

〈논 문〉

홀확장과 링압인 동시적용에 의한 피로균열지연

유진상* · 최승룡* · 송정훈* · 송치훈* · 임원균**

(1996년 8월 3일 접수)

Fatigue Crack Retardation by Concurrent Cold-Expansion and Ring-indentation

J. S. Yoo, S. Y. Choi, J. H. Song, C. H. Song and W. K. Lim

Key Words : Fastener Hole(체결홀), Cold-Expansion(홀확장), Ring-Indentation(링압인), Residual Stress(잔류응력), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Fatigue Crack Retardation(피로균열지연), Weight Function(가중함수)

Abstract

A more efficient method for obtaining the fatigue life enhancement of a structure member with fastener holes is described. It is based on the combined process of cold-expansion and ring-indentation. Residual stresses were induced onto premachined holes using ring-indentation process near the fastener hole combined with cold-expansion. And residual stresses at the vicinity of a hole were evaluated using a fracture mechanics approach. The compressive residual stresses were larger using the combined process than is in the case of simple cold-expansion. Fatigue testing of aluminum specimens showed that the fatigue crack growth retardation emanating from a circular hole was greater for the combined process than for a simple cold-expansion alone.

1. 서 론

알루미늄재료를 사용하는 항공기 및 공업용 구조물에서 많은 부재들은 구멍 뚫린 홀에서의 볼트와 너트 또는 리벳을 이용하여 체결접합되어 있다. 이들 체결기구들은 조립과 분해를 용이하게 하여줄 뿐만 아니라 구조물에서 작용하는 하중을 분산하거나 전달하여 준다. 그러나 이들 체결기구의 주요 결점으로는 접합을 위하여 가공된 홀 주위가 응력 집중부로 되어 반복하중의 작용에 따른 부재의 피로수명을 감소시킨다는 사실이다.

이와 같이 피로하중이 중요한 적용분야에서, 부재내 균열의 발생을 지연시키기 위한 기계적, 금속

적 개선방법들에 대한 연구가 여러 연구자들에 의하여 이루어져 왔다. 이를테면, 샷피이닝(shot-peening)에 의한개선 방법,^(1,2) 용접이나 응력집중 부위의 국부가열(Spot heating) 등의 열처리에 의한 개선방법,^(3,4) 홀에서의 인터퍼런스핏(interference fit)또는 홀확장을 이용한 개선방법^(5~10)이 균열의 발생을 지연시키기 위한 일반적인 수법들로서, 균열의 발생이 예상되는 높은 응력을 받는 부위의 재료를 강화시켜주는 방법들이다. 위에서 열거한 방법들 중에서 홀로부터 나오는 균열의 생성을 지연시키기 위한 가장 보편적으로 이용되는 방법이 홀확장을 이용하는 방법이다. 이 방법은 가공된 홀보다 조금 더 큰 테이퍼진 맨드럴(tapered mandrel)을 홀에 삽입시켜, 홀을 재료의 항복강도 이상 팽창시켜줌으로써 맨드럴의 제거후 홀 주위에 유효한 압축잔류응력을 유발시키는 방법이다. 이 때 홀 주

*회원, 명지대학교 대학원 기계공학과

**회원, 명지대학교 기계공학과

위의 잔류응력은 홀 주위에서 접선방향으로 압축상태로 남아있기 때문에 이것이 홀로부터 떨어져 작용하는 인장방향의 응력을 감소시키는 역할을 하여, 부재가 반복적 하중을 받을 때 균열의 생성과 미소균열의 성장을 지연시킨다. 실제로 여러 연구자들이 반경방향으로의 홀팽창에 따른 잔류응력을 이론 해석하였으며, Poolsuk과 Sharpe⁽¹¹⁾는 이러한 이론들을 실험적으로 평가 비교하였다. 그리고 Arora 등⁽⁹⁾과 Lai 등⁽¹⁰⁾은 맨드릴로 확장된 중앙홀을 가진 알루미늄 시편의 피로균열성장에 대한 실험연구를 수행하여, 이들 재료의 피로강도에 큰 진전이 있음을 관찰하였다.

앞에서 설명한 바와 같이 응력집중부에서의 균열 생성을 지연시키는 효율적인 방법을 찾는 일은 매우 중요한 일이다. 그러나 일단 균열이 성장된 후의 피로균열성장을 저지 및 지연시켜서 피로수명을 향상시키는 일 또한 전자에 못지않은 중요한 사항이다. 따라서 이에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있으며, 현재까지 보고된 균열성장지연을 위한 일반적인 방법으로는 균열선단에 홀을 만들어 균열선단에서의 응력집중을 분산하는 방법,⁽¹²⁾ 단일 또는 복수 과대하중으로 균열선단에 소성역을 발생시키는 방법,⁽¹³⁻¹⁵⁾ 균열발생 부위를 링으로 압인시키는 방법⁽¹⁶⁾ 등으로 분류할 수 있다. 그러나 처음의 균열선단에 구멍을 만드는 방법은 오히려 구멍으로 인한 재료의 강도저하를 유발할 수 있으며, 두 번째의 방법에서는 과대하중을 구조물 재료의 붕괴하중 또는 파괴하중 아래로 주어야 하기 때문에 실용적으로 약간의 제약이 수반된다. 한편 세 번째의 압인에 의한 방법은 위에서 문제점을 피할 수 있는 방법으로서 균열선단 주위의 압인으로 인한 잔류압축응력을 부여하여 줌으로서 균열의 성장을 지연시키는 방법이다. 이강용 등⁽¹⁶⁾은 알루미늄 판재내의 중앙 홀 주위에 원형링을 압인한 다음, 시편 폭을 2등분한 편축균열 시편에 대하여 피로균열성장에 대한 연구를 수행하였다. 이들의 결과에서 재료의 피로균열성장지연이 현저하게 일어났음을 관찰할 수 있으며, 또한 많은 피로수명의 향상을 가져왔음을 보이고 있다.

이러한 기존의 연구결과를 토대로 피로균열의 발생이 예견되는 홀 주위에 홀확장과 함께 링압인을 혼합 적용한다면 홀로부터 발생하는 균열의 발생지연 및 지연현상이 더욱 효과적으로 나타날 수 있을 것으로 생각된다. 이와 같은 홀확장과 링압인의 동

시작용에 의한 피로균열성장에 대한 연구는 아직 알려진 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 평판내 홀 주위에 홀확장과 링압인의 소성가공을 혼합 적용시켰을 때의 홀 주위에서의 압축잔류응력 분포와 홀로부터 발생하는 피로균열성장거동을 관찰함으로써, 이 방법이 원형홀로부터 발생하는 피로균열의 새로운 지연방법으로서의 유용한지의 여부를 제시하고자 한다.

2. 실험 절차

2.1 시편재료 및 시편제작

본 실험에서 시편 제작에 사용된 재료는 알루미늄 합금인 6061 T6을 사용하였으며, 이의 화학적 성분과 기계적 성질은 Tables 1, 2와 같다.

시편은 두께 2 mm의 알루미늄 평판으로부터 가공하였으며, 재료의 윤곽방향과 시편의 길이방향이 같도록 하여 제작하였다. 피로시험을 위한 시편의 기하학적 형상과 치수는 Fig. 1과 같다. 먼저 시편 중앙의 홀을 5.8 mm의 드릴로 가공한 후에 6.0 mm의 리이머로 가공하였으며, 리이머 가공 후의 최종 지름은 6.015이었다. 다음에 시편의 홀확장을 위하여 테이퍼진 맨드릴을 홀에 관통시켰으며, 이때 홀 벽면이 손상되지 않도록 하기 위하여 맨드릴 관통시 0.175 mm 두께의 스플릿 슬리브(split sleeve)를 벽면에 부착하였다. SKD11(JIS)로 제작된 맨드릴의 형상과 치수는 Fig. 2와 같으며, 이를 이용한 홀 확장의 모습을 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of 6061-T6 aluminum

Material	Mg	Si	Cr	Cu	Al
6061-T6	1.0	0.6	0.2	0.3	Bal

Table 2 Mechanical properties of 6061-T6 aluminum

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

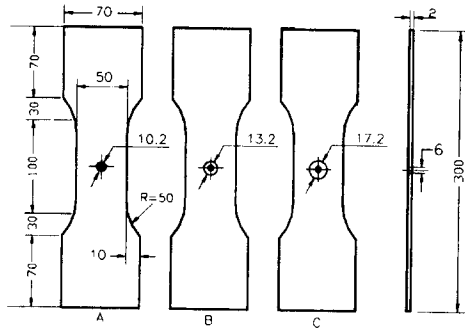


Fig. 1 Shape and dimensions of the fatigue test specimens (unit : mm)

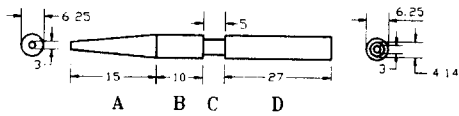


Fig. 2 Dimensions of the mandrel (unit : mm)

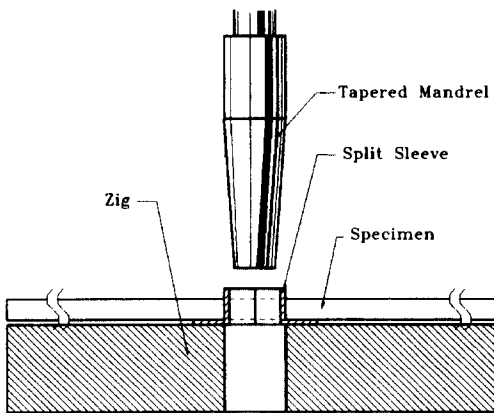


Fig. 3 Schematic of the hole expansion process

홀확장시 맨드럴의 D부분을 고정시키고, A쪽부터 홀에 삽입시켜, B부분을 거쳐 C부분까지 완전히 관통시켰으며, 이 때 맨드럴에 윤활유를 바름으로써 맨드럴의 관통을 원활하게 하였다. 홀확장 후에 스플릿 슬리브를 제거한 다음 확장된 홀의 지름을 측정할 결과, 리이밍 가공된 초기 홀보다 약 0.225 mm 확장된 6.225 mm였으며, 초기 홀보다 약 3.75% 정도 확장되었다. 이어서 확장된 홀 주위에 두께 0.5 mm의 원형 링압인의 소성가공을 부가하였다. Nadai이론⁽²⁰⁾에 의하여 계산된 확장된 홀 주위의 탄소성영역의 경계는 홀 중심으로 약 7.2 mm 떨어진 지점에 위치하므로, 링압인의 위치를

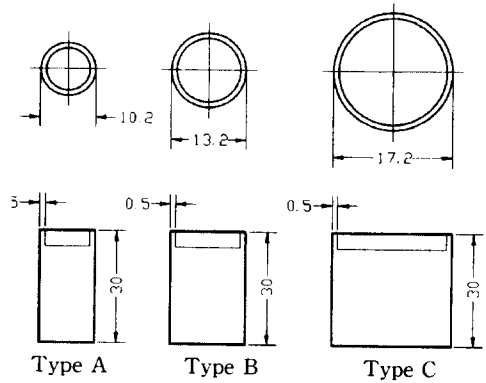


Fig. 4 Dimensions of the circular rings (unit : mm)

단순 홀확장시의 탄소성경계부근(B링, 평균지름 12.7 mm)과 이의 안쪽 소성역부근(A링, 평균지름 9.7 mm) 그리고 이의 바깥쪽영역(C링, 평균지름 16.7 mm)에 두었으며, 이를 위하여 링의 지름을 3개로 서로 달리하여 제작하였다. 각 링의 끝단은 평평한 모양으로 가공하였으며, 정밀가공된 원형링은 가공 후에 진공법을 이용한 열처리를 하였다. 가공된 링의 형상과 치수는 Fig. 4와 같다.

압인에는 Instron 동적 피로시험기를 이용하여 링을 알루미늄 평판내 홀의 중앙에 놓고 서서히 하중을 가하였다. 이 때 시편은 홀확장 때와 마찬가지로 SKD11로 만들어진 두께 30 mm의 두꺼운 블록 위에 놓고 압인함으로써 시편 바닥면의 압인부분이 돌출되는 현상을 없도록 하였다. 링압인은 모두 980 MPa, 1080 MPa, 1180 MPa의 3종류의 압력으로 압인하였으며, 피로시험시 홀로부터 발생하는 피로균열의 측정을 용이하게 하기 위하여 홀 주위를 #1000, #1500의 모래종이로 연마하고, 마지막으 연마제를 이용하여 부드러운 천으로 광택을 내었다. 이와 같이 제작된 시편을 분류하면 Table 3과 같다.

2.2 실험방법

제작한 시편에 대한 피로시험을 위하여 Instron 사가 제작한 100 kN용량의 유압서보 피로시험기(모델 1350)를 이용하였다. 피로시험조건은 하중제어 상태에서 정현파, 주파수 15 Hz, 최대응력 140 MPa에 응력비를 0.1로 하여 피로시험을 수행하였으며, 균열길이의 측정을 위하여 일정반복 사이클마다 최고 하중에서 시험기를 일시 정지시킨 후에 50배율의 이동현미경을 이용하여 측정하였다.

Table 3 Classification of the fatigue test specimens

Specimen configuration	Indentation pressure (MPa)	Type of circular ring	Indented depth (mm)	Final hole diameter (mm)	Specimen type
Non-worked specimen				6.015	R
Cold-expanded specimen				6.225	E
Combination-worked specimens (Cold-expansion and Ring-indentation)	1180	A	0.167	6.125	EA11
	1180	B	0.120	6.165	EB11
	1180	C	0.098	6.185	EC11
	980	B	0.042	6.215	EB9
	1080	B	0.076	6.175	EB10

3. 잔류응력 계산

3.1 균열을 가진 잔류응력장내 임의 두점사이의 변위

Fig. 5와 같이 균열길이 a 를 가진 물체가 외력 P 와 함께 가상력 F 를 받고 있다고 하자. 이 때 가상력 F 를 영으로 접근시켰을 때 두점 c, c' 사이의 변위 Δ_F 는 다음과 같이 주어진다. ⁽¹⁷⁾

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

$E' = E$: 평면 응력상태의 경우

$E' = E / (1 - \nu^2)$: 평면 변형률상태의 경우

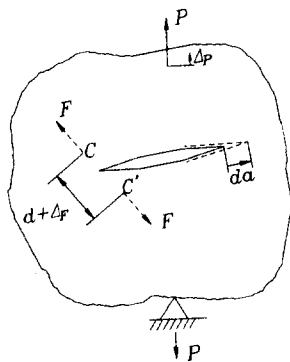


Fig. 5 A body loaded by forces, P and virtual forces, F

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

한편 잔류응력을 내포하는 균열을 가진 물체에서 모드 I의 응력확대계수 K_I^r 은 다음과 같이 나타낼 수 있다. ⁽¹⁸⁾

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

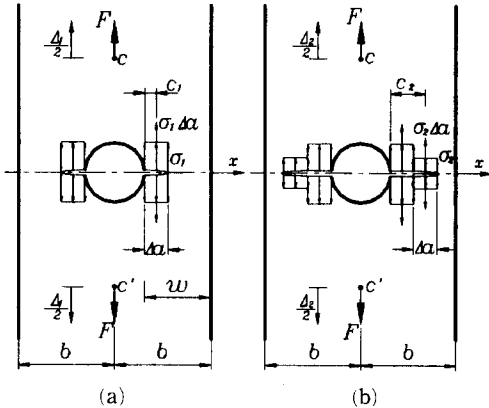
여기서, $m(x, a)$ 는 물체의 기하학적 형상에 따라 주어지는 가중함수 ⁽¹⁸⁾(weight function)이고, A 는 균열면 길이 그리고 σ_y^r 은 균열이 없을 때 존재하던 y 방향으로의 잔류응력이다. 따라서 식 (2)의 K_I^r 을 식(1)의 K_{IP} 로 바꾸어 놓고, $K_{IP} = 0$ 그리고 $\Delta_{F \text{ no crack}} = 0$ 으로 놓음으로써 잔류응력장내 임의 두점사이의 변위 Δ_F 는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

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

3.2 홀 주위의 잔류응력분포 계산

평판내 홀 주위에서의 잔류응력분포를 결정하기 위하여 강기주 등에 의하여 제안된 점진균열법 ⁽²¹⁾을 이용하였다. 지금 Fig. 6과 같은 평판내의 홀을 생각하여 보자.

홀 좌우에 균열길이 a 를 주었을 때에 잔류응력에 의한 응력확대계수 K_I^r 은 균열 a 가 생기기 전에 그 위치에 존재하던 잔류응력 σ_1 을 균열증분길이



(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

Fig. 6 Radial cracks at a circular hole in a finite width plate

중심점에서의 집중하중, $\sigma_1 \Delta a$ 로 놓음으로서 식 (2)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기서, $\delta(x - c_1)$ 는 Dirac 델타함수이고, $c_1 = \Delta a/2$ 그리고 $m(x, a_1)$ 은 균열길이 a_1 을 가진 시험편의 가상함수로서, 유한평판내 중앙 홀로부터 나오는 균열 a 에 대한 이의 함수는 다음과 같이 주어진다.⁽¹⁹⁾

$$m(x, a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi a}} \sum_{k=1}^3 \beta_k(a) \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{k-3/2}$$

$$\beta_1(a) = F_1(a) / [2f_r(a)] = 2.0$$

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

$$\beta_3(a) = [aF'(a) - \frac{1}{2}F_2(a)] / f_r(a)$$

$$F_2(a) = [\sqrt{2}\pi\psi(a) - E_1(a) \cdot F_1(a)] / E_2(a)$$

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

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

$$E_j(a) = \sum_{m=0}^M \frac{2^{m+1} m! S_m a^m}{\prod_{k=0}^m (1+2j+2k)} \quad (5)$$

여기서, $\beta_i(a)$ 는 균열의 기하학적 형상에 따라서 결정되는 값이며, f_r 과 S_m 은 각각 다음과 같이

정의된다.

$$f_r = K_r / (\sigma \sqrt{\pi a}), \quad f_r = \sum_{i=0}^I a_i a^i$$

$$\sigma_r(x) / \sigma = \sum_{m=0}^M S_m x^m$$

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

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

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

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

따라서 식 (4)와 (6)을 식 (3)에 대입함으로써 다음과 같은 초기균열진전 Δa 후의 균열길이 a_1 에 대한 변위 Δ_1 의 관계식을 얻을 수 있다.

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

$$h(x, a) = 2 \int_0^a m(x, a) \frac{\partial \sigma_r^f(x)}{\partial F} dx \quad (8)$$

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.

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

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 풀이함으로써 홀 주위에서의 잔류응력을 계산할 수 있다.

4. 실험결과 및 토의

4.1 홀 주위의 잔류응력 분포변화

홀 주위에서의 잔류응력 측정을 위하여 50 mm × 300 mm인 알루미늄 평판을 사용하였다. 시편의 재질과 두께 그리고 홀 주위에서의 홀확장 및 링압인의 방법은 피로시험을 만들 때의 경우와 동일하며, 이의 측정을 위한 시편의 형상과 치수는 Fig. 7과 같다.

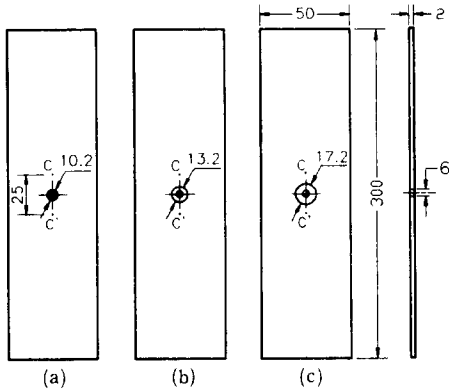


Fig. 7 Specimens for residual stress measurement (unit : mm)

시편의 홀 상하 두점, c, c' (두점사이의 거리, $s = 25$ mm)에 신장계(extensometer)를 부착하여 홀 좌우에 길이 Δa 의 균열을 진전시켜 줄 때마다 c, c' 에서의 변위를 구하였다. 홀 좌우 가장자리로부터 거리가 10 mm에 이르기까지 균열증분, Δa 를 1 mm씩 증분시켜 주어가며, 이 때마다의 변위값을 측정하였으며, 이들을 식 (8)과 (9)에 넣어서 잔류응력을 계산하였다. 균열은 0.3 mm 두께의 금속으로 된 실톱을 사용하여 인공적으로 생성시켰으며, 이의 가공을 용이하게 하기 위하여 톱으로 절단시 윤활유를 부가하였다.

먼저 본 측정법의 유효성을 검증하기 위하여 기존의 이론해가 주어져 있는 홀확장만 한 경우에 대하여 잔류응력 측정 실험을 수행하였다. Fig. 8은 홀 가장자리로부터 균열길이에 따른 c, c' 점에서의 측정된 변위값을 나타낸다. 그림에서 실선은 홀확장만 수행한 경우의 측정결과이고, 나머지 점선들은 다음에서 기술할 홀확장과 함께 링압인을 동시에 수행한 시편에 대한 측정결과이다. 변위값은 홀 주위에서의 압축잔류응력으로 인하여 균열의 증분과 함께 음의 값을 나타냄을 알 수 있다. 홀확장만 수행한 시편에서 얻은 이들 변위값들로부터 계산된 홀 주위의 점선방향으로의 압축잔류응력분포를 Fig. 9에 나타내었다. 점선은 본 실험으로부터 측정된 결과이고 실선은 Nadai의 이론해(20)를 나타낸다. 그림에서 보듯이 본 측정방법으로부터 얻은 결과들은 이론해와 대체적으로 비슷한 결과를 보이고 있다.

Fig. 10은 홀확장과 링압인 작업을 혼합 적용한 시편에 대한 잔류응력 측정결과를 보여준다. 홀확

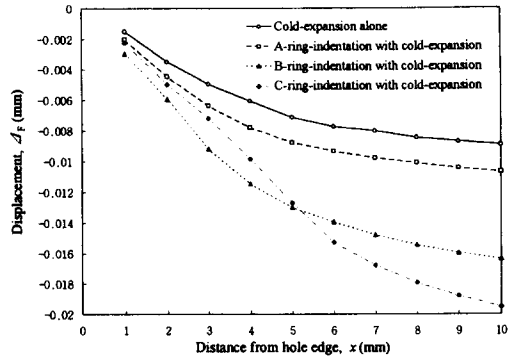


Fig. 8 Measured displacement as a function of the crack length

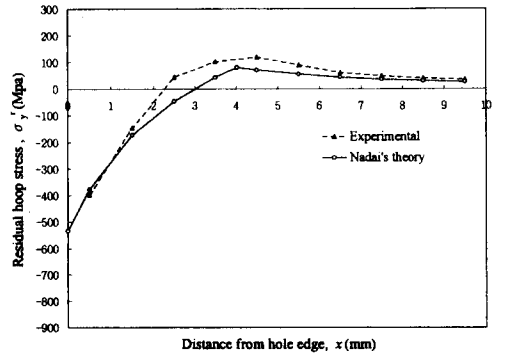


Fig. 9 Comparison of residual hoop stresses surrounding a cold expanded hole by theoretical and experimental methods

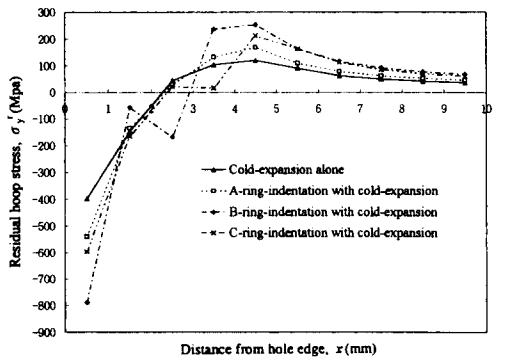


Fig. 10 Effect of punch location on the distribution of residual hoop stresses

장 작업과 함께 부가하는 링압인의 위치가 홀 주위의 잔류응력 생성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 홀압인의 위치를 각각 단순 홀확장 작업시의 탄소성경계영역 부근과 소성영역 그리고 탄성영역에

두고 압인작업을 수행하였으며, 이 때 주어진 압인 압력은 모두 1180 MPa로 동일하게 부가하였다. 그림에서 실선은 단순 홀확장만 한 경우의 실험결과로서 링압인의 연속적용에 따른 홀 주위에서의 잔류응력의 분포와 비교하기 위하여 함께 도시하였다. 홀확장과 아울러 확장된 홀 주위의 소성영역 내에 압인(A링)을 준 경우, 홀 주위에서의 접선방향으로의 압축잔류응력 분포는 단순 홀확장 작업만을 수행했을 경우보다도 홀 주위에서 압축잔류응력이 더욱 크게 발생하고 있으며, 홀 가장자리로부터 조금 떨어져서 나타나기 시작하는 인장잔류응력은 오히려 약간 큰 값을 보이다가 그 이후에는 단순 홀확장시의 잔류응력분포와 거의 비슷한 값을 보인다. 한편 홀 주위의 탄소성 경계부근에 압인(B링)을 가한 경우에는 그림에서 보듯이 A링을 부가하여 압인 하였을 때보다도 홀 주위에 압축잔류응력이 더욱 크게 발생하고 있으며, 링압인지역 밖으로는 인장으로의 잔류응력이 상대적으로 더욱 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 홀 주위의 탄성영역 내에 압인(C링)을 가한 경우의 잔류응력분포는 탄성영역에서의 압인작업으로 홀 주위에 유효한 압축잔류응력을 생성시킬 수 있으나, 압인지역이 홀로부터 멀어지므로써 이의 생성효과는 점차 작아짐을 알 수 있다.

앞에서 본 바와 같이 홀확장 가공 후에 링압인을 수행함으로써 홀 가장자리 뿐만 아니라 홀 주위의 잔류응력분포를 변화시키게 되는데, 링압인은 압인 지역 바깥부분보다도 이 지역 안쪽부분의 응력분포에 더 큰 영향을 미친다. 일반적으로 링압인을 수행함으로써 압인지역을 경계로 하여 링압인 안쪽에서는 압축잔류응력이 크게 발생하게 되며, 링 밖에서는 인장으로서의 잔류응력이 더욱 크게 발생함을 알 수 있다. 홀 주위에서의 압축잔류응력분포의 관점에서 볼 때, 이의 분포에 가장 큰 영향을 미치는 링압인의 위치는 단순 홀확장만 한 경우에서의 탄소성 경계부근임을 알 수 있다. 따라서 링압인은 균열의 생성을 지연시키는 측면에서 매우 효율적인 방법임을 짐작할 수 있다.

다음은 압인압력이 홀 주위의 잔류응력분포에 미치는 영향을 검토하기 위하여 홀확장시의 탄소성경계 부근에 B링으로 압인을 주었을 때의 압인압력에 따른 홀 주위에서의 잔류응력을 측정하였다. 이 때 부가된 압인압력은 980 MPa, 1080 MPa, 1180 MPa 등 3가지로 달리하여 주었다. Fig. 11은 이의

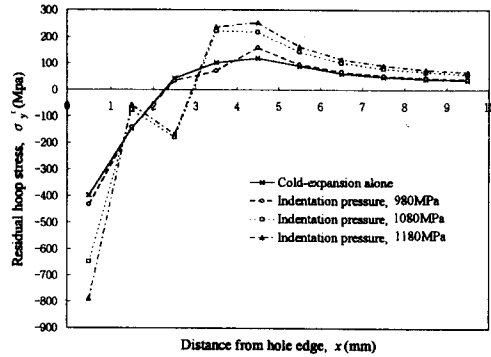


Fig. 11 Effect of indentation pressure on the distribution of residual hoop stresses

측정결과를 도시한 것으로써, 압인압력 980 MPa에서는 압인지역 부근에서만 약간의 잔류응력 변화만이 나타났을 뿐 큰 변화볼 보이지 않다가, 이 보다 큰 1080 MPa에서는 잔류응력의 변화가 갑작스럽게 일어나게 된다. 압인압력을 더욱 증가시켜 1180 MPa를 주었을 때에는 잔류응력의 변화가 바로 앞의 결과에서와 같이 급격하게 나타나지는 않으나, 압인압력을 증가시킬수록 홀 주위의 잔류응력분포에 여전히 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 홀 주위의 압축잔류응력분포에 압인의 영향을 나타내기 위해서는 압인압력을 적어도 980 MPa이상이므로 부가시켜 주어야함을 알 수 있다. 압인압력에 따른 잔류응력분포의 결과에서 보듯이 홀 가장자리에서의 압축잔류응력은 압인압력을 증가할수록 더욱 크게 발생시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 홀로부터 발생하는 균열의 생성은 압인압력을 증가시킴으로써 더욱 효율적으로 지연시킬 수 있음을 예측할 수 있다.

4.2 홀로부터 발생하는 피로균열 성장거동

홀확장 가공과 함께 홀 주위에서의 링압인의 위치를 서로 달리하여 가공한 피로시험에 대하여 하중반복회수에 따른 균열성장과의 관계를 Fig. 12에 도시하였다.

이 때의 균열길이는 홀 좌우에서 발생한 균열의 평균값으로 하였다. 홀로부터 발생한 균열에서 초기 균열길이를 0.25 mm로 가정하여, 이로부터 파단시까지의 균열길이를 나타낸 것으로서 리미팅가공된 R시험보다는 홀확장 가공된 E시험에서 균열성장지연이 일어남을 볼 수 있으며, 링압인의 소성가공을 조합하여 부가하여 줌으로서 초기균열의 생

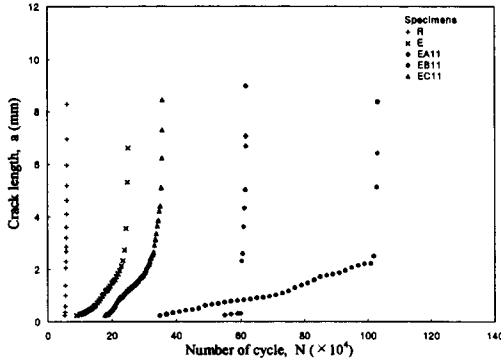


Fig. 12 Crack growth curves for R, E, EA11, EB11 and EC11 specimens

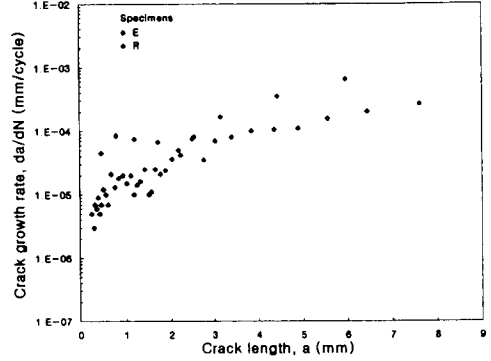


Fig. 13 Fatigue crack growth rates vs crack length for R and E specimens

성 및 균열성장의 지연현상이 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 이들은 모두 홀 주위에서의 압축 잔류응력의 결과라고 생각된다. 그림에서 보듯이 시편 EC11은 시편 E와 비교하여 초기균열생성에서 지연현상이 뚜렷하나 그 이후의 균열성장은 대체적으로 비슷한 경향을 보이고 있으며, 시편 EA11은 이들 시편 중에서 초기균열생성을 위한 반복회수가 가장 많은데 이는 피로수명의 대부분을 초기균열을 성장시키는데 소비하고 있음을 알 수 있다. 두 시편의 실험결과를 고찰하여 보건데 홀 주위의 압축잔류응력분포에서 시편 EA11은 EC11과 비교하여 조금 작은 값을 나타내면서도 오히려 피로수명에서는 크게 향상된 값을 보이고 있다. 이는 링압인의 위치를 홀 주위에 가까이 좁음으로서 나타나는 홀지름의 감소, 홀 주위 두께의 증가 그리고 압인부위 재료의 변화 등의 복합적인 요인에 기인한다고 생각된다. 한편 EB11은 다른 어떤 시편보다도 전체 피로수명이 가장 향상되어 나타남을 보여주고 있다. 이는 링압인의 위치를 홀확장 가공만 했을 때의 탄소성경계반경 부근에 두는 것이 기존의 단순 홀확장 방법보다도 초기균열의 성장지연 효과 및 전체 피로수명을 가장 효율적으로 향상시킬 수 있는 수법임을 확인시켜 준다.

Fig. 13부터 Fig. 16까지는 각 시편에 대하여 균열길이에 따른 피로균열성장속도와와의 관계를 도시하였다. Fig. 13은 홀확장만 한 시편 E에 대한 실험결과로서 비교를 위하여 리미팅가공된 시편 R의 결과와 함께 도시하였다. 그림에서 보듯이 균열길이 2~3 mm 부근에 이르기까지 시편 R보다 낮은 균열성장률을 보이다가 그 이후에는 점차로 큰 값

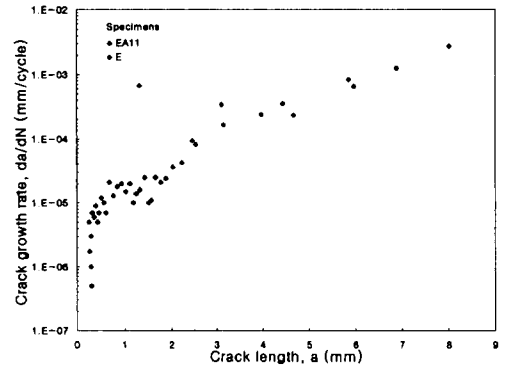


Fig. 14 Fatigue crack growth rates vs crack length for E and EA11 specimens

을 나타낸다. 이는 앞서 기술한 홀확장에 따른 잔류응력분포와 매우 유관한 것으로, 홀 가장자리로부터 2~3 mm되는 부근에서 잔류응력이 압축에서 인장으로 바뀌는 부위이다. Fig. 14는 시편 EA11에 대한 실험결과로서 단순 홀확장된 시편 E와 함께 비교 도시하였다. 압인지역을 중심으로 안쪽(홀이 위치한 지역)에서는 시편 E보다 낮은 피로균열성장률을 보이다가, 성장한 미소균열이 압인지역에 가깝게 이르러서는 균열성장률이 급격하게 상승하게 되며, 이후에는 시편 E의 성장률과 비슷한 값을 가지며 성장한다. 이와 같은 현상은 시편 EB11과 EC11의 실험결과인 Fig. 15와 Fig. 16에서 더욱 뚜렷이 나타난다. 시편 EB11은 압인지역인 홀 가장자리로부터 2~3 mm 부근에 이르기까지 시편 E와 비교하여 낮은 균열성장률을 보이다가, 이후에 급격히 큰 값을 가지면서 시편 E와 비슷한 성장률을 보이고 있으며, 시편 EC11 역시 균열이

압인지역인 홀 가장자리로부터 4~5 mm 부근에 이르기까지 보다 낮은 균열성장률을 가지며 성장하다가 압인지역과 가까게 이르러 이 지역을 통과하면서 균열성장률이 갑자기 증가된 후에 시편 E와 비슷한 균열성장률을 가지며 성장한다. 이와 같이 균열이 링압인 지역에 이르기까지 낮은 피로균열성장률을 보이는 것은 홀확장에 의한 압축잔류응력과 링압인에 의한 압인 안쪽에서의 압축잔류응력이 복합적으로 작용하여 나타난 결과이고, 링압인 지역에 이르러 균열성장률이 급증하는 이유는 링압인 바깥쪽에서는 오히려 인장응력의 잔류응력이 활발하게 생성되는 점 그리고 이 부근에 이르러 시편두께가 감소하고, 압인홀의 노치현상이 조합되어 일어나는 현상으로 생각된다. 위의 결과를 종합해 보면 균열의 성장을 안정적으로 지연시키고, 전체 피로수명을 연장시키기 위해서는 링압인의 위치를 단순 홀확장시의 탄소성 경계부근에 두는 것이 효

과적이다.

이번에는 B링으로 압인압력을 서로 달리하여 준 시편에 대하여 하중반복회수에 따른 균열성장의 실험을 수행하였으며, 이의 결과를 Fig. 17에 도시하였다. 압인압력을 980 MPa로 준 시편 EB9에서는

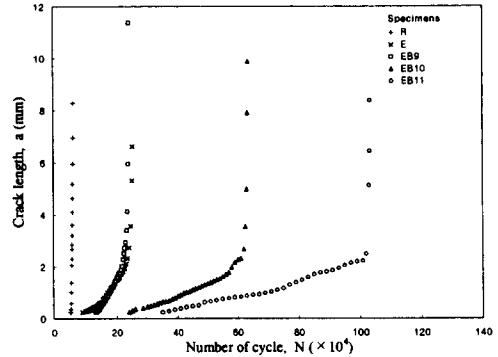


Fig. 17 Crack growth curves for R, E, EB9, EB10 and EB11 specimens

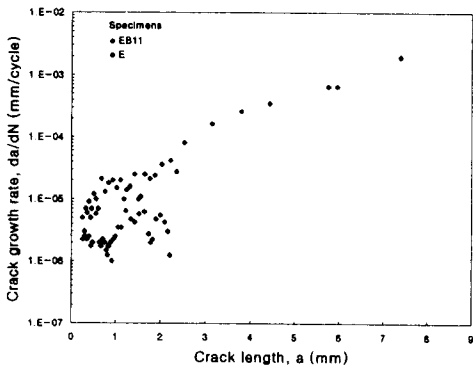


Fig. 15 Fatigue crack growth rates vs crack length for E and EB11 specimens

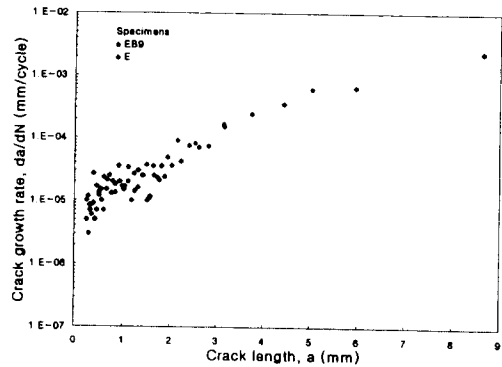


Fig. 18 Fatigue crack growth rates vs crack length for E and EB9 specimens

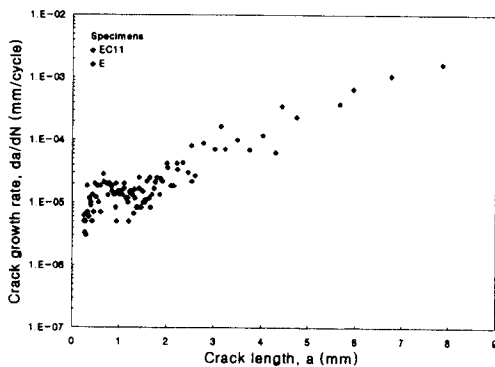


Fig. 16 Fatigue crack growth rates vs crack length for E and EC11 specimens

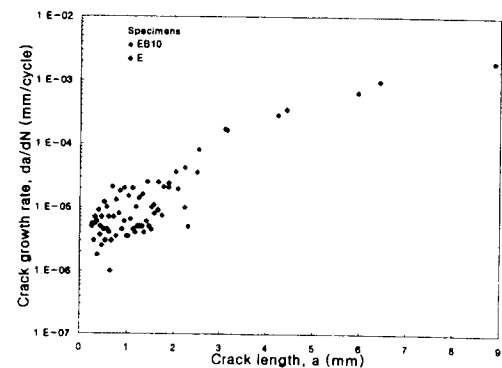


Fig. 19 Fatigue crack growth rates vs crack length for E and EB10 specimens

Table 4 Fatigue lives of specimens

Type of specimens	Initial life (Cycle)	Total life (Cycle)	$\frac{\text{Initial life}}{\text{Total life}} \times 100(\%)$
R	5×10^4	6×10^4	83
E	9×10^4	25×10^4	36
EA11	55×10^4	62×10^4	89
EB11	35×10^4	103×10^4	34
EC11	18×10^4	36×10^4	50
EB9	13×10^4	24×10^4	54
EB10	24×10^4	63×10^4	38

* Initial life was defined as the development of a 0.25 mm crack

확장된 시편 E의 결과와 거의 차이를 보이지 않으나 압인압력을 점점 크게 부여한 시편 EB10과 EB11일수록 균열성장의 지연현상이 더욱 뚜렷하게 나타난다. 즉 링압인의 압력을 크게 부가하는 것이 균열성장의 지연을 효과적으로 나타내는 수법임을 알 수 있다. 그러나 과도한 압인압력은 압인 노치 부를 크게 하여 응력집중부화함으로써 오히려 이 부분에 균열의 발생을 유도하므로 전체 피로수명의 감소를 유발할 수 있다. 이와 같은 균열지연현상은 Fig. 9에 나타난 홀 주위에서의 압축잔류응력분포의 크기와 매우 유사성을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 18과 Fig. 19는 시편 EB9와 EB10에 대한 균열길이에 따른 피로균열성장률을 나타낸 것이다. 이미 나타난 시편 EB11의 실험결과인 Fig. 15와 함께 고찰해 보건데 홀확장만 한 시편 E와 비교하여 링압인지역에 이르기까지의 균열성장률은 압인압력을 증가하여 줄수록 더욱 낮은 값을 갖게 되는데 그림에서 보듯이 압인압력을 가장 크게 준 시편 EB11에서 균열성장률이 가장 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 균열이 링압인 지역을 통과한 후에는 앞에서 언급 하였듯이 대체적으로 시편 E와의 균열성장률과 비슷한 값을 가지며 성장함을 알 수 있다.

비교를 위하여 앞에서 열거한 실험 시편에 대한 0.25 mm 초기균열길이의 생성에 소요되는 반복사이클 수와 파단시까지의 피로수명을 Table 4에 나타내었다. 피로수명은 초기균열생성까지의 수명과 전체 수명 두 가지로 분류하여 표시하였는데, 표에서 보듯이 전체 피로수명중 초기균열생성에 소요되

는 수명의 백분율은 시편마다 제각기 다를 수 있다. 시편 R과 EB11에서는 초기균열생성에 소요되는 수명이 전체 피로수명의 약 85% 내외로서, 전체 피로수명의 대부분이 초기 균열을 생성시키는데 소요됨을 알 수 있다. 시편 EB10, EB11의 경우에는 단순 홀확장 작업만을 수행한 시편 E와 비교하여 전체수명 중 초기균열생성까지의 수명의 비율이 35% 내외의 값으로 서로 비슷하며, 이들 모두의 수명에서는 2~4배 정도의 향상이 있음을 보여주고 있다. 위의 결과들을 종합적으로 고찰해 보건데 홀을 가진 부재의 피로수명을 향상시킨다는 관점에서 홀확장과 링압인의 혼합소성가공은 매우 유용한 방법임을 알 수 있다.

5. 결 론

원형 홀을 가진 6061-T6 알루미늄합금 평판에 대하여 홀확장과 아울러 홀 주위에 링압인 소성가공을 혼합적용한 후에 홀 주위에 분포하는 접선방향으로의 압축잔류응력과 홀로부터 발생하는 피로 균열의 성장에 이의 영향을 검토하기 위하여 파괴역학적 수법을 이용한 잔류응력의 측정과 함께 피로시험을 수행하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 홀확장과 링압인의 소성가공을 혼합적용함으로써 단순 홀확장만 수행한 시편보다도 홀로부터 발생하는 균열의 생성을 효과적으로 저지할 수 있음은 물론이고, 재료의 전체 피로수명도 크게 증대된다.

(2) 확장된 홀 주위에 링압인을 수행함으로써 링

압인 안쪽지역으로 압축잔류응력이 보다 활발히 생성되므로, 단순 홀확장된 시편과 비교하여 압인지역부근에 이르기까지의 균열성장률은 크게 저하된다.

(3) 링압인의 위치를 홀 가까이에 위치시킬수록 초기균열의 생성에 지연현상이 뚜렷이 나타나지만 균열의 안정적 성장과 피로수명을 증대시키는 관점에 있어서는 단순 홀확장시의 탄소성경계부근에 압인을 부가하는 것이 가장 효율적이다.

(4) 링 압인압력을 증가할수록 홀 가장자리에서의 압축잔류응력이 크게 발생하므로 초기균열의 생성수명과 파단시까지의 피로수명 모두가 증가하게 된다.

후 기

본 연구는 1995년도 한국과학재단의 핵심전문연구지원과제(과제번호 : 951-1009-057-1)의 일환으로 수행되었으며, 이에 재단 및 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Al-Obaid, Y. F., 1990, "A Rudimentary Analysis of Improving Fatigue Life of Metals by Shot Peening," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 57, pp. 307~312.
- (2) Almen, T. O. and Black, P. M., 1981, *Residual Stress and Fatigue in Metals*, McGraw-Hill, New York.
- (3) Maddox, S. J., 1982, "Influence of Tensile Residual Stresses on the Fatigue Behavior of Welded Joints in Steel," *ASTM STP 776*, pp. 63~69.
- (4) Chen, B. D., Griffiths, J. R. and Lam, Y. C., 1993, "The Effects of Simultaneous Overload and Spot Heating on Crack Growth Retardation in Fatigue," *Engng Fracture Mech.*, Vol. 44, pp. 567~572.
- (5) Rich, D. L. and Impellizzeri, L. F., 1977, "Fatigue Analysis of Cold-Worked and Interference Fit Fastener Holes," *ASTM STP 637*, pp. 153~177.
- (6) Toor, P. M., 1978, "Cracks Emanating from Precracked Cold-Worked Holes," *Engng Fracture Mech.*, Vol. 8, pp. 391~395.
- (7) Chandawanich, Nopporn, 1979, "An Experimental Study of Fatigue Crack Initiation and Growth from Coldworked Holes," *Engng Fracture Mech.*, Vol. 11, pp. 609~620.
- (8) Heller, M., Jones, R. and Williams, J. F., 1991, "Analysis of Cold-Expansion for Cracked and Uncracked Fastener Holes," *Engng Fracture Mech.*, Vol. 39, No. 2, pp. 195~212.
- (9) Arora, P. R., Attaguru, B. D. and Subramenya Hande, H. S., 1992, "The Fatigue Growth Rate in L-72 Al-Alloy Plate Specimen with Cold Worked Holes," *Engng Fracture Mech.*, Vol. 42, No. 6, pp. 989~1000.
- (10) Lai, M. O., Oh, J. T. and Nee, A. Y. C., 1993, "Fatigue Properties of Holes with Residual Stresses," *Engng Fracture Mech.*, Vol. 45, pp. 551~557.
- (11) Poolsuk, S. and Sharpe Jr., W. W., 1978, "Measurement of Elastic-Plastic Boundary around Cold Worked Fastener Hole," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 45, pp. 515~520.
- (12) Hertzberg, R. W., 1976, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, John Wiley & Sons, pp. 237~238.
- (13) Chen, Dai-Heng and Nisitani, H., 1991, "Analysis of Delaying Effects of Overload on Fatigue Crack Propagation," *Engng Fracture Mech.*, Vol. 39, pp. 287~298.
- (14) 김정규, 박병훈, 1990, "7075-T6 알루미늄합금의 피로균열 진전의 지연현상과 이의 기구", 대한기계학회논문집, 제8권, 제4호, pp. 883~891.
- (15) 송삼홍, 권운기, 1995, "단일 과대하중에 의한 균열지연거동에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제19권, 제10호, pp. 451~462.
- (16) 이강용, 강종목, 1984, "링압인으로 인한 잔류압축응력이 피로균열 성장률에 미치는 영향" 대한기계학회논문집, 제8권, 제4호, pp. 313~320.
- (17) Tada, H., Paris, P. and Irwin, G., 1985, *The Stress Analysis Handbook*, Del Research Co.
- (18) Parker, A. P., 1982, "Stress Intensity Factors,

- Crack Profiles and Fatigue Crack Growth Rates in Residual Stress Fields," *ASTM STP 776*, pp. 13~31.
- (19) Wu, X. R. and Carlsson, A. J., 1991, *Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions*, Pergamon Press, pp. 264~286.
- (20) Nadai, A., 1943, "Theory of the Expanding of Boiler and Condenser Tube Joints through Rolling," *Trans. ASME*, Vol. 65, pp. 865~880.
- (21) Kang, K. J., Song, J. H. and Earmme, Y. Y., 1989, "A Method for the Measurement of Residual Stresses Using a Fracture Mechanics Approach," *J. Strain Anal. Engng. Des.*, Vol. 45, pp. 23~30.