論文

링압인을 이용한 피로균열의 성장지연효과

임원균*, 송정훈**

Fatigue Crack Growth Retardation Using Ring Indentation

Won-Kyun Lim* and Jeong-Hoon Song**

ABSTRACT

A method for the retardation of fatigue crack growth using ring indentation at the vicinity of a crack is examined. Residual stresses near crack tip are evaluated using fracture mechanics approach using the Bueckner weight function. The motivation is to develop a simple and effective method for obtaining an increase in fatigue lives to total failure of materials with crack. Fatigue testing of aluminum specimen showed that the retardation effects are observed after the application of the method.

초 록

균열주위에 링압인을 부가함으로써 피로균열을 지연하는 수법을 제시하였다. 균열주위의 잔류응력분포는 Bueckner가중함수를 이용한 파괴역학적 수법으로 평가하였다. 본 연구는 균열을 가진 재료에 대한 파단시까지의 피로수명을 향상시키기 위한 단순하면서도 효과적인 수법을 개발하는데 있다. 알루미늄재료에 대한 피로실험결과 본 수법이 피로지연효과를 효율적으로 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

Key Words : ring-indentation(링압인), residual stress(잔류응력), fatigue crack growth retardation(피로균열성장지연), Bueckner weight function(Bueckner가중함수)

1. 서 론

피로하중이 중요한 적용분야에서, 부재 내 균열의 발생을 지연시키고 부재의 피로수명을 향상시키는 효율적인 방법을 찾는 일은 이들 부재를 구성하고 있는 구조물의 안전을 위하여 매우 중요하다. 이러한 균열성장지연을 위한 일반적인 방법으로는 균열선단에 구멍을 뚫어 예리한 노치선단에 걸리는 응력집중을 분산시키는 방법, 단일 또는 복수 과대하중으로 균열선단에 소성역을 발생시키는 방법, 균열선단부위에 강구(steel

ball)로 압인시키는 방법 등으로 분류할 수 있다. 그러나 처음의 균열선단에 구멍을 만드는 방법은 오히려 구멍으로 인한 재료의 강도저하를 유발할 수 있으며, 두 번째의 방법에서는 과대하중을 구조물 재료의 파괴하중 아래로 주어야 하기 때문에 실용적으로 약간의 제약이 수반된다. 한편 세 번째의 불압인을 이용한 방법은 균열의 성장을 지연시키는데 매우 효과적이거나 균열의 진전방향이 불규칙적이거나 균열선단을 정확히 확인할 수 없을 경우에는 균열의 진전이 예측되는 부근에 여러 군데 압인을 해야하는 가공상의 번거로움이 있다. 이러한 문제점을 피할 수 있는 방법으로서 링압인의 방법이 있다. 이강용과 강종묵[1]에 의하여 제안된 방법으로서 원형노치 주위에 일정한 폭을 가진 링을 압인하여 좁은 폭으로 균열의 진전에서 큰 지연효과를 얻을 수 있음을 보였다. 또

† 2003년 8월 11일 접수 ~ 2003년 10월 22일 심사완료

* 정회원, 명지대학교 기계공학과
연락처, E-mail: limwk@mju.ac.kr
경기도 용인시 남동 산 38-2

** 명지대학교 대학원 기계공학과

한 임원균 등[2-4]은 홀을 가진 평판에 홀확장과 링압인을 동시에 부가하여 줌으로서 홀확장 단독의 수법보다도 균열의 발생과 지연효과에서 큰 효과를 얻을 수 있으며 재료의 전체 피로수명에서도 많은 향상이 있음을 보였다. 그러나 이강용의 연구에서는 링압인에 의한 피로균열지연효과만을 실험하였으며, 링압인으로 인한 잔류응력의 측정은 이루어지지 않았다. 더욱이 시험편인 편측노치를 가진 시편을 만드는 과정 즉, 평판중앙에 홀을 만들고 이어서 홀주위에 링압인을 한 후에 평판을 둘로 나누어 편측노치를 가진 시편을 만드는 과정에서 잔류응력의 재분포가 일어날 수 있다.

본 연구에서는 링압인의 영향을 보다 정확히 분석하기 위한 것으로 편측균열을 가진 시험편에서 균열주위에 링압인을 직접 부가하고, 파괴역학적 수법으로 균열주위의 잔류응력의 분포를 결정하며, 아울러 이의 효과가 피로균열전진의 성장거동에 미치는 영향을 검토한다.

II. 잔류응력분포의 계산

2.1 균열을 가진 잔류응력장 내 임의 두점사이의 변위

Fig. 1과 같이 균열길이 a 를 가진 물체가 외력 P 와 함께 가상력 F 를 받고 있다고 하자. 이때 가상력 F 를 영으로 접근시켰을 때 두 점 c, c' 사이의 변위 Δ_F 는 다음과 같이 주어진다[5].

$$\Delta_F = \Delta_{F \text{ no crack}} + \frac{2}{E'} \int_0^a \left[K_{IP} \frac{\partial K_{IF}}{\partial F} + K_{IIP} \frac{\partial K_{IIF}}{\partial F} \right] da \quad (1)$$

$E' = E$: 평면응력상태

$E' = E/(1-\nu^2)$: 평면변형률상태

여기서 K_{IP} 와 K_{IIP} 는 모드 I과 II일 때의 외력 P 에 의한 응력확대계수이고, K_{IF} 와 K_{IIF} 는 가상력 F 에 의한 응력확대계수, 그리고 E 와 ν 는 각각 재료의 탄성계수와 포아송비이다.

한편 잔류응력을 내포하는 균열을 가진 물체에서 모드 I의 응력확대계수 K_I^r 는 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$K_I^r = \int_A m(x, a) \sigma_y^r(x) dx \quad (2)$$

여기서 $m(x, a)$ 는 물체의 기하학적 형상에 따라 주어지는 가중함수(Weight function)이고, A 는 균열면 길이 그리고 σ_y^r 은 균열이 없을 때 존재하던 y 방향으로의 잔류응력이다. 따라서 식(2)의 K_I^r 을 식(1)의 K_{IP} 로 바꾸어 놓고, $K_{IP} = 0$ 그리고 $\Delta_{F \text{ no crack}} = 0$ 으로 놓음으로써 잔류응력장 내 임의 두점사이의 변위 Δ_F 는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\Delta_F = \frac{2}{E'} \int_0^a \left[K_{IP} \frac{\partial K_{IF}}{\partial F} \right] da \quad (3)$$

2.2 파괴역학적 해석

유한폭을 가진 평판내 잔류응력분포를 결정하기 위하여 강기주 등[7]에 의하여 제안된 점진균열법을 이용하였다.

지금 Fig. 2와 같은 평판을 생각하여 보자. 평판에 균열길이 Δa 를 주었을 때에 잔류응력에 의한 응력확대계수 K_I^r 은 균열증분 Δa 가 생기기전의 그 위치에 존재하던 잔류응력 σ_1 을 균열증분길이 중앙점에서의 집중하중, $\sigma_1 \Delta a$ 로 놓음으로서 식(2)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_I^r &= 2 \int_0^{a_1} \sigma_1 \Delta a \delta(x - c_1) m(x, a_1) dx \\ &= 2 \sigma_1 \Delta a m(c_1, a_1) \end{aligned} \quad (4)$$

Fig. 1. A body loaded by forces, P and virtual forces, F

여기서 $\delta(x - c_1)$ 는 Dirac델타함수이고, $c_1 = \Delta a/2$, 그리고 $m(x, a_1)$ 은 균열길이 a_1 을 가진 시험편의 가중함수로써, 유한평판내의 편축균열 a 에 대한 이의 함수는 다음과 같이 주어진다 [8].

$$m(x, a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi a}} \sum_{i=1}^3 \beta_i(a) \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{i-\frac{3}{2}} \quad (5)$$

$$\beta_1(a) = 2.0$$

$$\beta_2(a) = [4af_r'(a) + 2f_r(a) + \frac{3}{2}F_2(a)] / f_r(a)$$

$$\beta_3(a) = \{aF_2'(a) + \frac{1}{2}[5F_3(a) - F_2(a)]\} / f_r(a)$$

$$\beta_4(a) = \{aF_3'(a) + \frac{1}{2}[7F_4(a) - 3F_3(a)]\} / f_r(a)$$

$$\beta_5(a) = [aF_4'(a) - \frac{5}{2}F_4(a)] / f_r(a)$$

$$F_1(a) = 4f_r(a)$$

$$F_2(a) = \frac{1}{12\sqrt{2}} [315\pi\psi(a) - 105V_r(a) - 208\sqrt{2}f_r(a)]$$

$$F_3(a) = \frac{1}{30\sqrt{2}} [-1260\pi\psi(a) + 525V_r(a) + 616\sqrt{2}f_r(a)]$$

$$F_4(a) = \sqrt{2}V_r(a) - [F_1(a) + F_2(a) + F_3(a)]$$

$$\psi(a) = \frac{1}{a^2} \int_0^a s \cdot [f_r(s)]^2 ds$$

여기서 $\beta_i(a)$ 는 균열의 기하학적 형상에 따라서 결정되는 값이다.

한편 가상력 F 에 의한 응력확대계수 K_{IF} 는 식(2)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{IF} = 2 \int_0^a m(x, a) \sigma_y^F(x) dx \quad (6)$$

여기서 $\sigma_y^F(x)$ 는 가상력 F 에 의한 홀 주위에서의 x 축에 따라 분포하는 y 방향으로의 응력으로 유한요소법을 이용하여 구한 결과는 다음과 같다.

$$\sigma_y^F(x) = F [A_0 + A_1x + A_2x^2 + \dots + A_8x^8] \quad (7)$$

따라서 식(8)과 식(10)을 식(7)에 대입함으로서 다음과 같은 초기균열진전 Δa 후의 균열길이 a_1 에 대한 변위 Δ_1 의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2} \Delta_1 = \frac{4}{E} \sigma_1 \Delta a \int_{c_1}^{a_1} m(c_1, a) h(x, a) da \quad (8)$$

$$h(x, a) = 2 \int_0^a m(x, a) \frac{\partial \sigma_y^F(x)}{\partial F} dx$$

Fig. 2. Radial cracks at a single edge crack in a finite width plate.

(a) The residual stress σ_1 released by introducing a crack length Δa .

(b) The residual stress σ_2 released by increasing a crack length Δa .

초기균열증분 다음으로 2차 균열증분 Δa 를 수행한 후의 균열길이 a_2 에 대한 새로운 변위 Δ_2 에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \Delta_2 = & \frac{4}{E} \sigma_1 \Delta a \int_{c_1}^{a_2} m(c_1, a) h(x, a) da \\ & + \frac{4}{E} \sigma_2 \Delta a \int_{c_2}^{a_2} m(c_2, a) h(x, a) da \end{aligned} \quad (9)$$

이와 유사한 관계식은 그 다음의 균열증분에 대해서도 얻을 수 있으며, 균열증분에 따라서 측정된 두점사이의 변위 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots$ 등을 위의 관계식에 대입하여 연립방정식을 풀면 홀 주위에서의 잔류응력을 계산할 수 있다.

III. 실험

3.1 시험재료 및 시험제작

시험 제작에 사용된 재료는 알루미늄 합금인 Al6061-T6 이며, 이의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Mechanical properties of Al 6061-T6.

Tensile strength (MPa)	318
Yield strength (MPa)	282
Elongation (%)	12
Modulus of elasticity (MPa)	68.9×10^3
Poisson's ratio	0.33

Fig. 3은 시편의 기하학적 형상과 치수를 나타낸다. 두께 2mm의 알루미늄 평판을 이용하여 시편을 가공하였으며, 재료의 롤링방향과 시편의 길이방향이 같도록 하여 제작하였다. 먼저 두께 0.3mm의 실톱을 사용하여 시편의 가장자리에서부터 7mm 길이의 노치를 절삭한 후에 피로시험기를 이용하여 길이 5mm의 예비균열을 내었다. 이와 같이 제작된 시편에 SKD11로 제작한 링을 사용하여 균열선단주위에 압인을 수행하였다. 압인링의 평균지름은 모두 12.7mm 이며, 링의 두께는 각각 0.5mm, 0.7mm, 1.0mm의 3종류로 달리하여 제작하였다. 링의 끝단은 평평한 모양으로 가공하였으며 가공 후에 진공법을 이용한 열처리를 하였다. 압인에 사용한 링의 치수와 형상은 Fig. 4와 같다.

예비균열을 낸 시편에 대해 링압인은 압인깊이를 0.06mm, 0.12mm, 0.18mm의 세가지로 달리하여 부가하였으며 압인위치에 있어서도 균열선단에서 링압인 안쪽경계까지의 거리 $h=1\text{mm}$, 3mm, 5mm의 위치(Fig. 3 참고)에 압인을 부가하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 분류하면 Table 2와 같다.

Fig. 3. Schematic of the specimen (unit : mm)

Fig. 4. Schematic of the ring (unit : mm)

Table 2. Classification of the fatigue test specimens.

Specimen classification	Width of circular ring(mm)	Indentation load(kgf)	Indented depth(mm)	Distance, h(mm)	Specimen identification
Without indentation					SEN
With indentation (Indentation load is variable)	0.5	2000	0.06 ± 0.01	3	AD06(2000)
		2300	0.12 ± 0.01		AD12(2300)
		2400	0.18 ± 0.01		AD18(2400)
	0.7	2400	0.06 ± 0.01		BD06(2400)
		2700	0.12 ± 0.01		BD12(2700)
		2900	0.18 ± 0.01		BD18(2900)
	1.0	3000	0.06 ± 0.01		CD06(3000)
		3400	0.12 ± 0.01		CD12(3400)
		3600	0.18 ± 0.01		CD18(3600)
With indentation (Distance is variable)	0.5	2300	0.12 ± 0.01	1	AP1(2300)
				3	AP3(2300)
				5	AP5(2300)
	0.7	2700		1	BP1(2700)
				3	BP3(2700)
				5	BP5(2700)
	1.0	3400		1	CP1(3400)
				3	CP3(3400)
				5	CP5(3400)

3.2 실험방법

잔류응력의 측정을 위하여 먼저 시편에 길이 12mm의 노치를 두께 0.3mm의 실톱으로 가공한 후에, 시편의 가장자리의 상하에 노치를 중심으로 양 끝단의 거리가 25mm 가 되게끔 신장계(extensometer)를 부착하였으며, 다음으로 $\Delta a = 1\text{mm}$ 씩 절단해 나아가면서 변위를 측정하였다. 여기에서 측정된 변위들은 식(7)과 (8)에 넣어 잔류응력을 계산하였다. 제작한 시편에 대한 피로시험을 위하여 Instron사가 제작한 100kN용량의 유압서보 피로시험기(Model 1350)를 이용하였다. 피로시험조건은 하중제어상태에서 정현파 주파수12Hz, 최대하중1140Kgf에 응력비를 0.1로 하여 피로시험을 수행하였으며, 균열길이의 측정을 위하여 일정반복 사이클마다 최고 하중에서 시험기를 일시 정지시킨 후에 0.01mm까지 측정 가능한 50배율의 이동현미경을 이용하여 측정하였다.

IV. 실험결과 및 고찰

4.1 잔류응력분포

먼저 압인하중이 균열주위의 잔류응력분포에 미치는 영향을 검토하기 위하여 0.5mm의 폭을 가진 링으로 압인한 시편에 대한 균열선에 따른 잔류응력분포를 Fig. 5에 도시하였다. 압인하중은 3가지로 달리 주었으며 압인의 위치 h는 모두 3mm가 되도록 하였다. 전체적으로 압인지역 안 쪽으로는 압축잔류응력이 분포하며 압인지역 바깥쪽으로는 인장잔류응력이 분포하는 것을 알 수 있다. 압인으로 발생한 압축잔류응력은 균열선단에 가까운 부위에서 가장 큰 값을 나타낸다. 그러나 압인지역 밖으로 약간 벗어나서부터는 인장잔류응력이 크게 분포하는데 이의 크기는 압인지역에서 거리가 멀어질수록 점진적으로 영으로 접근한다. 균열선단주위의 압축잔류응력의 크기는 압인하중이 커질수록 크게 나타나며 이에 상응하여 압인지역 밖으로는 인장잔류응력이 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 분석으로부터 피로균열의 성장은 압인하중을 크게 부여함으로써 효율적으로 지연시킬 수 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 6은 폭을 달리하는 3종류의 링을 사용하여 압인깊이를 0.12mm로 모두 동일하게 부가한 시편에 대한 잔류응력분포를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 링의 폭이 클 수록 균열선단주

Fig. 5. Effect of indentation load on the distribution of residual stress.

Fig. 6. Effect of circular-ring width on the distribution of residual stress.

Fig. 7. Effect of indented position on the distribution of residual stress.

위의 압축잔류응력이 크게 발생함을 알 수 있다. 이는 동일한 압인깊이를 만드는데 필요한 하중은 링의 폭이 커질 수록 더욱 크게 주어져야하기 때문인 것으로서, 압인하중이 증가하면서 링압인의 주위에 소성변형이 크게 일어난 결과라고 생각된다.

다음으로 압인위치가 잔류응력에 미치는 영향을 검토하기 위하여 압인위치를 달리하여준 시편에 대한 이의 측정결과를 Fig. 7에 나타내었다. 폭이 1mm인 링을 사용하여 균열선단에서 링압인까지의 거리 $h=1\text{mm}$, 3mm , 5mm 의 위치에 압인하중을 동일하게 추가하였다. 그림에서 보듯이 링압인을 균열선단으로부터 가장 근접한 1mm의 지역에 압인한 경우 균열선단에서의 압축잔류응력이 가장 크게 생성되었다. 압인위치가 멀어지면 균열선단에서의 압축응력이 다소 작게 생성되나 압인의 영향은 멀리 있는 균열선단에 까지 미친다. 일반적으로 동일한 하중으로 링압인을 추가하는 경우 균열선단에 가깝게 압인을 하는 것이 압축잔류응력을 생성시키는 데에 더욱 유효함을 알 수 있다.

4.2 피로균열성장거동

Fig. 8은 압인하중을 달리하여 만든 시편에 대한 피로균열성장곡선으로 하중반복회수에 따른 균열길이와의 관계를 보여준다. 압인에는 폭이 다른 3가지 링을 사용하였으며 압인거리 h 는 모두 3mm이다. 그림에서 굵은 실선으로 표시한 압인가공을 하지 않은 시편의 결과와 비교해 볼 때 압인가공에 의해 균열성장의 지연현상이 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 균열의 지연은 동일 폭을 가진 링압인의 경우에 압인하중이 클수록 지연효과가 크게 나타난다. 이는 링압인에 의한 균열선단주위의 압축잔류응력에 기인한다. 아울러 동일 위치에 동일 하중으로 압인하는 경우 압인폭이 좁을 수록 지연효과가 더욱 크게 나타남을 알 수 있다.

압인위치를 달리하여 만든 시편에 대한 피로 실험결과는 Fig. 9에 나타내었다. 이 때 시편의 압인깊이는 모두 0.12mm로 동일하다. 그림에서 보듯이 링압인의 경우 압인위치가 균열선단에 가까울 수록 균열성장의 지연효과가 더욱 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 경우에 균열체의 전체피로수명에 있어서도 크게 증가하였음을 관찰할 수 있었다. 또한 동일 압인위치에서 동일 깊이로 압인 하는 경우 압인폭이 넓을 수록 균열의 지연효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 압인하중과 밀접한 관련이 있는 것으로서

압인링의 폭이 커질수록 동일 깊이의 압인을 위한 하중을 크게 주어져야하기 때문이며 이에 따른 균열선단주위의 압축잔류응력이 크게 나타나고 있는 현상과 서로 대응된다.

Fig. 10은 폭이 1.0mm인 압인링을 가지고 압인한 시편에 대한 피로균열성장율을 균열길이의 함수로 나타낸 것이다. 압인하중은 3가지로 서로 다르며 압인의 위치 h 는 모두 3mm이다. 그림에서 보듯이 균열이 압인지역으로 성장할수록 균열성장율의 지연이 명확히 나타난다. 이러한 현상은 압인지역 안쪽에서의 압축잔류응력의 분포에 기인한 것으로서 이러한 지연효과는 압인하중이 클수록 더욱 뚜렷이 나타난다. 그러나 균열이 압인지역을 지나면 균열성장율은 급격히 증가하며 압인하지 않은 시편의 것과 같아 진다. 이와 같은 성장률의 갑작스런 증가는 압인지역 밖의 인장잔류응력, 압인에 따른 두께의 감소, 그리고 압인지역의 응력집중에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 8. Effect of indentation load on crack growth curves.

Fig. 9. Effect of indented position on crack growth curves.

Fig. 10. Effect of indentation load on fatigue crack growth rate.

Fig. 11. Effect of indented position on fatigue crack growth rate.

Fig. 11은 압인위치를 달리하여 준 시편에 대한 균열성장율에 대한 측정결과이다. 압인에는 폭이 1mm인 링을 사용하여 압인하중을 동일하게 부가하였다. 균열지연 효과는 링압인을 균열선단에 압인지역이 균열에 가까이 위치시킬 때 더욱 효과적임을 알 수 있다.

V. 결 론

균열주위에 링압인의 소성가공을 부가함으로써 균열의 성장지연과 함께 균열의 피로수명을 향상

시킬 수 있음을 제시하였다. 아울러 균열주위의 잔류응력을 실험적으로 평가할 수 있는 파괴역학적 수법을 제시하였다. 링압인의 부가에 의하여 생긴 링안쪽으로의 압축잔류응력은 피로균열의 지연효과를 유발하며 재료의 전체 피로수명도 크게 증대시킨다. 균열주위의 압축잔류응력은 압인하중을 크게 할수록 그리고 링압인의 위치를 균열선단 가까이에 할수록 크게 발생하며 이에 따른 균열의 지연현상을 효과적으로 유발할 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) 이강용, 강종목, "링 압인으로 인한 잔류압축응력이 피로균열 성장율에 미치는 영향" 대한기계학회논문집, 제8권, 제4호, 1984, pp.313-320.
- 2) 유진상, 최승용, 송정훈, 송치훈, 임원균, "홀 확장과 링압인 동시작용에 의한 피로균열 지연", 대한기계학회논문집A, 제21권 제2호, 1997, pp. 305 -316.
- 3) Lim, W.K., Yoo, J.S. and Choi, S.Y., "The Effects of Concurrent Cold-Expansion and Ring-Indentation on the Growth of Fatigue Cracks Emanating from Circular Holes", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 59, 1998, pp.643-653.
- 4) 송정훈, 유진상, 임원균, "홀확장 및 양면링압인된 홀의 피로균열성장에 대한 실험적 연구", 한국항공우주학회지, 제26권 제3호, 1998, pp.72-78.
- 5) Parker, A. P., "Stress Intensity Factors, Crack Profiles and Fatigue Crack Growth Rates in Residual Stress Fields," ASTM STP 776, 1982, pp. 13~31.
- 6)Tada, H., Paris, P. and Irwin, G., The Stress Analysis Handbook, Del Research Corporation, 1985.
- 7) Kang, K.J., Song, J.H. and Earmme, Y.Y., "A Method for the Measurement of Residual Stresses Using a Fracture Mechanics Approach", Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol.45, 1989, pp.23-30.
- 8)Wu, X.R and Carlsson, A.J, Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions, Pergamon Press, 1991, pp.264-286.