

납땜접합부내 균열진전거동에 대한 역학적 해석 (Mechanical Analysis of crack propagation in soldered joints)

김 동 학*(전남대 대학원), 강기주(전남대 기계공학과)
D.H. Kim(Graduate School of Chonnam N.U.), K.J. Kang(Chonnam N.U.).

1. 서론

납땜 접합은 계면접합강도와 전기적 연결 특성이 우수하고 보수 유지가 간편하여 전자 부품 접합방법으로 가장 보편적이다. 전자 부품이 고집적화, 대형화되고 많은 데이터의 빠른 처리를 위해 초기의 쓰루홀 마운팅 형식(Through-hole mounting type : THM)에서 벗어나 표면실장기술(Surface Mounting Technology : SMT)이 사용되었다. 패키지가 표면 실장 됨에 따라 열팽창, 수축으로 인한 납땜 접합부의 변형이 매우 심하여 높은 열하중이 발생하게 된다. 또한 납땜연결부는 기계적 하중을 견디는 부위가 되어 순간적인 충격이나 진동등에 의해 단락이 된다. 그러므로 납땜접합부의 강도에 관한 신뢰성을 확보하기 위한 노력들이 진행되어왔다.

납땜접합부의 강도연구는 계면파괴보다는 땜납자체의 크립, 피로에 집중되어 왔다. 반면 고열의 발생으로 인한 파괴, 외부충격으로 인한 접합부의 파괴 등은 땜납자체의 결합보다는 계면에서의 응력집중으로 인한 파괴가 일어나기 쉬우므로 계면파괴에 대한 파괴역학적 연구가 반드시 필요하다. 특히, 탄성변형 뿐 아니라 충분한 소성변형까지 발생하므로 계면 파괴에 적용할 수 있는 이론이나 실험이 필요하다. 최근의 계면파괴 실험에 의하면 여러 가지 형태의 균열진전거동이 관찰되었다.

본 연구에서는 땜납접합부의 계면파괴시 관찰되는 여러 가지 균열진전양상 중 교번균열 형태(Fig. 1)를 대변형 탄소성 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 균열진전 경로 및 파괴 기구에 미치는 땜납층의 두께, 하중작용형태 등의 영향 등을 조사하였다.

2. 이론

Aravas등에 의하면 강체사이에 끼어있는 연성층의 계면파괴는 다음과 같은 세 가지 유

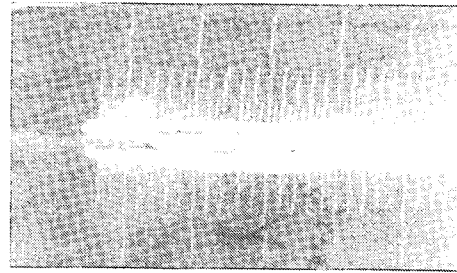


Fig. 1 alternation crack

형으로 발생한다. 첫째, 균열선단에 인접한 곳의 기공성장(near tip void growth)에 의한 파괴로써 균질재료의 연성파괴시에도 발생하는 전형적인 현상이다.(Fig. 2-(a)) 둘째, 균열선단으로부터 상당히 떨어진 위치에서의 기공의 불안정한 성장에 의한 파괴(high triaxiality cavitation ahead of the crack tip)로서 소성변형에 대한 구속은 심한데 선단근처의 파괴가 지연되는 경우 선단전방 연성층두께의 수배 떨어진 위치의 정수압적 응력(hydrostatic stress)이 임계치를 초과하면서 발생하는 현상이다.(Fig. 2-(b)) 셋째, 균열선단으로부터 상당히 떨어진 위치에서의 계면분리(interface debonding)에 의한 파괴로서 두 번째 파괴현상에서와 비슷한 이유로 균열선단으로부터 연성층의 수배만큼 떨어진 위치에서 계면사이의 최대 수직응력(σ_{22}^*)이 계면의 결합강도보다 커지면서 발생한다. 파괴실험 후 얻어진 파단면을 관찰한 결과 Fig. 3과 같은 기공성장 및 연결에 의한 덩플과 계면분리에 의한 파단면이 혼재되어 존재한다.

3. 해석

3.1 경계조건 문제

Fig. 4과 같은 경계조건문제에 대하여 해석을 수행하였다. 땜납층은 두 개의 동일한 탄성체 사이에 두께 h만큼 존재한다. h가 전체적

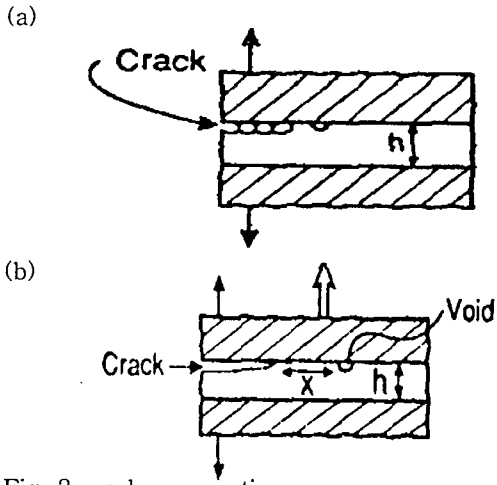


Fig. 2 crack propagation

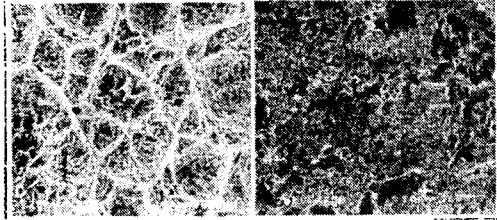


Fig. 3 fracture surface

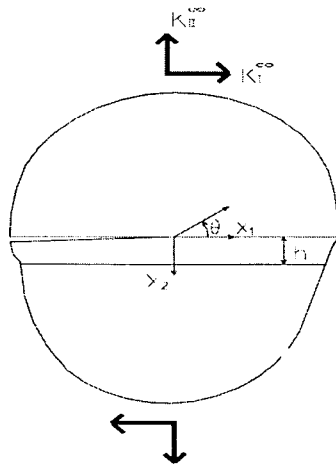


Fig. 4 modeling

인 길이에 비해 매우 작다고 하면 h 에 비해 매우 큰 영역에서의 변위는 다음과 같은 균질 재료의 탄성 균열선단 변위에 의해 표현할 수 있다.

$$u_i = K_I^\infty \sqrt{r} f_i(\theta) + K_{II}^\infty \sqrt{r} g_i(\theta) \quad (1)$$

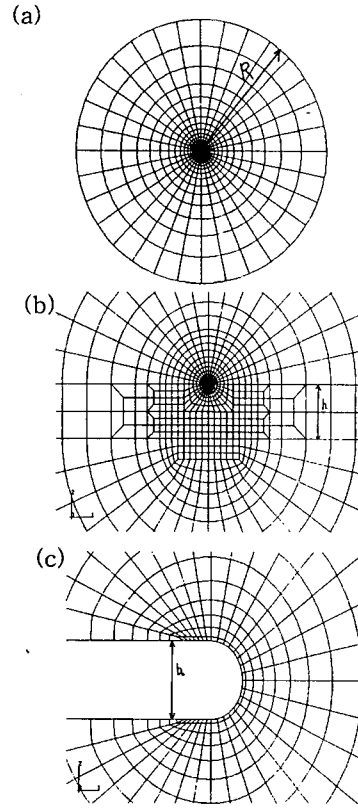


Fig. 5 FEM mesh

여기서 K_I^∞ , K_{II}^∞ 은 각각 $h \approx 0$ 로서 간주할 수 있는 경우의 모드 I, II 응력확대계수이다. 이 경우 J-적분인 J_{remote} 는, K_I^∞ , K_{II}^∞ 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$J_{remote} = G = \frac{K_I^{\infty 2} + K_{II}^{\infty 2}}{E^*} \quad (2)$$

이에 FEM Mesh를 Fig. 5의 (a)와 같이 제일 바깥쪽을 모델링하였고 (b)는 균열선단부 근의 mesh이다. (c)는 균열선단의 initial blunting을 나타낸 것이다. 이러한 FEM mesh

에 외부모드혼합도, $\phi = \tan^{-1} \frac{K_{II}^\infty}{K_I^\infty}$ 에 따라 식 (1)의 변위를 변화시켜가며 적용하여 범용 해석 패키지인 ABAQUS[3]를 이용, 유한요소 해석을 수행하였다. 요소는 평면 변형을 8절점 감차요소를 사용하였다. $R/h=500$, 2000을

$h/b_0=100, 200, 500, 1000, 2000$ 에 대하여 해석하였다.

3.2 재료 물성치

멤납의 소성변형은 대변형 증분이론에 따라 거동하고 다음 식과 같이 strain hardening을 일으키는 것으로 간주하였다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + a \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{1/n} \quad (3)$$

여기서 n 은 변형률 경화지수이며 a 는 재료상수이다. 각 재료물성치는 Table. 1과 같이 간주하였다.

재료 \ 물성값	영률 (GPa)	포아송의 비	항복응력 (MPa)
멤 납	10	0.397	45
탄성체	100	0.35	

Table. 1 material property

4. 결과 및 토론

4.1 멤납층에서의 정수압적응력분포

Fig. 6는 $J_{remote}/\sigma_0 h=0.1$ 에 대하여 외부모드 혼합도 $\phi=15^\circ$ 일 때의 윗계면과 아래계면에서의 정수압적응력값들을 표현한 것이다. 그림에서 아래쪽계면에서의 최대 정수압적응력이 윗계면에서의 최대 정수압적응력에 비해 높은 값을 갖는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 하중에 따른 정수압적응력의 최대값과 그 위치

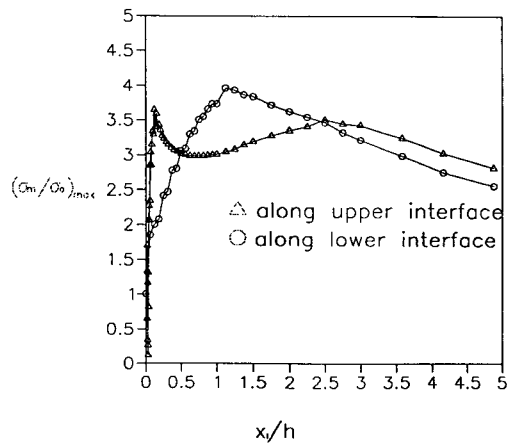


Fig. 6 hydrostatic stress at $\phi=15^\circ$

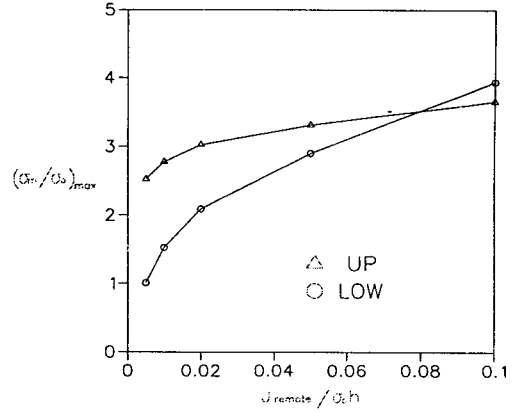


Fig. 7 maximum hydrostatic stress at $\phi=15^\circ$

를 나타내었다. 그림에서 하중이 약 $J_{remote}/\sigma_0 h=0.08$ 정도에서 아래계면에서의 값보다 윗계면에서의 값이 더 커진다. 실험에서 [1] $h/t=0.02$, 외부하중각 $\gamma=30^\circ$ 에서 주로 교번균열 형태의 균열진전거동이 보인다. 그런데 이러한 경우의 $J_{remote}/\sigma_0 h=0.057$ 이고 모드 혼합도 $\psi = \tan^{-1} \frac{K_2}{K_1} + \epsilon \ln h \approx 3^\circ$ 로 시험편의 두께 t 가 5mm로 작은 것을 고려하면 본 해석에 대하여 외부모드혼합도 $\phi=15^\circ$ 가 모드혼합도 $\psi \approx 3.4^\circ$ 로 같은 모드혼합도를 갖는 위의 결과와 비교적 잘 일치한다.

Fig. 8은 외부모드혼합도 $\phi=0^\circ$ 인 경우의 정수압적응력의 분포를 보인다. $\phi=15^\circ$ 인 경우와 마찬가지로 아래계면에서의 정수압적

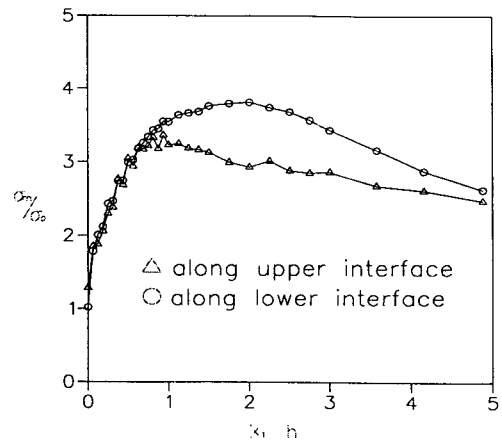


Fig. 8 hydrostatic stress at $\phi=0^\circ$

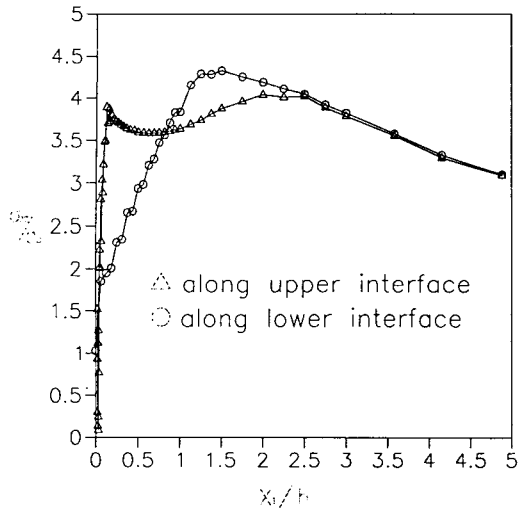


Fig. 9 σ_{22} at $\phi = 15^\circ$

응력의 값이 더 크다. 그러나 최대 정수압적응력의 크기는 비슷하나, 나타나는 위치는 위, 아래계면 모두에서 균열선단에서 멀어졌다. 즉 외부모드혼합도가 바뀌면 파괴가 일어나는 위치가 바뀐다.

4.2 계면에 수직한 응력 σ_{22} 의 분포

Fig. 9은 계면에서 윗계면과 아래계면에서의 σ_{22} 의 분포를 $J_{remote}/\sigma_0 h = 0.1$ 에 대하여 외부모드혼합도 $\phi = 15^\circ$ 에 대하여 나타내었다. 이러한 결과는 앞의 정수압적응력에서와 같이 아래계면에서의 $\sigma_{22_{max}}$ 이 윗계면에서

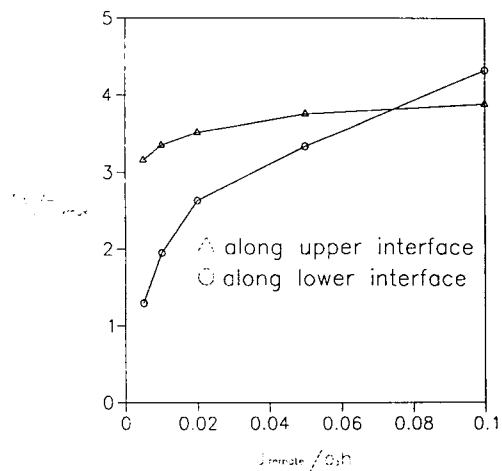


Fig. 10 maximum σ_{22} at $\phi = 15^\circ$

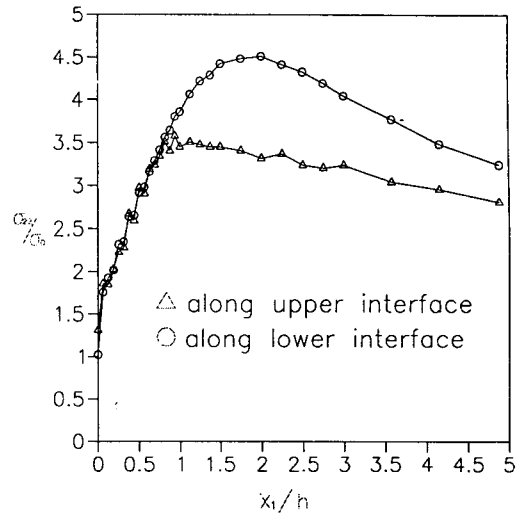


Fig. 11 σ_{22} for $\phi = 0^\circ$

보다 큼을 알 수 있다. Fig. 10은 외부모드혼합도 $J_{remote}/\sigma_0 h = 0.1$ 에 대하여 외부모드혼합도 $\phi = 15^\circ$ 에서의 하중에 따른 $\sigma_{22_{max}}$ 의 크기를 나타낸다. 하중이 작을 경우 아래계면에서의 $\sigma_{22_{max}}$ 가 윗계면에서의 $\sigma_{22_{max}}$ 보다 작다. 그러나 하중이 증가함에 따라 아래계면에서의 $\sigma_{22_{max}}$ 가 윗계면에서의 $\sigma_{22_{max}}$ 보다 큰 것을 알 수 있으므로 취성분리에 의한 파괴 역시 아래계면으로 나갈 것을 예측할 수 있다. Fig. 11은 외부모드혼합도가 $\phi = 0^\circ$ 인 경우의 계면에서의 σ_{22} 의 분포를 보여준다.

5. 결론

계면의 파괴인성이 강한 경우 균열선단 인접의 기공성장에 의한 파괴보다는 균열선단에서 떨어진 아래계면에서의 기공의 불안정한 성장에 의한 파괴 또는 계면분리(interface debonding)에 의한 파괴에 의해서 균열이 진전된다. 또한 모드혼합도에 따라 균열이 생성되는 위치가 각각 틀려진다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구비(과제번호 94-0200-02-02-3) 지원에 의해서 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.