

황동/땀납 계면 파괴에 대한 실험적 연구

An experimental investigation of brass/solder interfacial fracture

박영찬*, 강기주*

*전남대학교 기계공학과

1. 서론

계면파괴란 서로 다른 두 재료가 맞붙어 있는 경계면을 따라 파괴가 되는 현상을 말한다. 이런 현상은 반도체와 외부를 연결시켜 주는 금속선의 납땀부위에서, 세라믹/금속등의 복합 재료에서, 그리고 제트엔진의 터빈 회전축과 날개살 이음등에서 관찰이 된다. 이러한 계면 파괴에 대한 지금까지의 연구는 대부분이 선형탄성역학(LEFM)을 이용하여 이루어졌다.

금속/세라믹 복합체나 납땀 접합부에서와 같이 계면파괴시 소성변형이 명백한 경우가 많다. 실제로 금속/세라믹 접합체의 계면파단면에서 균열선단의 소성변형과 기공의 발생, 연결의 결과인 dimple이 발견되었다.¹⁾ 이와 같이 균열선단에서의 소성변형이 파괴거동에 영향을 미치는 사례가 많음에도 불구하고 지금까지는 탄소성 파괴에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있지 않다. Shih 등²⁻³⁾은 혼합모드하중을 받는 균질재료에서의 HRR응력장과 유사하게 계면균열에 대해서도 J적분과 모드혼합도를 이용하여 균열선단의 탄소성 응력장을 기술할 수 있음을 밝혔다. Evans 등⁴⁻⁶⁾은 Al_2O_3/Au , Al_2O_3/Pt , Al_2O_3/Al 등의 계면에 대한 일련의 실험적 연구에서, 위에서 언급한 바와 같은 탄소성 거동이 발생하는 것을 관찰하였다. 여기서 그들은 탄소성 매개변수인 J적분등을 이용하지 않고 LEFM의 매개변수를 이용하여 그 결과를 해석하였다. 최근에 Thurston 등⁷⁾은 Silica/copper 샌드위치 시편에 대하여 실험적으로 J적분을 측정하여 계면파괴 연구를 한 바 있다. 그들은 차원해석과 유한요소해석을 통하여 J적분을 하중만의 형태로 표현하고 파괴실험시 측정된 하중으로부터 J적분을 계산하였다. 이 방법은 균질재료에 적용되는 통상적인 방법⁸⁾ 즉, 하중-변위 곡선을 구하여 J적분을 측정하는 것과는 달리 J적분 계산식이 재료의 물성치나 시편편의 형상에 의존하게 되므로 그 정확성이 결여되는 것으로 생각된다.

이와 같이 탄소성 계면파괴에 대한 연구는 주로 이론연구에 대하여 이루어 졌고, J적분을 이용하여 실험적으로 계면파괴를 해석한 예는 현재까지 Thurston 등⁷⁾의 연구를 제외하고는 보고된 바 없다. 그 이유는 균질재료에서와 같이 이론적인 근거를 갖고 하중-변위 곡선등 실험결과에 간단히 적용할 수 있는 J측정법이 확립되어 있지 않기 때문이다.

본 논문에서는 황동/땀납 샌드위치 시편을 제작하고, 샌드위치층 두께와 모드혼합도를 변화시키면서 계면파괴거동을 관찰하였다. 이때 J적분을 이용하여 파괴인성을 구하고,⁹⁾ 파괴인성에 미치는 샌드위치층 두께와 모드혼합도의 영향을 알아 보았다. 또한 J적분과 모드혼합도가 탄소성 계면 파괴인성을 나타내는 매개변수로서 타당한지를 검토하였다.

2. 이론

2-1 선형탄성 해석

Fig.1은 이중재료 접합면에 존재하는 반무한 균열과 그를 해석하기 위한 좌표계를 보여주고 있다. 선형탄성거동 계면균열선단에서의 응력장은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{1}{(2\pi r)^{1/2}} [Re(Kr^{i\epsilon}) \tilde{\sigma}_{ij}^I(\theta; \epsilon) + Im(Kr^{i\epsilon}) \tilde{\sigma}_{ij}^{II}(\theta; \epsilon)] \quad \text{for } r \ll l \quad (1)$$

여기서 K 는 복소 응력확대계수이고, l 은 균열부재의 특성길이이며, ε 은 Dundurs의 매개 변수로 계산된다.

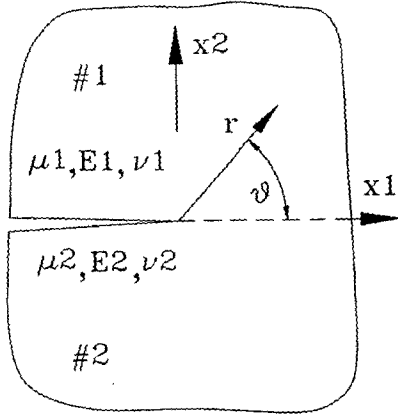


Fig. 1 Semi-infinite bimaterial interface crack with polar coordinates r, θ

그리고 모드혼합률과 에너지방출률은 균질재료의 경우에서와 비슷하게 응력강도계수로 표현 될 수 있다.

$$G = \frac{(1-\beta^2)}{E_*} (K_1^2 + K_2^2) \quad \text{여기서} \quad \frac{1}{E_*} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \quad (2)$$

$$\Psi |_{r=l} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(Kr^{i\theta})}{\text{Re}(Kr^{i\theta})} \right)_{r=l, \theta=0} \quad (3)$$

잔류응력의 영향이 무시되는 층 두께가 매우 얇은 샌드위치 시편은 계면파괴인성을 측정 할 때 많이 이용된다. 이 경우 J적분의 적분경로에 무관한 성질을 이용하여 다음과 같은 에너지방출률과 모드혼합률에 대한 유용한 식을 얻을 수 있다.¹⁰⁾

$$G = G^\infty = \frac{1}{E_1} |K^\infty|^2 \quad (4)$$

$$\Psi |_{r=h} = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(Kr^{i\theta})}{\text{Re}(Kr^{i\theta})} \right]_{r=h, \theta=0} = \tan^{-1} \left(\frac{K_{II}^\infty}{K_I^\infty} \right) + \omega(\alpha, \beta) \quad (5)$$

여기서 $|K^\infty|$ 는 각각 샌드위치층 두께가 존재하지 않을 때의 응력확대계수이고, $\omega(\alpha, \beta)$ 는 균질재료내 모드혼합률에 대한 같은 형상의 샌드위치시편 계면균열선단의 모드혼합률 변화량을 나타낸다.

2-2 탄소성 해석

Shih등²⁾은 계면균열선단 응력장이 혼합모드를 받는 균질재료에서의 HRR응력장과 유사한 모양을 갖게 될 때, 계면균열선단 응력장이 다음과 같이 표시됨을 밝혔다.

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \left(\frac{J}{\alpha \sigma_0 \varepsilon_0 r} \right)^{1/(n+1)} h_{ij}(\theta, \tilde{r}, \xi, n) \quad (6)$$

여기서 J 는 Rice의 J 적분이고, \tilde{r} 은 $r/(J/\sigma_0)$ 의 값을 가지며, 재료상수들은 두 재료 중 약한 재료의 값들을 나타낸다. 그리고 ξ 는 소성역 내에서 그 값이 거의 변하지 않는 소성모드혼합률이다.

균열의 진전은 기공의 생성, 연결에 의하여 발생하기도 한다. 다음 식은 기공에 의해 균열이 진전할 때의 파괴인성을 나타낸다¹⁾.

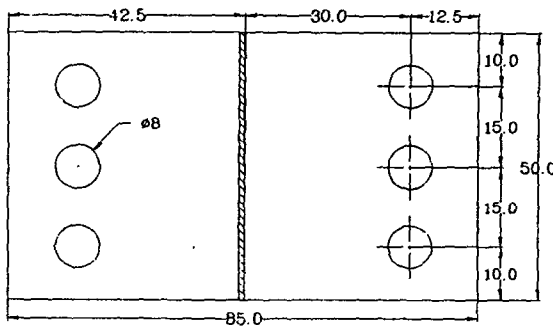
$$\begin{aligned} \Gamma_i &= \sigma_0 h \epsilon_0 H(\psi) && ; \text{소성확산으로 파괴가 일어나는 경우, } h \ll 1 \\ \Gamma_i &\approx 2\sigma_0 X_0 && ; X_0 \text{는 이웃한 기공들 간의 중심 거리} \end{aligned} \quad (7)$$

균열선단의 탄소성 경계선은 ξ 을 매개변수로 다음과 같이 표시가 가능하다.

$$r_p = \frac{K\bar{K}}{\sigma_0^2} R(\theta; \xi), \quad \theta: \text{각 변위} \quad (8)$$

3. 실험

본 실험에서 사용된 시험편은 황동/땀납 샌드위치 시험편으로 그 층 두께가 0.5mm ~ 2.0 mm에 이른다. 그 형상과 재료의 물성치는 각각 다음의 Table.1과 Fig.2에 나와 있다.



	E(xE9 Pa)	ν	σ_0 (xE6 Pa)
황동	100	0.35	110
땀납	10	0.397	40
그립, 편	300	0.3	-

Fig. 2 Brass/solder sandwich specimen

Table 1. Material Properties

그리고 시험 고정에 쓰일 그립을 Richard등¹¹⁾이 균질재료 시험편을 혼합모드로 파괴실험하기 위해 고안한 것을 개조하여 제조하였다. 이 그립의 형상은 다음 Fig.3에 나와 있다.

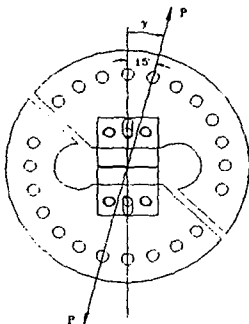


Fig. 3 Mixed mode fixture

본 실험에 쓰인 시험편은 두개의 황동블락을 납땀하여 적당한 간격으로 자른 후 밀링가공하여 완성했다. 그리고 사용된 시험편은 금속/세라믹의 계면파괴거동을 연구하는데 유용하고, 여러 가지의 모드혼합률을 쉽게 얻을 수 있다는 장점이 있다.

피로균열 및 파괴실험은 SATEC사의 CATS(Computer Aided Testing System)유압시험기를 이용하였다. 실험중의 변위 측정은 보조 고정구에 설치한 클립게이지로부터 얻었고, 하중은 10ton용량의 Load Cell(REBOW)을 이용하여 얻어냈다. 그리고 파괴 실험시에 나오는 하중 및 변위의 값은 X-Y plotter 및 보조컴퓨터에 기록,저장을 하였다.

균열의 선단 끝을 날카롭게 하기 위하여 시험편에 피로하중을 가했다. 여기에서 쓰인 피로하중의 최대값과 외부하중각 값은 small-scale yielding조건을 만족하면서 땀납쪽으로 균열이 진전하지 않도록 정하였다. (5)식에서 계면선상의 탄소성 경계점에서 모드혼합도가 0보다 크다는 조건으로 다음 식을 유도했다.

$$r_p > h \exp\left(\frac{-\phi - \gamma}{180\epsilon/\pi}\right) \quad (9)$$

(8)식과 (4)식에 다음으로 표현되는 $|K^\infty|$ 를 대입하여, 위 식과 연립하면 하중 및 외부하중각을 얻을 수 있다.

$$|K^\infty| = D F/wt\sqrt{\pi a} \quad (10)$$

여기서 상수 D는 Richard등¹¹⁾의 계산 결과로부터 얻을 수 있다. $a/w=0.5$, $\gamma=15^\circ$ 인 경우에 대해 모드혼합도가 0보다 큰 조건을 만족하는 하중의 범위를 구해 보면 $F > 835N$ 가 나온다. 이때 즉, 하중이 835N이 작용할 때 계면선단의 소성역의 크기는 0.01mm가 된다.

small-scale yielding조건을 만족하려면 하중에 대한 최대 소성역의 크기가 샌드위치층 두께보다 0.35배 이하의 값을 가지면 된다⁷⁾. 위에서 유도된 식으로부터 얻어진 최대 피로하중값($\sim 100kg$)은 낮은 균열진전속도를 주었다. 그래서 최대 피로하중 값을 높일 목적으로 본 시험편에 대한 FEM 응력계산결과⁹⁾와 small-scale yielding 조건⁷⁾을 이용하여 최대 피로하중값($\sim 140kg$)을 선정했다. 그리고 진동수는 30Hz로 설정했다.

파괴실험은 CATS내 컴퓨터의 키보드를 조작하여 실험에 필요한 모든 소프트웨어적 조작을 한 다음 보조컴퓨터를 이용하여 실험의 시작과 종료를 지시했다. 실험은 변위제어로 시험편을 0.01mm/min속도로 당겼고, 시험편이 파괴되기 전에 그림에 물린 모양을 사진촬영하였다. 그리고 파괴가 일어나는 동안에는 시험편의 측면에서 일어나는 현상을 눈으로 관찰하여 노트에 기록하거나 사진기로 촬영하였다.

4. 결과 및 토론

4-1. 전형적인 실험결과

Fig.4는 파괴실험을 하여 얻은 하중-변위 곡선을 보여준다. 이 곡선은 시험편이 불안정적으로 파괴됨을 보여주고 있다.

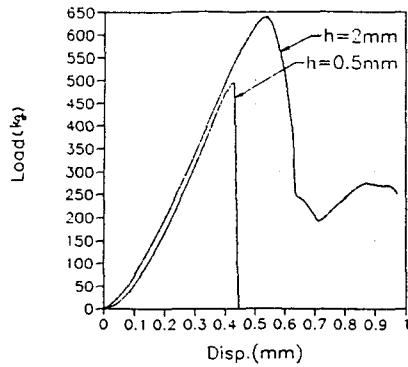


Fig. 4 P-D curve obtained from fracture test.

Fig.5는 샌드위치층의 두께가 2mm인 시편을 외부하중각 15°(모드혼합률 -21.3°)로 파괴실험한 후 파단면을 SEM으로 관찰한 것을 보여준다.

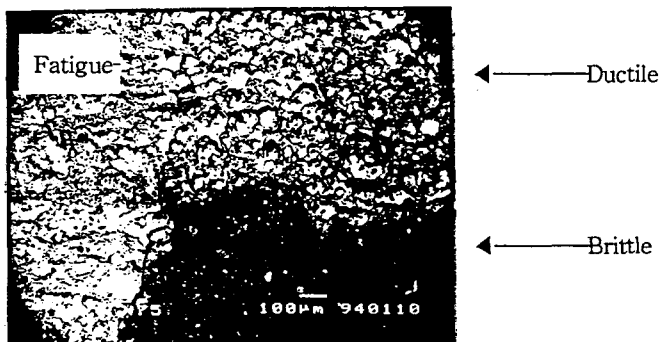


Fig.5 Brittle, Ductile and Fatigue surfaces

4-2. 실험결과 해석

Fig. 6에 모드혼합률에 대한 파괴인성의 결과를 정리해 두었다. 이 결과는 LEFM으로

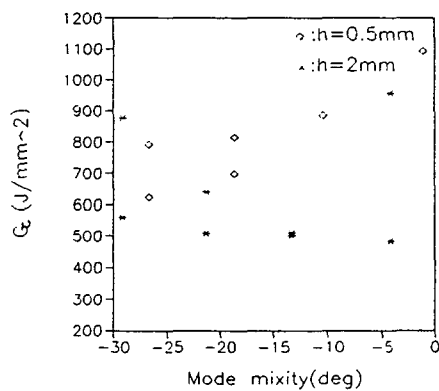


Fig. 6 Toughness vs. mode mixity with varying layer thickness

실험한 연구결과나 탄소성을 고려한 Thurston⁷⁾의 결과와 비교해 볼때 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. 여기서 Thurston⁷⁾의 결과와 비교 가능한 이유는 홍기주⁹⁾이 모드혼합도가 크지 않으면 땀납층의 소성거동을 무시할 수 있다고 했기 때문이다.

J적분 및 ζ 를 탄소성 매개변수로써 쓰려면 샌드위치 층두께에 상관없이 유사한 파괴인성값을 주어야 한다. 본 실험에서의 실험횟수나 그 범위에 있어 아직 부족한 점이 많다. J적분 및 ζ 의 매개변수로써의 타당성을 따지기에는 이른감이 있다.

5. 결론

황동/땀납 샌드위치시편을 이용하여 실험한 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 모드혼합도에 대한 파괴인성의 관계는 지금까지 연구된 것과 경향이 비슷했다.
2. 샌드위치층 두께 변화에 대한 파괴인성의 변화는 그 경향에 있어서 차이가 난다. 이에 대한 더 자세한 사항을 알기 위해서는 더 많은 실험을 할 필요가 있다.
3. 파괴가 brittle debonding으로 일어날지라도 파괴는 계면에 가까운 땀납층 속에서 일어난다.
4. 실험된 모드혼합도(-30°에서 10° 까지)범위에서 계면균열이 땀납층으로 kink되는 현상이 관찰되지 않았다.
5. 대부분의 파괴는 급작스런 균열진전, 혹은 균열진전과 병행한 아래쪽 계면에서의 균열발생으로 이루어졌다.

5. 참고 문헌

1. Evans A.G. and Dalglish, B.J.: "The fracture resistance of metal-ceramic interfaces", *Materials Science and Engineering*, A162, 1993, 1-13.
2. Shih C.F. and Asaro R.J. : " Elastic-plastic analysis of cracks on bimaterial Interfaces: part I- small scale yielding", *J. of Applied Mech.*, 55, 1988, 299-316.
3. Shih C.F. and Asaro R.J. : " Elastic-plastic analysis of cracks on bimaterial Interfaces: part II- structure of small scale yielding field", *J. of Applied Mech.*, 56, 1989, 763-779.
4. Rimanis I.E., Dalglish B.J. and Evans A.G. : "The fracture resistance of a model metal/ceramic interface", *Acta metall. mater*, vol.39, 1991, pp3133-3141
5. Graft M.D., Dalglish B.J., Turner M.R. & Evans A.G. : "Interface between Aluminum and platinum: Structure, Bonding and fracture resistance" , *Acta metall. mater.* Vol.40, 1992, suppl. pp5333
6. Dalglish B.J, Trumble K.P. and Evans A.G. : " The strength and fracture of alumina bonded with aluminum alloys", *Acta metall. mater.*, Vol.37, 1989, pp.1923-1931.
7. Thurston M.E. and Zehnder A.T.: "Experimental Deformation of Silica/Copper Interfacial Toughness", *Acta metall. mater.*, 1993, pp. 2985-2992.
8. ASTM : "Standard test method for J_{IC} , A measure of fracture toughness", E813-89, 1989
9. 홍기주 & 강기주 , 대한 기계학회지 발표 예정
10. Suo Z. and Hutchinson J.W: "Sandwich test specimens for measuring interface crack toughness", *Mat'ls science engineering*, A109, 1989, pp.135-143
11. Richard H.A. and Benitz K. : " A loading device for the creation of mixed mode in fracture mechanics". *Int J. Fracture*, 22, 1983. R55-R58.