

Al-Li-Cu 합금의 피로균열 성장거동에 미치는 하중비의 영향 (Effects of Load Ratio on Fatigue crack growth of Al-Li-Cu alloy)

강원대학교 재료공학과 김 송희 윤 여범

1. 서 론

Al-Li 합금은 저밀도, 고강도, 고강성을 가지는 항공재료로서 기존의 알루미늄 합금보다 매우 우수한 피로균열 전파 저항성을 나타낸다. 피로균열 성장거동은 분위기, 하중비 등의 인자에 의해서 영향을 받으며 하중비($R=P_{min}/P_{max}$)가 증가함에 따라 near-threshold 영역에서의 확대계수(ΔK_{th})가 감소한다. 이 하중비의 영향을 규명하기 위해서 피로균열 성장 동안의 균열단힘 현상에 초점이 맞추어 졌으며 Elber가 2024-T₃ Al 합금의 연구를 통해서 처음으로 입증하였다. Elber는 균열단힘은 피로균열 전파 도중에 재료는 균열선단에서 소성적으로 변형되고 주위의 탄성영역의 구속에 의해서 반복하중이 최소하중에 도달하기전에 균열의 표면이 맞닿게 되어 일어난다고 하였다. Elber는 이 균열단힘 개념에 기초해서 Paris의 피로균열 전파 속도식을 다음과 같이 수정하였다.

$$da/dN = C(\Delta K_{eff})^n$$

여기서, 유효응력확대계수 범위, ΔK_{eff} 는 다음과 같이 정의된다

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (K_{op}: \text{균열이 열릴 때의 응력확대계수})$$

그리고 유효응력 확대계수 범위비, U는 다음과 같이 정의된다

$$U = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{op}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} = \frac{1 - (\sigma_{op}/\sigma_{max})}{1 - R}$$

본 연구에서는 Al-Li-Cu 합금에 대해서 Elber의 균열단힘 개념을 이용하여 다른 하중비가 균열전파에 미치는 영향, 하중비 변화에 따른 균열단힘이 피로균열 전파 속도에 미치는 영향, 그리고 유효응력 확대계수 범위비, U에 대한 R과 ΔK 의 영향에 대하여 알아보려고 하였으며 각각의 하중비와 측정된 균열단힘을 이용하여 균열전파 속도식을 모델링 하였다.

2. 실험 방법

화학조성이 Al-2.86wt% Cu-1.81wt% Li-0.11wt% Zr-0.1wt% Mg-0.06wt% Fe-0.06wt% Si인 합금을 LT 방향으로 가공한 C-T 형태의 시편에 대해서 만능시험기인 MTS 810 System을 사용하여 20Hz의 사인파형 하중 제어하에서 하중비 0.1, 0.3, 0.5를 가하여 피로균열 전파실험을 행하

였다. 균열단힘은 게이지 길이가 5mm인 strain gage를 시편의 옆 표면에 부착하여 strain gage에서 측정된 변위와 시편에 가해진 하중을 X-Y 기록계로 기록하였으며 하중-변위 선도에 서 직선성이 변하는 점을 균열단힘 하중으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

하중비가 0.1, 0.3, 0.5로 증가함에 따라 ΔK_{th} 가 6.01, 5.3, 4.3으로 감소하였으며 하중비가 0.3으로 증가할 때 보다 0.5로 증가할 때 ΔK_{th} 의 감소가 더욱 현저하였다. 이는 피로시험중 반복하중을 받는 동안 균열선단에서의 소성변형에 의한 효과, 즉 균열단힘과 관계가 있으며 2090 Al-Li 합금은 다른 고강도 알루미늄 합금 보다 매우 높은 균열단힘 효과 때문에 near-threshold 영역 근처의 넓은 ΔK 범위에 걸쳐서 일정한 균열전파속도를 나타냈다. 균열전파는 균열이 완전히 열린후의 하중에 의해 일어나므로 균열이 닫혀 있는 동안에는 균열은 전파할 수 없다. 그러므로 균열선단에서 균열전파에 영향을 주는 응력상태는 ΔK 에서 ΔK_{eff} 로 감소하게 된다. 일반적으로 피로균열 전파 속도는 ΔK 의 함수이기 때문에 유효응력 확대계수 범위비(U)를 이용하여 피로균열 전파속도식을 예측하는것이 타당하다고 볼 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 유효응력 확대계수 범위비(U)를 0.1, 0.3, 0.5로 하중비를 변화시키면서 각각의 하중비에서 다른 균열길이에 대해서 실험적으로 구한 균열단힘응력으로 부터 구하였으며 이 실험결과에 의하면 U값은 R과 ΔK 가 증가함에 따라 증가하였으며 이 관계를 컴퓨터 회귀분석 방법을 이용하여 다음과 같은 실험식을 얻었다.

$$U = (3.9574 - 0.373 \Delta K)R - (5.7986 - 0.845 \Delta K)R^2 + 0.0677 \Delta K - 0.2148$$

위에서 구한 U값을 이용하여 2090 Al-Li합금에 대해서 다음과 같은 피로균열 전파 속도식을 얻었다.

$$da/dN = 1.01 \times 10^{-10} (\Delta K_{eff})^{2.2}$$

da/dN 의 단위는 m/cycle 이며 ΔK 의 단위는 MPa \sqrt{m} 이다.

균열단힘을 이용하여 구한 위의 실험식은 실험결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Wolf Elber, Eng. Fracture Mech., Vol. 12, Pergamon Press, 1970, p. 37
2. Wolf Elber, ASTM STP 486, ASTM, 1971, p. 230
3. S. Suresh and R. O. Ritchie, Eng. Fracture Mech., Vol. 18, No. 4, Pergamon Press, 1983 p. 367