

711
6/11 24
15
22

工學碩士學位論文

스프링鋼의 쇼트피닝加工에 의한
疲勞龜裂伝播特性과 高溫環境에서의
壓縮殘留應力消滅現象에 관한 研究



2003년 2월

釜慶大學校 一般大學院

機 械 工 學 科

孫 明 君

工學碩士學位論文

스프링鋼의 쇼트피닝加工에 의한
疲勞龜裂轉派特性和 高溫環境에서의
壓縮殘溜應力 消滅現象에 관한 研究

指導教授 朴 卿 東

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2003년 2월

釜慶大學校 一般大學院

機 械 工 學 科

孫 明 君

이 論文을 孫明君의 工學碩士
學位論文으로 認准함

2002年 12月 26日

主 審 金 榮 大 教授 (印)

委 員 姜 大 敏 教授



委 員 朴 卿 東 教授 (印)

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 쇼트피닝	3
2.1. 쇼트피닝 가공의 개요	3
2.2. 쇼트피닝의 효과	5
2.3 쇼트피닝의 강도	6
2.4 쇼트피닝기의 구조	7
제 3 장 이론적 배경	8
3.1. 피로균열의 파괴역학적 개념	8
3.2. 피로균열 진전거동에 있어서 파괴역학의 적용	12
3.3. 피로균열 진전거동	14
3.4. 응력 확대계수범위의 결정	16
3.5. 균열진전의 하한계 측정	18
제 4 장 실험장치 및 방법	21
4.1. 쇼트피닝 가공	21
4.2. 압축잔류응력의 측정	21
4.3. 피로균열진전실험	24

4.3.1 시험편	24
4.3.2 피로시험기	24
4.3.3 피로균열진전실험	27
4.4 유한요소해석모델	28
제 5 장 실험결과 및 고찰	30
5.1. 피로크랙전파특성	30
5.1.1 Unpeened재와 Shot peened재의 피로크랙전파특성	30
5.1.2 고온환경에서의 피로크랙전파특성	30
5.2. 하한계응력확대계수	36
5.3. 온도변화에 따른 재료상수 C , m 관계	36
5.4. 크랙길이와 사이클 수의 관계	40
5.5 유한요소해석결과	42
5.6. 압축잔류응력의 분포	45
5.7 시험편의 파면양상	46
제 6 장 결 론	49
참고문헌	50
Abstract	52
Nomenclature	53

제 1 장 서 론

산업사회의 발전으로 기계구조물, 기계부품, 자동차, 항공기 부품, 발전기 터빈등의 기계구조물에서는 에너지와 자원절약의 목적으로 경량화에 대한 요구가 증가하고 있다. 재료의 절감을 위해서 고강도화, 경량화 설계방법의 도입이 적극 채용되고 있다.

스프링의 설계응력증가를 위해서 최근에 새로운 스프링강종이 개발되고 있으며, 개발된 스프링강종의 경도 또한 높은 설계응력에 발맞추어 증가하고 있다. 하지만 높은 인성과 경도의 증가는 가져왔지만 경도의 증가에 따른 노치 민감성에 따라 표면의 노치민감성을 낮출 수 있는 쇼트피닝가공은 더욱 중요하게 되었다.

기계부품의 파손은 대부분 반복적인 인장응력에 의하여 발생하기 때문에 사용중에 높은 인장응력을 받는 기계부품의 경우에는 표면에 압축잔류응력을 발생시켜서 인장응력을 상쇄시키는 방법으로 부품의 피로수명을 증대시킨다. 쇼트피닝은 이와같이 기계부품의 표면에 유익한 압축잔류응력을 발생시키기위한 방법으로 현재 자동차 및 항공기부품에 폭넓게 적용되고 있다.

서로 다른 쇼트피닝조건을 적용하여 쇼트볼의 투사밀도를 높이거나, 투사속도를 높이거나, 쇼트볼의 경도를 증가시키면 피로강도가 증가하는 것으로 알려져 있다. ⁽¹⁾

쇼트피닝 후 잔류응력에 대한 연구결과에 있어서 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력은 표면에서 최대값을 갖는 것이 아니라 표면아래에서 최대값을 형성하며 최대 압축잔류응력의 양은 쇼트피닝가공조건에 따라 향상시킬 수 있다고 하였다. ⁽²⁾ 또한 쇼트피닝의 압축잔류응력과 피로 크랙진전과의 관계를 연구한 결과 피로균열진전수명에 있어서 표면에 형성된 잔류응력은 매우 중요한 인자이며 최대 잔류응력이 표면에 가까울수록 피로수명이 증가함을 연구하였다. ⁽³⁾⁽⁴⁾

쇼트피닝가공에 의해 형성된 압축잔류응력은 어떤 상황에 놓이게 되면 온도에 의해 잔류응력은 없어지거나 이완될수 있다. 이러한 상황은 고온 및 과대응력 상태이며, 잔류응력 소멸현상을 발생시키는 대략적인 온도는 강철은 260℃, 이고 알루미늄은 120℃이다. 고온에서의 풀림 (annealing)에 의해 압축잔류응력에 의한 이점이 제거될 수도 있다는 점이 중요하다.

본 연구는 압축잔류응력이 피로균열진전에 미치는 영향을 알아보기 위하여 CT시험편에 쇼트볼을 투사한 쇼트가공재와 투사하지 않은 언피닝재의 피로균열진전 실험을 실시하였다. 또한 유한요소법에 의한 CT 시험편에 미치는 압축잔류응력의 영향을 알아보고 고온환경에서의 피로균열진전에 미치는 압축잔류응력의 영향을 조사하기 위하여 RT, 100℃, 150℃ 180℃의 고온에서 실시함으로서 고온의 환경에서의 피로균열전파특성과 압축잔류응력의 소멸에 대하여 알아보았다.

제 2 장 쇼트 피닝

2.1 쇼트피닝 가공의 개요

쇼트피닝 가공은 냉간 가공의 한 방법으로 1920년대에 개발되어 1940년대부터 공업에 널리 응용되기 시작하였으며, 산업 발전의 추세에 따라 기계, 구조물에 대한 대형화, 고속화 및 경량화, 고강도화가 필요하게 되고 높은 피로 강도의 특성 요구가 증가되고 있다.

쇼트피닝 가공이란 금속 부품의 표면에 쇼트볼(shot ball)이라는 강구를 고속으로 금속의 표면에 투사하여 금속의 표면을 해머링(hammering)하는 일종의 냉간 가공이다. 쇼트피닝 가공은 Fig. 1과 같이 쇼트볼이 금속 표면에 고속 충돌하면서 이때 쇼트볼의 운동에너지가 순간적으로 재료의 표면에 소성 변형(plastic deformation)을 주고 표면에서 이탈한다.

쇼트볼과 충돌 후 표면층에는 요철이 발생하게 된다. 이 층에는 늘어난 표면층을 늘어나기 전의 상태로 유지하려는 힘이 작용하게 되어 표면은 잔류 압축 응력, 내부는 인장 응력을 갖고 평형을 이루게 된다.

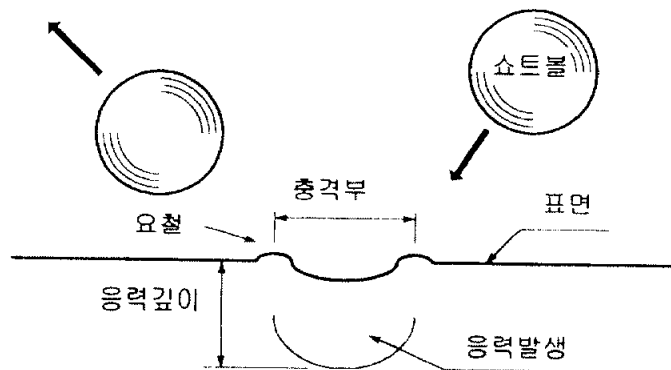


Fig. 1 Principle of controlled shot peening

Fig. 1와 같이 쇼트볼이 충돌후 압축응력이 잔류하게 되는데 응력의 크기는 크지만 응력은 가공 조건에 따라 약간에 차이는 있으며, 일반적으로 표면에서 깊이 0.1~0.5mm 정도에 분포되고 특수한 경우 0.8mm 까지 분포층을 형성시킬 수도 있다. 이러한 쇼트피닝 가공으로 재료의 표면에 압축잔류응력을 남게 함으로써 반복인장이 작용할 때 압축잔류응력은 점점 상쇄되어 압축잔류응력이 사라지게 될 때까지 피로 수명을 연장하게 된다.

쇼트피닝 가공에서 금속의 작은 볼의 충격에 의한 자국은 쇼트볼의 직경, 자국의 깊이, 체적의 함수로 형성된다. 소성 영역은 쇼트볼의 속도, 쇼트볼의 직경 그리고 쇼트피닝 가공되는 재료의 경도에 대한 함수의 관계를 갖는다. 쇼트피닝 가공에 의한 소성 영역의 변형층에 잔류응력의 발생과 더불어 경도의 변화를 가져온다. 이 변형층의 경도 분포에는 가공 경화(work hardening)와 가공 연화(work softening)를 나타낸다. 쇼트피닝 가공된 표면의 잔류 응력은 시험편의 두께에 영향을 받으며, 쇼트피닝 가공 조건에 대한 극한 두께에서는 감소하게 된다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

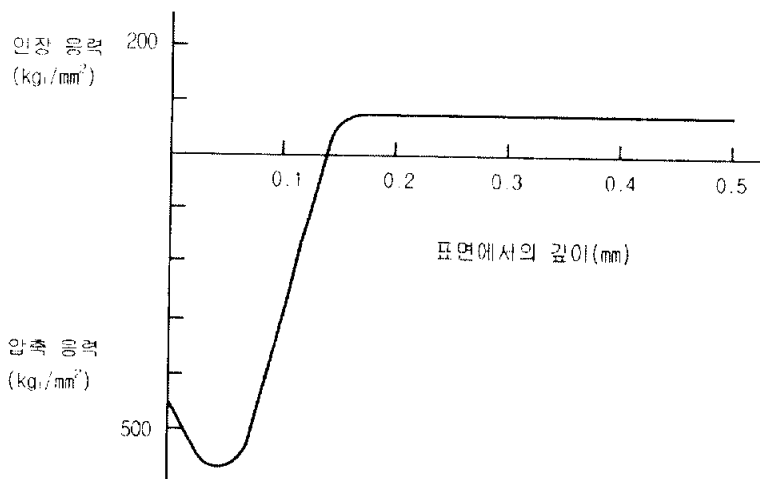


Fig. 2 Distribution of residual stress on surface layer

2.2 쇼트피닝의 효과

쇼트피닝은 쇼트볼이라는 작은 강구를 임펠러로 고속회전시켜 운동에너지를 증대하여 금속표면에 투사하는 것으로 금속표면을 강타하여 순간적으로 금속표면에 소성변형을 주고 이탈한다. 이 때 표면은 잔류압축응력이 발생하고, 내부는 잔류 인장응력이 생긴다. 이로 인한 재료의 표면은 항복점을 초과하여 영구변형을 일으킨다. 그 거동은 소성 변형에 의한 냉간 가공의 효과로 볼 수 있다. 쇼트볼이 충돌시에 잔류압축응력의 분포는 일반적으로 100~150 μm 에서 최고치를 나타내며 표면에 잔류 압축응력이 발생함으로써 인장이 반복적으로 작용하면, 압축응력이 점점 감소할 때까지 피로수명이 길어진다.

쇼트피닝가공 효과는 지극히 표면에만 잔류하는 압축응력에 의한 것이므로, 탄성한계의 증가나 인성의 증가는 없다. 또한 저싸이클 영역보다는 10^5 사이클이상의 반복되는 하중을 받는 부분에서 피로수명 연장에 효과적이다.

일반적으로 표면 가공법에는 침탄, 질화와 같은 열을 이용한 방법과 냉간압연, 그라인딩, 표면 연마와 같은 기계적인 표면 가공법이 있다. 쇼트피닝은 특수 가공으로서, 일반적인 표면 가공과 쇼트피닝 가공을 몇 가지 비교해본다면, 열처리법은 재료의 종류에 따라 구별해야 한다는 적용상의 제한이 있으며, 이와 반대로 기계적 처리법은 재료의 종류에 영향을 받지 않지만 재료의 기하학적인 형상에 제약을 받는다는 단점이 있다. 하지만 쇼트피닝 가공은 이런 적용상의 문제점들을 해결할 수 있으며, 피로 강도의 증가에도 크게 기여하고 있다. 이러한 쇼트피닝 가공에 대한 연구는 중요성이 인식되어 쇼트피닝 가공조건, 쇼트볼 선정, 압축잔류응력, 피로강도, 피로 수명등 다양한 연구가 진행되었으나, 산업체에서는 쇼트피닝 가공에 대한 체계적인 연구와 데이터가 극히 일부에 국한되어 있고 매우 미진한 상태이다.⁽⁵⁾

2.3 쇼트피닝의 강도

쇼트피닝의 강도의 평가기준은 일반적으로 알멘스트립(almen strip)의 굴곡 정도로 나타내며, 이 굴곡정도를 "Arc Height"라고 한다. 아크 하이트가 만들어지는 이유는 얇은 박판에 쇼트볼이 투사될 때 쇼트볼이 충격되는 부분에서는 표면층이 늘어날려는 성질을 가지고, 쇼트볼이 충격되지 않은 반대 면에서는 원상태를 유지하고 있으므로 표면과 반대면 간의 인장과 압축력으로 작용하게 되어 굽어지는 데 알멘스트립은 쇼트볼 투사면쪽으로 볼록하게 된다. 이러한 아크하이트의 굴곡정도를 쇼트피닝 강도를 나타내게 된다.

쇼트피닝가공 강도 조절을 위해서는 여러 가지 변수들에는 쇼트볼의 속도, 크기, 경도, 형상, 단위시간당의 투사량 그리고 투사각도 등이 있다. 이모든 것이 적절해야만 최적의 쇼트피닝 가공 강도를 유지할 수 있다.⁽⁷⁾

2.4 쇼트피닝기의 구조

1. 쇼트볼을 가속하여 운동 에너지를 만드는 쇼트볼 투사장치의 임펠러
2. 투사되었던 쇼트볼을 다시 사용하기 위한 쇼트볼 순환 장치
3. 마모와 파손으로 인한 쇼트볼을 선별하는 쇼트볼 선별 장치
4. 쇼트볼의 부족시 보충해 주는 쇼트볼 공급 장치
5. 가공물에 균일한 쇼트피닝 가공을 하기 위한 제품 이송 장치
6. 투사로 인한 쇼트볼의 흩어짐 방지를 위한 캐비닛
7. 쇼트피닝 가공시 제품의 스케일, 먼지 쇼트볼의 파쇄로 인한 분진 등을 제거하기 위한 집진장치
8. 생산 공정의 공정 관리를 위한 쇼트피닝기 제어용 컨트롤 패널

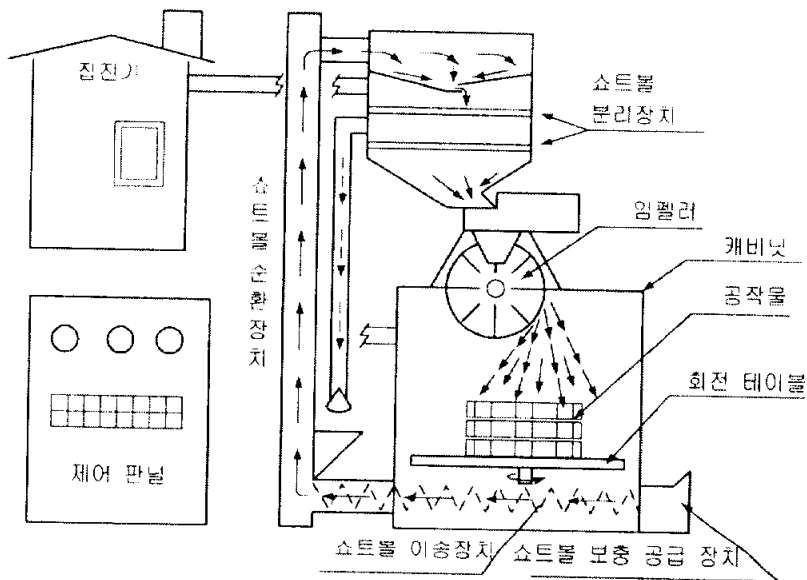


Fig. 3 The structure of shot peening machine

제 3 장 이론적 배경

3.1 피로균열의 파괴역학적 개념

파괴라는 이론적 현상은 미관적 조직이나 파괴기구의 영향을 강하게 받기 때문에 여러 가지 학문적 수법이 요구된다.

재료의 부재나 구조물을 연속체로 보고 파괴의 현상을 거시적인 입장에서 다루는 선형탄성파괴역학(LEFM : linear elastic fracture mechanics)은 균열 또는 예리한 노치를 갖는 부재 혹은 구조물의 강도나 변형을 선형탄성론으로부터 얻어진 결과를 기초로 하여 취급하는 분야의 하나이다⁽⁸⁾.

길이 $2a$ 인 판통 균열이 있는 무한판이 균일인장응력 σ 를 받고 있는 경우를 생각해 보면 균열 선단으로부터 거리 r 인 곳에 있는 요소 dx, dy 는 응력 σ_x, σ_y 및 τ_{xy} 등을 받는데 이들은 Fig. 4의 좌표계로서는 다음과 같이 표시할 수 있다⁽⁹⁾.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2} \theta \right] \\ \sigma_y &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2} \theta \right] \quad \text{-----}(1) \\ \tau_{xy} &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3}{2} \theta \\ \sigma_z &= 0 \text{ (plane stress)}\end{aligned}$$

파괴가 Mode I 에서 발생할 때 식 (1)에서 $\theta = 0$ 일 때 균열선단에서의 σ_y 의 분포는 $\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}}$ 가 되고 이를 Fig. 5에 표시하면 응력확대계수 K_I ⁽¹⁰⁾은

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad \text{-----}(2)$$

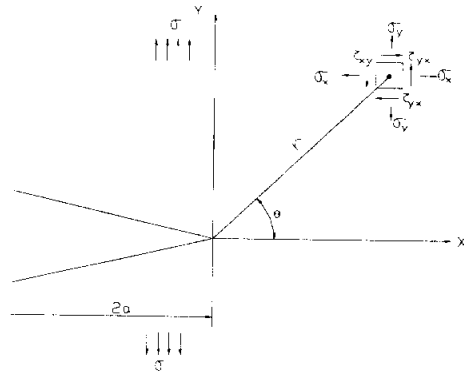


Fig. 4 The coordinate system of a crack in an infinite plate

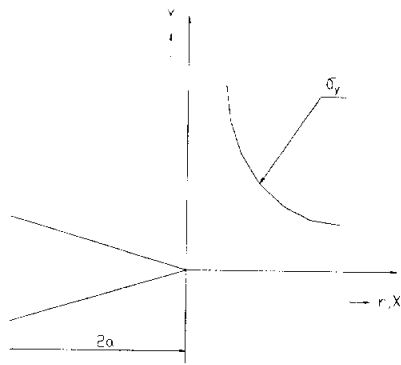


Fig. 5 Elastic stress at the crack tip

그러므로 식 (1)은 일반적으로 K_I 을 사용하여

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) \quad \text{-----}(3)$$

로 표시할 수 있다.

식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 균열 선단에서 응력의 크기 σ_y 는 K_I 에 의존함을 알 수 있고 균열 진전거동도 K_I 의 영향을 크게 받을 것임을 용이하게 단정할 수가 있다.

본 연구에서는 응력확대계수 K 의 이러한 성질을 이용하여 균열 길이에 대한 K 값을 제어하여 시험을 행하였다.

선형과괴역학은 균열 선단부근의 소성역의 크기가 작은 소규모항복상태에 운용이 되며 균열 선단부근의 소성역의 크기를 고려하는 경우 응력확대계수 K 는 보정이 필요하다.

탄성과 소성의 경계조건 즉, σ_y 를 항복강도 σ_{ys} 로 대치하면 $\theta=0$ 에서 식 (3)은

$$\sigma_{ys} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_p^*}} \quad \text{-----}(4)$$

로 표시되며 여기서 r_p^* 는 이론상의 소성역의 크기이다.

일반적으로 역학적 평형조건으로부터 실제의 소성역의 크기 r_p 는 $r_p = 2r_p^*$ 가 됨이 밝혀져 있다(Fig. 6). 즉,

$$r_p^* = \frac{1}{2\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_{ys}^2} \text{ (plane stress)} \quad \text{-----}(5)$$

로 표시할 수 있으며

$$r_p = \frac{1}{\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_{ys}^2} \text{ (plane stress)} \quad \text{-----}(6)$$

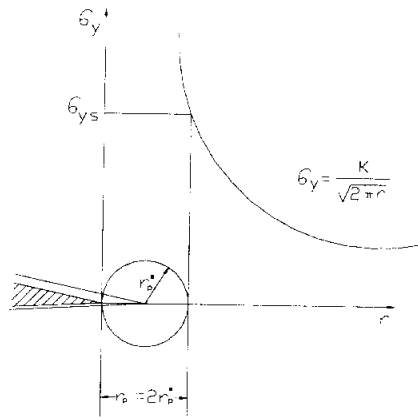


Fig. 6 Plastic zone at the crack tip

소성역의 반경 r_p^* 를 고려한 균열 길이 즉 $a + r_p^*$ 를 유효 균열 길이라 하며 이것을 고려한 응력확대계수 K 를 유효응력확대계수 K_{eff} 라고 한다. 식 (5)를 식 (2)에 대입시키면

$$K_{eff} = \sigma \sqrt{\pi \left[a + \frac{1}{2\pi} (K_1^2 / \sigma_{ys}^2) \right]} \quad \text{-----}(7)$$

이 되며 이것을 다시 정리하면

$$K_{eff} = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\left[1 - \frac{1}{2} (\sigma / \sigma_{ys})^2 \right]^{1/2}} \quad \text{-----}(8)$$

로 표시된다.

3.2 피로균열 진전거동에 있어서 파괴역학의 적용

피로에 대하여 파괴역학의 본격적인 적용은 1960년대부터이며, 파괴역학적 입장에서 정리한 피로균열진전속도에 관한 실험법칙과 이론은 극히 다양하다.

그 예로서 Liu에 의하여 $da/dN = Ba$ 와 Frost와 Dugdale에 의한 $d(2a)/dN = Const$ 및 McEvily에 의한 $d(2a)/dN = f(\sigma_0)$ 등을 들 수 있으나, Irwin의 응력확대계수 K 가 균열선단에서의 응력의 크기를 특성지워주는 Parameter이므로 K 의 함수로서 균열 진전속도를 나타냄이 가장 적절하리라는 추측이 간다. 즉 K_{max} , K_{min} , ΔK 및 K_m 등의 함수로서 주어지는 양은, 예컨대 균열진전속도와 밀접한 관계가 있어야 한다.

지금 일정진폭의 반복하중을 작용시켰을 경우 응력확대계수 K 에 대하여 살펴보면 반복하중회수(N)의 증가에 따라 K 가 변화하며 즉, 최대응력확대계수 K_{max} , 최소응력확대계수 K_{min} , 응력확대계수폭 $\Delta K (= K_{max} - K_{min})$ 및 평균응력확대계수 $K_m \left\{ = \frac{1}{2}(K_{max} + K_{min}) \right\}$ 은 균열 진전에 따라 변화한다. 즉,

$$da/dN = f_1(\Delta K, R)$$

$$da/dN = f_2(K_{max}, R) \quad \text{-----}(9)$$

$$da/dN = f_3(\Delta K, K_{max})$$

여기서 R 은 응력비(stress ratio)이며

$2a$: 균열 의 길이

f_i : 작용응력의 함수 ($i = 1, 2, 3$)

σ_0 : 균열 선단에서의 응력

N : 하중반복회수

균열 진전속도 da/dN 을 응력확대계수 K 로서 표시하면 다음과 같은 특징이 있다.

첫째로, 서로 다른 균열 진전특성을 나타내는 각종 시험편의 da/dN 을 K 로 정리하면, 동일 선상에 오게 된다.

둘째로, 높은 응력상태하에서 작은 균열이나 낮은 응력하에서의 긴 균열에 상관없이 K 가 같으면 균열 진전속도 da/dN 가 일정하게 된다.

셋째로, 균열 진전속도 da/dN 와 응력확대계수폭 ΔK 를 양 대수좌표로 표시하면 3단계구간이 나타나는데 균열의 안정성장구간 즉 2단계구간 선형영역에 있어서는 $\log \Delta K$ 와 $\log(da/dN)$ 의 직선관계를 나타내는

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad \text{-----}(10)$$

의 식이 일반적으로 성립하며, 여기서 C 와 m 은 재료상수이다^{(13)~(16)}.

이 식은 각종 금속재료외에 고분자재료나 K 의 적용이 문제가 되는 고연성재료의 고 ΔK 영역에서도, 각종 균열에 대하여 일반적으로 성립한다. Paris와 Erdogan은 직선의 경사 즉 식 (10)에서 $m = 4$ 가 넓은 영역에 걸쳐 특성이 잘 맞는 이유에서 다음과 같은 사승식을 제시하였다.

$$da/dN = C(\Delta K)^4 \quad \text{-----}(11)$$

그러나 많은 시험결과를 재료에 따라서 단 하나의 값으로 정의하는 것은 어렵다는 것이 밝혀졌다.

즉, m 은 0.4~8.0 정도의 넓은 값을 취하며 C 도 $10^{-5} \sim 10^{-18}$ 정도의 값을 가짐을 지적하였다.

3.3 피로균열 진전거동

균열선단에서 응력-변형률이 금속의 거동을 지배한다는 피로역학의 개념은 이미 존재해 있는 균열로부터 해석한다는 의미에서는 피로파괴 성장과 같다.

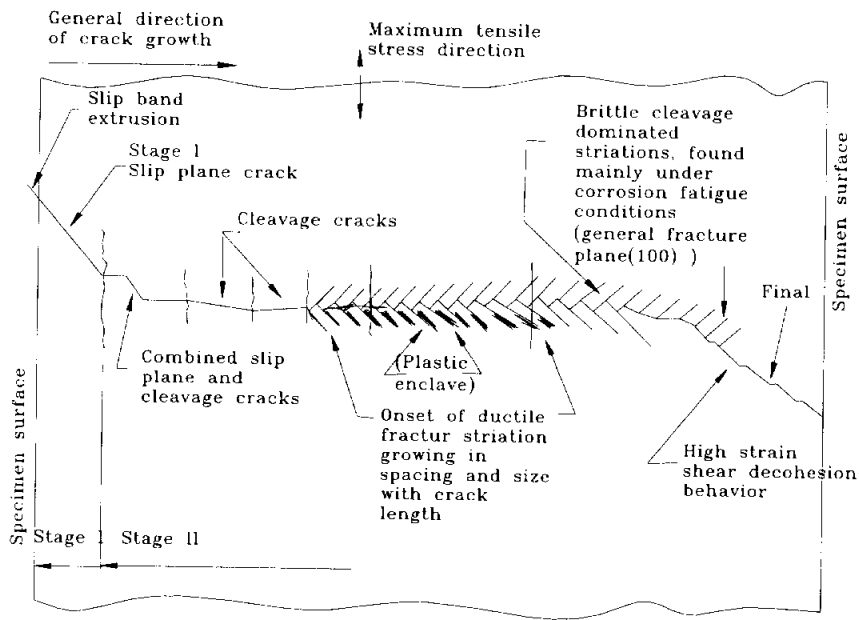


Fig. 7 Schematic illustration of the various modes of fatigue fracture

여기서 균열선단에서의 응력-변형률의 성질은 응력확대계수 (stress intensity factor) K 로 표시되고, 반복 응력확대계수와 피로균열진전속도 와도 관계가 있다.

한편 균열의 성장률을 표시하면 Fig. 7와 같이 3개의 분리된 영역으로 나타난다.

이처럼 균열의 성장률을 나타냄으로서 주어진 하중에서 어느 정도 크기의 균열까지는 안전한가 또는 주어진 균열크기에 어느 하중까지는 알

마동안 안전한가 등 여러 가지 공학적 중요한 문제를 해결하는데 이용할 수 있다.

여기서 C 와 m 은 재료상수이고 보통 m 은 0.5~0.8의 넓은 범위에서 변화한다. 그러나 식 (12)는 실험재료를 총괄적으로는 나타내지 못한다. 실제로 Fig. 5에서 da/dN 와 ΔK 의 관계는 S형 모양을 갖거나 부분적으로 다른 기울기를 가진다.

ΔK 범위의 최상부 끝을 벗어남은 da/dN 가 유한으로 되어야 하는 균열이 임계값에 도달하는 것일 때 예상될 수 있다. 최종파괴는 사이클 동안에 응력확대계수 K_{Ic} 에 도달한 상태에서 일어난다.

최대응력확대계수 K_{max} 및 응력비 R 의 영향도 고려해 넣으면 다음과 같이 일반화된다. 즉,

$$\frac{da}{dN} = f_1(K_{max}, \Delta K) = f_2(R, \Delta K) \quad \text{-----}(12)$$

여기서 응력비 $R = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$ 이다.

3.4 응력 확대계수범위의 결정

CT시험편에 대하여 응력 확대계수 범위 ΔK 는 다음 식으로 계산한다.

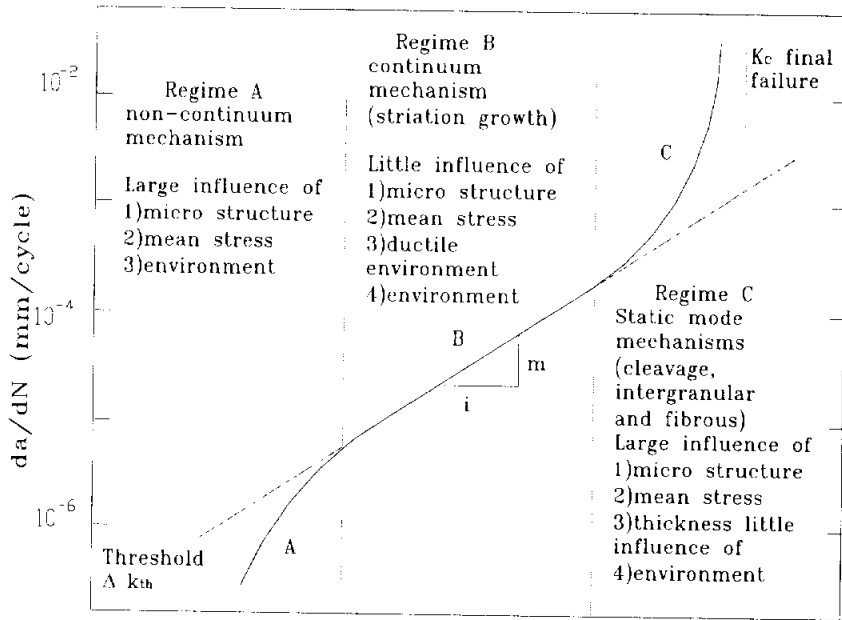


Fig. 8 Primary fracture mechanisms with variation of fatigue crack propagation rate da/dN with stress intensity factor range ΔK

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad \text{-----}(13)$$

여기서 $\alpha = a/W$, 위 식은 $a/W \geq 0.2$ 에 대하여 유효하다.

CCT시험편에 대하여 ΔK 는 다음 식으로 계산한다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \sqrt{\frac{\pi\alpha}{2W} \sec \frac{\pi\alpha}{2}} \quad \text{-----}(14)$$

여기서 $\alpha = 2a/W$ 위식은 $2a/W < 0.95$ 에 대하여 유효하다. 또 전술한 대로 CT시험편은 인장-압축부하에 대하여 권장하지 않으나 CCT시험편에 대하여 그 제한은 없다. 따라서 CCT시험편에 대하여 하중범위 ΔP 는 다음 식으로 정의된다.

$$\Delta P = \begin{cases} P_{\max} - P_{\min} & (R > 0) \\ P_{\max} & (R \leq 0) \end{cases} \text{-----}(15)$$

특히 응력비 R 에 관계없이 $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$ 이라 정의해 $da/dN - \Delta K$ 관계를 표시한 보고가 많다. $R < 0$ 의 결과를 조사하는 경우 주의를 요한다. 선형탄성 파괴역학의 범위내에서 $\Delta P = P_{\max}$ 이라 하면 $R \leq 0$ 의 R 이 $da/dN - \Delta K$ 관계에 영향을 미치는 일은 없다.

3.5 균열진전의 하한계 측정

10^{-8} m/cycle 이하에서 균열진전의 하한계 ΔK_{th} 에 이르는 da/dN 을 상술한 정하중진폭시험으로 측정하는 경우, 피로 예균열 도입때의 K_{max} 및 시험개시때의 K_{max} 또는 ΔK 가 현저한 영향을 미친다. 진(眞)의 $da/dN - \Delta K$ 관계는 하중이력이 무시되는 이상 균열에 대하여 시험개시때의 ΔK_{th} 와 거의 같은 ΔK 를 준 경우에만 얻어진다. 이것을 달성하는 것은 용이하지 않다. 따라서 하중 점감시험이 일반적으로 행하여지고 있다. ASTM에서는 E647-81의 개정예 이어 10^{-8} m/cycle의 da/dN 측정을 포함하여 ‘정상상태의 피로균열 진전속도의 시험방법’을 검토중이다. 아래에 그것을 소개한다^{(11),(12),(15),(19)}.

R일정의 경우 K구배는 다음에 의해 정의된다.

$$\begin{aligned} C &\equiv \frac{1}{K} \frac{dK}{da} \equiv \frac{1}{K_{max}} \frac{dK_{max}}{da} \\ &\equiv \frac{1}{K_{min}} \frac{dK_{min}}{da} \equiv \frac{1}{\Delta K} \frac{d\Delta K}{da} \end{aligned} \quad \text{-----}(16)$$

K 증가시험은 C가 정(正), K감소 시험은 C가 부(負)가 된다. 하중은 계단상으로 감소시켜도 연속적으로 감소시켜도 좋다. C의 값으로 다음이 권장된다.

$$C \geq -0.08 \text{ mm}^{-1} \quad \text{-----}(17)$$

하중을 계단상으로 감소시키는 경우에도 Fig. 9을 참조하여 이것에 준한다. 단 P_{max} 의 감소는 10%이하로 하여 감소후에

$$\Delta a \geq 0.50 \text{ mm} \quad \text{-----}(18)$$

의 균열길이 증분이 확인이 권장된다.

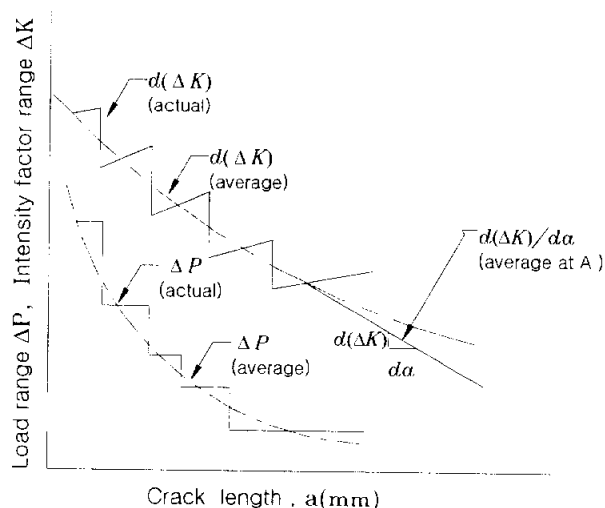


Fig. 9 Typical K decreasing test by stepped load

$da/dN = 10^{-9} \sim 10^{-10}$ m/cycle의 범위를 등분할한 5점 이상의 테이터를 사용하여 $da/dN - \Delta K$ 관계를 양대수좌표상에 최적 직선으로 근사한다. 이 최적직선에서 $da/dN = 10^{-8}$ m/cycle 에 대응하는 ΔK 를 결정하여 ΔK_{th} 로 한다.

상기의 시험방법에 대한 비판이 적지 않다. 우선 상기의 C 의 조건을 만족하지 않는 경우에도 ($C \geq -1 \text{ mm}^{-1}$), C 는 ΔK_{th} 에 영향을 미치지 않는다. 또 통상의 재료 및 시험편 치수에 대하여 상기의 Δa 의 조건을 만족하기에는 매우 어렵다. $da/dN = 10^{-9} \sim 10^{-10}$ m/cycle의 범위를 등분할한 5점 이상의 테이터를 얻기 위해 최저 5×10^7 회의 하중 반복이 필요하게 되는 것은 명심해야 한다.

또한 K 점감시험에 진(眞)의 ΔK_{th} 가 얻어지는가 아닌가에 대해서도 의문이 있다. 아래에서 설명한 것과 같이 대기중에서 ΔK_{th} 는 프레팅(fretting)산화물 유기균열개구에 지배되어 있다. 프레팅(fretting) 산화물의 생성은 하중, 환경조건에 강하게 영향되며 ΔK_{th} 의 평가와 시험방법의 검토는 금후의 과제로서 아직 남아 있다.

제 4 장 실험방법 및 장치

4.1 쇼트피닝가공

쇼트 피닝가공은 스프링 제조회사인 대원강업(주)가 보유하고 있는 코일스프링 제조용 쇼트 피닝기와 엔진밸브 스프링 제조용 쇼트 피닝기를 사용하였으며, 그 조건은 Table 1과 같다. Fig. 10는 CT 시험편의 표면에 쇼트피닝가공을 위한 치구로서 쇼트피닝가공기의 회전하는 work table에 놓여진다.⁽²⁰⁾

4.2 압축잔류응력측정

금속재료는 작은 결정체의 집합체이며 각 결정체는 조직적으로 배열된 원자로 구성되어 있다. 그러나 각각의 결정체는 불규칙한 방향을 갖고 있어 재료에 응력이 가해지면 그 재료의 탄성한계 내에서 응력의 크기에 비례하여 결정의 원자간 거리가 균일하게 벌어지던가 또는 줄어든다. 따라서 그와 같은 현상에 X-선을 입사시켜 회절되어 나오는 원자를 이용해 결정면간 폭을 측정하여 응력을 산출하는 것이 X-선 잔류응력측정법이다.⁽²¹⁾

쇼트 피닝된 시험편 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기 (Fig. 11 RIGAKU - MSF2M)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20 μ m 단위로 연마 해가면서 Table 2 와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였다.⁽²²⁾

Table 1 Conditions of Shot-peening

Condition	Shot- Peening
Impeller Dia	490 mm
Blades Width /Q'ty	90mm/6 pcs
r.p.m	2200 r.p.m
Shot Ball Dia.	0.8 mm
Time	24 sec.
Arc Height (Alman A-Stip)	0.375 mm
Coverage	85 %

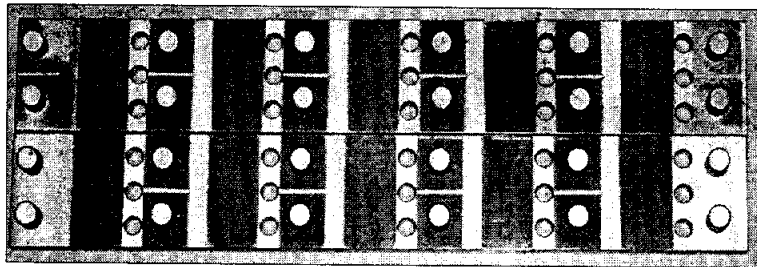


Fig. 10 Fixture of specimen

Table 2 Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffraction		Condition
X-Ray Source	Taget	Cr-V
	Voltage	30 KV
	Current	10 mA
Ψ	$0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$	
2θ	$140^{\circ} \sim 170^{\circ}$	
Diffraction	Scintillation Counter	

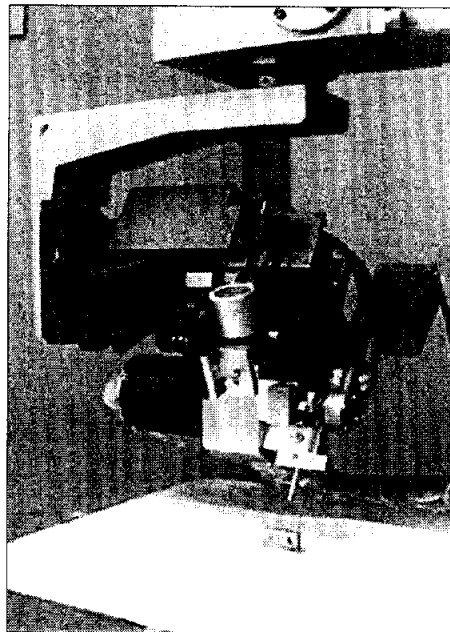


Fig. 11 Photograph of X-Ray diffraction machine

4.3. 피로균열진전실험

4.3.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드 상태의 압연 강재 스프링강 SUP9이며, 시편의 화학적 성분은 Table 3에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 4와 같다.

Fig. 12는 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재에서 산소 절단기를 이용, L-T방위로 채취하여 압연방향이 하중방향이 되게 하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93(1993)의 기준에 따라 외형가공은 밀링으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기(wire cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈반지름 0.1mm가 되게 가공하였다.⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

그리고 피로균열진전의 예상경로는 그 관찰을 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며, 25℃ 정도의 온도환경과 항복강도이내의 응력범위에서 ASTM(1993) E647-93 규정에 의거 3mm의 피로 예균열을 주었다.⁽¹⁸⁾

4.3.2 피로시험기

Fig. 13은 본 실험에 사용된 전기 유압식 피로시험기(INSTRON 8501, 1000KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 콘트롤하였다. 균열길이 측정은 시편에 COD 클립 게이지를 부착하여 Compliance법을 사용하였다.

Table 3 Chemical composition (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88

Table 4 Mechanical properties

Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (H _{RB})
1226	9	2.75

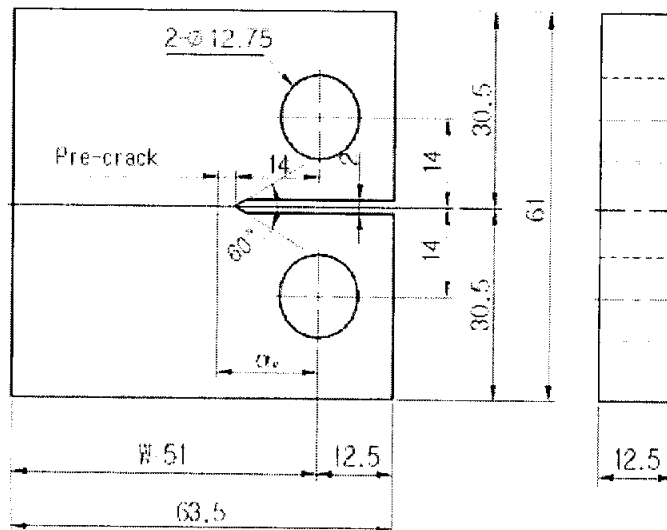


Fig. 12 Configuration of CT-specimen (unit:mm)



Fig. 13 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

4.3.3 피로균열진전시험

실험은 서보전기 유압식 피로시험기를 사용하여 하중감소 제어방식으로 주파수 10Hz, 정현파형으로 하였다.

고온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착하였으며, 온도유지는 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였고 응력비 $R=0.3$ 10Hz, 실험온도는 25°C 와 100°C , 150°C , 180°C 의 고온으로 하였다.

실험해석을 하기 위해 응력확대계수 ΔK 는

$$\Delta K = \begin{cases} K_{\max} - K_{\min} & (K_{\min} > 0) \\ K_{\max} & (K_{\min} \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

및 응력비

$$R = K_{\min} / K_{\max} \quad (2)$$

의 함수가 된다. 여기서 R의 영향을 제외하면 특정의 ΔK 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 Paris 법칙인

$$da / dN = C (\Delta K)^m \quad (3)$$

으로 나타나고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변한다. 여기서 C와 m은 재료상수로서 그 값은 동일재료, 동일환경 구조물 등의 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다. 응력확대계수 범위 ΔK 는 다음 식에 의해서 나타낸다. 본 시험에서는 ASTM (1997) E647-95a 규정에 의거 ΔK 콘트롤에 의한 K 감소방식을 이용하였는데 그 감소조건은 다음과 같다.

ΔK 의 기울기는⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁸⁾

$$C_g = \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{d\Delta K}{da} \geq 0.08 \text{ mm}^{-1} \quad (4)$$

da/dN의 측정범위 $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$

4.4 유한요소해석모델

CT시험편 양쪽표면에 존재하는 압축잔류응력이 피로균열진전전과거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 실험조건과 같이 경계조건을 주어 각각의 경우의 시험편에 발생하는 응력의 변화를 알아보았다. 실험에 사용된 시험편의 형상을 유한요소 상용 코드를 이용하여 Fig. 14과 같이 CT시험편을 하중/형상이 대칭이므로 해석대상의 1/2을 모델링 하였다.⁽²³⁾

유한요소모델(Finite element model)에는 8절점의 솔리드 요소(8-node 3D structural element)를 사용하였다. Table 5에 모델의 Simulation data와 재료의 물성치를 나타냈다.

유한요소법에 의해 계산된 결과는 모델링을 구성하는 Mesh의 형태와 크기, 그리고 비율에 따라 많은 차이를 나타낸다. 유한요소법에서 촘촘한 mesh가 항상 정확한 결과를 계산하지 못한다. 오히려 계산결과가 발산하여 오차범위가 더 커질수도 있을뿐만아니라 계산과정이 지나치게 오래 수행되는 단점이 발생된다. 반면에 지나치게 성글게 mesh를 만들면 계산과정은 단축되지만 필요한 지점에서의 계산결과를 얻지 못할 수 있다. 이 때문에 적합한 mesh를 결정하는 것이 중요하다.⁽²⁴⁾

Table 5 Simulation data for FEM simulation and material property data

	Simulation data
Element mode	3-D structural solid element (8-node)
FEM program	ANSYS Ver 5.6
Node	3858
Element	2870
	Material property data
Young' modulus	215800 MPa
Poisson's ratio	0.39

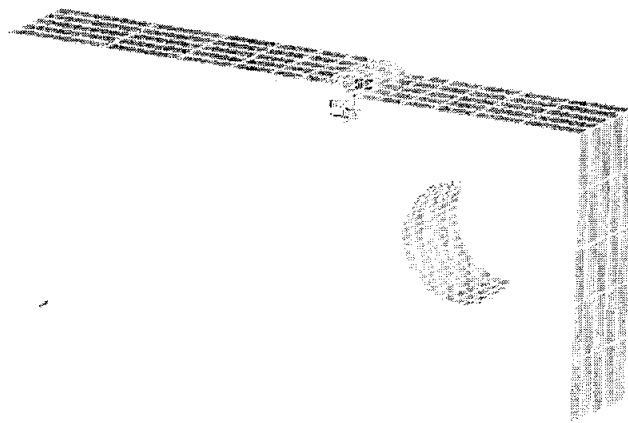


Fig. 14 Finite element half model of CT specimen

제 5장 실험결과 및 고찰

5.1 피로크랙전파 특성

5.1.1 unpeened재와 shot peened재의 피로크랙전파특성

Fig. 15 은 응력확대계수 범위 ΔK 와 피로균열진전속도 da/dN 과의 관계를 나타낸 그래프이다.

Fig. 15 에서 볼수 있듯이 unpeened 재의 경우 $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계는 $2.5 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 까지 성립되었고, Shot peened 재의 경우는 $4.3 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하였다. shot peened재 경우 시험편 양쪽 표면에 형성된 압축잔류응력에 의하여 인장압축반복 작용시 균열선단 소성영역내의 소성변형에 대한 구속력이 피로균열진전에 작용함으로서 피로균열진전속도 da/dN 지연에 영향을 미친 것으로 생각된다.

이 영향으로 인하여 shot peened재가 unpeened재에 비해 하한계응력 확대계수 ΔK_{th} 가 상승하는 것으로 나타났다.

5.1.2 고온환경에서의 피로크랙전파특성

Fig. 16를 보면 온도의 상승과 더불어 $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계는 저하되어 상온에서 $4.3 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$, 100°C 의 경우가 $2.3 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$, 150°C 의 경우 $2 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$, 180°C 의 경우 $1.7 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하였다.

이를 보면 온도의 증가에 따라 속도가 가속하여 양대수 직선 성립구간이 저하하는 경향으로 나타났다. 이 영향으로 인하여 하한계응력 확대계수 ΔK_{th} 가 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 17에서 Fig. 19는 각 온도와 unpeened재, shotpeened재를 응력확대계수 범위 ΔK 와 피로균열진전속도 da/dN 과의 관계를 비교하여 나타낸 그래프이다.

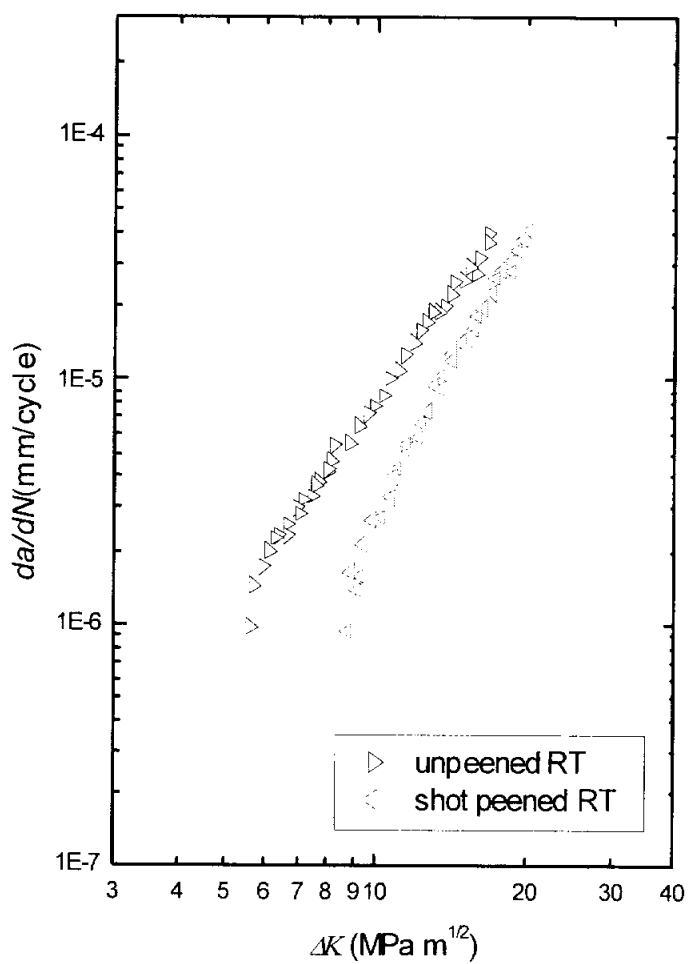


Fig. 15 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

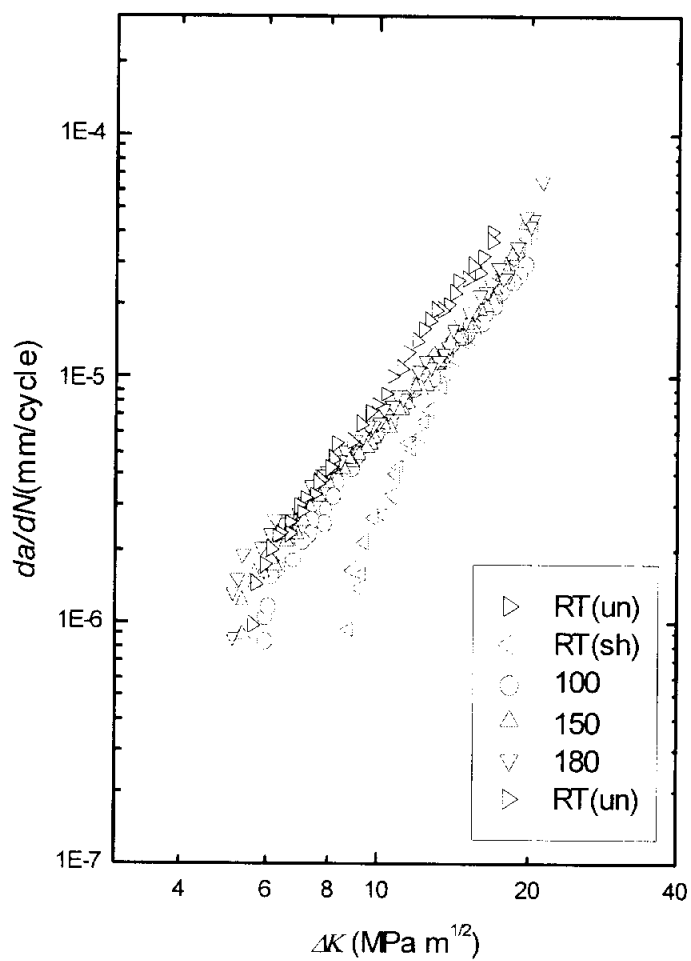


Fig. 16 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

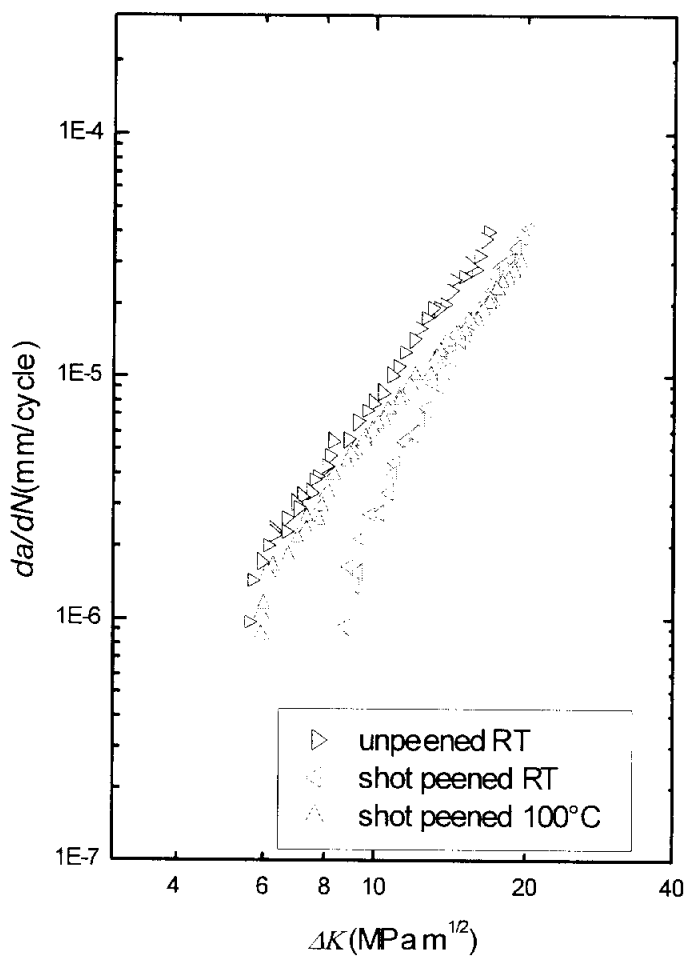


Fig. 17 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

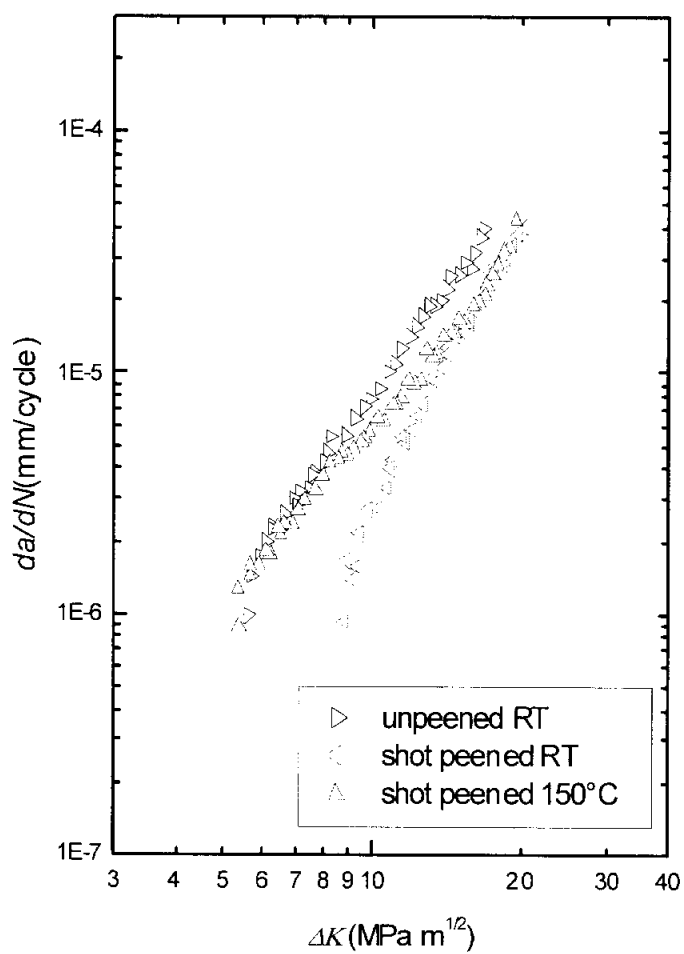


Fig. 18 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

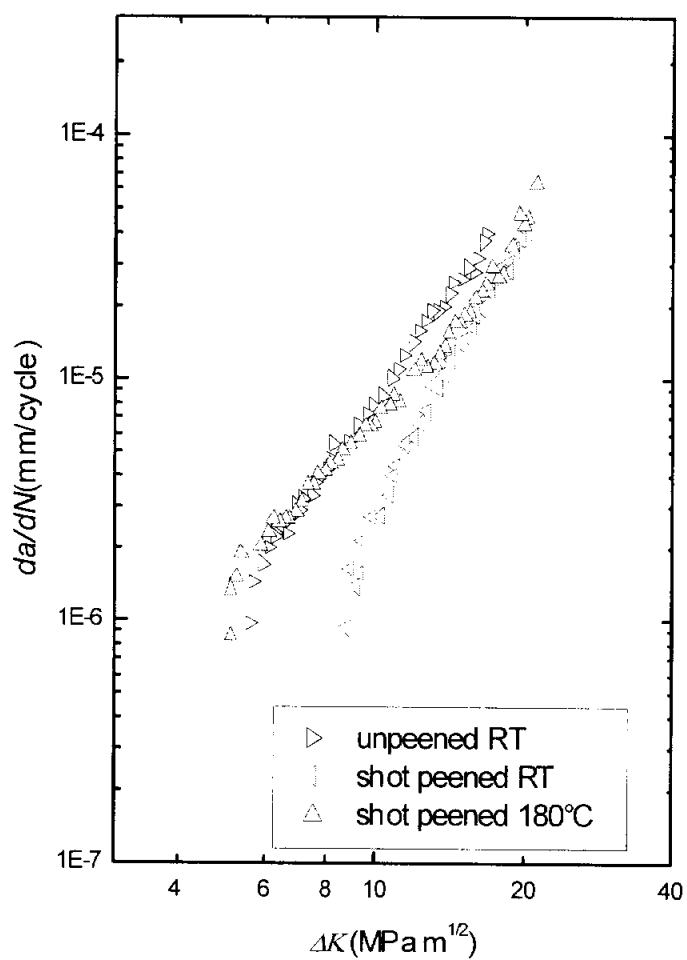


Fig. 19 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

5.2 하한계응력확대계수

스프링강 SUP9에 대하여 RT, 100℃, 150℃, 180℃의 온도에서 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 의 관계를 Fig. 20 나타내었다. 그리고 Table 6에 그 값을 나타내었다.

Table 6에서 온도가 고온으로 상승할수록 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 100℃ 이상은 급하게 감소함을 나타내었다. 상온에 비하여 온도가 상승할수록 하한계응력확대계수 ΔK_{th} 가 감소함을 알수 있었다.

5.3 온도변화에 따른 재료상수 C , m 관계

피로균열진전과정의 제 2단계 영역에 있어서 da/dN - ΔK 는 양대수 선도 상에서 직선 관계로 나타났고, 이것을 paris식 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에 대입하여, 각 온도에 대한 균열진전지수 m 및 재료상수 C 를 Table 7에 정리하였고, Fig. 21 및 Fig. 22에 그 결과를 나타내었다.

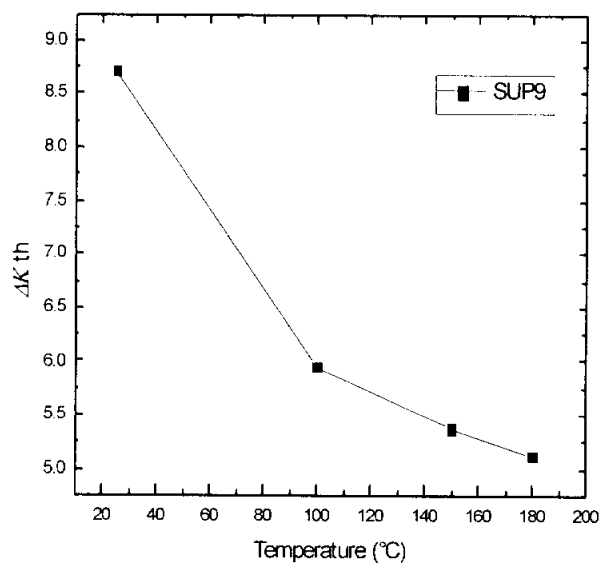


Fig. 20 Effect of Threshold stress intensity factor and temperature(°C)

Table 6 The value of fatigue crack growth ΔK_{th} (Mpa $\sqrt{m}$)

Temperature	RT(unp)	RT(shp)	100°C	150°C	180°C
Growth Threshold	5.61	8.08	5.79	5.44	5.06

Table 7 Experimental constants by $da/dN=C(\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth

Tem.	ΔK Range (MPa $\sqrt{m}$)	da/dN Range (mm/cycle)	m	C
RT(un)	$7.42 \leq \Delta K \leq 17.91$	$4.305 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 4.057 \times 10^{-5}$	2.592	2.21×10^{-8}
RT(sh)	$10.95 \leq \Delta K \leq 20.91$	$1.131 \times 10^{-5} \leq da/dN \leq 5.701 \times 10^{-5}$	3.774	6.93×10^{-10}
100°C	$10.49 \leq \Delta K \leq 21.51$	$8.762 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.721 \times 10^{-5}$	2.607	1.5×10^{-8}
150°C	$11.01 \leq \Delta K \leq 23.06$	$7.051 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.022 \times 10^{-5}$	2.44	2.01×10^{-8}
180°C	$11.82 \leq \Delta K \leq 21.37$	$6.351 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.031 \times 10^{-5}$	2.36	2.4×10^{-8}

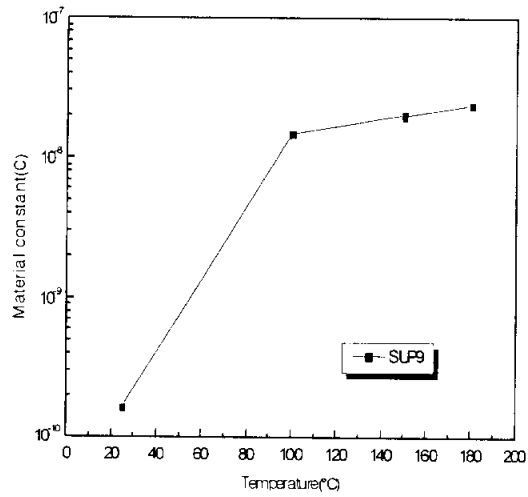


Fig. 21 Relation between material constant C and Temperature(°C)

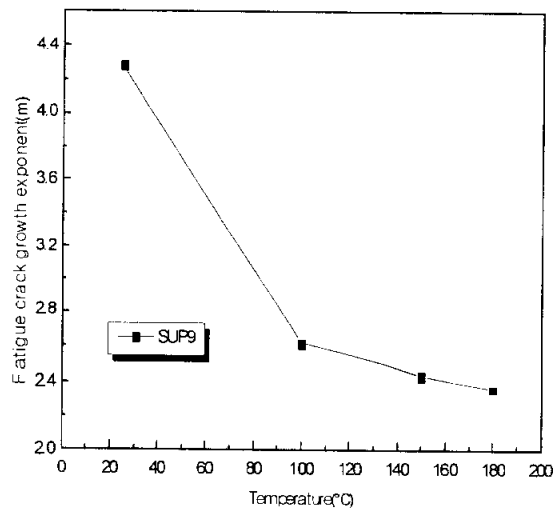


Fig. 22 Relation between fatigue crack growth exponent m and Temperature(°C)

5.4 크랙길이와 사이클수의 관계

Fig.23은 쇼트피닝가공하지 않는 unpeened 재와 쇼트피닝가공재의 크랙길이 a 와 반복 사이클 수(N)의 관계를 나타내며, 크랙길이 28mm지점에서 하중가진횟수는 unpeened 재의 경우 $N=619.824$ 회, 쇼트피닝의 경우 $N=1,222,120$ 회로서 약 2배의 피로수명향상이 있었다.

또한, RT, 100℃, 150℃ 및 180℃에서 시험한 각 온도에서의 크랙길이 a 와 반복 사이클 수(N)의 관계를 Fig. 24에 나타내었다. Fig. 24에서 각 온도에 있어서 크랙길이 19mm에서 22mm까지는 반복횟수 증가가 크게 나타나지 않고 완만한 형태를 보였다. 그러나 크랙길이 22mm이상부터는 반복횟수의 증가가 급격하게 증가함을 보였다. 각 온도에 있어서 동일한 경향을 나타내었다.

그리고 상온보다는 온도가 상승할수록 크랙길이가 증가함에 따라 반복횟수가 감소함을 나타냈고 전체적으로 동일한 경향을 나타내었다. 이는 상온에 비해 고온에서의 잔류응력의 소멸현상으로 인한 균열진전의 억제력의 감소를 나타내며 온도영향에 의한 수명의 감소로 보아진다.

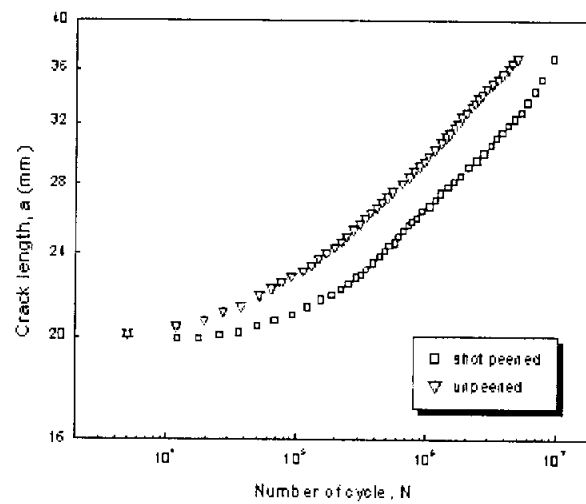


Fig. 23 Relations between crack length and number of cycle

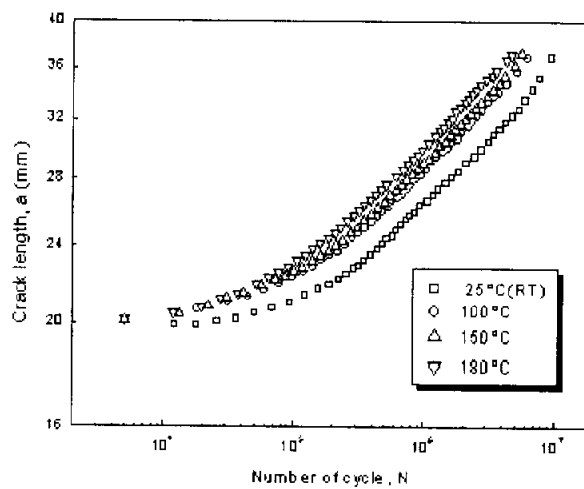
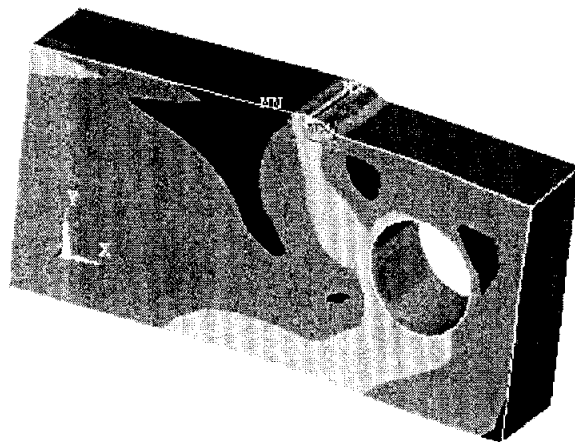


Fig. 24 Relations between crack length and number of cycle

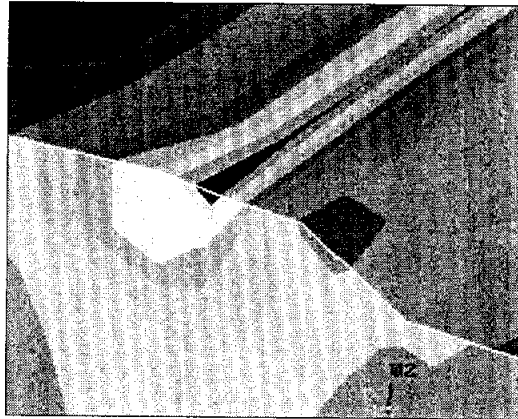
5.5 유한요소해석결과

Fig. 25는 유한요소해석 결과를 전체모델과 unpeened와 shot peened의 최대응력부근의 응력분포를 나타내고있다. 그림(a)에서 볼수 있듯이 균열선단부근의 응력분포가 집중되어 있고, 그림(b)와 (c)를 비교하여 보면 시험편 표면에 압축잔류응력을 부가된 그림(c)는 unpeened재 그림(b) 표면에서의 응력분포와 달리 시험편 표면에서의 응력집중이 감소되어졌음을 볼수 있다. 이는 CT시험편 양 표면에 존재하는 압축잔류응력이 시험편 표면에 발생하는 응력을 저하시키는 역할을 한것으로, 이것은 시험편 균열의 개폐의 억지력으로 작용되어 피로균열진전전파거동 및 피로수명에 영향을 미치는 것으로 생각된다.⁽²²⁾

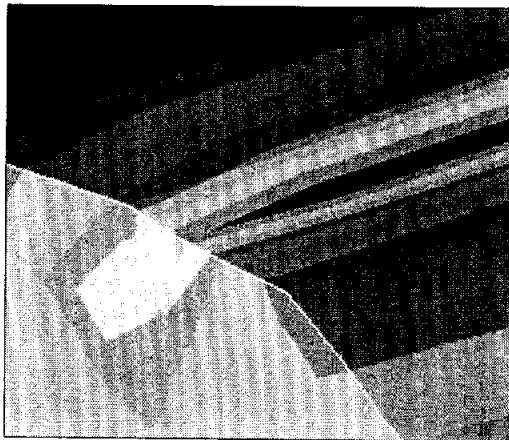
Fig. 26은 유한요소법에의한 해석의 결과치로서 unpeened 모델과 CT 시험편 양쪽 표면에 압축잔류응력을 부여하고 해석한 shot peened 모델과의 최대응력값을 비교하여 나타내고 있다. Fig. 26에서 볼 수 있듯이 unpeened재와 shot peened재의 최대응력값은 shot peened재가 감소하였으며, 또한 각 온도에 따른 응력결과값은 온도가 상승할수록 압축 잔류응력의 감소로 인하여 시험편에 발생하는 응력값이 온도의 상승에 따라 조금씩 증가하는 경향을 보여주고 있다.



(a) stress distribution for the total model



(b) stress distribution around the area with maximum stress of unpeened result



(c) stress distribution around the area with maximum stress of shot peened result

Fig. 25 Finite element method result

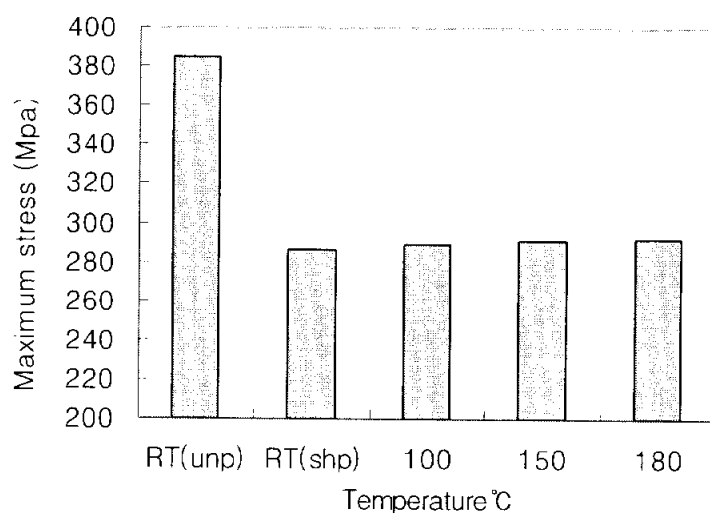


Fig. 26 Finite element analysis result

5.6 압축잔류응력의 분포

Fig. 27은 쇼트피닝 쇼트볼을 시험편 표면에 투사하여 얻어진 압축잔류응력치를 깊이별로 조사한 그래프로서 상온에서의 압축잔류응력치와 각각의 온도의 환경에서 피로균열진전 시험후 시험편에 남아있는 잔류응력치를 비교하여 보여주고 있다.

온도가 상승할수록 상온에 비해 잔류응력이 낮게 나타났으며, 압축잔류응력은 상온환경에 비하여 고온환경 100℃에서 6%, 150℃에서 12%, 180℃에서 14%정도 소멸되었다. 이는 고온의 온도환경에 의한 시험편 표면의 잔류응력이 소멸되었음을 알수 있었다.

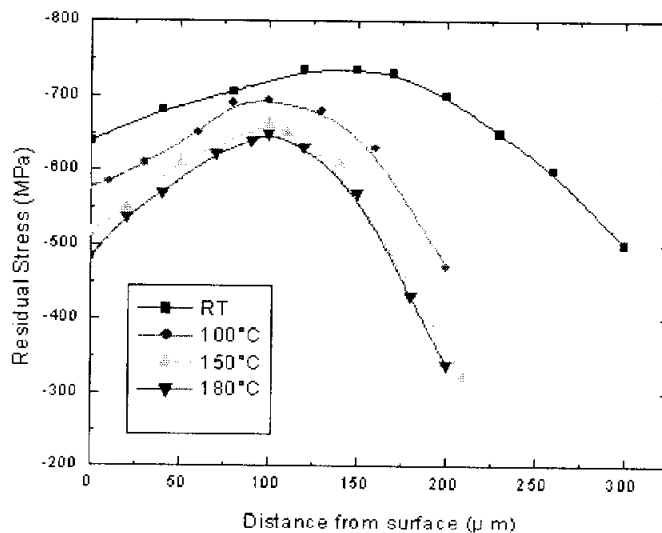
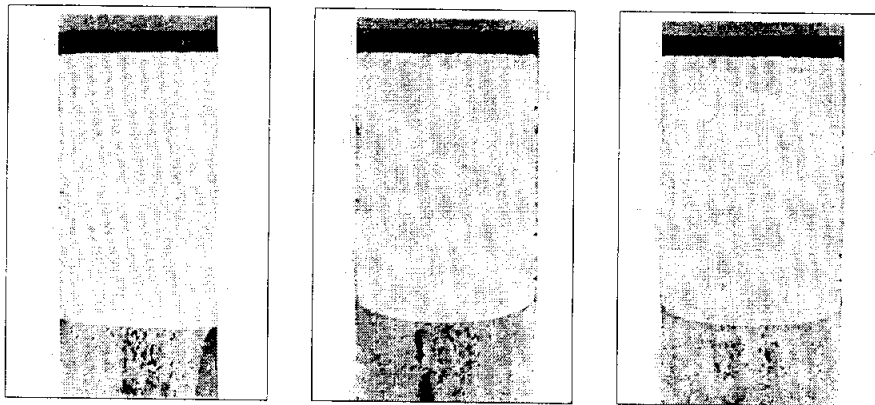


Fig. 27 Compressive Residual Stress Distributions
Produced by Shot-Peening

5.7 시험편의 파면양상

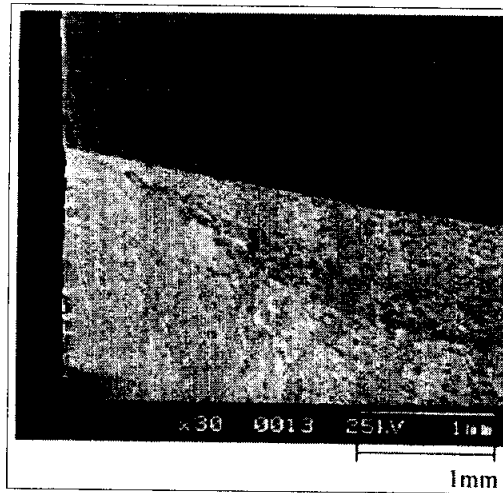
Fig. 28는 피로크랙진전 파면의 실물사진이고 Fig. 29는 unpeened (a) 과 쇼트피닝된 shot peened (b), 그리고 180℃ 시험후의 시험편(c)의 피로크랙진전파면에 대한 시험편 표면부의 30배 확대사진으로서 파면의 양상이 현저한 차이를 보여주고 있다.

쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전과정에서 균열선단 소성영역을 구속하므로써 피로균열진전이 지연되는 현상이 관찰되었고, Fig. 29 (b), (c)에서 비교하여 볼수 있듯이 쇼트피닝 시편의 상온환경 피로균열진전 파면과 고온환경 피로균열진전 파면의 양상이 잔류응력 소멸된 형태를 나타냈으며 균열선단 소성영역에 대한 구속력인 잔류응력이 소멸됨으로 균열진전의 지연이 효과가 감소하고 있는 것이 균열선단 표면부에 나타난것으로 관찰되었다.

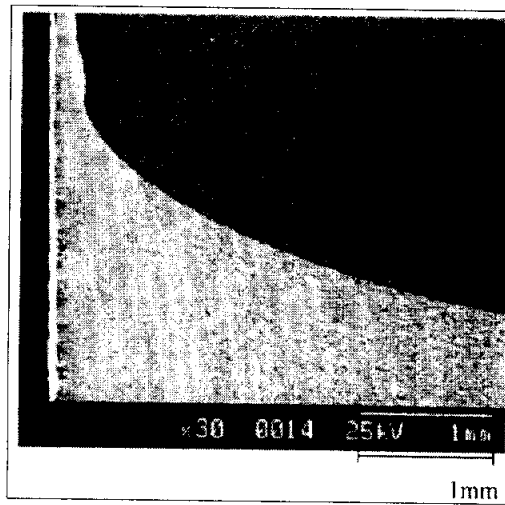


unpeened(RT) shot peened(RT) shot peened(180℃)

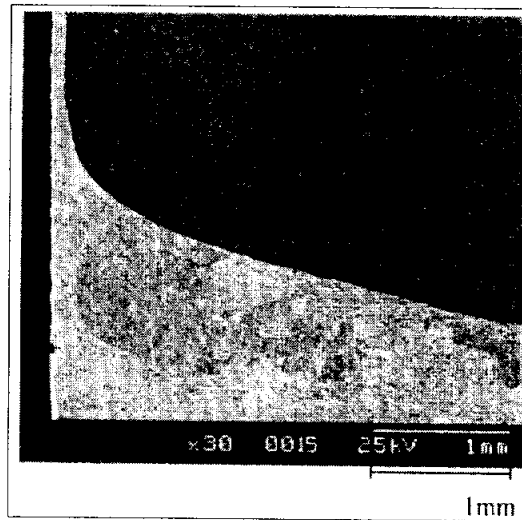
Fig. 28 Fracture surface of CT Specimen



(a) unpeened



(b) shot peened



(c) shot peened 180°C

Fig. 29 SEM Photographs of fracture surface

6. 결 론

스프링강 SUP9에 대하여 unpeened재와 쇼트피닝으로 압축잔류응력이 형성된 shot peened재의 CT시험편에 대하여 응력비 $R=0.3$ 로 RT, 100℃, 150℃, 180℃의 고온에서 크랙전파 특성시험을 실시하여 스프링강의 쇼트피닝의 피로수명 향상과 고온에서의 크랙전파속도, 크랙전파 특성 및 하한계 응력확대계수를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 쇼트피닝가공에 의해 형성된 압축잔류응력은 피로균열진전에 구속력으로 작용하여 재료에 작용하는 최대응력치를 감소시키고, 피로균열진전속도를 감소시키는 역할을 하여 하한계응력확대계수가 상승하였다.

(2) RT~180℃까지의 고온에서 da/dN 와 ΔK 와의 관계에서 RT $da/dN \geq 4.3 \times 10^{-6}$ mm/cycle 에서 180℃ $da/dN \geq 1.7 \times 10^{-6}$ mm/cycle까지로 양대수직선 관계가 성립하다가 급격하게 감속하여 온도의 영향을 나타내었다.

(3) 고온의 경우 하한계 응력확대계수는 25℃에서 100℃까지는 직선적으로 감소하여 100℃이상부터는 급격하게 감소함을 보였다.

(4) 크랙길이와 반복횟수와와의 관계에서 Unpeened재에 비해 shot peened재가 약2배의 피로수명의 향상이 있었으며 온도가 상승함에 따라 크랙길이의 증가에 따른 반복횟수는 급격하게 증가하였다.

(5) 쇼트피닝가공에 의해 형성된 압축잔류응력에 의한 피로수명의 향상은 고온의 영향에 의해 상당한 감소를 나타냈다. 이는 고온의 환경에서의 잔류응력의 소멸에 의하여 피로균열진전의 역지력이 감소되어진 것으로 생각된다.

※ 참고문헌

- (1) Aoki, H., Nagashima, E., and Miura, T., Effect of Shot Peening Condition on Fatigue Strength of Carburized Steel, Proc. The 4th International conference on shot peening, Tokyo, pp. 513~518 (1990)
- (2) H. Wohlfahrt, The influence of peening conditions on the resulting distribution of residual stress, Proc. of the 2nd international conference on shot peening, Vol. 1, pp. 316~331, (1984)
- (3) A. Tange. and N. Takamura, Relation between Shot-peening residual stress distribution and fatigue crack propagation life in spring steel, Proc. The 4th International conference on shot peening, Tokyo, pp. 243~253, (1990)
- (4) K. Natto, T. Ochi, T. Takahashi, and T. Suzuki, Effect of shot peening on the fatigue strength of carburized steels, Proc. The 4th International conference on shot peening, Tokyo, pp. 519~526, (1990)
- (5) 정성균, 이승호, 쇼트피닝 加工概論, 世和출판사, pp. 13~29, 78 (2001)
- (6) 이승호, 김희송, 정성균, 문혁, 고강도화를 위한 쇼트피닝이 피로강도에 미치는 영향, 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp. 322~327, (1997)
- (7) 이승호, 장석주, 쇼트피닝 가공조건이 피닝강도에 미치는 영향, 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp. 1590~1596, (2001)
- (8) 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, pp. 99~125, (1999)
- (9) Paris, P. and Erdogan, F., A Critical analysis of crack Propagation Laws, J. Basic Eng., Trans, ASME, pp. 528~534, 1963.

- (10) H. Liebowitz, Fracture. Vol, III, (1971)
- (11) 朴卿東, 原子爐用 低合金鋼의 高溫疲勞 크랙전이와 크랙開閉口 特性에 關한 研 究, 동아대학교 박사학위논문, (1983)
- (12) 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp10-16, (1989)
- (13) 日本機械學會基準, 彈塑性 破壞引性 J 試驗方法, JSME S 001-1981
- (14) Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates ASTM : E647-93, (1993)
- (15) Advanced Fatigue Crack Propagation, Instron 2490 Series Application Programs , pp1~4, (1991)
- (16) 小林英男, 破壞力學, 東京, 共立出版株式會社, pp. 57~63, 131~135, (1993)
- (17) Y. Kitsunai, Fatigue Crack growth Behavior in Mild Steel Weldments at Low Temperature, pp280-290, (1991)
- (18) ASTM Standard, E647-81, (1981)
- (19) 禹興植 외 2명, 재료과괴공학, 서울, 보성문화사, pp. 147-170, 265~273, (1993)
- (20) 박경동, 정찬기, 스프링강의 피로강도에 미치는 잔류압축응력의 영향, 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 338~343 (2001)
- (21) Riragu (1991) X-ray Stress Analyzer Manual, pp.9-17
- (22) 박경동, 정찬기, 하경준, 박상오, 손명균, 노영석, 쇼트피닝 가공된 스프링강의 저온 피로균열진전 평가, 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp. 282~285 (2001)
- (23) 이승호, 김희송, 스프링강의 피로거동에 미치는 2단 쇼트피닝의 효과, 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, 23권, pp. 140~147, (1999)
- (24) 김정수, 심천식, 이재욱, 조형민, 유한요소법을 이용한 피로하중을 받는 균열선단의 소성영역크기에 대한 연구, 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집 pp. 151~154, (2002)

A Study of Shot peened Spring Steel for Fatigue Crack Propagation Characteristic and Compressive Residual Stress Disappearance on the High Temperature

Myung-Koon Son

Dept. of Mechanical Engineering,
Graduate School of Pukyong National University.

Abstract

The compressive residual stress, which is induced by shot peening process, seems to be an important factor of increasing the fatigue strength. And then it was showed that residual stress was disappeared at the high temperature. The fatigue characteristic study of a SUP9 spring steel processed shot peening is performed by considering the high temperature service conditions in the range of room temperature through 180°C in the range of stress ratio of 0.3 by means of opening mode displacement. The fatigue resistance characteristics and fracture strength at high temperature is considerable lower than that of room temperature in the early stage and stable of fatigue crack growth region.

Key words : Shot Peening(쇼트피이닝), Residual Stress(잔류응력), High Temperature(고온), FEM(유한요소법), Fatigue Crack Propagation (피로균열전파)

Nomenclature

da/dN	: Fatigue crack growth rate
K	: Stress intensity factor
ΔK	: Stress intensity factor range
ΔP	: Load range
R	: Stress ratio
$K_{\max}$	: Maximum Stress intensity factor
$K_{\min}$	: Minimum Stress intensity factor
C	: Material constant
m	: Fatigue crack growth exponent
a/W	: Crack length of width ratio
$B_{eff} E' \frac{\nu}{P}$	: Compliance
B_{eff}	: Effective specimen thickness
B_{net}	: Net thickness
E'	: Elastic modulus of material
ν	: Crack opening displacement(COD)
P	: Load on specimen
C_g	: Normalized K -gradient