

719
661

工學碩士學位論文

구조용강의 피로균열 진전 특성에
미치는 온도의 영향

指導教授 朴卿東

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함



釜慶大學校 産業大學院

機械設計學科

朴在郁

朴在郁의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2003年 6月 17日

主
委
委

審
員
員

金 亨 資
金 榮 大
朴 卿 東



목 차

Abstract

Nomenclature

List of Table

List of Figure

제 1 장 서 론	1
제 2 장 쇼트피닝 가공의 이론 해석	3
2.1 쇼트피닝 가공의 개념	3
2.2 쇼트피닝 강도측정	6
2.2.1. 아크 하이트(arc height)	6
2.2.2. 커버리지(coverage)	6
제 3 장 실험장치 및 방법	8
3.1 시험편	8
3.2 압축잔류응력의 부여	10
3.3 실험 장치	11
3.4 실험 방법	12
3.4.1. 압축잔류응력의 측정	12
3.4.2. 피로균열진전 실험	12
제 4 장 실험결과 및 고찰	15
4.1 저온피로균열 전파특성	15
4.2 하한계 특성과 온도와의 관계	18

4.3. 온도변화에 따른 재료상수 C, m 관계	20
4.4 저온에서의 피로균열 진전길 이와 사이클 수의 관계	25
4.5 파단면의 특성	28
 제 5 장 결 론	 31
 참고문헌	 33

The Effect of Temperature on the Characteristics of Fatigue Crack Propagation for Structure steel

Jae-Ug Park

**Department of Mechanical design
Graduate School of Pukyong National University**

Abstract

Effects of temperature variation on fatigue failure characteristics in low temperature range for shot-peened spring steel were studied experimentally. Fatigue test was done under the condition of compressive residual stress of -666.86MPa (2200rpm), stress ratio of 0.05, and the surrounding temperature of $25^{\circ}\text{C} \sim -150^{\circ}\text{C}$.

The results of the test are summarized as follows by analyzing crack propagation characteristics, low-limit stress intensity factor range, fatigue crack growth length versus number of cycles at fatigue failure.

- (1) Fatigue crack propagation characteristics for temperature variation is that linearity of da/dN log scale to ΔK log scale was slightly decreased with decreasing temperatures. The linearity was kept up

to 4×10^{-5} mm/cycle at room temperature 25°C and up to 9×10^{-4} mm/cycle at -150°C .

- (2) Low-limit stress intensity factor range was stable under the surrounding temperature of $25^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$, but it was rapidly increased under the temperature of $-40^{\circ}\text{C} \sim -100^{\circ}\text{C}$ and then moderately increased under -100°C below. This may be attributable to low temperature brittleness of the material under $-40^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$.
- (3) The variation of stress intensity factor range was $8 \sim 13.3$ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ for shot-peened material and $8.5 \sim 13.8$ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ for un-shot-peened material under the surrounding temperature of $25^{\circ}\text{C} \sim -150^{\circ}\text{C}$. Crack propagation was getting slower and the low-limit was increased with decreasing temperatures.
- (4) Number of cycles at fatigue failure was decreased with decreasing temperatures. This phenomenon is probably effect of the low temperature brittleness on fatigue crack length and number of cycles at fatigue failure. Fatigue life of shot-peened material is longer than that of un-shot-peened material for every temperature. Improvement of fatigue life comes from that compressive residual stress on sub-surface generated by shot-peening keeps the crack faces closed on the surface.

Nomenclature

ΔK	: stress intensity factor range
K	: stress intensity factor
ΔP	: load range
R	: stress ratio
K_{max}	: maximum Stress intensity factor
K_{min}	: minimum Stress intensity factor
da/dN	: fatigue crack growth rate
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

List of Table

Table 1. Chemical composition (wt. %)

Table 2. Mechanical properties

Table 3. Conditions of Shot-peening

Table 4. Measuring condition of residual stress

Table 5. The value of fatigue crack growth threshold ΔK_{th} (Mpa $\sqrt{m}$)

Table 6. Experimental constants by $da/dN=C(\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth(shot peening)

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

List of Figure

- Fig. 1 Principle of controlled shot peening
- Fig. 2 Distribution of residual stress on surface layer
- Fig. 3 The almen test strip system
- Fig. 4 Dimension of CT specimen(unit : mm)
- Fig. 5 Fixture of specimen
- Fig. 6 Apparatus of fatigue test machine(instron, 8501)
- Fig. 7 Photograph of X-Ray diffraction machine
- Fig. 8 Fatigue crack growth rate as a function of stress intensity factor range
- Fig. 9 Threshold stress intensity factor as a function of temperature
- Fig. 10 Fatigue crack growth exponent m as a function of temperature
- Fig. 11 Material constant C as a function of temperature
- Fig. 12 Crack length as a function of number of cycle
- Fig. 13 Fractography of fatigue crack growth surface at 25°C, -30°C, -50°C, -70°C, -100°C and -150°C for $R=0.05$

제1장 서론

구조물의 내구연한 또는 수명을 결정하는 요인 중 파괴기구는 매우 중요하다. 각종 구조물은 운용부하를 고려하여 설계, 제작되나 설계 하중 이하의 부하를 받는 중에도 여러 가지 유해한 파괴유발인자에 노출되게 된다. 즉, 돌발적인 충격, 진동·반복하중, 마모, 마멸 등의 기계적 요인들과 산성비, 염분 등의 오염으로 인한 화학적인 부식유발인자 등에 의하여 재료가 열화되어 최종 파괴에 도달한다. 특히, 반복하중에 의한 피로파괴기구는 항복하중 이하의 매우 낮은 하중조건에서 발생하며, 일단 피로균열의 성장이 일정한 단계에 도달하면 급속히 파괴가 일어나 치명적인 결과를 초래한다. 따라서, 반복하중을 받는 모든 구조물에서 피로파괴는 중요한 파괴기구로서 그 중요성이 더욱 강조되고 있다⁽¹⁾.

기술산업에서 요구되는 구조의 경량화는 소비자로부터 요구되는 필수적인 사항으로서 교량, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차 등에 필요한 철강소재 분야에서 활발히 연구되어지고 있다. 특히 철강소재 분야에서 재료의 고응력화에 대한 연구가 절실히 요구되고 있지만, 생산성과 같은 경제적인 측면과 환경보호 측면에서 많은 문제점을 갖고 있으므로 그것에 상응하는 소재개발은 매우 중요한 사항이 되고 있다⁽²⁾.

구조의 설계시 고려되는 금속의 고강도화, 고장력화는 구조물의 경량화를 실현시킴으로서 재료 절감과 고출력화, 연료절감이라는 잇점을 갖고 있으나, 고장력화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중 또는 진동 조건에 따라 차이는 있지만 금속표면 또는 금속 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정 성장하여 최종적으로 급속파괴 되는 현상이 발생된다⁽³⁾.

구조물의 파손은 대부분 반복적인 인장응력에 의하여 발생하기 때문에 피로수명을 증대시켜야한다.

피로수명의 연장방법으로는 피로손상보수, 잔류응력의 부여⁽⁴⁾, 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 엔진밸브스프링에 다량의 쇼트볼을 투사시켰으며 1940년에 Zimmerli는 금속표면처리 심포지엄에서 코일 스프링에 쇼트피닝을 처리한 결과 피로강도가 42% 증가된다는 것을 실증하여 지속적으로 연구하고 실용화함으로서 SAE 쇼트피닝 위원회에서는 쇼트피닝 가공에 대한 규격과 작업표준안을 제정하게 되었다⁽⁵⁾.

이러한 쇼트피닝 가공에 의해 금속 표면부에 형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속표면부에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시켜 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시켜주고 균열의 안정 성장을 지연시켜 피로수명을 향상시킨다^{(6),(7)}. 그리고, Verpoort와 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^{(8)~(10)}.

그러나 쇼트피닝 가공된 재료를 저온영역에서의 피로 시험 결과는 드물었다. 본 연구는 구조용강에 대하여 쇼트피닝 재료 -666.86MPa(2200rpm)의 압축 잔류응력으로 가공된 재료를 상온 25℃와 -30℃, -50℃, -70℃, -100℃ 및 -150℃의 저온에서 응력비 R을 0.05로 하여 쇼트피닝을 하지 않은 재료와 쇼트피닝을 한 재료에 대해 피로크랙 전파특성과 하한계 특성을 규명하여 피로수명, 잔존수명 등을 예측하여 이 분야의 설계자료로 활용하고자 한다.

제 2 장 쇼트피닝 가공의 이론해석

2.1 쇼트피닝 가공의 개념

쇼트피닝은 자동차, 항공기 부품의 피로강도를 향상시키는 표면경화법으로 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.

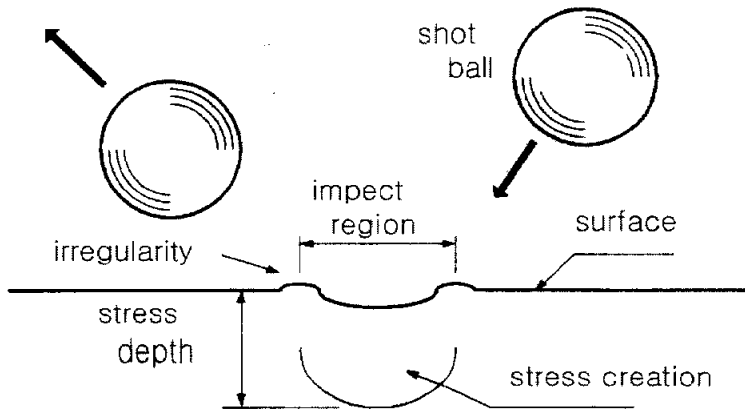


Fig. 1 Principle of controlled shot peening

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.

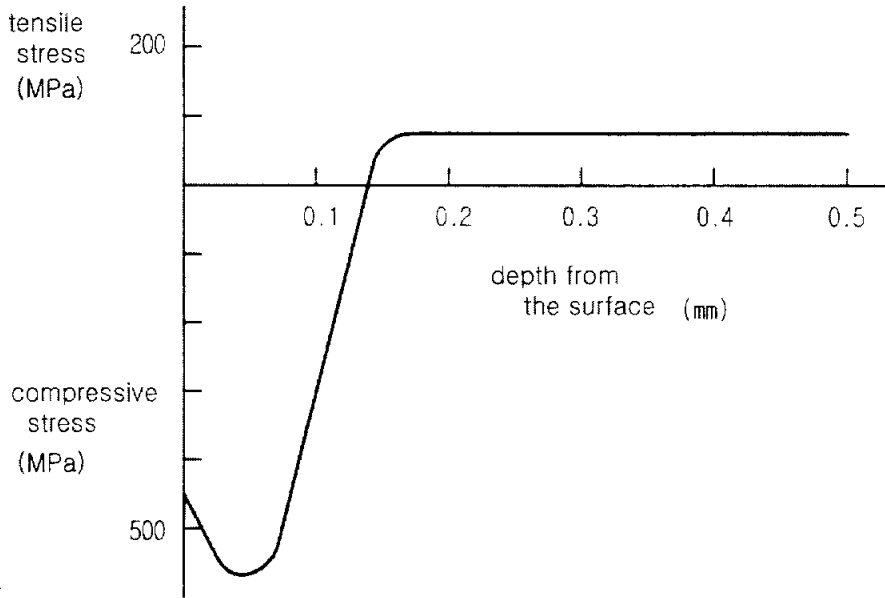


Fig. 2 Distribution of residual stress on surface layer

일반적으로 표면에서 깊이 0.1~0.5mm 정도에 분포되고 특수한 경우 0.8mm 까지 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, 체적의 함수로 형성된다. 소성 영역은 쇼트볼의 속도, 쇼

트볼의 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 정도 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 비교해 본다면, 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, 밸브와 볼록 등 많은 분야에 적용되고 있다⁽¹¹⁾.

2.2 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.

2.2.1 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 즉, arc height가 주어진다. Fig. 3은 알멘 시스템 개념도 이다.

2.2.2 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 정도를 %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⁽¹²⁾.

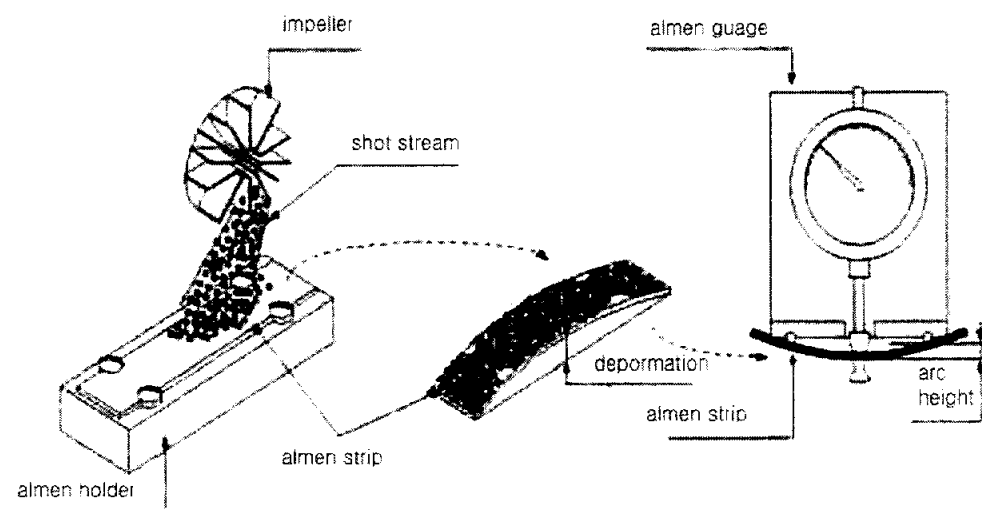


Fig. 3 The almen test strip system

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 구조용 스프링강으로 사용되고 있는 SUP9이며, Table 1은 시편의 화학적 성분이며, Table 2는 시편의 기계적 성질을 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical composition (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.55	0.22	0.73	0.11	0.05	0.02

Table 2 Mechanical properties

tensile strength (kg/mm ²)	elongation (%)	hardness (HRB)
177.8	11.4	2.75

본 시편은 피로균열 진전거동을 관찰하기 위하여 CT시험편의 두께는 12.5mm로 하였고 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 제작하였다. Fig. 4는 시편의 형상과 치수를 나타낸다.

시험편을 두께 20mm 판재에서 산소 절단기를 이용하여 압연방향이 하중방향이 되게 L-T방향으로 채취하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 외형가공은 밀링(milling)으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기(wire cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈 반지름 0.1mm가 되게 가공하였다^{(13),(14)}.

E647-93 규정에 의거해 3mm의 피로예비균열을 주었다^{(15),(16)}.

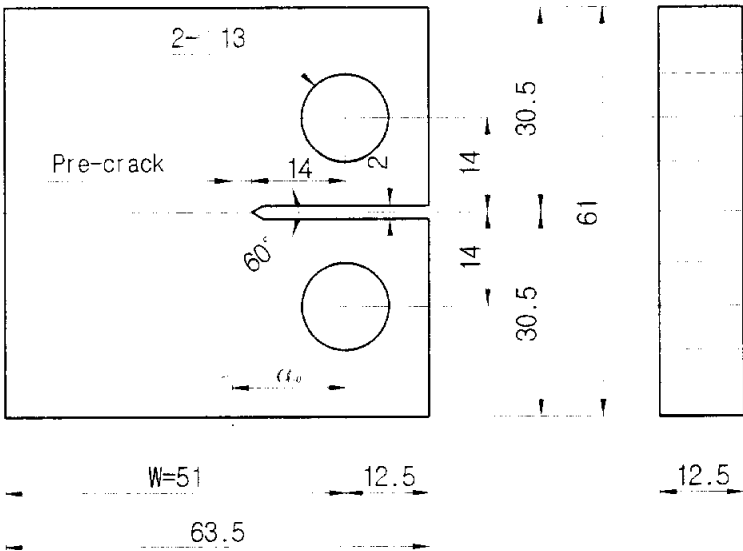


Fig. 4 Dimension of CT specimen(unit : mm)

3.2 압축잔류응력의 부여

3.1항과 같이 완성된 CT 시험편에 균일한 쇼트피닝 가공면의 압축잔류응력을 부여하기 위해 코일스프링 제조용 쇼트파이닝기와 엔진밸브 스프링 제조용 쇼트파이닝기를 사용하였으며, Table 3은 쇼트피닝 조건을 나타낸 것이다.

또한 시험편이 단면임을 감안하여 표면 전체에 균일한 쇼트피닝 가공면을 얻기 위하여 Fig. 5는 시험편의 고정 장치를 나타낸 것으로, 시험편의 양단을 치구로 고정하고 그 치구를 자전 로울러 위에 올려 놓고 쇼트볼을 투사하였다.

Table 3 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 %

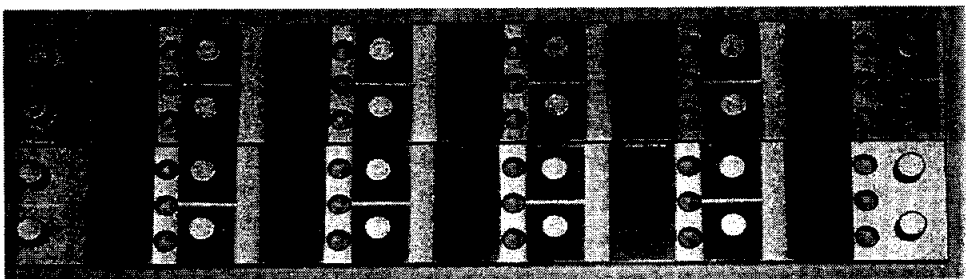


Fig. 5 Fixture of specimen

3.3 실험 장치

Fig. 6은 본 실험에 사용된 전기 유압식 파괴시험기(INSTRON 8501, 1000KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 콘트롤하였다. 균열길이 측정은 시편에 COD클립게이지를 이용한 compliance법으로 ASTM E647-93의 규정에 따라 실험하였다.

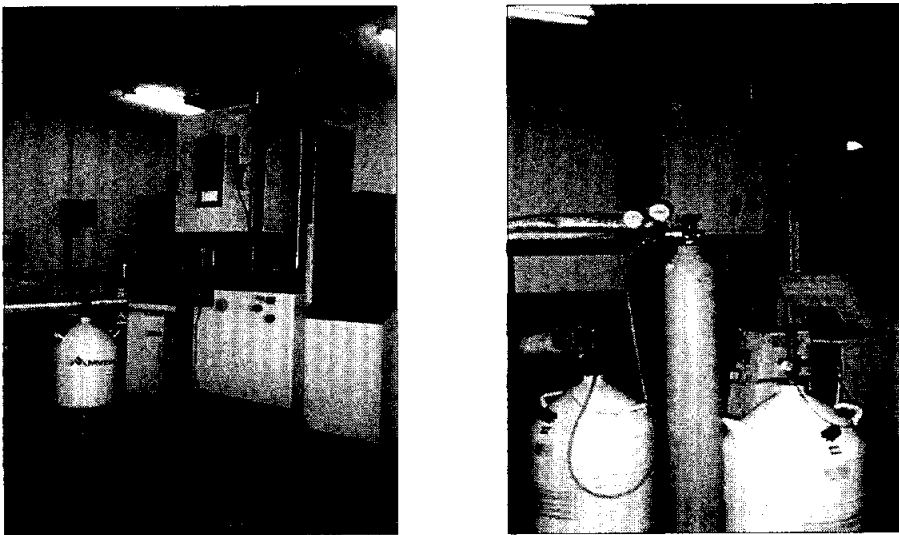


Fig. 6 Apparatus of fatigue test machine(instron, 8501)

3.4 실험 방법

3.4.1 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 잔류응력 측정법이다.

쇼트피닝 가공된 시험편 표면의 압축잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기(rigaku - MSF2M, Fig. 7)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20 μ m 단위로 연마 해가면서 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였다. Table 4는 X선 측정 조건이다.

3.4.2 피로균열진전실험

실험은 서보전기 유압식 피로시험기를 사용하여 하중감소 제어방식으로 주파수 20Hz, 정현파형으로 하였다.

저온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착해 액체 질소용기에 질소 보배를 연결하여 액체 질소 용기 내의 압력을 5MPa내외로 되도록 하여 액체질소를 챔버내로 유입시켜 저온환경으로 만든다. 실험 중 액체질소의 감소에 따라 질소보배의 압력으로 액체질소의 유입을 정상적으로 밀어주며 온도유지는 전자석밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 되어 있다. 온도편차는 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였고 응력비 R 은 0.05, 실험온도는 상온(25°C)과 -30°C , -50°C , -70°C , -100°C 및 -150°C 로 하였다.

본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK 의 계산식은 다음과 같다.

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

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

여기서, α 는 하중중심에서의 균열길이, W 는 하중중심에서의 시험편 길이, B 는 시험편의 두께이며 ΔP 는 하중변위이다⁽¹⁴⁾.

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^{(13),(14),(16)}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 감소조건은 다음과 같다.

ΔK 의 기울기는^{(14),(17)}

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

da/dN 의 측정범위 $\Delta a \leq 0.5mm$ (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.

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°	
diffraction	scintillation counter	

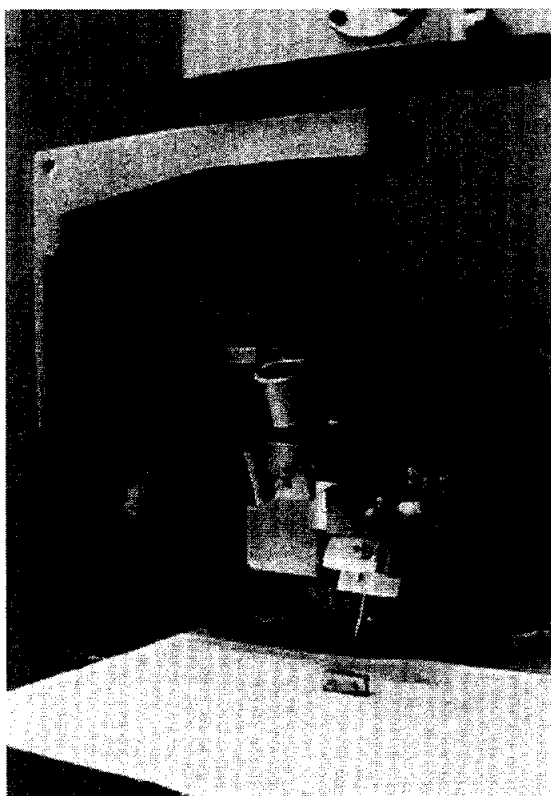


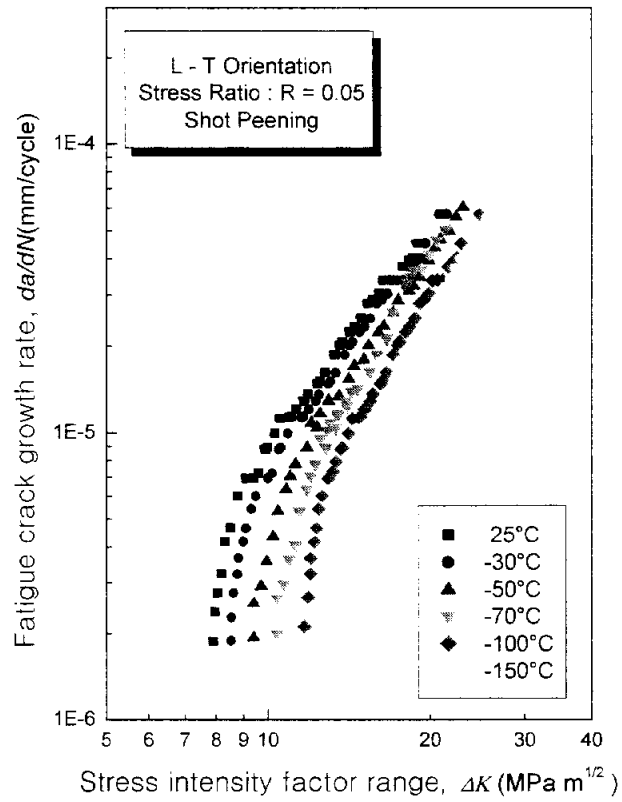
Fig. 7 Photograph of X-Ray diffraction machine

제4장 실험결과 및 고찰

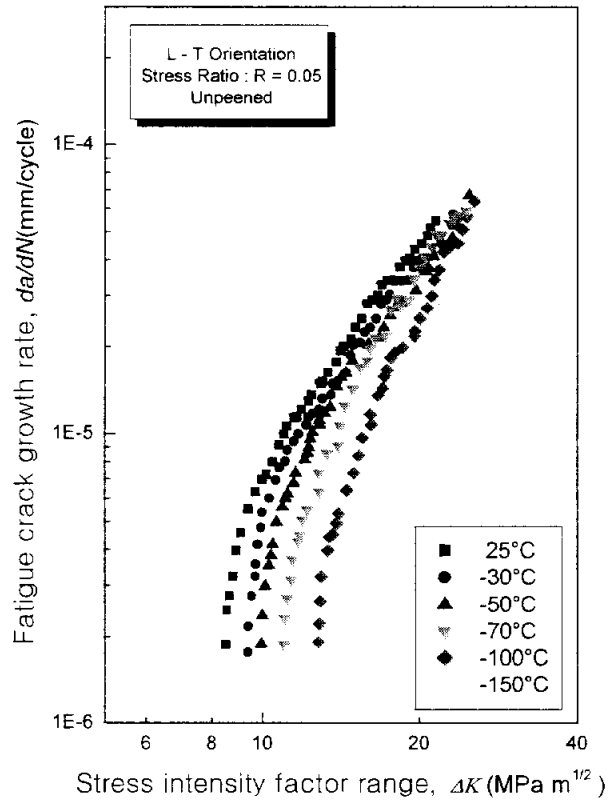
4.1 저온피로균열 전파특성

Fig. 8은 쇼트피닝에 의해 $-666.86\text{MPa}(2200\text{rpm})$ 의 압축잔류응력으로 가공된 구조용 스프링강 SUP9의 unpeened재와 shot peening재에 대하여 CT시험편으로 응력비 $R=0.05$ 에서 시험온도 $25^{\circ}\text{C}(\text{RT})$, -30°C , -50°C , -70°C , -100°C 및 -150°C 에서의 점감하중법에 의해 피로균열 전파속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다. 동일한 ΔK 에서 저온으로 갈수록 da/dN 의 관계는 직선적으로 증가하고 있으며, 또한 Fig. 8의 (a)와 (b)를 비교하여 보면 unpeened재가 shot peening재보다 빠르게 균열이 진전되고 있음을 알 수 있다. 또한 실험 결과 shot peening 및 unpeened재는 온도가 내려 갈수록 피로균열 전파초기영역(제1단계 영역)에서의 피로균열진전 하한계 특성 ΔK_{th} 값이 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 현상은 저온일수록 탄성계수의 상승으로 인한 재료강도의 증가 때문으로 균열초기 피로저항성이 우수한 것으로 판단되며, 또한 쇼트피닝가공재는 unpeened재에 비해 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속으로 피로강도의 증가로 판단된다⁽¹⁸⁾.



(a) shot peening



(b) unpeened

Fig. 8 Fatigue crack growth rate as a function of stress intensity factor range

4.2 하한계 특성과 온도와의 관계

Fig. 9는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 -666.86MPa(2200rpm)인 구조용 스프링강 SUP9에 대해 상온 25℃에서 -150℃까지 피로 크랙전파 특성 실험을 통하여 하한계 응력확대계수와 온도와의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 9에서 상온 25℃에서 -40℃까지는 하한계 응력확대계수가 완만하게 증가하다가 -40℃부터 -100℃까지는 급격하게 증가함을 알 수 있었다.

-40℃부터 급격하게 증가하는 것은 저온취성의 영향이 크게 나타난 것으로 생각된다⁽¹⁸⁾. Table. 5는 실험결과를 온도별로 표시하여 나타낸 것이다.

Table 5 The value of fatigue crack growth threshold ΔK_{th} (Mpa $\sqrt{m}$)

temperature	25℃	-30℃	-50℃	-70℃	-100℃	-150℃
shot peening	8.0	8.51	9.4	10.4	12.2	13.3
unpeened	8.5	9.1	10.0	11.7	12.6	13.8

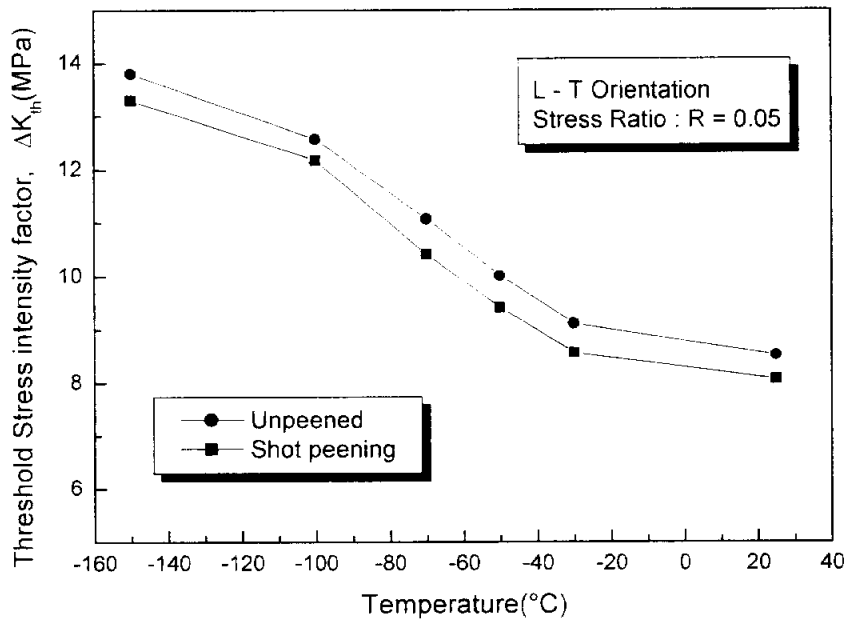


Fig. 9 Threshold stress intensity factor as a function of temperature

4.3 온도변화에 따른 재료상수 C, m 관계

Fig. 10과 Fig. 11은 피로균열진전과정의 제2단계 영역에 있어서 da/dN - ΔK 는 양대수 선도상에서 직선 관계로 나타낸 것이고, 이것을 Paris식 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 에 대입하여 Table 6 및 Table 7에 그 결과를 나타낸 것이다.

shot peening재가 unpeened재보다 양대수 직선관계가 성립하는 제 2단계 영역에서의 da/dN - ΔK 직선의 기울기 즉, 균열진전지수 m의 값이 급격히 증가한 것으로 나타났으며, 이것은 재료의 파괴가 시작되면 균열진전 속도 da/dN 가 증가하게 되고, 따라서 취성파괴가 일어날 가능성이 커질 것으로 추정된다.

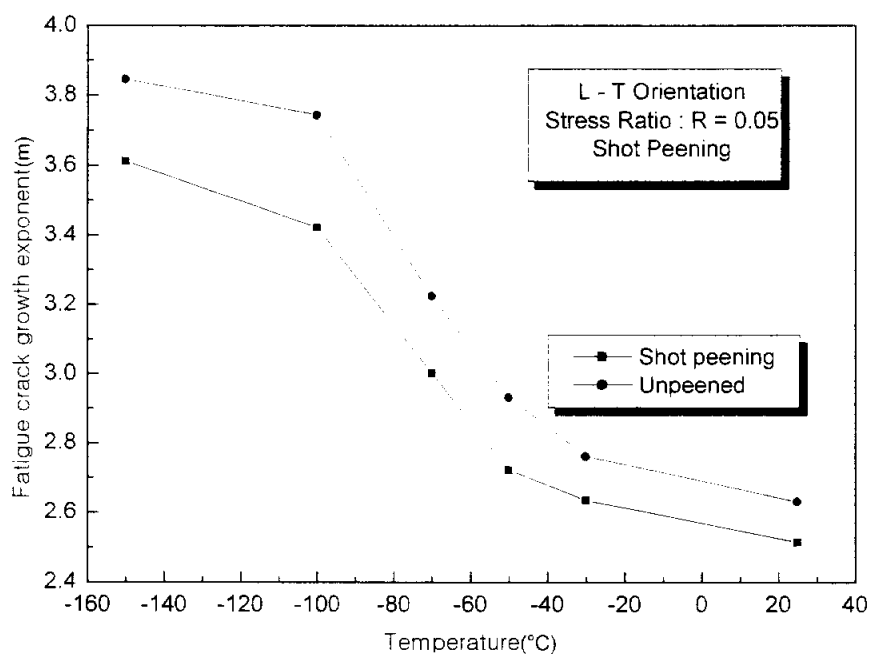


Fig. 10 Fatigue crack growth exponent m as a function of temperature

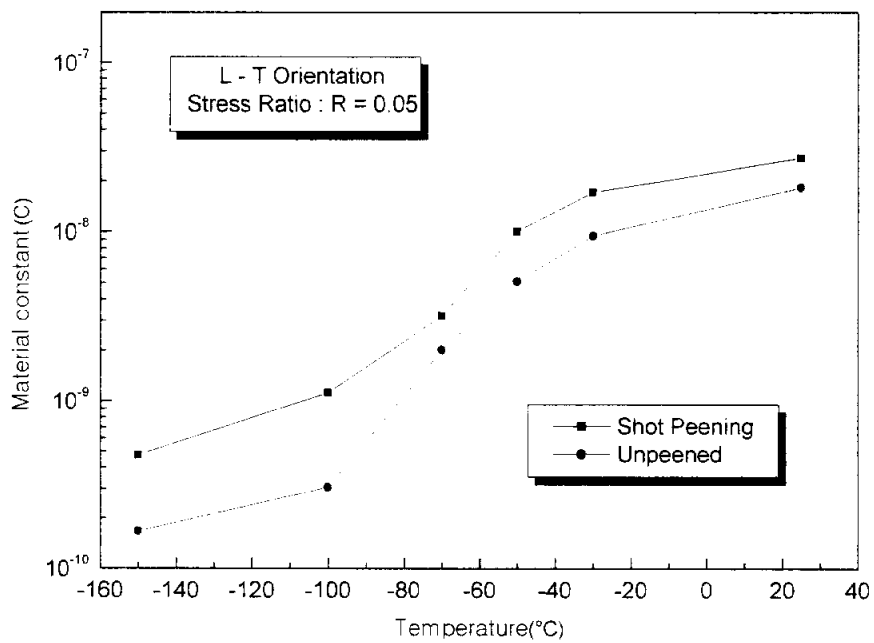


Fig. 11 Material constant C as a function of temperature

Table 6 Experimental constants by $da/dN=C(\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth(shot peening)

tem.	ΔK range (MPa $\sqrt{m}$)	da/dN range (mm/cycle)	m	C
25°C	$10.95 \leq \Delta K \leq 20.91$	$1.131 \times 10^{-5} \leq da/dN \leq 5.701 \times 10^{-5}$	2.515	2.71×10^{-8}
-30°C	$10.49 \leq \Delta K \leq 21.51$	$8.762 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.721 \times 10^{-5}$	2.635	1.72×10^{-8}
-50°C	$11.01 \leq \Delta K \leq 23.06$	$7.051 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.022 \times 10^{-5}$	2.721	1.01×10^{-8}
-70°C	$11.82 \leq \Delta K \leq 21.37$	$6.351 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.031 \times 10^{-5}$	3.001	3.02×10^{-9}
-100°C	$12.92 \leq \Delta K \leq 20.19$	$6.923 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.36 \times 10^{-5}$	3.421	1.12×10^{-9}
-150°C	$14.02 \leq \Delta K \leq 25.47$	$6.016 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.51 \times 10^{-5}$	3.612	4.75×10^{-10}

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

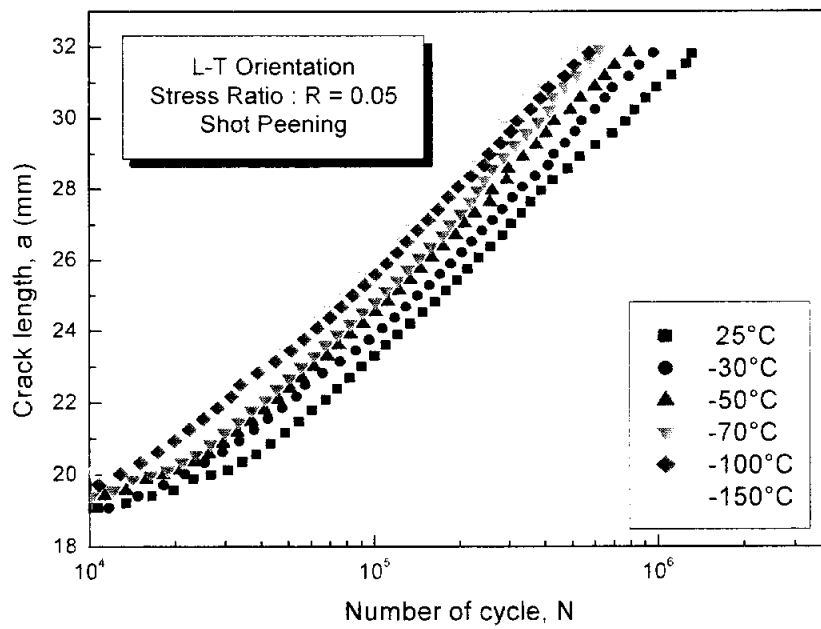
tem.	ΔK range (MPa $\sqrt{m}$)	da/dN range (mm/cycle)	m	C
25℃	$15.95 \leq \Delta K \leq 21.51$	$2.801 \times 10^{-9} \leq da/dN \leq 5.443 \times 10^{-5}$	2.631	1.81×10^{-8}
-30℃	$10.01 \leq \Delta K \leq 23.21$	$5.362 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.702 \times 10^{-5}$	2.761	9.42×10^{-9}
-50℃	$10.41 \leq \Delta K \leq 24.9$	$3.821 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.667 \times 10^{-5}$	2.931	5.09×10^{-9}
-70℃	$13.34 \leq \Delta K \leq 24.65$	$8.513 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.872 \times 10^{-5}$	3.223	2.01×10^{-9}
-100℃	$15.32 \leq \Delta K \leq 25.46$	$8.351 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.332 \times 10^{-5}$	3.743	3.05×10^{-10}
-150℃	$16.76 \leq \Delta K \leq 24.68$	$8.015 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 4.538 \times 10^{-5}$	3.846	1.66×10^{-10}

4.4 저온에서의 피로균열 진전길이와 사이클 수의 관계

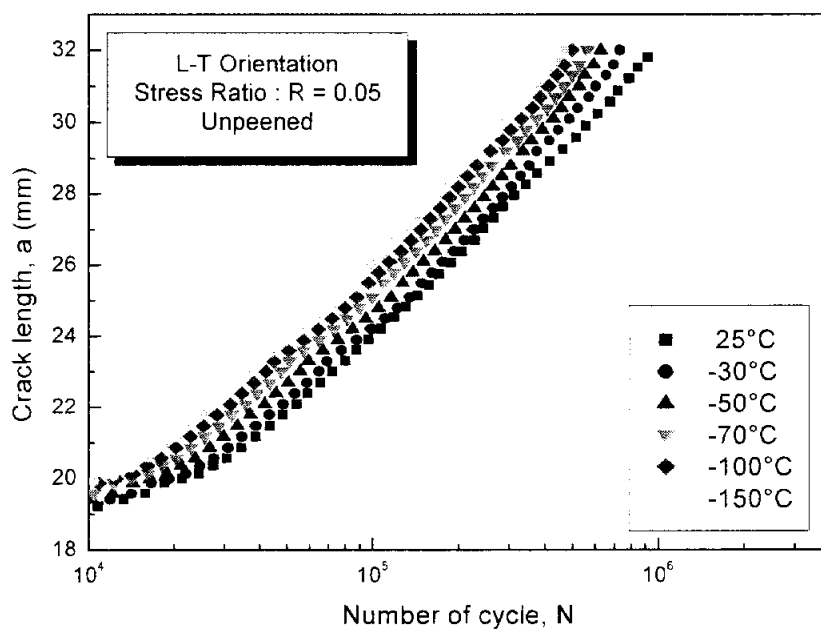
Fig. 12은 저온에서의 피로균열 진전길이와 사이클 수의 관계를 나타내었다. 각 온도에 있어서 크랙길이는 저온으로 갈수록 사이클의 수가 줄어드는 것을 볼 수가 있다. shot penning재의 각각의 사이클은 상온(25℃)에서 1.32×10^6 Cycle, -30℃에서 9.7×10^5 Cycle, -50℃에서 7.9×10^5 Cycle, -70℃에서 6.3×10^5 Cycle, -100℃에서 5.7×10^5 Cycle, -150℃ 5.2×10^5 Cycle로 나타났다.

그리고 unpeened재의 각각의 사이클은 상온(25℃)에서 9.2×10^5 Cycle, -30℃에서 7.3×10^5 Cycle, -50℃에서 6.3×10^5 Cycle, -70℃에서 5.6×10^5 Cycle, -100℃에서 5.0×10^5 Cycle, -150℃ 4.6×10^5 Cycle로 나타났다. 이처럼 상온(25℃)에서 저온 -150℃로 갈수록 사이클 수가 감소하는 것을 볼 수 있었다.

이러한 현상은 저온 취성이 피로크랙길이와 사이클에 미치는 영향으로 생각되고, 또한 shot penning재가 unpeened재 보다 피로수명이 향상 되었는데 이는 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속으로 shot penning재가 unpeened재 보다 수명이 더 길어진 것으로 판단된다.



(a) shot peening



(b) unpeened

Fig. 12 Crack length as a function of number of cycle

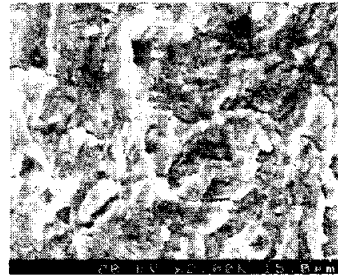
4.5 파단면의 특성

Fig. 13은 구조용 스프링강 SUP9에 대하여 상온 25℃와 -30℃, -50℃, -70℃, -100℃ 및 -150℃ 등의 저온 환경에서, shot peening재와 unpeened재에 대한 피로균열진전특성을 K -감소방식으로 시험한 후, 제 2 단계 영역의 중심부의 미시적 파면양상을 주사식 전자현미경으로 촬영하여 나타내었다.

각 시험편의 파단면에는 피로파단면의 특징이 되는 스트라이에이션(striation)이 관찰되었는데, 그 생성은 인장과정에서 균열선단에 소성변형이 생김에 따라 둔화가 일어나고, 압축과정에서 재예화가 일어나는 둔화-재예화 과정에 의해 형성되는 것으로 반복응력 1사이클당 스트라이에이션 1개가 형성되는 것으로 보이며 각 온도별 스트라이에이션의 크기와 모양은 큰 변화가 없었으나, 파면 조직상의 크기는 뚜렷한 차이를 나타내어 저온일수록 취성과파괴가 발생한 것으로 판단된다⁽¹⁹⁾.

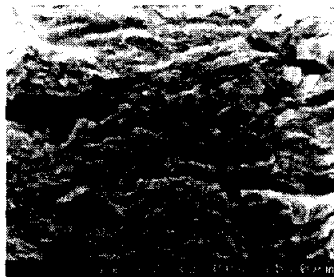


(a) shot peening



(b) unpeened

temperature : 25°C (RT)



(a) shot peening



(b) unpeened

temperature : -30°C

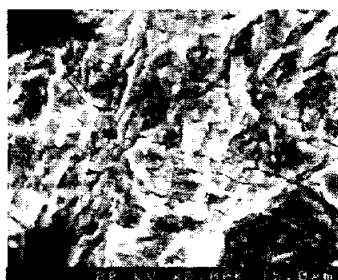


(a) shot peening



(b) unpeened

temperature : -50°C

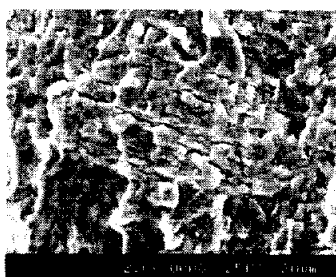


(a) shot peening

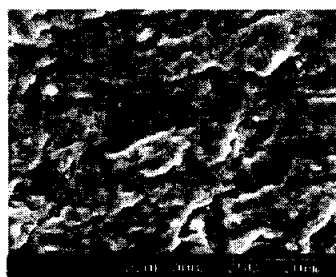


(b) unpeened

temperature : -70°C

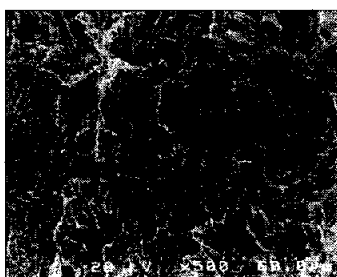


(a) shot peening

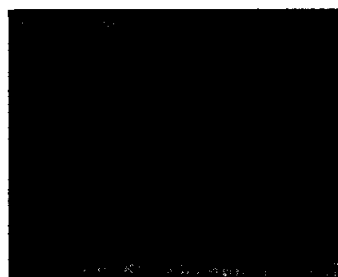


(b) unpeened

temperature : -100°C



(a) shot peening



(b) unpeened

temperature : -150°C

Fig. 13 Fractography of fatigue crack growth surface at 25°C , -30°C , -50°C , -70°C , -100°C and -150°C for $R=0.05$

제5장 결 론

쇼트피닝에 의해서 압축잔류응력이 부과된 구조용 스프링 강에 대하여 저온에서 피로수명 특성의 변화를 실험적으로 연구하였다. 압축잔류응력 -666.86MPa(2200rpm), 응력비 0.05, 주위온도 25℃ ~ -150℃의 조건으로 피로시험을 실시하여 균열전파특성, 하한계 응력확대계수, 피로균열 성장 길이와 피로파괴 사이클 수의 관계를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 온도 변화에 따른 피로균열의 전파특성은 온도의 저하에 따라 $da/dN \sim \sqrt{K}$ 양 대수 직선관계가 조금씩 감소함을 보였다. 상온 25℃의 경우 양 대수 직선관계는 4×10^{-5} mm/cycle까지 성립하고 -150℃에서 9×10^{-4} mm/cycle까지 성립하였다.
- (2) 하한계 응력확대계수는 25℃ ~ -40℃의 온도범위에서 변화하지 않았지만 -40℃ ~ -100℃에서 급격하게 증가하였고 -100℃이하에서는 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 -40℃ ~ -50℃에서 저온취성의 영향으로 판단된다.
- (3) 응력확대계수의 변화 폭은 25℃ ~ -150℃의 온도범위에서 쇼트피닝 재에 대하여 $8 \sim 13.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, 쇼트피닝 미적용재에 대하여 $8.5 \sim 13.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이다. 즉, 온도의 저하에 따라 균열전파속도가 감소하여 하한계가 증가하였다.
- (4) 피로파괴 사이클 수는 온도의 저하에 따라 감소하였는데 이 현상은 재료의 저온취성이 피로균열길이와 피로파괴 사이클 수에 영향을 미친

것으로 판단된다. 쇼트피닝재는 쇼트피닝 미적용재에 비하여 각 온도에서 피로수명의 향상을 보이고 있다. 피로수명의 향상은 부표면(sub-surface)에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단이 구속되기 때문이라고 사료된다.

※ 참 고 문 헌

- (1) 양치훈, 신광선(1997). “피로균열성장속도의 측정법”, 大韓金屬學會 會報, Vol. 10, No. 3, pp. 1
- (2) 박경동, 정찬기(2001). “SA516강의 탄소성 파괴인성평가에 관한 연구”, 한국해양공학회 논문집, 제34권 제1호, pp. 37~44
- (3) 박경동, 정찬기(2001). “JISG4081SUP7-DIN50CrV4강의 피로강도에 미치는 쇼트피닝의 영향”, 한국해양공학회 논문집, 제15권 제4호, pp. 66~72
- (4) ASTM Standard, E1426-98, (1998)
- (5) 정성균, 이승호(2001), “쇼트피닝 加工概論”, 世和출판사, pp. 6~12, 13~29, 78
- (6) 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)
- (7) 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)
- (8) 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)
- (9) 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)
- (10) 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)

- (11) 이승호, 김희송, 정성균, 문혁, 고강도화를 위한 쇼트피닝이 피로강도에 미치는 영향, 추계학술대회 논문집, pp. 322~327, (1997)
- (12) 정성균, 이승호, 정석주, 쇼트피닝 가공조건이 피닝강도에 미치는 영향, 대한기계학회 논문집, A, 제 25권, 제 10호, pp. 1590~1596, (2001)
- (13) 日本機械學會基準, 彈塑性 破壊引性 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) 이용복, 김호경, 정진성(1999), "피로해석의 기초", 청문각, pp. 99~125, (1999)
- (16) 小林英男(1993). "破壊力學", 共立出版株式會社, pp. 57~63, 131~135, (1993)
- (17) 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp. 10~16, (1989)
- (18) 박경동, 노태영, 김영대, 김형자, 손재윤(1999). "압력용기용 A516강의 저온피로 크랙전파특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제13권 제3(1)호 pp.108~115
- (19) 박경동, 김정호, 정찬기, 하경준(2000). "압력용기용 강의 저온 피로크랙 하한계 특성에 관한 연구(II)", 한국해양공학회 논문집, 제14권 제3호, pp. 78~83

감사의 글

눈을 감고 돌이켜 봅니다.

결국 시간이 해결하여 준 것이지만, 베푸는 것보다는 도움을 많이 받는 적자 인생에 또 하나의 빛이 추가 되었습니다.

나름의 뜻을 가지고 시작하게 된 사연을 접어 두더라도, 쏠살같은 세월에 벌써 막을 내리는 아쉬움과 함께 감사의 글로 빛을 대신하고자 합니다.

오늘의 논문이 있기까지

지난 시간 격려와 배려로 지도하여 주신 박경동 지도교수님께 깊은 감사를 드리며, 김영대 교수님 그리고 심사위원장으로 부족한 부분을 메워주신 김형자 교수님, 아울러 기계설계학과 모든 교수님들께 진심으로 감사를 드립니다.

때마다 각종 자료를 수집·제공하여 준 연구실의 동생들, 또한 학업이 진행되는 동안 그 어느 해보다 유별나게 다사다난했던 학교 생활을 같은 부서에서 함께 한 동료들과도 작은 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

끝으로

이 세상에서 가장 사랑하는 나의 아내 허성자

나의 가족들

그리고 나를 아는 모든 분께 깊은 감사와 애정을 드립니다.