경우의 설계영역을 Fig. 8 에 나타내었다. QFP의 결과 (Fig. 7) 와 유사하게 길이 방향 인자가 폭 방향 인자보다 더 민감하게 변화함을 보인다. SOP의 리드 피치가 QFP보다 크므로 폭 방향의 설계 허용 영역이 QFP모델에서의 결과보다 넓으며 QFP와 유사한 방법으로 설계 변수를 결정할 수 있다. SOP와 QFP의 결과를 비교하면, 설계 영역의 변화는 유사한 추세를 보이지만 리드의 형상

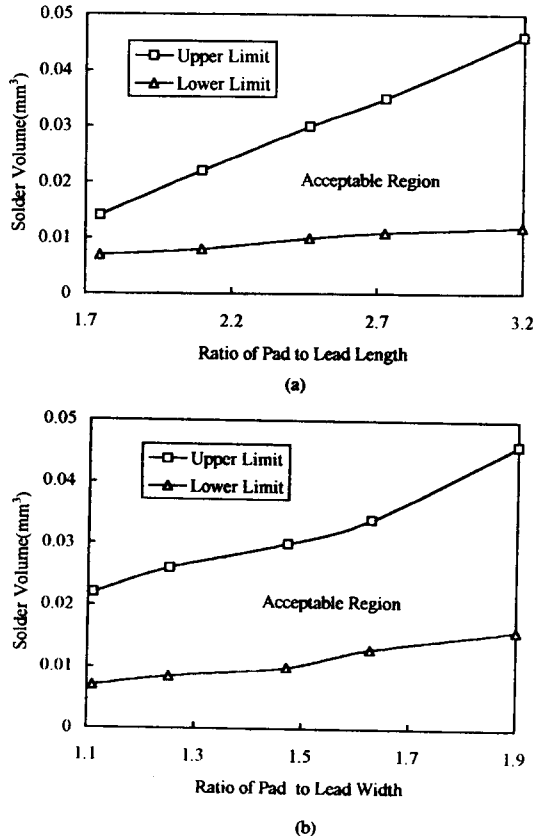


Fig. 8 Design Criteria for Solder Volume and Pad Dimension of SOP  
(a) Pad Length (b) Pad Width

이 바깥에 따라 설계영역이 변화함을 보인다.

본드 수가 설계 기준에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 특성 길이  $H_c$  를 제한 높이 경계 조건이 주어지지 않는 리드 상단 부분의 절점 중에서 그 값이 최대인 점의 높이로 정하여 본드 수를 계산하였다. Fig. 7 과 8 에 나타난 QFP 와 SOP 의 경우, 양질의 접합부를 형성하는 구간의 하한선과 상한선의 본드 수는 각각 0.0026 과 0.01의 범위에 있다. 이는 SMT 설계에 있어 본드 수가 접합부의 적합성 여부를 판정하는 데 참고가 될 수 있음을 나타낸다. 이와 같은 결과로 부터 양질의 접합부를 얻기 위한 설계 변수를 다음과 같은 과정을 통하여 결정하는 것이 타당하다.

(1) 피치를 고려하여 단락이 발생하지 않는 범위에서 패드의 폭을 결정한다.

(2) 패드 폭으로 부터 납의 부피를 상한값과 하한값의 중간값으로 선정한다.

(3) 선정된 납의 부피를 이용하여 패드의 길이를 선정한다. 설계영역이 작으면, 패드의 길이를 증가시켜 안전한 설계 영역을 확보한다.

(4) 선정된 설계변수를 입력으로 3차원 형상을 구하고, 적합성을 확인한다.

본 연구에서 제안한 SMT 설계방법은 I, J형태의 리드와 leadless chip 등에도 적용이 가능하지만, 다양한 리드 형상에 관한 정확한 해석을 위하여 모델링의 보완과 납의 부피를 무차원수로 표현하여 일반화하는 것이 필요하다. 또한, 해석결과를 실험 결과와 비교하여 형상 예측의 정밀도와 설계 기준의 타당성 등을 검증하는 추가 연구가 요구된다.

## 5. 결 론

본 연구의 결과는 다음과 같이 요약 할 수 있다.

(1) 기존의 설계기준을 참고하여 SMT공정에서 납 접합부의 설계기준을 설정하였고, 유한요소 해석의 결과를 이용하여 접합부의 3차원 형상으로부터 양/불량을 판정하였다.

(2) 64 QFP-1414와 28 SOP-375에 대한 설계영역을 구한 결과, 패드의 길이와 폭이 증가함에 따라 설계영역이 증가하며, 패드의 길이가 폭에 비하여 설계영역에 큰 영향을 주었다.

(3) 본드 수가 납 접합부의 양/불량을 판정하는 기준으로 활용될 수 있다.

(4) 본 연구의 결과는 리드가 없는 부품이나 다양한 리드형상의 부품에 대하여도 적용이 가능하다.

## 참 고 문 헌

1. H.K. Charles Jr., and G.V. Clatterbaugh : Solder joint reliability-design implication from finite element modeling and experimental testing, Trans. ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol. 112, pp. 135-146, (1990)
2. P.T. Alexander and D.C. Bello : The single key process variable in SMT solder joint reliability, Proc. Expo SMT 87, pp. 85-89, (1987)
3. S.M. Heinrich, A.F. Elkouh, N.J. Nigro, and P.S. Lee: Solder joint formation in surface mount technology-part I: analysis, Trans. ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol. 112, pp. 210-218, (1990)
4. S.M. Heinrich, A.F. Elkouh, N.J. Nigro, and P.S. Lee : Solder joint formation in surface mount technology-part II: design, Trans. ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol. 112, pp. 219-222, (1990)
5. L. M. Racz, J. Szekely, and K.A. Brakke: A general statement of the problem and description of a proposed method of calculation for some Meniscus problems in material processing, ISIJ International, Vol. 33, pp. 328-335, (1993)
6. L. M. Racz, and J. Szekely : Determination of equilibrium shapes and optimal volume of solder droplets in the assembly of surface mounted integrated circuits, ISIJ International, Vol. 33, pp. 336-342, (1993)
7. N. J. Nigro, S. M. Heinrich, A. F. Elkouh, X. Zou, R. Fournelle, and P. S. Lee : Finite element method for predicting equilibrium shapes of solder joints, Trans. ASME,

- Journal of Electronic Packaging, Vol. 115, pp. 141-146, (1993)
8. T. S. Lee, T. P. Choi, and C. D. Yoo : Finite element modeling of 3-dimensional solder joint geometry in SMT, ASME Advances in Electronic Packaging EEP-Vol. 10-2 pp. 1031-1041, (1995)
  9. S. W. Hinch : Handbook of Surface Mount Technology, Longman Scientific & Technical, New York, (1988).
  10. P. P. Ray : Surface Mount Technology principles and practice, Van Nostrand Reinhold, New York, (1989).