

Sn-3.0Ag-0.5Cu 솔더재료의 피로 균열진전에 관한 연구

우태욱[†] · 김광수^{*} · Masao Sakane^{**} · Kaoru Kobayashi^{***}

Fatigue Crack Propagation Behavior of Sn-3.0Ag-0.5Cu Solder Material

Tae Wuk Woo, Kwang Soo Kim, Masao Sakane and Kaoru Kobayashi

Key Words : Solder(솔더), Crack propagation(균열진전), J-integral (J-적분)

Abstract

This study investigates crack propagation behavior of Sn-3.0Ag-0.5Cu solder under pull-push loading conditions. Fatigue Crack Growth (FCG) tests were conducted on Center Cracked Plate (CCP) specimens in fast-fast (pp) strain waveform. The fast-slow (pc), slow-fast (cp) and slow-slow (cc) strain waveforms were also used to study the effect of strain rates. The crack propagation rates for the four strain waveforms were correlated with J-integral range and a scatter band of factor 4 was found. The crack growth rates for the pc waveform was highest, followed by cp, cc and then pp waveforms.

기호설명

da/dN: 균열진전률 (mm/cycle)

ΔJ : J-적분 범위 (N/mm)

ΔK : 응력집중계수 범위 ($\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$)

T_m : 솔더 재료의 용융점 (K)

2a: 전체 균열 길이(mm)

S^* : 하중-변위 곡선의 내부 면적의 절반

$\Delta \epsilon$: 변형률 범위

1. 서론

Solder(솔더)는 전자기기들에서의 전기적, 기계적 결합재료로서 널리 사용되어왔으며, 사용되는 부품들 간의 열팽창 계수의 차이로 인해 전원 온/오프 과정에서 low cycle fatigue(LCF) 손상을 받게 된다.

최근, 납(lead)의 환경 및 건강에 대한 악영향과 WEEE/ROHS 협약의 영향으로 electronic packaging 분야에서 lead-free 솔더에 대한 많은 연구가

되어왔다[1-2,4,6]. Lead-free 솔더 중에 Sn-Ag 계 솔더가 가장 눈에 띄이는 합금이다. 그러나, 이 솔더 계의 낮은 접합성과 용융점으로 인해 물성 개선을 위해 추가적인 합금원소(Cu, Bi, Zn etc.)가 첨가 된다[2].

솔더 접합부의 피로 수명을 예측하는데 있어서 균열진전 수명의 적절한 평가는 매우 중요하다[3]. Lead-free 솔더의 균열 진전 거동에 대한 많은 연구가 피로-크립 상호 영향을 고려하여 compact tension(CT) 시편을 사용하여 이루어져왔다[2,4-5]. 그러나, lead-free 솔더 재료에 대한 center-cracked-plate(CCP) 시편을 사용한 연구는 제한적으로 이루어졌다[6].

본 연구에서 사용된 Sn-3.0Ag-0.5Cu lead-free 솔더 CCP 시편은 일본 LCF 시험 규격에 따라 제작되었다[8]. 균열진전 실험은 네 가지 strain-rate 조건의 삼각 파형을 사용하여 수행되었으며, 실험 결과를 이용하여 균열 진전률(da/dN)과 J-적분 범위(ΔJ) 및 응력집중계수 범위(ΔK)와의 상관 관계를 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 재료 및 시편

[†] 학생비회원, 포항공과대학교, 기계공학과

E-mail : wtw7604@postech.ac.kr

TEL : (054)279-5890 FAX : (054)279-5899

^{*} 포항공과대학교, 기계공학과

^{**} 立命館大學校, 機械工學科

^{***} KYOCERA SLC Technology Corporation

Table 1 Chemical composition and heat treatment condition of specimen.

Element, wt%	Sn	Pb	Ag	Sb	Cu	Bi
Sn-3.0Ag-0.5Cu	Bal.	0.027	3.0	0.018	0.5	0.019

본 연구에서는 Sn-3.0Ag-0.5Cu lead-free 솔더 재료를 사용하였다. 재료의 화학조성은 Table 1에 주어졌다. 시편 가공을 위해서 솔더 재료를 용융점 이상의 온도(600K)에서 캐스팅하고, 상온으로 공기 중에서 냉각하여 bulk 시편을 제작하였다. 그리고, CCP 시편을 bulk 시편으로부터 가공하였다. 시편의 형상은 Fig. 1과 같다. 실험에 앞서 솔더 재료의 미세조직의 안정화를 위해 시편을 $0.87 T_m$ 온도로 Furnace에서 한 시간 동안 열처리를 수행하였다[8]. 또한, 실험 전에 $0.05\mu\text{m}$ 이하의 알루미늄 파우더를 사용하여, 시편의 길이 방향으로 시험부의 표면을 polishing 하였다.

2.2 실험 방법

본 연구의 모든 실험은 5kN 로드 셀 용량의 push-pull servo-hydraulic 방식의 피로시험기를 사용하였으며, 313K의 온도에서 nominal strain 제어 방식으로 실험을 수행하였다. Nominal strain은 10mm gage 길이를 갖는 extensometer를 사용하여 측정하였다. 균열 길이(2a)는 Fig. 2와 같이 정의하였으며, $5\mu\text{m}$ 해상도의 CCD 카메라를 이용하여 관찰하였다.

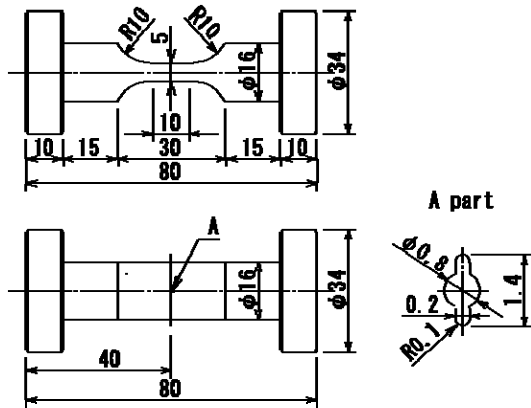


Fig. 1 Geometry of test specimen (mm)

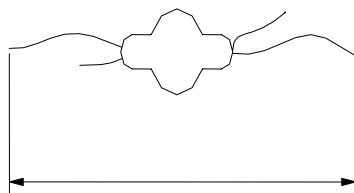


Fig. 2 Definition of crack length 2a

Table 2 Test Conditions

$\Delta\epsilon$ (%)	0.2	0.3	0.5
Wave			
pp-wave	⊙	⊙	⊙
pc-wave	N/A	⊙	⊙
cp-wave	N/A	⊙	⊙
cc-wave	N/A	⊙	⊙

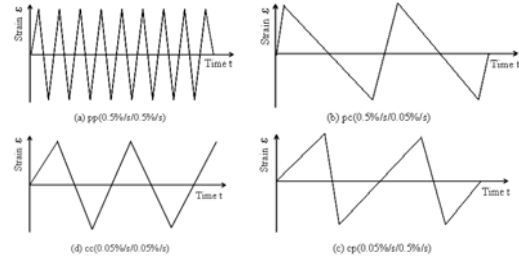


Fig. 3 Definition of crack length 2a

모든 실험은 삼각파형을 사용하여 수행되었으며, pp-파형의 경우 0.2%, 0.3%, 0.5%의 strain 범위에서 각각의 fast(p) 구간에서 0.5%/s의 strain-rate를 사용하였으며, cp-, pc-, cc-파형의 경우 0.3%, 0.5%의 strain 범위에서 fast(p) 구간에서는 0.5%/s의 strain-rate를, slow(c) 구간에서는 0.05%/s의 strain-rate를 사용하였다. 실험 조건 및 파형에 대한 자료는 Table 2와 Fig. 3에 나타나있다.

2.3 Fracture Parameter 평가 방법

Sn-3.0Ag-0.5Cu 솔더 재료의 낮은 항복강도를 고려할 때, 실험 중 균열 끝 단 주변에 LSY(large scale yielding) 영역이 형성될 것으로 판단된다[4-5]. 따라서, 응력집중계수 범위(ΔK) 파라미터와 더불어 LSY 조건에서 널리 적용되는 J-적분[7]의 범위(ΔJ) 파라미터를 사용하여 균열 진전 거동과의 상관관계를 살펴 보았다. 응력집중계수 범위는 식(1)에 의해서 계산된다[12]. 여기서, F는 균열 길이(a)와 시편 폭(W)의 변수로 이루어진 geometry 함수이다. J-적분 범위는 식(2)와 Fig. 4에 의해서 계산된다[9-11]. 여기서, S^* 는 실험에서 crack closure 현상을 고려하여 얻어진 하중-변위 곡선 내부의 면적의 절반을 나타낸다.

$$\Delta K = F \cdot \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

$$\Delta J = \frac{(\Delta K)^2}{E} + \frac{2S^*}{B(W-2a)} \quad (2)$$

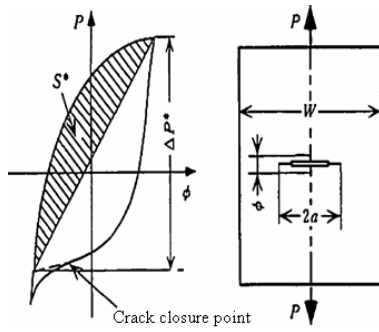


Fig. 4 Method of calculation of ΔJ for CCP specimen

3. 결과 및 고찰

3.1 균열 진전률

모든 strain 파형과 strain 범위 조건에서의 균열길기와 사이클 수와의 관계를 Fig. 5에 정리하였다. 균열 진전 속도는 같은 파형 조건에서 strain 범위가 클수록 커지는 현상을 보였다. 또한, 같은 strain 범위에서는 네 가지 파형 중 pc-파형이 가장 큰 균열 진전 속도를 보였으며, cp-파형 및 cc-파형이 큰 차이 없이 다음으로 빠른 균열 진전 속도를 보였으며, pp-파형이 가장 느린 균열 진전 속도를 보였다.

pc-, cp- 및 cc-파형과 같이 pp-파형에 비해 낮은 strain-rate 를 갖는 조건에서 보다 빠른 균열 진전 속도를 보이는 현상은 Table 3에 나타나있듯이 낮은 strain-rate 에서 인장 및 항복 강도가 낮아지기 때문에 재료에 균열선단 소성 변형의 영향이 커지기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 같은 strain rate 조건에서 파형에 따라 균열 진전 속도의 차이를 보이는 것은 각각의 파형 조건에서 재료의 최대 응력의 차이 때문인 것으로 보인다. 파형 조건에 따른 최대 응력은 Fig. 6에 정리하였다. 최대 응력이 클수록 균열 진전 속도는 빨라지는 양상을 나타내었다.

Table 3 Tensile and Yield Strength for different strain-rate conditions

$\dot{\epsilon}$ (%/s)	2.0	0.2	0.02
Item (MPa)			
Tensile Strength	47.3	40.0	32.0
0.2% Yield Strength	32.7	29.3	26.0
0.02% Yield Strength	19.6	16.3	16.7

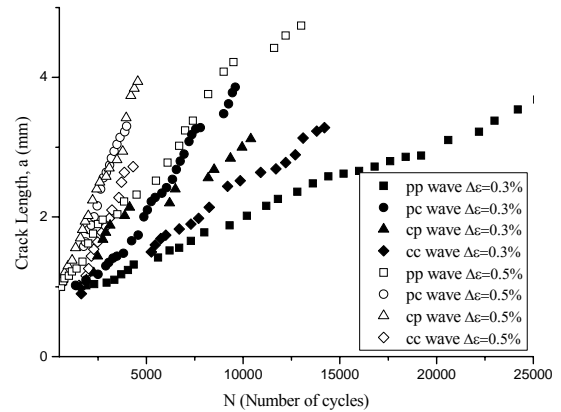


Fig. 5 Relationship between crack length and number of cycles for all test conditions

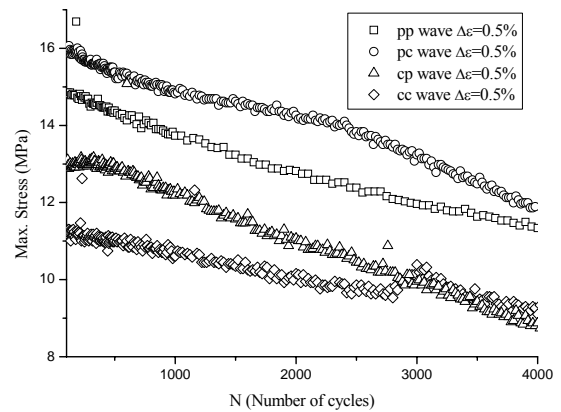


Fig. 6 Relationship between max. stress and number of cycles for all test conditions

3.2 균열 진전 경로

균열 진전 경로는 광학현미경으로 실험 후에 관찰 하였으며, 두 가지 대표적인 현상에 대해서 Fig. 7에 정리하였다. 균열은 CCP 시편의 center notch hole의 양 끝 단에서 발생하여, saw-tooth 형태를 보이며 진전하였다. 균열이 초기에는 최대 principal stress plane을 따라 진전하는 경향을 보였으며, 이후에는 최대 shear stress plane을 따라 진전하는 경향을 보였다.



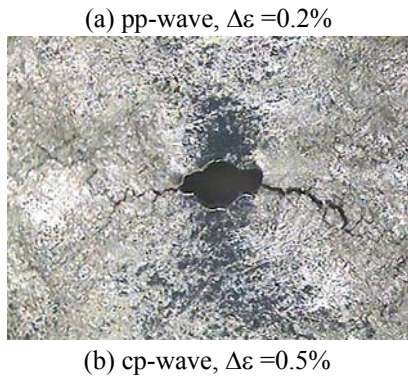


Fig. 7 Crack Propagation Path

3.3 Fracture Parameter 를 이용한 균열진전 평가
 균열 진전률과 파괴역학 파라미터와의 상관 관계에 대해서 평가해 보았다.

먼저, 균열 진전률과 응력집중계수(ΔK)와의 관계를 고려해 볼 때, Fig. 8 과 같이 factor 7 의 내에서 scatter 를 보였으며, 이것은 탄성 이론에 기초한 응력집중계수(ΔK)가 이 재료에 대하여는 적합한 파라미터가 아님을 보여준다. 균열 진전률과 응력집중계수와의 관계는 식(3)과 같이 수식적으로 표현된다.

$$\frac{da}{dN} = 5.75 \times 10^{-10} \Delta K^{3.29} \quad (3)$$

다음으로 균열 진전률과 J-적분 범위(ΔJ)와의 관계는 Fig. 9 과 같이 factor 4 범위 내에서 상관 관계를 보였으며, 식(4)와 같이 수식적으로 표현할 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = 6.59 \times 10^{-4} \Delta J^{2.08} \quad (4)$$

J-적분 범위(ΔJ)가 응력집중계수(ΔK) 보다 좋은 상관 관계를 보이는 것은 균열선단에서 소성변형의 영향이 크기 때문이며, 솔더 재료와 같이 연성이 큰 재료에 대하여는 당연한 결과로 간주된다.

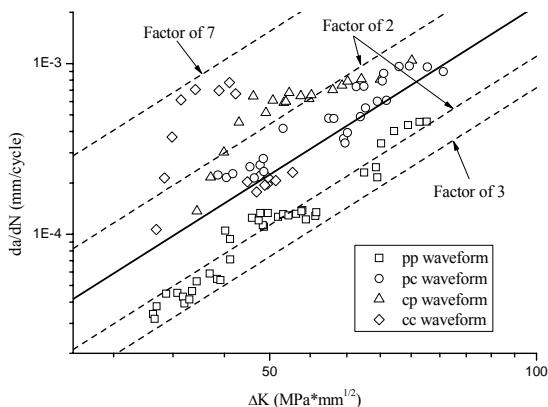


Fig. 8 Relationship between da/dN and ΔK

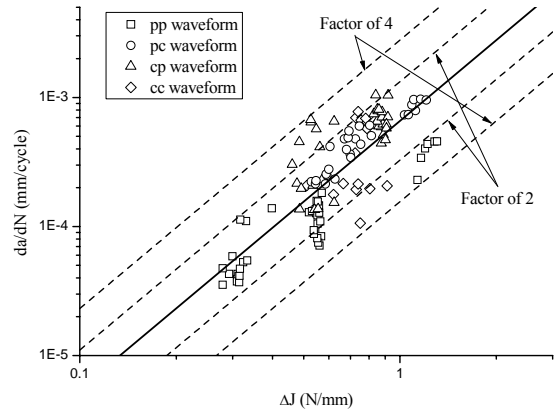


Fig. 9 Relationship between da/dN and ΔJ

4. 결론

본 연구에서는 Sn-3.0Ag-0.5Cu 솔더 재료에 대한 균열 진전 거동에 대한 연구 수행 하였다. 실험에는 CCP 시편을 사용하였으며, strain 제어 하에서 push-pull 하중조건을 가지고 실험을 수행하였다. 주요 결론을 다음과 같이 정리하였다.

(1) 균열 진전 속도는 strain 파형 보다 nominal strain 범위에 따라 더 민감하게 변화하였다. 또한, 같은 nominal strain 범위에서는 pc-파형이 가장 빠른 균열 진전 속도를 보였고, cp-파형과 cc-파형이 큰 차이 없이 다음으로 빠른 균열 진전 속도를 보였으며, pp-파형에서 균열이 가장 늦게 진전하였다.

(2) 일반적으로 균열은 saw-tooth 형태를 가지고 초기에는 principal stress surface 를 따라 진전하였고, 이후에는 최대 shear stress surface 를 따라 진전하는 경향을 나타냈다.

(3) 균열 진전률은 모든 실험 조건에서 응력집중계수(ΔK)는 좋은 상관 관계를 보이지 않았다. 이는 균열 선단 소성변형의 영향으로 사료된다.

(4) 균열 진전률과 J-적분 범위(ΔJ)와의 관계는 factor 4 범위 내에서 상관 관계를 보였으며, 수식적으로 $\frac{da}{dN} = 6.59 \times 10^{-4} \Delta J^{2.08}$ 으로 표현할 수 있다.

후기

본 연구는 일본의 Ritsumeikan 대학의 피로 실험

협 장비와 Kyocera SLC Technology 의 시편 제작 지원으로 이루어진 것임을 밝힌다.

참고문헌

- (1) Zhao, J., Mutoh, Y., Miyashita, Y., Mannan, S. L., 2002, "Fatigue Crack-Growth Behavior of Sn-Ag-Cu and Sn-Ag-Cu-Bi Lead-free Solders," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 31, No. 8, pp. 879~886.
- (2) Kanchanomai, C., Miyashita, Y., Mutoh, Y., 2002, "Low-Cycle Fatigue Behavior of Sn-Ag, Sn-Ag-cu, and Sn-Ag-Cu-Bi Lead-free Solders," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 31, No. 5, pp. 456~465.
- (3) Solomon, H. D., 1987, "Fatigue of 60Sn/40Pb Solder," *IEEE Transaction on CHMT*, Vol. 9, No. 4, pp. 423~432.
- (4) Zhao, J., Miyashita, Y., Mutoh, Y., 2001, "Fatigue Crack Growth Behavior of 96.5Sn-3.5Ag Lead-free Solder," *International Journal of Fatigue*, Vol. 23, pp. 723~731.
- (5) Zhao, J., Mutoh, Y., Miyashita, Y., Wang, L., "Fatigue Crack Growth Behavior of Sn-Pb and Sn-based Lead-free Solders," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, pp. 2187~2197.
- (6) Nose, H., Sakane, M., Yamashita, M., 2002, "Crack Propagation Behavior of Four Types of Lead and Lead-free Solders in push-pull Low Cycle Fatigue," *Journal of JSME*, Vol. 68, No. 665, pp.88~95.
- (7) Rice, J. R., 1968, "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, pp. 379~386.
- (8) JSME Committee on High Temperature Strength of Materials, 2000, "Standard for Low Cycle Fatigue Testing of Solders," JSME-SD-3-00, pp.1~51.
- (9) Rice, J. R., Paris, P. C., Merkle, J. G., 1973, "Some Further Results of J-integral Analysis and Estimates," *Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP 536*, pp. 231~245.
- (10) Dowling, N. E., Begley, J. A., 1976, "Fatigue Crack Growth during Gross Plasticity and the J-integral," *Mechanics of Crack Growth, ASTM STP 590*, pp.82~103.
- (11) Dowling, N. E., 1976, "Geometry Effects and the J-integral Approach to Elastic-Plastic Fatigue Crack Growth," *Cracks and Fracture, ASTM STP 601*, pp. 19~32.
- (12) Anderson, T. L., 1995, "Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications," CRC Press, pp. 29~116.