

771
661
4
2

工學碩士學位論文

스프링강의 疲勞크랙進展 特性에
미치는 쇼트피닝 投射速度의 影響



2003年 2月

釜慶大學校大學院

機械工學科

盧榮石

工學碩士學位論文

스프링강의 疲勞크랙進展 특성에
미치는 쇼트피닝 投射速度的 影響

指導教授 朴卿東

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함

2003년 2月

釜慶大學校大學院

機械工學科

盧榮石

이 論文을 盧榮石의 工學碩士
學位論文으로 認准함

2002年 12月 26日

主 審 教授 金 亨 資



委 員 教授 吳 明 錫



委 員 教授 朴 卿 東



목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 쇼트피닝 가공의 개요	4
2.1. 쇼트피닝 가공의 개념	4
2.2. 쇼트피닝기의 구조	7
2.3. 쇼트피닝 강도측정	8
2.3.1 아크 하이트(Arc height)	8
2.3.2 커버레지(Coverage)	9
제 3 장 이론적 배경	10
3.1. 피로균열의 파괴역학적 개념	10
3.2. 피로균열 진전거동에 있어서 파괴역학의 적용	14
3.3. 피로균열 진전거동	16
3.4. 응력확대계수범위의 결정	19
3.5. 균열진전의 하한계 측정	20
제 4 장 실험장치 및 방법	23
4.1. 시험편	23
4.2. 압축잔류응력의 부여	25
4.3. 실험 장치	26

4.4. 실험 방법	27
4.4.1 압축잔류응력의 측정	27
4.4.2 피로균열진전 실험	29
제 5 장 실험결과 및 고찰	31
5.1. 피로크랙 전파특성	31
5.2. 쇼트피닝 투사속도에 따른 피로크랙 전파특성	34
5.3. 하한계 특성과 쇼트피닝 투사속도와 관계	39
5.4. 재료상수와 피로균열진전지수	40
5.4.1 쇼트피닝 투사속도에 따른 C, m 관계	40
5.4.2 하한계 응력확대계수에 따른 C, m 관계	43
5.5. 크랙길이와 사이클수	46
5.5.1 응력확대계수에 따른 a, N 관계	46
5.5.2 피로균열진전지수에 따른 a, N 관계	48
5.5.3 쇼트피닝 투사속도에 따른 N 관계	50
5.6. 파단면의 특성	52
제 6 장 결 론	54
참고문헌	55
Abstract	57
Nomenclature	59

제 1 장 서 론

외부하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있지만 외부하중 또는 금속 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정성장하여 최종적으로 파괴되어 버리는 현상을 발견 할 수 있는데 이러한 현상을 피로파괴라 한다⁽¹⁾. 이와 같은 금속 내에서 발생하는 피로파괴현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재앙을 초래할 수 있으며 현재와 같은 대형화된 산업사회에서 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

재료의 피로파괴는 환경에 따른 강도, 부식과 더불어 재료의 수명을 단축하고 구조물의 내구연한을 결정짓는 가장 중요한 사항으로서 피로수명 평가의 필요성이 증대되고 있다. 특히 최근 기계, 항공기, 자동차 산업 등에서는 신소재 개발과 재료의 고응력화, 경량화를 요구하고 있지만 고가의 기기와 많은 시간, 노력을 필요로 한다는 많은 문제점을 갖고 있다.

피로수명의 연장방법으로는 피로손상보수, 잔류응력의 부여⁽²⁾, 휴식기간의 부여 등의 방법이 있으며 잔류응력을 도입하여 피로수명 및 성질을 개선하는 방법인 쇼트피닝에 의해 표면에 압축잔류응력을 부여하는 방법이 1927년 Herber가 높은 곳에서 강판에 작은 강구를 낙하시켜 금속표면의 경화 등을 시험한 것을 시초로 1935년에 Weibel이 엔진벨브 스프링에 다량의 쇼트볼을 투사시켰으며 1940년에 Zimmerli는 금속표면처리 심포지엄에서 코일 스프링에 쇼트피닝을 처리한 결과 피로강도가 42% 증가된다는 것을 실증하여 미국의 자동차와 항공부품업계에서 지속적으로 연구하고 실용화함으로서 SAE 쇼트피닝 위원회에서는 쇼트피닝 가공에 대한 규격과 작업표준안을 제정하게 되었다⁽³⁾.

이러한 쇼트피닝가공에 의해 금속 표면부에 형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속표면부에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시켜 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시켜주고 균열의 안정성장을 지연시켜 피로수명을 향상시킨다^{(4),(5)}. 그리고, Verpoort

와 Gerdes는 쇼트볼이 가하는 투사 에너지를 변화 시켜보기 위해서 쇼트볼의 질량, 속도, 투사량을 변경하여 시험한 결과 쇼트피닝 할 때 에너지가 높은 것만이 좋은 것은 아니고 적절한 쇼트조건을 가지는 것이 좋다는 연구를 하였다. 또한 Tange, Takamura와 Natto, Ochi는 쇼트피닝의 압축잔류응력과 피로크랙진전과의 관계를 연구한 결과 피로크랙진전 수명에 있어서 표면에 형성된 최대 잔류응력이 표면에 가까울수록 피로수명이 증가함을 연구하였다^{(6)~(8)}.

한편, 영역 II에서의 피로균열성장거동은 피로균열성장속도, 미세구조, 실험 분위기 및 하중조건 등의 내적·외적 인자에 의해 크게 좌우되며 실험이 Paris영역, $da/dN = C(\Delta K)^m$ 의 식이 성립하는 영역, 에서 주로 행해지는 반면에 ΔK 가 감소하여 영역 I에 들어가면 피로균열성장속도가 급격히 감소하여 ΔK_{th} 이하에서는 피로균열이 성장하지 않는다.

피로파괴의 대부분은 피로균열의 개시와 피로균열의 안정성장과정에서 소비되므로 피로균열의 개시와 안정성장과정의 해석과 예측이 매우 중요한 사항이 되고 있다. 균열의 개시와 균열의 성장과정은 반복하중, 부식환경, 고온환경, 저온환경 내에서 균열의 개시조건과 균열의 진전속도를 특성 짓는 것이 파괴역학의 파라미터로서 피로균열 전파속도 da/dN 또는 da/dt (a : 균열길이, N : 외력의 반복수, t : 재하시간)가 K 또는 ΔK 의 함수로서 $da/dN = f(\Delta K, K)$, $da/dt = f(K)$ 에 의해 파괴조건이 기술되어지는 선형파괴역학이 응용되고 있으며 응력확대계수(K : Stress intensity factor)와 파괴인성(K_C : Fracture toughness)은 중요한 파라미터이다. 그리고 선형파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics : L.E.F.M)은 1959년 Irwin에 의해 제정된 이래 매우 활발히 연구한 결과 새로운 학문체계로서 완성해 가고 있다⁽⁹⁾.

본 연구에서는 실험적으로 어려운 자동차용 스프링재료로 주로 사용되고 있는 SUP-9강에 대하여 종래에 발표되었던 Un-peening재와 앞

서 피로수명 및 기계적 성질을 개선하고자 Un-peening재에 투사속도에 따라 쇼트피닝 가공하여 응력비 $R=0.3$, 진폭 10cycle/sec로써 상온 (RT)에서 실험하여 투사속도에 따른 피로크랙 특성, 피로수명 향상 그리고 안전설계에 기여하고자 한다.

제 2 장 쇼트피닝 가공의 개요

2.1 쇼트피닝 가공의 개념

쇼트피닝은 기계, 자동차, 항공기 부품의 피로강도를 향상시키는 표면 경화법으로 스트레스 피닝(Stress peening), 열간 쇼트피닝(Hot shot peening), 다단 쇼트피닝(Multistage shot peening), 핀 포밍(Peen forming), 워터 피닝(Water peening)등의 다양한 방법이 제시되었다.

쇼트피닝 가공은 금속 부품의 표면에 쇼트 볼(Shot ball)이라는 강구를 고속으로 금속의 표면에 투사하여 금속의 표면을 햄머링(Hammering)하는 일종의 냉간 가공이다. 쇼트피닝 가공은 Fig. 1과 같이 쇼트 볼이 금속 표면에 고속 충돌하면서 이때 쇼트볼의 운동에너지가 순간적으로 재료의 표면에 소성변형(Plastic deformation)을 주고 표면에서 이탈한다.

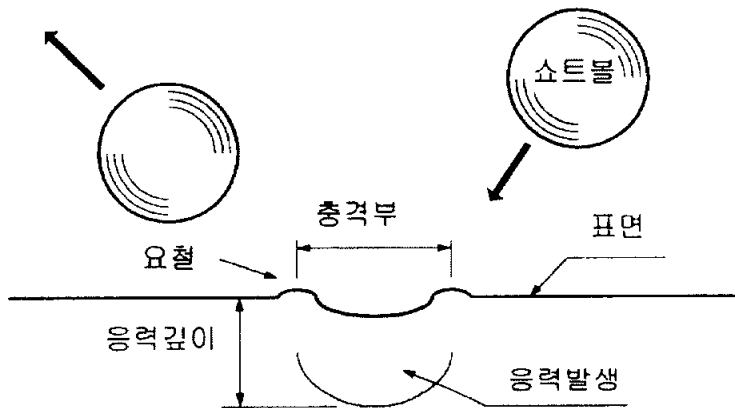


Fig. 1 Principle of controlled shot peening

쇼트볼과 충돌 후 표면층은 요철이 발생하며 표면에 얇은 소성 변형층을 형성하며 탄소성층의 경계를 형성하게 된다. 이 층은 늘어난 표면층을 늘어나기 전의 상태로 유지하려는 힘이 작용하게 되어 표면은 압축잔류응력, 내부는 인장응력을 갖고 평형을 이루게 된다. Fig. 2와 같이 쇼트볼이 충돌후 표면에 압축응력이 잔류하게 된다.

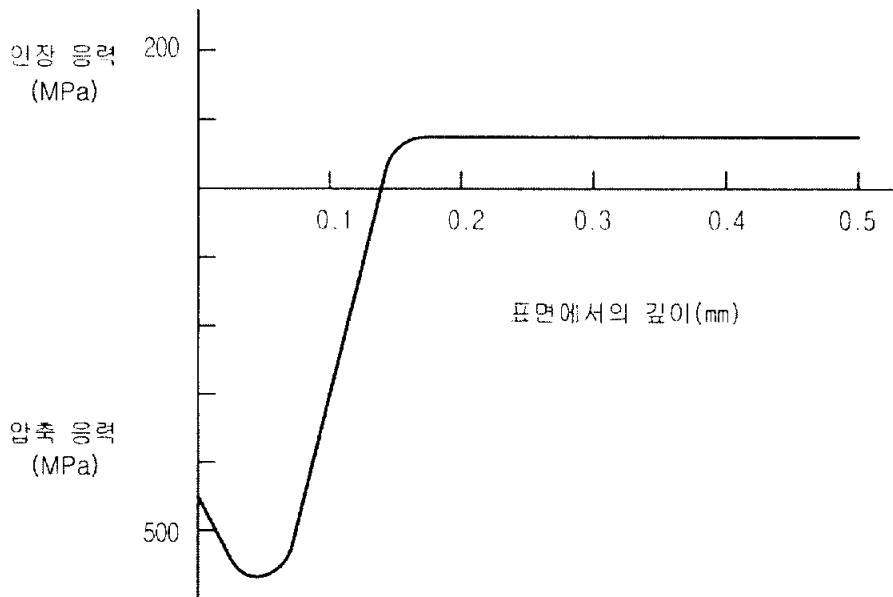


Fig. 2 Distribution of residual stress on surface layer

일반적으로 표면에서 깊이 0.1~0.5mm 정도에 분포되고 특수한 경우 0.8mm까지 분포층을 형성시킬 수도 있다. 이러한 쇼트피닝 가공으로 재료의 표면에 압축잔류응력을 남게 함으로써 반복인장이 작용할 때 압축잔류응력은 "0"이 되어 압축잔류응력이 사라지게 될 때까지 피로수명을 연장하게 된다.

쇼트피닝 가공에서 금속의 작은 볼의 충격에 의한 자국은 쇼트볼의 직경, 자국의 깊이, 제적의 함수로 형성된다. 소성 영역은 쇼트볼의 속

도, 쇼트볼의 직경 그리고 쇼트피닝 가공되는 재료의 경도에 대한 함수의 관계를 갖는다. 그리고 쇼트피닝 가공에 의한 소성 영역의 변형층에 잔류 응력의 발생과 더불어 경도의 변화를 가져온다. 이 변형층의 경도 분포에는 가공 경화(Work hardening)와 가공 연화(Work softening)를 나타낸다. 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 수명 등 다양한 연구가 진행되었으나, 산업체에서는 쇼트피닝 가공에 대한 체계적인 연구와 데이터가 극히 일부에 국한되어 있고 매우 미진한 상태이다.

그러나 쇼트피닝 가공을 하는 품목은 매우 다양하다. 예를 들면 여러 형상의 기어, 키 홈이 있는 축, 단면변화를 갖는 베어링, 증기나 가스 터빈 부분, 비행기의 착륙장치 부분, 헬리콥터 프로펠러의 구동축과 날개, 압축기와 고성능 엔진 부품이나 피스톤, 크랭크 축, 커넥팅 로드, 벨브와 블록 등 많은 분야에 적용되고 있다⁽¹⁰⁾.

2.2 쇼트피닝기의 구조

쇼트피닝의 구조는 아래와 같이 구성되어 있으며 Fig. 3은 쇼트피닝기의 구조이다.

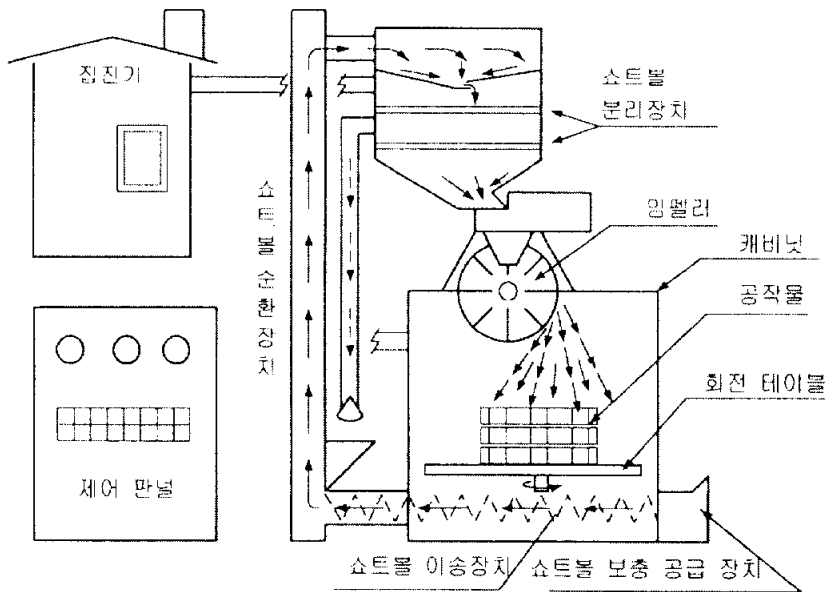


Fig. 3 The structure of shot peening machine

1. 쇼트볼을 가속하여 운동 에너지를 만드는 쇼트볼 투사장치의 임펠러
2. 투사되었던 쇼트볼을 다시 사용하기 위한 쇼트볼 순환장치
3. 마모와 파손으로 인한 쇼트볼을 선별하는 쇼트볼 선별장치
4. 쇼트볼의 부족시 보충해 주는 쇼트볼 공급 장치
5. 가공물에 균일한 쇼트피닝 가공을 하기 위한 제품 이송장치
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 공정관리를 위한 쇼트피닝기 제어용 컨트롤 판넬⁽³⁾

2.3 쇼트피닝 강도측정

쇼트피닝 강도(Intensity)는 쇼트피닝의 가공 정도를 나타내는 것이다. 쇼트볼의 속도, 경도, 크기, 투사각, 무게 등에 따라 변하며, 아크하이트(Arc height)와 커버리지(Coverage)로 표시한다. 일반적으로 100% 커버리지에서의 아크하이트를 피닝 강도로 나타낸다. 쇼트피닝은 제품에 일정하고 재현성 있도록 하는 것이 중요하다. 그러므로, 쇼트볼의 재질, 크기, 형상, 경도 그리고 투사속도와 투사각도는 일관성 있는 공정을 위해 반드시 제어되어야만 한다.

2.3.1 아크 하이트(Arc height)

강판의 표면에 쇼트피닝하면 쇼트 투사에 의하여 타격을 받아 가공경화가 생기며 강판이 만곡되는데 이 강판의 만곡은 표면층 압축잔류응력의 크기에 따라 정하므로 그 만곡의 정도에 따라 쇼트피닝의 강도를 표시할 수 있다.

쇼트피닝 강도를 전기 Almen strip으로써 표절간의 만곡의 높이로서 표시 할 수 있다. 각종 부품 개개에 대하여 각종의 강도로 쇼트피닝하여 가장 그 효과가 좋았던 피닝강도를 찾아내어 그 부품에 대해서 쇼트피닝 강도 얼마 즉, Arc height가 주어진다. Fig. 4는 알멘 시스템 개념도 이다.

2.3.2 커버리지(Coverage)

일정면적에 대한 쇼트자국 면적과의 비를 백분율로 표시한 것이 커버리지이다. 그러나 사용 쇼트의 종류, 크기, 가공물의 재질, 형상 등에 따라 투사 자국이 달라질 수 있다.

Coverage의 경도를 %로 표시할 때에 비교할 표준시간이 규격으로 정해져있다. Coverage 55%, 65%, 80%, 90% 등으로 되어있으며 Arc height와 비교하여 Coverage는 단순히 쇼트볼에 노출시킨 시간과 관계될 뿐이고 Arc height와 반드시 비례하는 것은 아니라는 사례이다⁽¹¹⁾.

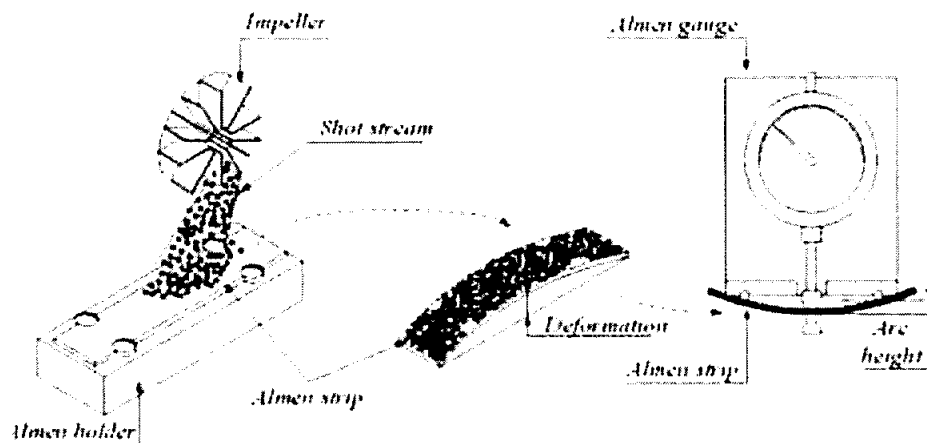


Fig. 4 The almen test strip system

제 3 장 이론적 배경

3.1 피로균열의 파괴역학적 개념

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

재료의 부재나 구조물을 연속체로 보고 파괴의 현상을 거시적인 입장에서 다루는 선형탄성파괴역학(L.E.F.M : Linear Elastic Fracture Mechanics)은 균열 또는 예리한 노치를 갖는 부재 혹은 구조물의 강도나 변형을 선형탄성론으로부터 얻어진 결과를 기초로 하여 취급하는 분야의 하나이다⁽¹²⁾.

길이 $2a$ 인 관통 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. 5의 좌표계로서는 다음과 같이 표시할 수 있다⁽¹³⁾.

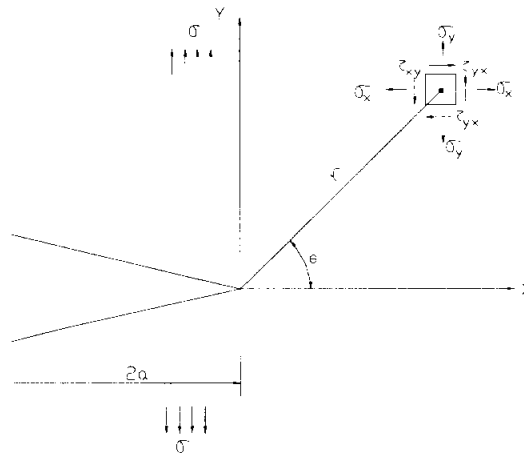


Fig. 5 The coordinate system of a crack in an infinite plate

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

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. 6에 표시하면 응력 확대계수 $K_I^{(14)}$ 은

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

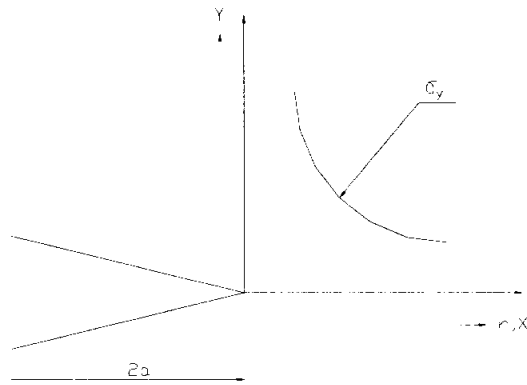


Fig. 6 Elastic stress at the crack tip

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 실험을 행하였다.

선형파괴역학은 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. 7). 즉,

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

로 표시할 수 있으며

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

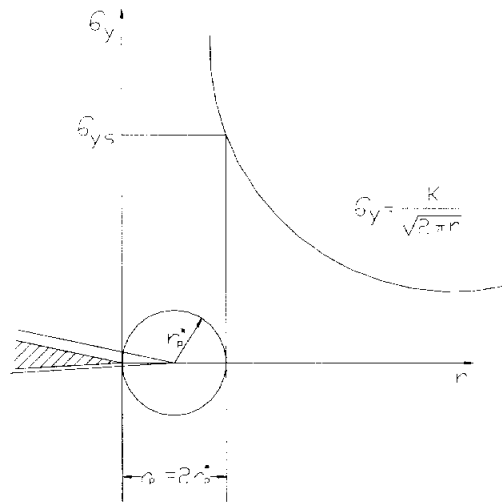


Fig. 7 Plastic zone at the crack tip

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

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

이 되며, 이것을 다시 정리하면

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

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 $d(2a)/dN = \text{Const.}$ 및 McEvily에 의한 $d(2a)/dN = f(\sigma_0)$ 등을 들 수 있으나, Irwin의 응력확대계수 K 가 균열선단에서의 응력의 크기를 특성 지워주는 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 ΔK ($=K_{\max} - K_{\min}$) 및 평균응력확대계수 $K_m \left\{ = \frac{1}{2}(K_{\max} + K_{\min}) \right\}$ 은 균열 진전에 따라 변화한다. 즉,

$$\begin{aligned} da/dN &= f_1(\Delta K, R) \\ da/dN &= f_2(K_{\max}, R) \\ da/dN &= f_3(\Delta K, K_{\max}) \end{aligned} \quad \text{-----}(9)$$

여기서 R 은 응력비(Stress ratio)이며

$2a$: 균열의 길이

f_i : 작용응력의 함수 ($i = 1, 2, 3$)

σ_0 : 균열 선단에서의 응력

N : 하중반복횟수

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 양대수 좌표로 표시하면 3단계 구간이 나타나는데 균열의 안정성장구간 즉 2단계 구간 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^{(15)~(18)}.

이 식은 각종 금속재료 외에 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 실험결과는 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.

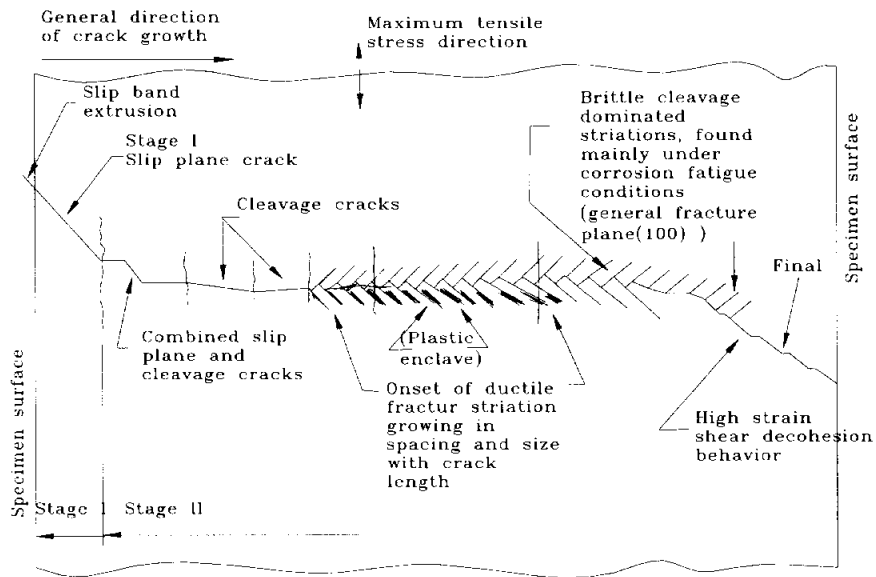


Fig. 8 Schematic illustration of the various modes of fatigue fracture

여기서 균열선단에서의 응력-변형률의 성질은 응력확대계수(Stress intensity factor) K 로 표시되고, 반복 응력확대계수와 피로균열진전속

도와도 관계가 있다.

한편 균열의 성장률을 표시하면 Fig. 8과 같이 3개의 분리된 영역으로 나타난다.

이처럼 균열의 성장률을 나타냄으로서 주어진 하중에서 어느 정도 크기의 균열까지는 안전한가 또는 주어진 균열크기에 어느 하중까지는 얼마동안 안전한가 등 여러 가지 공학적 중요한 문제를 해결하는데 이용할 수 있다.

여기서 C 와 m 은 각각 재료상수, 피로균열진전지수이고 보통 m 은 0.5~0.8의 넓은 범위에서 변화한다. 그러나 식 (12)는 실험재료를 총괄적으로는 나타내지 못한다. 실제로 Fig. 9에서 da/dN 와 ΔK 의 관계는 S형 모양을 갖거나 부분적으로 다른 기울기를 가진다.

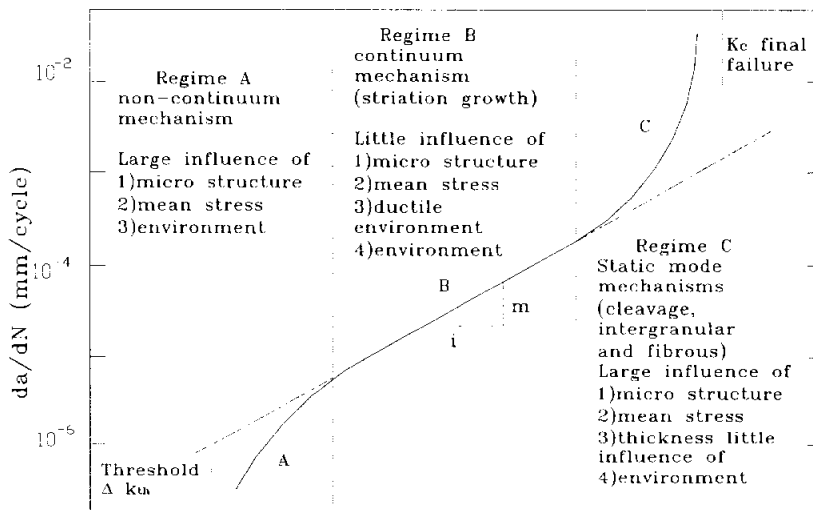


Fig. 9 Primary fracture mechanisms with variation of fatigue crack propagation rate da/dN with stress intensity factor range ΔK

ΔK 범위의 최상부 끝을 벗어남은 da/dN 가 유한으로 되어야 하는 균열이 임계값에 도달하는 것일 때 예상될 수 있다. 최종 파괴는 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 응력확대계수범위의 결정

CT시험편에 대하여 응력확대계수 범위 ΔK 는 다음 식으로 계산한다.

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

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 $\alpha = 2a/W$ 위 식은 $2a/W < 0.95$ 에 대하여 유효하다. 또 전술한대로 CT시험편은 인장-압축부하에 대하여 권장하지 않으나 CCT 시험편에 대하여 그 제한은 없다. 따라서 CCT시험편에 대하여 하중범위 ΔP 는 다음 식으로 정의된다.

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

특히 응력비 R 에 관계없이 $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$ 이라 정의해 da/dN - ΔK 관계를 표시한 보고가 많다. $R < 0$ 의 결과를 조사하는 경우 주의를 요한다. 선형탄성 파괴역학의 범위 내에서 $\Delta P = P_{\max}$ 라 하면 $R \leq 0$ 의 R 이 da/dN - ΔK 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 정하중 진폭시험으로 측정하는 경우, 피로 예균열 도입 때의 K_{max} 및 시험 개시 때의 K_{max} 또는 ΔK 가 현저한 영향을 미친다. 실제의 $da/dN-\Delta K$ 관계는 하중이력이 무시되는 이상 균열에 대하여 시험 개시 때의 ΔK_{th} 와 거의 같은 ΔK 를 준 경우에만 얻어진다. 이것을 달성하는 것은 용이하지 않다. 따라서 하중점감 시험이 일반적으로 행하여지고 있다. ASTM에서는 E647-81의 개정에 이어 10^{-8} m/cycle의 da/dN 측정을 포함하여 ‘정상상태의 피로균열 진전속도의 시험방법’을 검토중이다. 아래에 그것을 소개한다^{(19)~(22)}.

R 일정의 경우 K 구배는 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 C 가 정(正), K 감소 시험은 C 가 부(負)가 된다. 하중은 계단상으로 감소시켜도 연속적으로 감소시켜도 좋다. C 의 값으로 다음이 권장된다.

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

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

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

의 균열길이 증분이 확인이 권장된다.

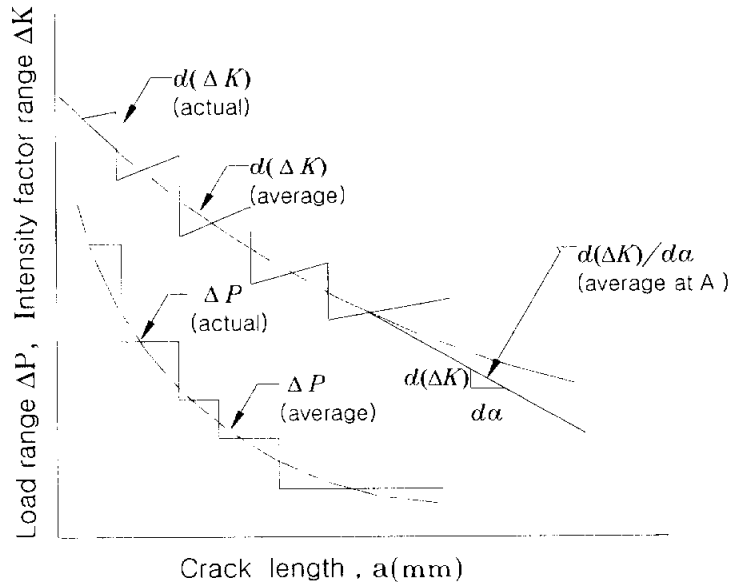


Fig. 10 Typical K decreasing test by stepped load

$da/dN = 10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ m/cycle}$ 의 범위를 등분할 한 5점 이상의 데이터를 사용하여 $da/dN - \Delta K$ 관계를 양대수 좌표상에 최적직선으로 근사한다. 이 최적직선에서 $da/dN = 10^{-8} \text{ m/cycle}$ 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 조

건을 만족하기에는 매우 어렵다. $da/dN = 10^{-9} \sim 10^{-10}$ m/cycle의 범위를 등분할 한 5점 이상의 데이터를 얻기 위해 최저 5×10^7 회의 하중 반복이 필요하게 되는 것은 명심해야 한다.

또한 K 점감실험에 실제의 ΔK_{th} 가 얻어지는가 아닌가에 대해서도 의문이 있다. 아래에서 설명한 것과 같이 대기 중에서 ΔK_{th} 는 프레팅(Fretting)산화물 유기균열개구에 지배되어 있다. 프레팅(Fretting) 산화물의 생성은 하중, 환경조건에 강하게 영향을 받으며 ΔK_{th} 의 평가와 실험방법의 검토는 차후의 과제로서 아직 남아 있다.

제 4 장 실험장치 및 방법

4.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 철도차량 및 자동차 현가장치에 주로 사용되고 있는 와이어로드 상태의 압연 스프링강(JISG SUP-9)이며, 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고, Table 2는 열처리(Quenching & Tempering)한 시험편의 기계적 성질이다.

Table 1 Chemical composition of specimen(wt, %)

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

Table 2 Mechanical properties of specimen

Tensile Strength (MPa)	Hardness (HrC)		Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
	after Quenching	after Tempering		
1226	55	47	1079	9

본 시험편은 피로균열 진전거동을 관찰하기 위하여 CT시험편의 두께는 12.5 mm로 하였고 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 제작하였다. 그리고 Fig. 11은 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

Fig. 11은 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재에서 산소 절단기를 이용하여 압연방향이 하중방향이 되게 L-T방향으로 채취하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 외형가공은 밀링(Milling)으

로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기(Wire cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈 반지름 0.1mm가 되게 가공하였다^{(15),(16)}.

그리고 기계 가공된 노치는 실제로는 매우 둔한 첨단을 갖는다. 이에 비하여 피로균열성장실험의 기본역학인 선형탄성파괴역학(L.E.F.M)은 이상적으로 날카로운 균열을 전제로 하고 있다. 따라서, 기계 가공된 노치로부터 날카로운 예비균열을 성장시켜 가공된 노치의 영향과 균열 첨단모양 및 하중이력으로 인한 영향을 감소하고 예상 경로를 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며 25℃ 정도의 온도환경과 항복강도 이내의 응력범위에서 ASTM E647-93 규정에 의거해 3mm의 피로예비균열을 주었다^{(12),(18)}.

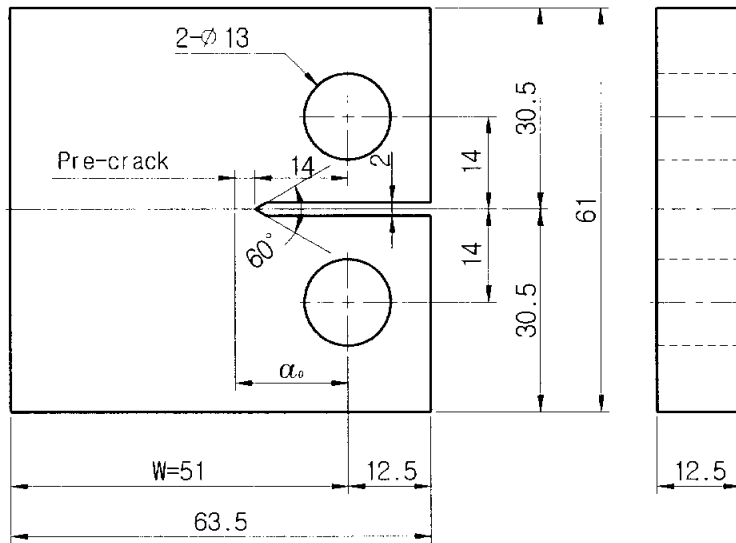


Fig. 11 Dimension of CT specimen(unit:mm)

4.2 압축잔류응력의 부여

4.1항과 같이 완성된 CT 시험편에 균일한 쇼트피닝 가공면의 압축잔류응력을 부여하기 위해 Fig. 12 형상의 치구에 고정하여 고속회전 터빈방식 쇼트피닝기로 Table 3과 같은 조건하에서 압축잔류응력의 크기가 각각 차이가 있는 4종류(1800, 2200, 2600, 3000rpm)의 시험편을 제작하였다.

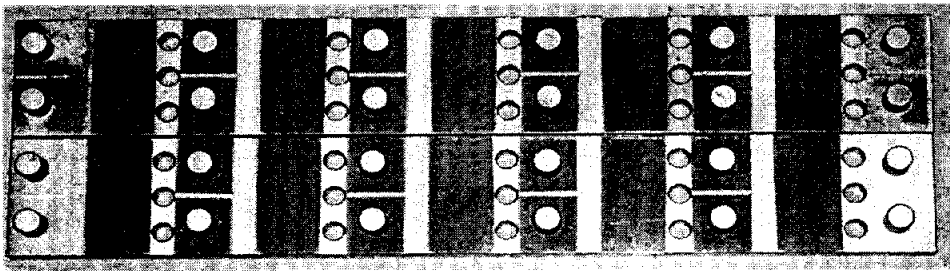


Fig. 12 Fixture of specimen

Table 3 Condition of Shot-Peening

Content	Specimen A	Specimen B	Specimen C	Specimen D
Impeller Diameter (mm)	Ø490	Ø490	Ø490	Ø490
Shot Velocity (rpm)	1800	2200	2600	3000
Shot Ball Diameter (mm)	Ø0.8	Ø0.8	Ø0.8	Ø0.8
Time(sec.)	24			
Arc-Height (mm)	0.32	0.39	0.42	0.46
Coverage(%)	85			

4.3 실험장치

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기(Instron 8501, 100KN)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 적용 하중 파형은 정현파로 하고 적용 응력비 $R=0.3$, 주파수는 10Hz로 하였으며, 피로균열 길이측정은 COD 클립 게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 ASTM E647-93의 규정에 따라 상온에서 실험하였다. Fig. 13은 전기유압서보 피로시험기이다.



Fig. 13 Apparatus of fatigue test machine(Instron, 8501)

4.4 실험 방법

4.3.1 압축잔류응력의 측정

쇼트피닝 가공된 시험편 표면의 압축잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기(Rigaku - MSF2M, Fig. 14)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20 μ m 단위로 연마 해가면서 Table 4와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffraction	Condition	
X-Ray Source	Target	Cr-V
	Voltage	30 KV
	Current	10 mA
Ψ	0°, 15°, 30°, 45°	
2θ	140° ~ 170°	
Calculation method	$2\theta - \sin^2\Psi$	
Diffraction	Scintillation Counter	

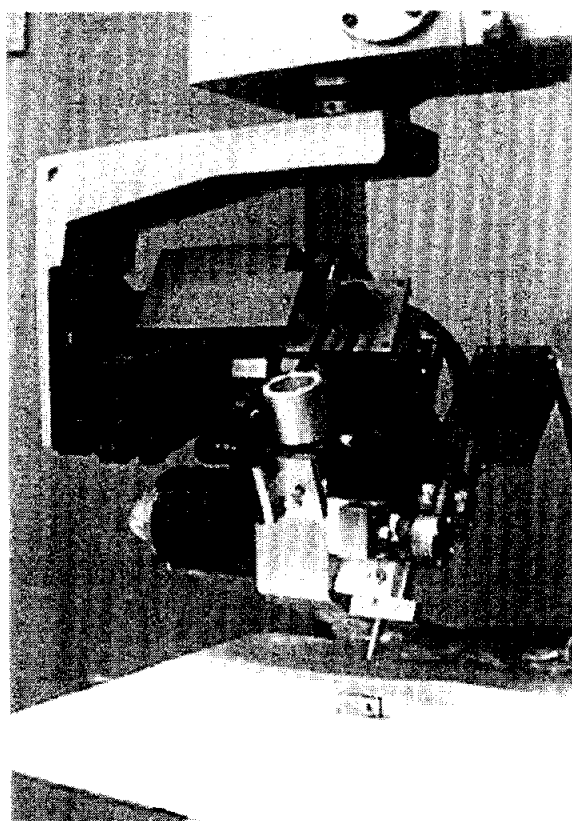


Fig. 14 Photograph of X Ray diffraction machine

4.3.2 피로균열진전 실험

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기에 의해 응력비 $R=0.3$, 주파수는 10Hz, 피로균열 길이측정은 COD 클립게이지에 의해 상온에서 각각의 시험편을 실험하였다.

시험편의 초기 크랙은 초기응력확대계수 범위 ΔK 를 $10 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 으로 하여 초기 ΔK 의 95% 범위 내에서 ΔK 증가법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였고 초기크랙진전길이 3~5mm 지점에서 다시 95% 범위 내의 ΔK 감소법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다.

본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK 의 계산식은 다음과 같다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.46\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

$$\alpha = a/W \quad (a/W \geq 0.2) \quad (1)$$

여기서, a 는 하중중심에서의 균열길이, W 는 하중중심에서의 시험편 길이, B 는 시험편의 두께이며 ΔP 는 하중변위이다⁽¹⁶⁾.

실험해석을 위해 응력확대계수 ΔK 는

$$\Delta K = \begin{cases} K_{\max} - K_{\min} & (K_{\min} > 0) \\ K_{\max} & (K_{\min} \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

및 응력비

$$R = K_{\min} / K_{\max} \quad (3)$$

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

(15),(16),(18)인

$$da / dN = C (\Delta K)^m \quad (4)$$

으로 나타나고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변한다. 응력확대계수 범위 ΔK 는 다음 식에 의해서 나타낸다. 본 실험에서는 ASTM E647-93 규정에 의거 ΔK 콘트롤에 의한 K -감소방식을 이용하였는데 그 감소 조건은 다음과 같다.

ΔK 의 기울기는^{(16),(20)}

$$C_g = \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{d\Delta K}{da} \geq 0.08\text{mm}^{-1} \quad (5)$$

da/dN 의 측정범위 $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$ (Δa 는 균열길이 증분량)이다. 여기서 C 와 m 은 재료상수와 균열진전지수로서 그 값은 동일재료, 동일환경 구조물 등의 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 피로크랙 전파특성

Fig. 15는 쇼트피닝 가공에 의해 생성된 압축잔류응력을 X-ray 잔류응력 측정기로 측정하여 잔류응력 크기를 표면과 시편의 표면에서 내부 0.3mm에 분포하는 최대 압축잔류응력의 크기를 나타낸 그림이다.

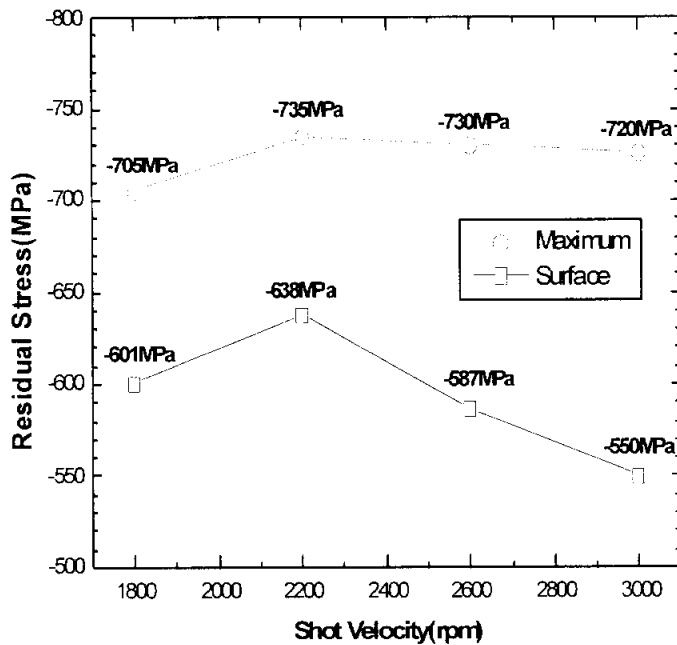


Fig. 15 Compressive residual stress distributions produced by shot peening

그리고 Fig. 16은 쇼트피닝 가공에 의해 CT 시험편의 표면에 각각 -601MPa(1800rpm), -638MPa(2200rpm), -587MPa(2600rpm), -550MPa(3000rpm)의 압축잔류응력이 생성된 스프링강 SUP-9에 Un-peened재와 Shot-peened재에 대하여 응력비 $R=0.3$, 사이클은 10 Hz에서 상온(RT)에서의 점감하중법에 의해 피로균열 전파속도 da/dN 과 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 동일한 ΔK 에서 쇼트피닝 가공된 Shot-peened재의 경우 피로균열 전파속도 da/dN 의 관계가 직선적으로 증가하고 있으며 쇼트피닝 가공의 투사속도에 따라 da/dN 의 관계가 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 실험 결과 Shot-peened재는 쇼트피닝 투사속도에 반응하여 Un-peened재보다 피로균열 전파초기영역(영역 I)에서의 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 값이 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 현상은 쇼트피닝 투사속도에 의한 표면에 잔재하는 압축잔류응력이 균열초기 피로저항성이 우수한 것으로 판단되며, 또한 쇼트피닝가공이 Un-peened재보다 피로수명 향상의 효과는 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속으로 판단된다.

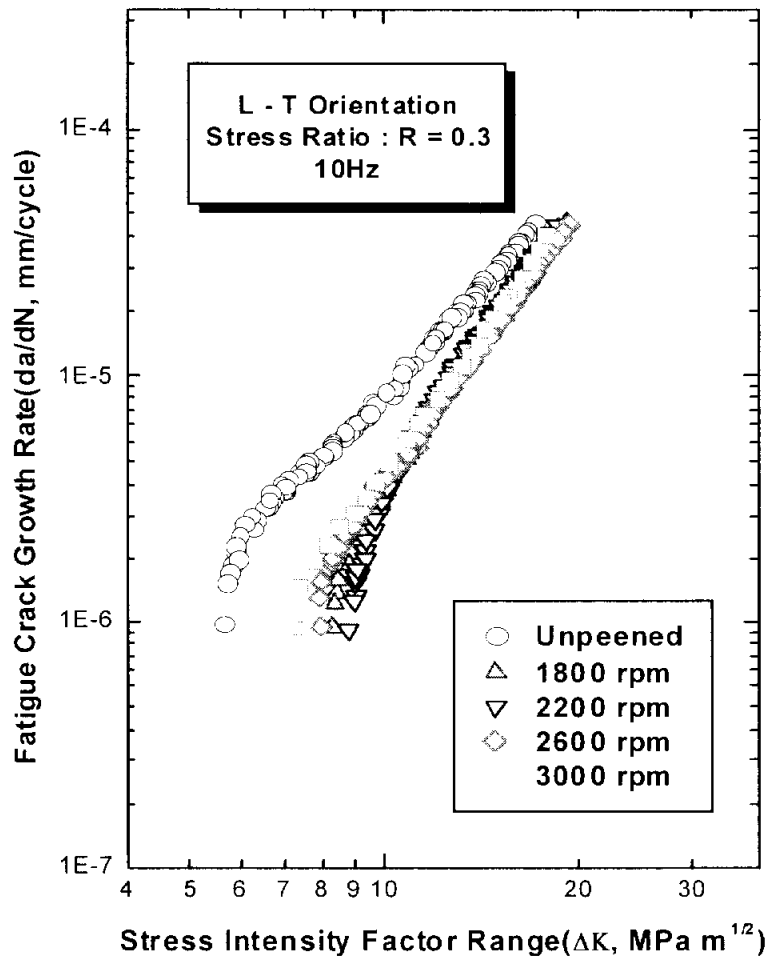


Fig. 16 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

5.2 쇼트피닝 투사속도에 따른 피로크랙 전파특성

Fig. 17, 18, 19, 20은 철도차량 및 자동차 현가장치에 주로 사용되는 SUP-9강에 대하여 쇼트피닝 가공의 투사속도에 의해 각각 -601MPa (1800rpm), -638MPa(2200rpm), -587MPa(2600rpm), -550MPa(3000rpm)의 압축잔류응력으로 가공된 재료에 응력비 $R=0.3$, 사이클은 10Hz로 하여 상온에서 점감하중법 실험을 실시하여 피로균열 전파속도 da/dN 와 응력 확대계수 ΔK 관계를 양대수 직선상에 쇼트피닝 투사속도별로 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 Un-peened재의 경우는 $2.5 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립되었고 쇼트피닝 가공(2200rpm)의 경우가 $4.333 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립되었다.

쇼트피닝 가공의 투사속도에 반응하여 각각 $8.319 \text{MPa} \sqrt{m}$, $8.797 \text{MPa} \sqrt{m}$, $7.835 \text{MPa} \sqrt{m}$, $7.352 \text{MPa} \sqrt{m}$ 로 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 에 도달하였다.

쇼트피닝 투사속도에 따라 하한계 응력확대계수에 각각 도달한 것은 표면에 잔재해 있는 압축잔류응력이 피로균열진전 억제력을 작용한 것으로 추정된다.

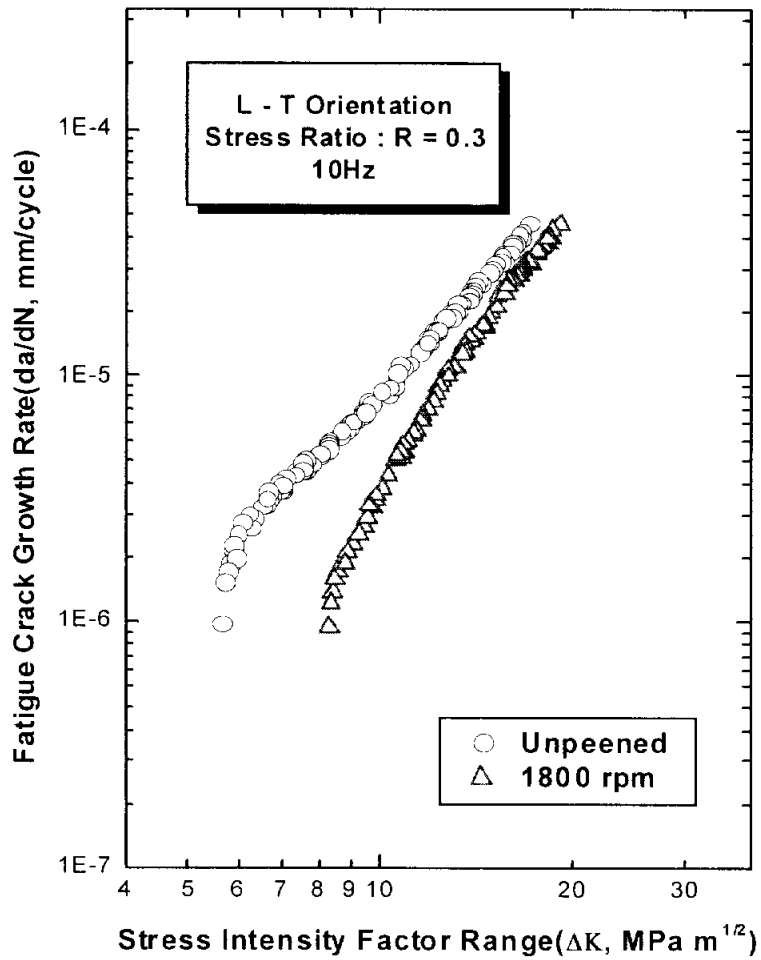


Fig 17. Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(1800rpm)

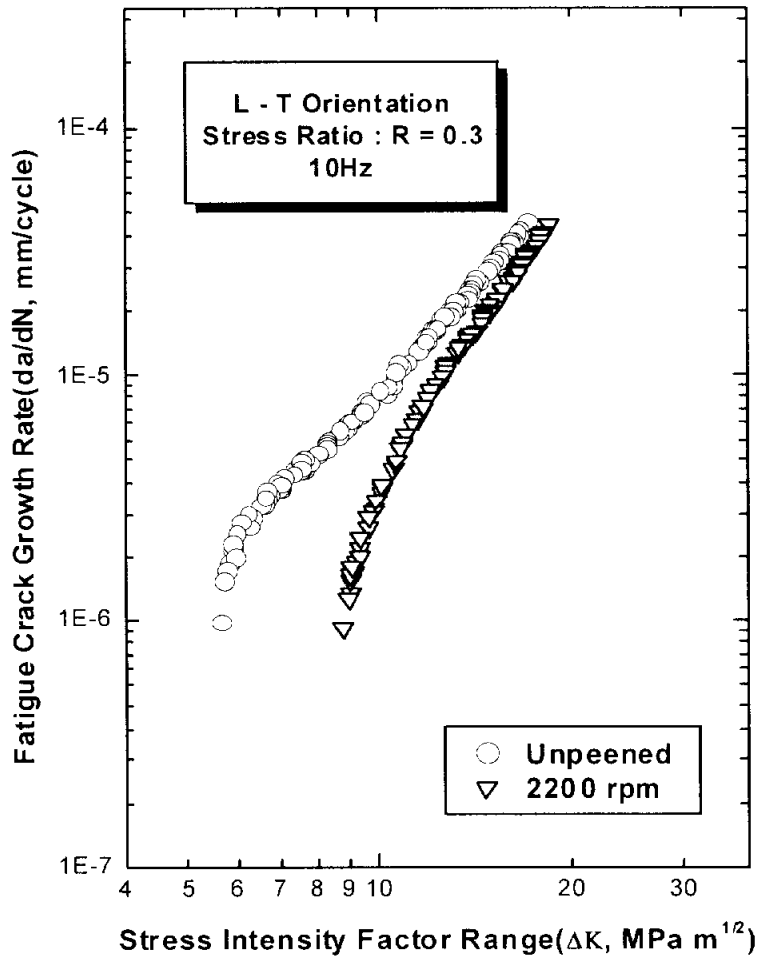


Fig 18. Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(2200rpm)

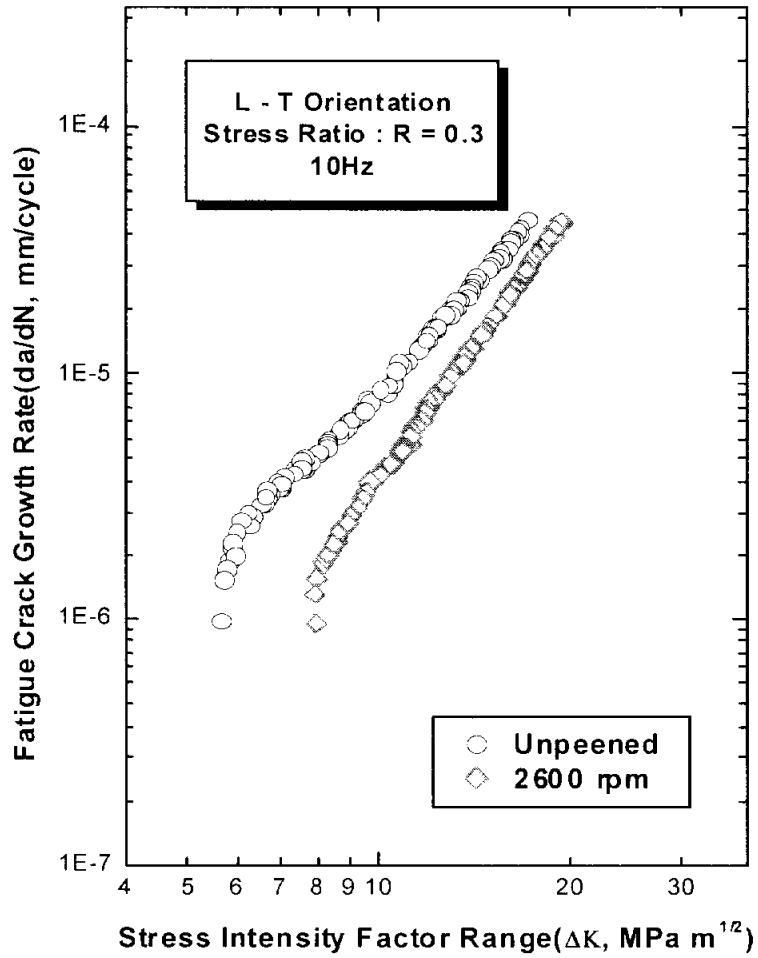


Fig 19. Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(2600rpm)

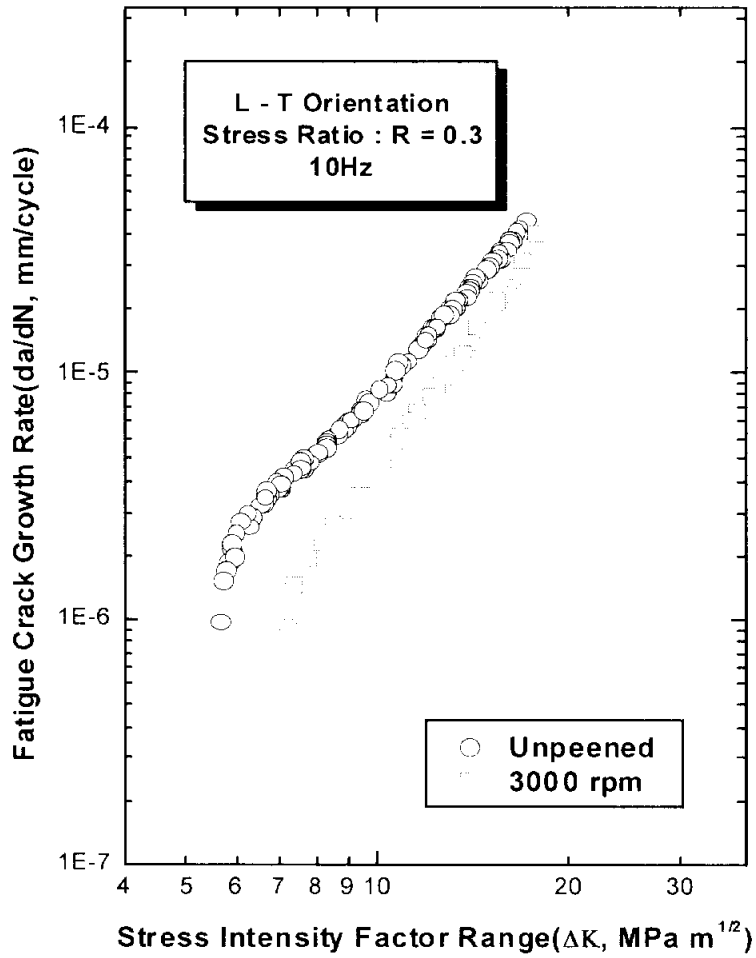


Fig 20. Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(3000rpm)

5.3 하한계 특성과 쇼트피닝 투사속도와 관계

Fig. 21에 쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력이 형성된 스프링강 SUP-9에 대해 쇼트피닝 투사속도에 따른 피로크랙전파특성 실험을 통하여 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 와 쇼트피닝 투사속도와의 관계를 나타내었다.

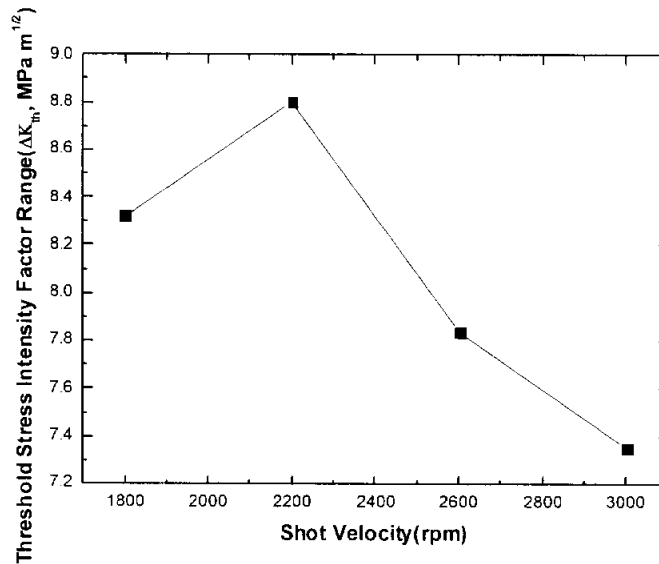


Fig. 21 Effect of threshold stress intensity factor and shot velocity

Fig. 21에서 투사속도 1800rpm에서 2200rpm까지는 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 서서히 증가하다가 투사속도 2200rpm부터 3000rpm까지는 급격하게 하한계 값이 감소함을 나타내었다. 이는 피로균열진전속도 da/dN 이 감소하여 높은 하한계값에 이른 것으로 보인다.

5.4 재료상수와 피로균열진전지수

5.4.1 쇼트피닝 투사속도에 따른 C , m 관계

피로균열진전과정의 제 2단계 영역에 있어서 $da/dN-\Delta K$ 는 양대수 선도상에 직선 관계로 나타났고, 이것을 Paris식 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 에 대입하여, 각 쇼트피닝 투사속도에 대한 피로균열진전지수 m 과 재료상수 C 를 Table 5에 정리하였다.

Table 5 Experimental constants by $da/dN=C(\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth

	ΔK_{th} (MPa $\sqrt{m}$)	da/dN Range (mm/cycle)	m	C
Un-peened	5.619	4.138×10^{-6} $\leq da/dN \leq$ 4.273×10^{-5}	2.603	2×10^{-8}
1800rpm	8.319	4.431×10^{-6} $\leq da/dN \leq$ 4.13×10^{-5}	3.714	7.815×10^{-10}
2200rpm	8.797	4.333×10^{-6} $\leq da/dN \leq$ 4.01×10^{-5}	4.029	3.763×10^{-10}
2600rpm	7.835	4.04×10^{-6} $\leq da/dN \leq$ 4.12×10^{-5}	3.627	8.773×10^{-10}
3000rpm	7.352	3.697×10^{-6} $\leq da/dN \leq$ 2.534×10^{-5}	3.549	1×10^{-9}

Fig. 22, 23에는 쇼트피닝 투사속도에 따른 피로균열진전지수 m 과 재료상수 C 와의 관계를 나타낸 것으로 m 은 투사속도 1800rpm에서 2200rpm까지 증가하다가 2200rpm 이후에서는 급격히 떨어지다가 다시 3000rpm까지는 완만히 감소하였으며 C 와 m 은 서로 반대의 경향으로 나타났다.

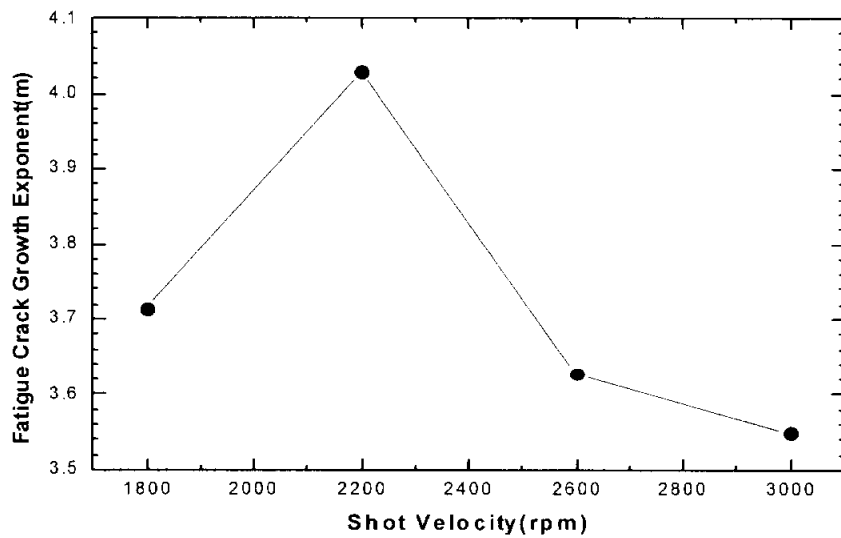


Fig. 22 Relation between fatigue crack growth exponent m and shot velocity

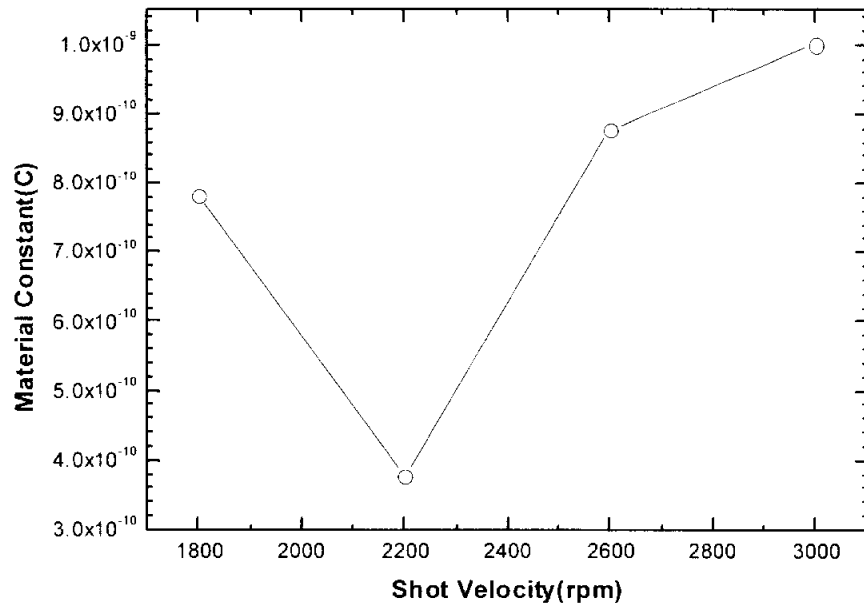


Fig. 23 Relation between material constant C and shot velocity

5.4.2 하한계 응력확대계수에 따른 C , m 관계

Fig. 24, 25에는 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 에 따른 Paris식 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에 대입하여 얻은 m , C 와의 관계를 나타내었다.

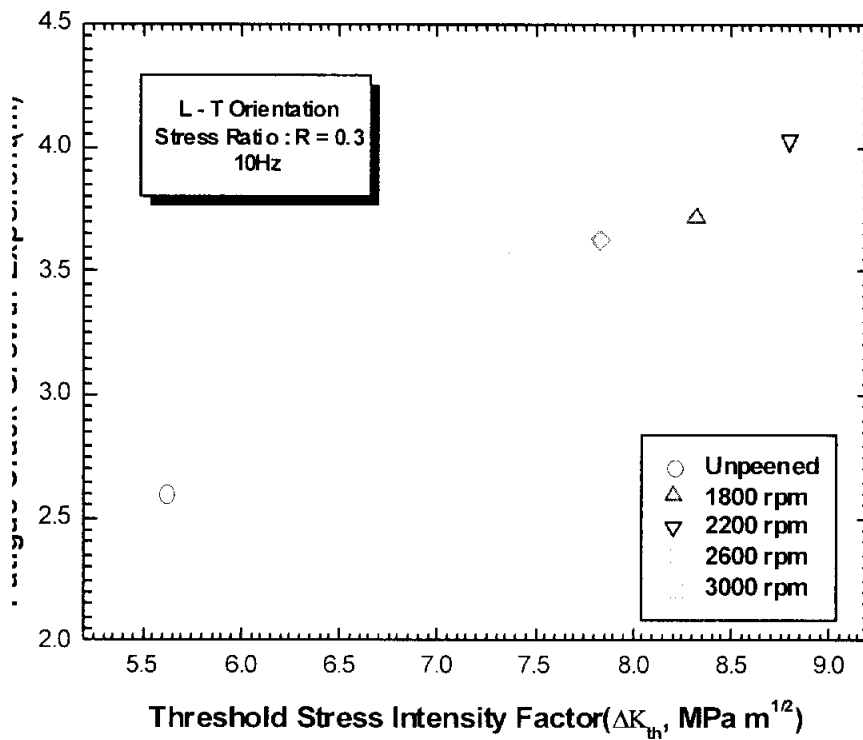


Fig. 24 Relation between fatigue crack growth exponent m and threshold stress intensity factor ΔK_{th}

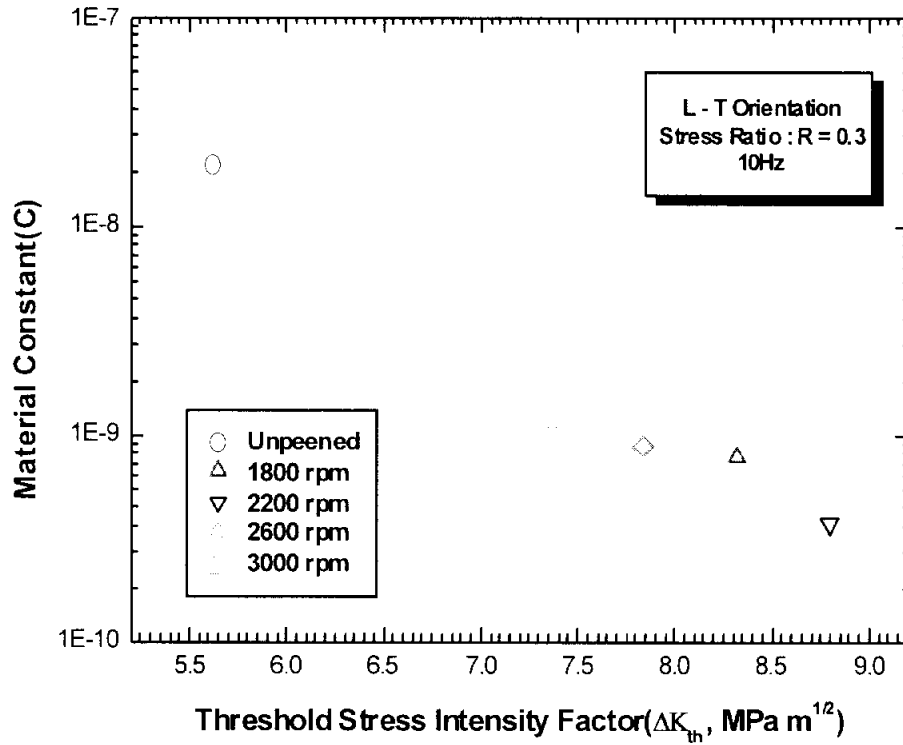


Fig. 25 Relation between material constant C and threshold stress intensity factor ΔK_{th}

Fig. 24, 25에서 나타나듯이 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 증가할수록 균열전진지수 m 의 값이 증가하였으며 Un-peened재보다 Shot-Peened재가 m 의 값이 상당히 높으며 C 는 반대의 경향을 나타내었다.

Fig. 26은 쇼트피닝 가공을 하지 않은 Un-peened재와 투사속도에 따른 Shot-peened재의 m , C 관계 그림이다.

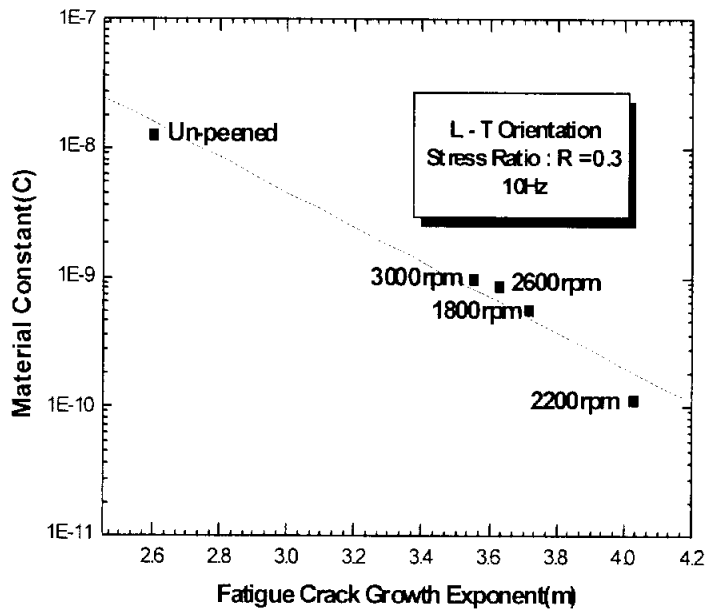


Fig. 26 Correlation between C and m in Paris' law

Shot-peened재가 Un-peened재보다 양대수 직선관계가 성립하는 제 2 단계 영역에서의 $da/dN-\Delta K$ 직선의 기울기 즉, 균열진전지수 m 의 값이 증가하며 특히 투사속도에 따라 2200rpm의 경우가 가장 높고 3000rpm의 경우가 가장 낮은 것으로 나타났다. 이것은 쇼트피닝 가공에 의해 피로 균열진전속도 da/dN 이 감소하여 균열진전지수 m 에 영향을 미치는 것으로 추정된다.

5.5 크랙길이와 사이클수

5.5.1 응력확대계수에 따른 a , N 관계

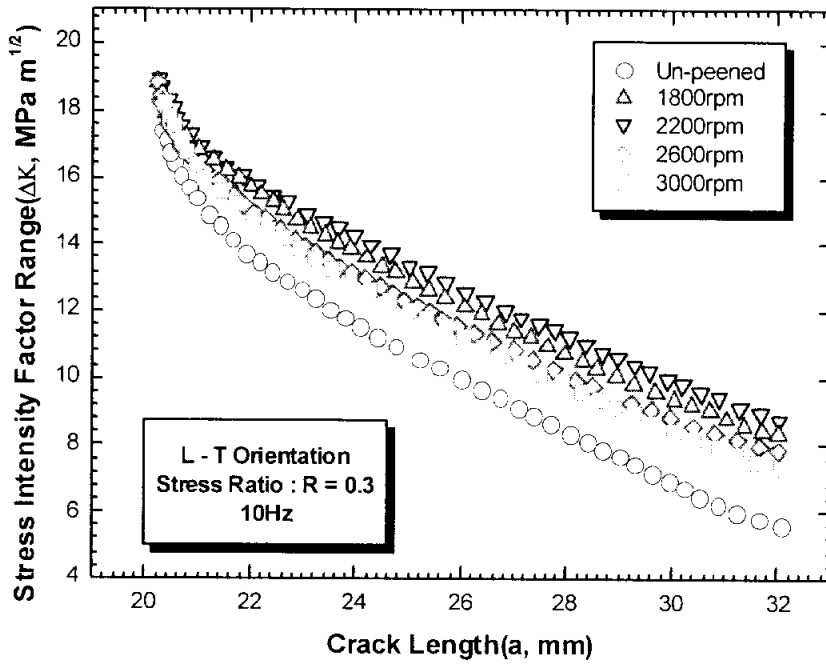


Fig. 27 Relation between stress intensity factor range ΔK and crack length a

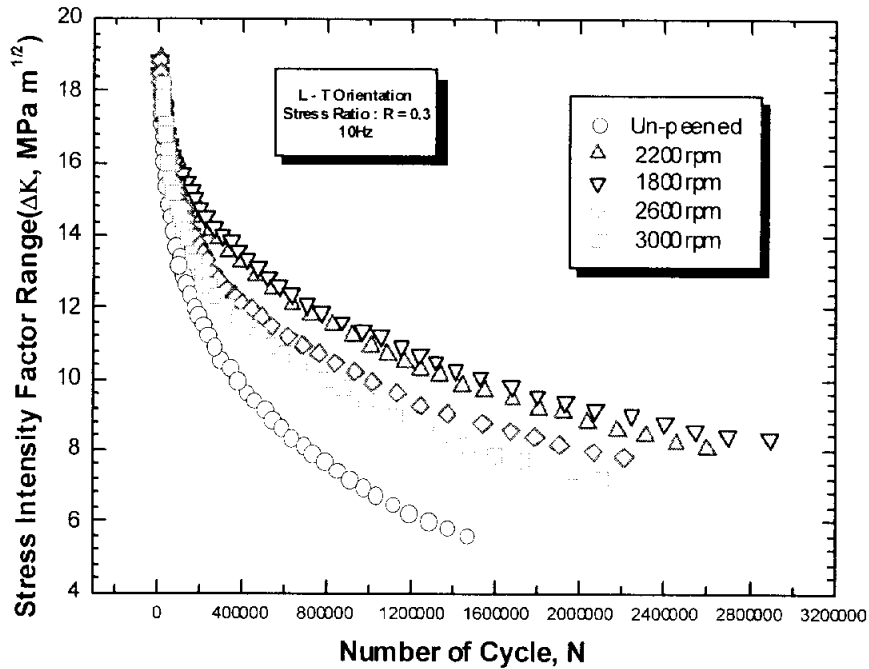


Fig. 28 Relation between stress intensity factor range ΔK and number of cycle N

Fig. 27, 28은 COD 클립게이지에 의해 컴플라이언스 법으로 계산된 크랙길이 a 의 변화와 사이클수에 대한 응력확대계수 ΔK 관계를 나타낸 것으로 Shot-peened재가 Un-peened재보다 동일 균열길이 32mm에 대해 ΔK 가 높음을 알 수 있다. 투사속도에 따라서는 2200rpm의 경우가 ΔK 가 가장 높게 나타났다. 그리고 ΔK 감소경향은 쇼트피닝 가공의 경우와 Un-peened재의 기울기가 다소 비슷하게 감소하였다.

Fig. 28에서는 Un-peened재보다 Shot-peened재가 동일균열길이 32 mm에 대해 사이클수가 훨씬 증가하였으며 쇼트피닝 투사속도에 따라서도 2200, 1800, 2600, 3000rpm의 순으로 사이클수가 증가하였다. 사이클수의 증가에 따라서도 ΔK 의 감소가 Un-peened재가 가장 급하게 감소하였고 Shot-peened재는 감소경향이 비슷하면서 완만하게 감소하였다. 동일 사이클 수 800,000회에 대해서도 Shot-peened재가 Un-peened재보다 ΔK 가 훨씬 높게 나타났다. 이는 피로균열진전지수 da/dN 의 감소로 ΔK 에 영향을 미친 것으로 추정된다.

5.5.2 피로균열진전속도에 따른 a , N 관계

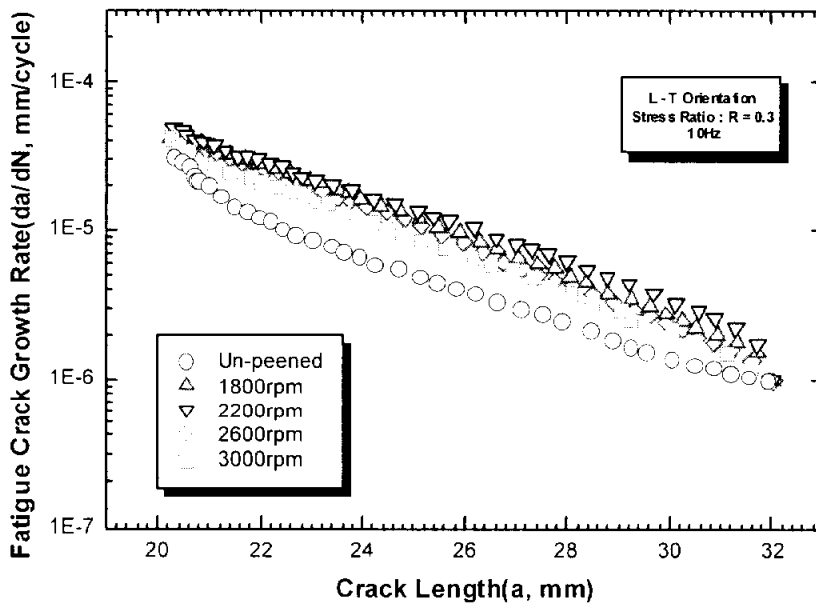


Fig. 29 Relation between stress fatigue crack growth rate da/dN and crack length a

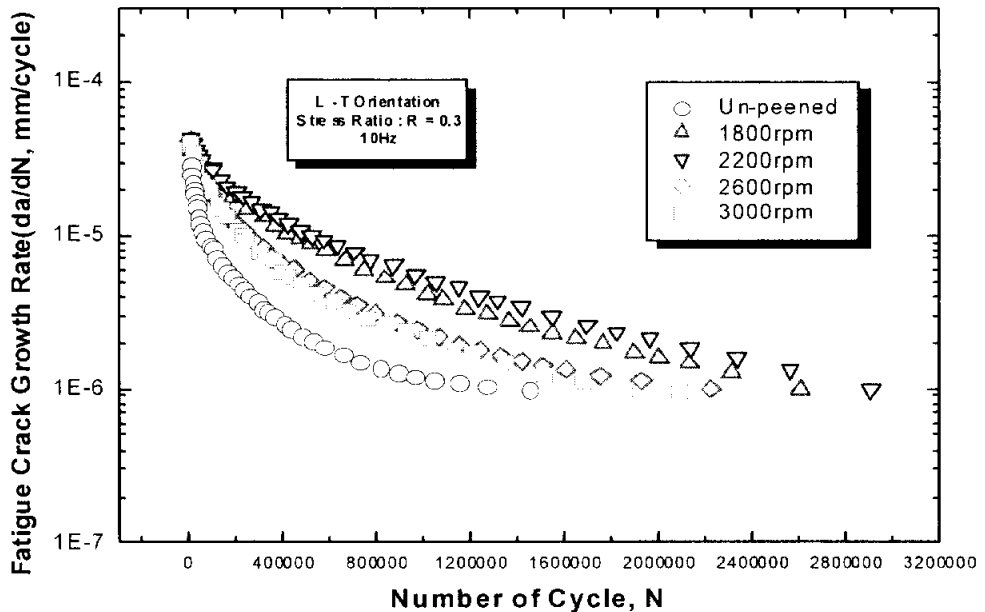


Fig. 30 Relation between stress fatigue crack growth rate da/dN and number of cycle N

Fig. 29, 30은 피로균열진전속도 da/dN 에 따른 균열길이 a 와 사이클 수 N 의 관계 그림이다. 균열길이 a 가 증가할수록 da/dN 은 서서히 감소하였으며 Shot-peened재가 Un-peened재보다 da/dN 이 높게 나타났다. 그리고 쇼트피닝 투사속도에 따라 da/dN 의 감소경향은 비슷한 경사도로 분포하였다.

Fig. 30에서 알 수 있듯이 투사속도에 따라 da/dN 의 감소 경향은 비슷한 경사도로 감소하고 있으나 2200rpm이 가장 완만하게 3000rpm이 다소 완만하게 증가하였다. 또한 Un-peened재의 경우가 동일 균열길이

32mm에 대해 사이클수가 가장 작게 나타났으며 투사속도에 따라 3000, 2600, 1800, 2200rpm 순으로 사이클수가 증가하였다. 각각의 시편에서 균열길이 32mm와 32mm직전의 da/dN 값을 살펴보면 da/dN 의 값에 비해 사이클수가 현저히 증가함을 볼 수가 있는데 이는 낮은 ΔK 에 있어 균열진전이 거의 없음을 알 수 있다.

5.5.3 쇼트피닝 투사속도에 따른 N 관계

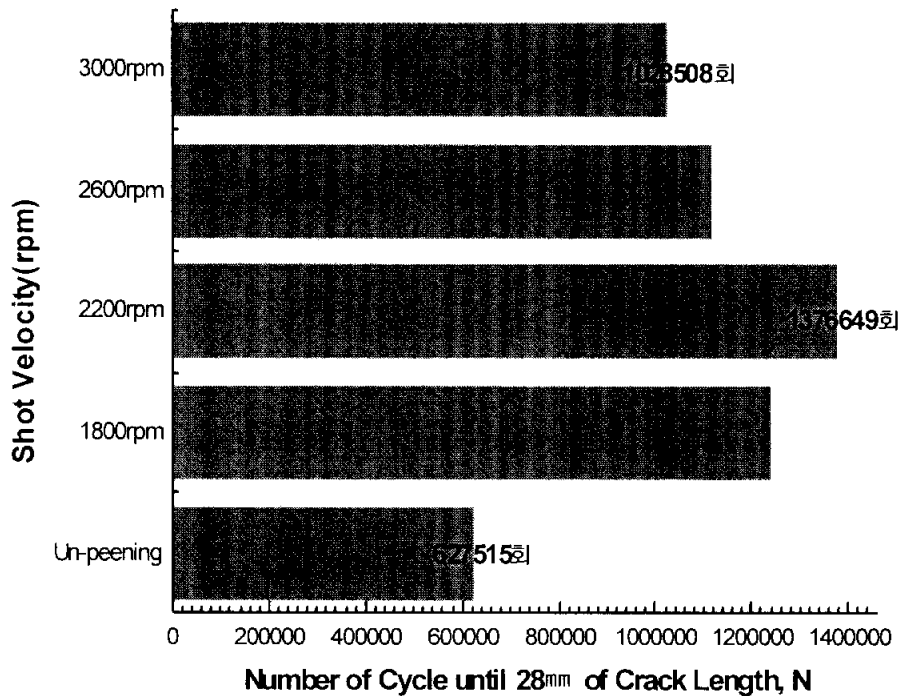


Fig. 31 Relations between shot velocity and number of cycle until 28mm of crack length

Fig. 31에 의하면 Shot-peened재가 Un-peened재보다 사이클 수가 훨씬 많은 것을 알 수가 있다. 그리고 동일 균열길이 28mm에 대해 쇼트 피닝 투사속도에 따라 2200rpm의 경우는 1,376,649회, 1800rpm은 1,241,278회, 2600rpm은 1,119,635회, 3000rpm은 1,028,508회의 순서로 사이클 수가 나타났고 Un-peened재는 627,515회로 나타났다. 이는 Un-peened재에 비해 2200rpm의 경우는 약 2배, 3000rpm의 경우는 약 1.6배의 피로수명 향상의 효과를 보이고 있다.

이러한 현상은 쇼트피닝 가공에 의한 표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열전단의 구속으로 Shot-peened재가 Un-peened재보다 수명이 더 길며 쇼트피닝 투사속도에 의한 표면에 잔재하는 압축잔류응력의 크기가 달라져 피로균열진전 억지력을 작용한 것으로 판단된다.

5.6 파단면의 특성

Fig. 32는 피로크랙진전 파면의 실물사진이고 Fig. 33은 Un-peened (a)와 쇼트피닝 가공된 Shot-peened(2200rpm) (b)의 피로크랙진전파면에 대한 시험편 표면부의 30배 확대사진으로서 파단면의 양상이 현저한 차이를 보여주고 있다.

Fig. 33 (a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 쇼트피닝에 가공에 의한 표면에 잔재하는 압축잔류응력이 피로균열진전과정에서 균열선단 소성영역을 구속함으로서 피로균열진전이 지연되는 현상이 관찰되었다. Fig. 33 (a)는 균열선단의 소성영역의 구속력이 없어 표면까지 거의 직선 형태로 나타났으며 Fig. 33 (b)는 균열선단 소성영역에 대한 구속력인 압축잔류응력이 소멸될 때까지 균열진전의 지연효과가 있어 표면에 완만한 곡선이 나타났다. 이는 표면에 피로균열진전속도 da/dN 의 지연으로 균열선단 표면부에 나타난 것으로 관찰되었다.

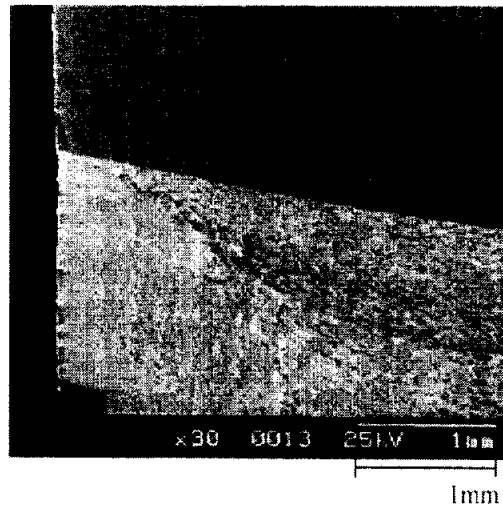


Un-peened(RT)

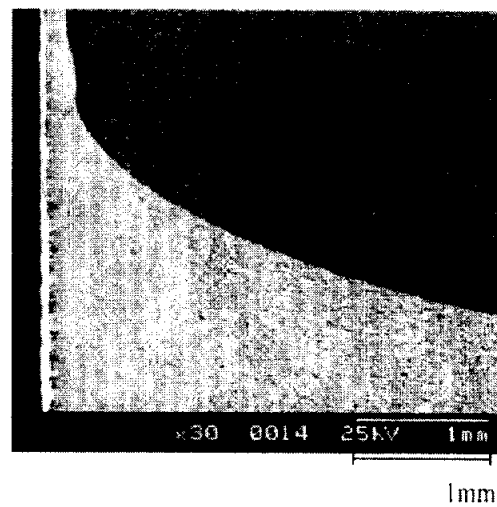


Shot-peened(2200rpm)

Fig. 32 Fracture surface of CT Specimen



(a) Un-peened



(b) Shot-peened(1800rpm)

Fig. 33 SEM Photographs of fracture surface

6. 결 론

쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력이 형성된 스프링강(JISG SUP-9)에 대하여 쇼트피닝 투사속도에 따른 응력비 $R=0.3$, 사이클 10Hz로 상온에서 피로크랙전파시험을 실시하여 스프링강의 피로크랙전파속도, 크랙전파특성 및 하한계 응력확대계수를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 동일한 ΔK 에서 쇼트피닝 가공된 Shot-peened재의 경우 피로균열 전파속도 da/dN 의 관계가 직선적으로 증가하고 있으며 쇼트피닝 가공의 투사속도에 따라 da/dN 의 관계가 차이가 있음을 알 수 있었다.
2. Shot-peened재는 쇼트피닝 투사속도에 반응하여 Un-peened재보다 피로균열 전파초기영역(영역 I)에서의 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 의 값과 균열진전시수 m , 사이클수 N 이 증가하는 것으로 나타났다.
3. $da/dN-\Delta K$ 와의 관계에서 Un-peened재의 경우는 $2.5 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립되었고 쇼트피닝 가공(2200rpm)의 경우가 $4.333 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립되었다.
4. 크랙길이 a 와 사이클수 N 과의 관계에서 Un-peened재보다 2200rpm의 경우는 약 2배, 3000rpm의 경우는 약 1.6배의 피로수명 향상의 효과를 나타내었다.
5. 쇼트피닝 가공에 의해 표면에 잔재하는 압축잔류응력이 피로균열진전 억제력을 작용한 것으로 나타났으며 투사속도 2200rpm의 경우가 가장 높고 투사속도 1800, 2600, 3000rpm 순서로 나타났다.

※ 참고문헌

- (1) 村上, 大南, オーム社, 破壊力学入門, pp. 121~127, (1979)
- (2) ASTM Standard, E1426-98, (1998)
- (3) 정성균, 이승호, 쇼트피닝 가공개론, 세화출판사, pp. 6~12, 13~29, 78, (2001)
- (4) R. D. Gillespie, Its effect on process consistency and resultant improvement in fatigue characteristics, Proc. of the 5th international conference on shot peening, Vol 1, oxford, pp. 81~90, (1993)
- (5) 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)
- (6) 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)
- (7) 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)
- (8) C. M. Verpoort, and C. Gerdes, Influence of shot peening on material properties of turbine blades, Shot peening theory and application, Institute for industrial technology transfer international, Vol 1, France, pp. 11~70, (1989)
- (9) 장동일, 정경섭, 한민구, 파괴역학, 원창출판사, pp. 119~121, (1992)

- (10) 이승호, 김희송, 정성균, 문혁, 고강도화를 위한 쇼트피닝이 피로강도에 미치는 영향, 추계학술대회 논문집, pp. 322~327, (1997)
- (11) 정성균, 이승호, 정석주, 쇼트피닝 가공조건이 피닝강도에 미치는 영향, 대한기계학회 논문집, A, 제 25권, 제 10호, pp. 1590~1596, (2001)
- (12) 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, pp. 99~125, (1999)
- (13) P. C. Paris and F. Erdogan, Tran. of the ASME Ser. D, pp. 528~534, (1963)
- (14) H. Liebowitz, Fracture. Vol, III, (1971)
- (15) 日本機械學會基準, 彈塑性 破壊引性 J 試験方法, JSME S 001-1981
- (16) Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates ASTM : E647-93, (1993)
- (17) Advanced Fatigue Crack Propagation, Instron 2490 Series Application Programs , pp. 1~4, (1991)
- (18) 小林英男, 破壊力學, 東京, 共立出版株式會社, pp. 57~63, 131~135, (1993)
- (19) 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)
- (20) 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp. 10~16, (1989)
- (21) Advanced Fatigue Crack Propagation, Instron 2490 Series Application Programs , pp. 1~4, (1991)
- (22) 禹興植 외 2명, 재료파괴공학, 서울, 보성문화사, pp. 147~170, 265~273, (1993)

A Study on The Effect of Shot Velocity by Shot peening on Fatigue Crack Growth Property for Spring Steel

Young-sok No

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

Abstract

The development of new materials that are light-weight, yet high in strength has become vital to the machinery, aircraft and auto industries. However, there are a lot of problems with developing such materials that require expensive tools, and a great deal of time and effort. Therefore, the improvement of fatigue strength and fatigue life are mainly focused on by adopting residual stress(in this thesis). The compressive residual stress was imposed on the surface according to each shot velocity(1800, 2200, 2600, 3000rpm) based on shot-peening, which is the method of improving fatigue life and strength.

By using the methods mentioned above, I arrived at the following conclusions

1. The fatigue crack growth rate(da/dN) of the Shot-peened material was lower than that of the Un-peened material. And in stage I, ΔK_{th} , the threshold stress intensity factor, of the

shot-peen processed material is high in critical parts unlike the Un-peened material. Also m , fatigue crack growth exponent and number of cycle of the Shot-peened material was higher than that of the Un-peened material. That is concluded from effect of da/dN .

2. Fatigue life shows more improvement in the Shot-peened material than in the Un-peened material. And compressive residual stress of surface on the Shot-peen processed operate resistance force of fatigue crack propagation.

Key words : Shot Peening(쇼트 피닝), Compressive Residual Stress(압축 잔류응력), Fatigue Crack Growth Rate(피로균열진전속도), Shot Velocity(투사속도), Fatigue Life(피로 수명), Threshold Stress Intensity Factor(하한 계 응력확대계수), Fatigue Crack Growth Exponent(피로균열진전지수)

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(C.O.D)
P	: Load on specimen
C_g	: Normalized K -gradient