

해양구조용강의 피로강도향상 공법개발

박경동* · 정재욱**

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 대학원 기계공학부

The Development Methods of Fatigue Strength Improvement for the Marine Structural Steel

KEYOUNG-DONG PARK* · JAE-WOOK JUNG**

*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

**Graduate School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Shot Peening (쇼트 피닝), Residual Stress (잔류응력), Low Temperature (저온), Fatigue Crack Propagation (피로균열전파)

ABSTRACT: This study made an experiment on fatigue crack propagation da/dn , stress intensity factor range ΔK respectively in room temperature and in low temperature. And we got the following characteristics from fatigue crack growth test carried out in the environment of room temperature and low temperature at 25°C, -60°C, -80°C, and -100°C in the range of stress ratio of 0.3 by means of opening mode displacement. The threshold stress intensity factor range ΔK_{th} in the early stage of fatigue crack growth (Mode I) and stress intensity factor range ΔK in the stable of fatigue crack growth (Mode II) was decreased in proportion to descend temperature. It assumed that the fatigue resistance characteristics and fracture strength at low temperature and high temperature is considerable higher than that of room temperature in the early stage and stable of fatigue crack growth region.

1. 서 론

산업이 발달하면서 인류는 생활의 영역을 바다로 점점 확장해 나가고 있다. 그래서 여러 다양한 해양구조물들이 바다에 세워지고 있으며, 그 중에서도 심해의 환경 즉 저온환경에 견디는 재료의 필요성도 증가하는 추세이다.

이에 따라 여러 피로강도 향상법들이 연구, 개발되어 왔으며, 그 중에서도 쇼트피닝은 재료의 고강도화, 고장력화로 부품의 경량화를 실현시킴으로서 재료절감과 고출력화, 연료절감이라는 잇점을 갖고 있다. 그러나 지나친 고장력화는 설계형상이나 외부하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있지만 금속표면 또는 금속 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정 성장하여 최종적으로 금속파괴 되는 현상이 발생할 수 있다.(박, 정, 2001)

본 연구는 해양구조물 재료로 사용되는 스프링강(SUP9 강)에 대하여 -735MPa의 압축잔류응력으로 가공된 재료를 상온 25°C,

-60°C, -80°C, 및 -100°C의 저온에서 응력비 R=0.3으로하여 피로크랙전파특성과 하한계특성, 피로균열진전지수 m과 재료상수 C의 관계를 규명하여 저온환경에서의 피로수명, 잔존수명 등을 예측하여 안전설계에 기여하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드 상태의 압연 강재 스프링강이다.

기계 가공된 노치가 실제로는 매우 둔한 첨단을 갖는 것에 비하여 피로균열성장실험의 기본역학인 선형탄성파괴역학(L.E.F.M)은 이상적으로 날카로운 균열을 전제로 하고 있다. 따라서, 노치로부터 날카로운 예비균열을 성장시켜 노치의 영향과 균열 첨단모양 및 하중 이력으로 인한 영향을 감소하고 예상 경로를 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였고 ASTM E647-93 규정에 의거해 3mm의 피로에 비균열을 주었다.

제1저자 박경동 연락처: 부산광역시 남구 용당동 산 100번지

부경대 용당캠퍼스 Tel)051-620-1592, Fax)051-620-1592

parkkd@pknu.ac.kr

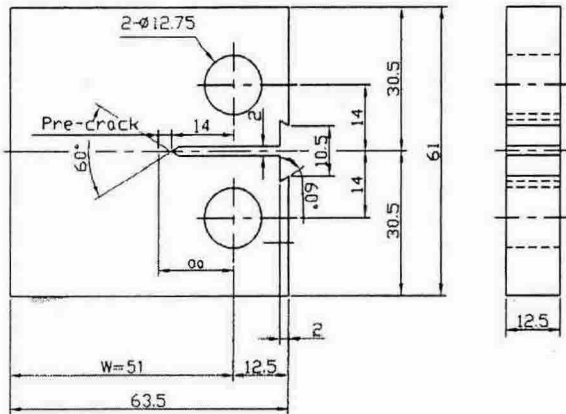


Fig. 1 Configuration of CT-specimen (unit:mm)

Fig. 1은 콤팩트(CT) 시험편으로, 피로균열 진전거동을 관찰하기 위해 두께 12.5mm로 가공하였다. 시험편의 채취는 열간 압연된 프렛바 상태에서 L-T방향으로 채취하였으며, 시험편의 열처리는 970℃에서 20분간 가열한 후 유중에서 담금질하여 정상적인 마르텐사이트 조직이 형성되면, 이 시험편을 다시 490℃에서 80분간 뜨임하였다.

노치의 슬로터 가공은 와이어 커팅머신에 의하여 가공한 후 표면을 그라인딩 머신으로 연마하였다.

2.2 실험 장치



Fig. 2 Fixture of specimen

Table 1 Conditions of Shot-peening

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

시험편 가공시 표면 전체에 균일한 쇼트피닝 가공을 하기

위해 Fig. 2와 같이 시험편을 자전 롤러 위에 올려놓은 치구에 양단을 고정하고 Table 1.과 같은 조건으로 쇼트 볼을 투사하였다.

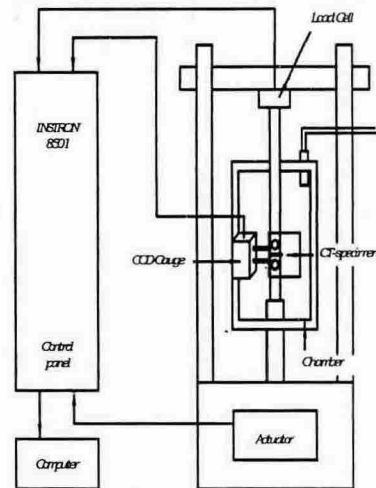


Fig. 3 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

균열길이 측정은 시험편에 COD 클립 게이지를 부착하여 Compliance법을 이용하였다. Fig. 3은 본 실험에 사용된 전기유압식피로시험기(INSTRON 8501)이다.

2.3 실험방법

2.3.1 압축잔류응력

쇼트 피닝된 시험편 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기 (RIGAKU - MSF2M)를 사용하였다. Fig 4는 측정기를, Table 2는 여러 가지 측정조건들을 나타내고 있다.

Table 2 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. 4 X-ray residual stress measuring system (RIGAKN-MASF2M)

2.3.2 피로균열진전시험

실험은 서보전기 유압식 피로시험기를 사용하여 하중감소 제어방식으로 주파수 10Hz, 정현파형으로 하였다. 저온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착해 액체 질소용기에 질소 보배를 연결하여 액체 질소 용기 내의 압력을 5MPa내외로 되도록 하여 액체 질소를 챔버내로 유입시켜 저온환경으로 만든다. 실험 중 액체 질소의 감소에 따라 질소보배의 압력으로 액체 질소의 유입을 정상적으로 밀어주며 온도유지는 전자석밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 되어 있다. 온도편차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였고 응력비 $R=0.3$ 10Hz, 실험온도는 25°C 와 -60°C , -80°C , -100°C 로 하였다

시험편의 초기크랙은 응력확대계수범위 ΔK 를 $10\text{MPa}\sqrt{m}$ 로 시작하여 ΔK 의 95%범위내에서 ΔK 증가법으로 진행하였고, 초기크랙완료 3~5mm지점에서 형성된 ΔK 의 95%범위내에서 다시 연속적으로 ΔK 저감법을 적용하여 피로균열진전이 정지될때까지 실험하였다.

실험해석을 하기 위해 응력확대계수K는

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

및 응력비

$$R = K_{\min} / K_{\max}$$

의 함수가 된다. 여기서 R의 영향을 제외하면 특정의 ΔK 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 Paris 법칙인(Paris and Erdogan, 1963)

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

으로 나타나고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변한다. C와 m은 재료상수로서 그 값은 동일재료 또는 동일환경 구조물 등의 크랙진전속도와 수명을 예측할 수 있게 한다. 응력확대계수 범위 ΔK 는 다음 식에 의해서 나타낸다. 다음은 본 ASTM (1997) E647-95a 규정에 의거 ΔK 콘트롤에 의한 K-감소방식을 이용할 때의 그 감소조건이다.

ΔK 의 기울기는

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

(da/dN 의 측정범위 $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 저온피로균열 전파특성

3.1.1 온도별 피로크랙 전파특성

Table 3은 저온환경에서 각온도별 응력확대계수범위와 피로균열진전속도범위를 도표화하였다.

Table 3. Experimental constants by $da/dN = C(\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth

	ΔK range [$\text{MPa}\sqrt{m}$]	da/dN range [mm/cycle]
RT	$8.75 \leq \Delta K \leq 17.72$	$1.75 \times 10^{-6} \leq da/dN$
25°C		$\leq 2.52 \times 10^{-5}$
-60°C	$9.08 \leq \Delta K \leq 18.01$	$1.81 \times 10^{-6} \leq da/dN$ $\leq 3.38 \times 10^{-5}$
-80°C	$9.65 \leq \Delta K \leq 18.15$	$1.92 \times 10^{-6} \leq da/dN$ $\leq 2.78 \times 10^{-5}$
-100°C	$10.04 \leq \Delta K \leq 19.71$	$1.31 \times 10^{-6} \leq da/dN$ $\leq 3.45 \times 10^{-5}$

여기서 $\Delta K = 10\text{MPa}\sqrt{m}$ 일때의 피로균열진전속도 da/dN 는 25°C 상온에서 $da/dN = 4.9 \times 10^{-6}$ 로 측정되었고, -60°C 저온에서 $da/dN = 3.237 \times 10^{-6}$, -80°C 저온에서 $da/dN = 2.178 \times 10^{-6}$, -100°C 저온에서는 $da/dN = 1.085 \times 10^{-6}$ 로써 상온에 비하여 온도가 하강할수록 피로균열진전속도비는 작아지는 현상이 관찰되었다.

이와 같이 da/dN 의 감소와 ΔK 의 증가현상이 온도의 저하에 따라 비례적으로 나타나고 있는 것은 온도가 저하될수록 재료의 피로균열저항성이 증가하게되어 응력확대계수 ΔK 는 증가하게 되고 이에따라 피로균열진전속도 da/dN 는 급속히 가속되는 현상으로 판단되었다.

Fig. 5와 Fig. 6은 25°C 상온환경과 -60°C, -80°C, -100°C의 저온 환경에서 실험한 피로균열진전속도비 da/dN 과 응력확대계수 ΔK 의 관계를 도시하였다. 여기서 피로균열진전곡선의 중간적 선부분이 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 식을 만족하는 Stage II영역이고, 좌측 수직선이 피로균열진전이 정지되는 Stage I영역의 하한계 응력확대계수범위 ΔK_{th} 가 된다

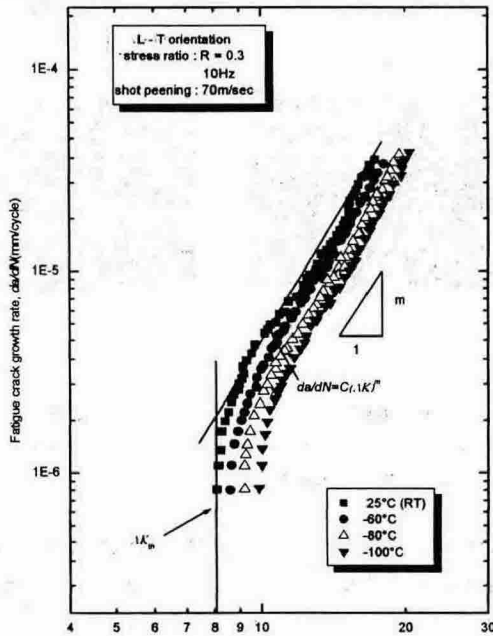


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

3.1.2 온도별 하한계 응력확대계수

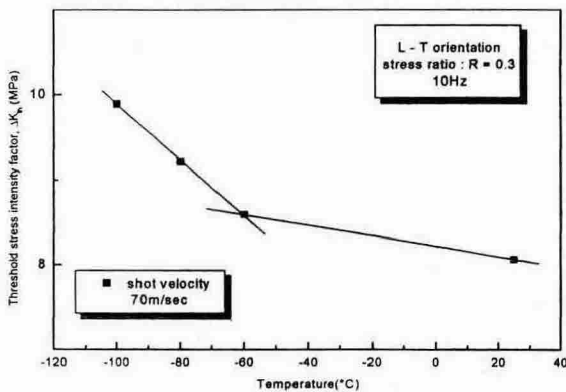


Fig. 6 Relation between threshold stress intensity factor range and temperature(°C)

하한계 응력확대계수 범위는 상온에서 $8.06MPa\sqrt{m}$, -60°C저온에서 $8.59MPa\sqrt{m}$, -80°C저온에서 $9.21MPa\sqrt{m}$, -100°C저온에서 $9.89MPa\sqrt{m}$ 으로써 온도가 저하될수록 재료 특성상 탄성계수의 상승으로 인한 피로균열저항성이 크게 작용하여 그 값이 증가하는 것으로 판단되었다.

3.2 저온변화에 따른 C, m의 관계

피로균열진전거동의 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 식에서 재료상수 C와 피로균열진전지수 m에 대한 저온환경의존성을 다음과 같이 제안하였다.

-60°C ≤ T ≤ 25°C 일 때

$$C = 5.3787 \times 10^{-10} \times 1.01076^T$$

$$m = 3.8401 - 0.00345 T$$

-120°C ≤ T ≤ -60°C 일 때

$$C = 2 \times 10^{-9} \times 1.0286^T$$

$$m = 3.6276 - 0.0069 T$$

Fig. 7은 재료상수 C와 피로균열진전지수 m을 저온환경(-60°C, -80°C, -100°C)실험에서 정량적으로 비교 도시하였다. 그리고 Fig. 10은 재료상수 C의 저온환경의존성을 도시하였고, Fig. 11은 피로균열진전지수 m의 저온환경의존성을 도시하였다. 여기서 시험온도하강에 따라 C의 값은 감소하는 경향이고, m의 값은 증가하는 경향을 보여주고 있다.

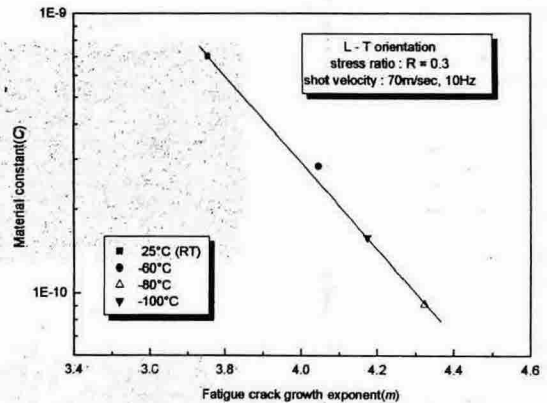


Fig. 7 Correlation between C and m in paris law $da/dN = C(\Delta K)^m$

3.3 파단면의 특성

쇼트피닝공에 의한 압축잔류응력이 저온피로균열진전기구에 미치는 영향을 관찰하기 위해, 고사이클 반복하중을 받는 -100°C CT시험편의 피로균열파단면을 주사식전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. 저온환경에서 실험된 피로균열파단면의 양상은 정상적인 스트라이에이션을 형성하면서 균열이 성장하였다. 쇼트피닝시험편에 대한 각 저온환경시험에서 피로균열파단면(a)지점을 관찰한 결과 피로균열진전 스트라이에이션의 형성은

균열진전방향과 동일한 방향으로 진행되었고, (b)지점에서 관찰된 스트라이에이션은 균열진전방향의 45°기울기 방향으로 진행되었다.

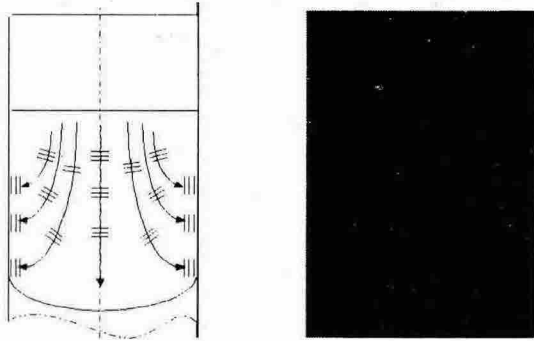


Fig. 8 Photographs of fracture surface (-100°C)

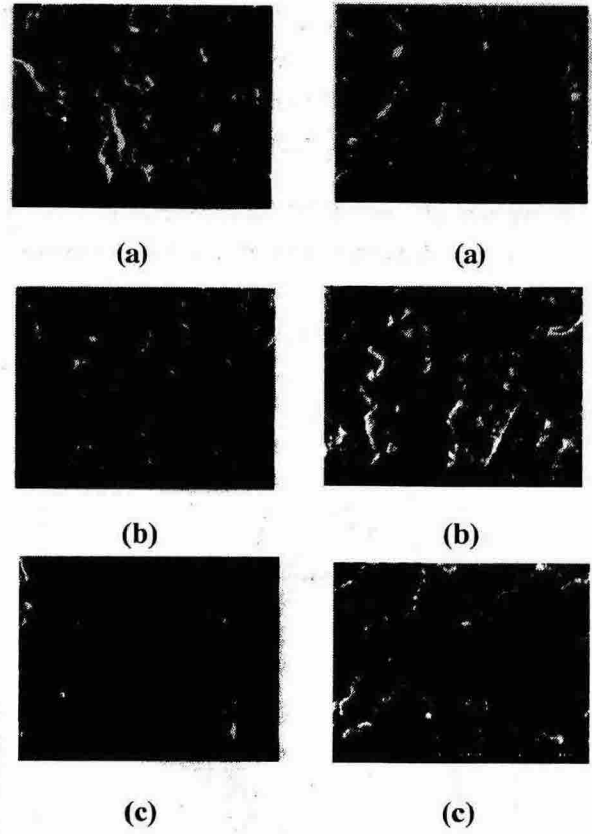
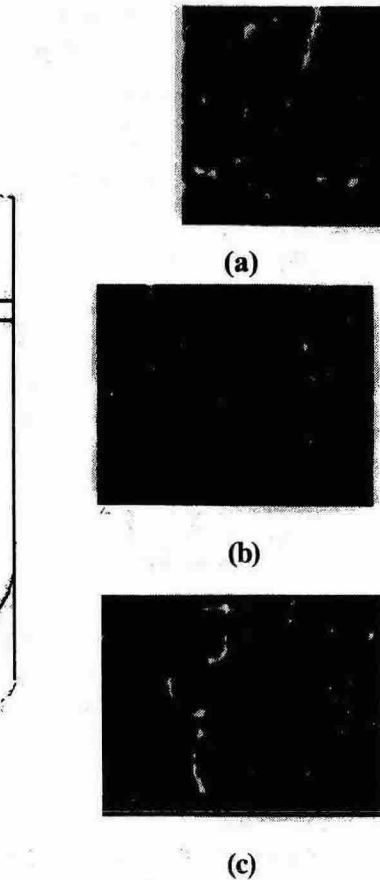
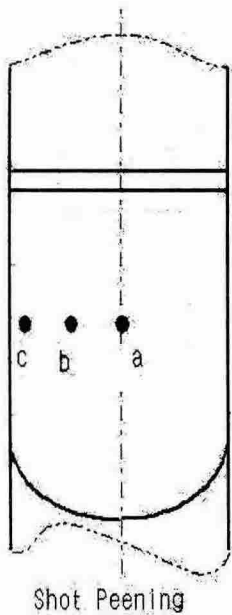


Fig. 9 Striation of fatigue crack propagation by SEM (-60°C, -80°C, -100°C)



그리고 시험편의 표면부에 해당되는 (c)지점에서 관찰된 스트라이에이션은 균열진전방향의 수직방향 즉, 시험편 두께방향으로 형성되었다. 이와 같이 피로균열진전과정에서 균열선단 소성역의 탄소성변형에 대한 압축잔류응력은 시험편 표면부로부터 작용되고 중심부로 갈수록 그 영향이 감소되고 있다는 것을 균열진전 스트라이에이션의 미시적인 관찰에서 확인되었다.

각 온도별 파단 양상은 큰 차이가 없었으나, 파면 조직상의 크기는 뚜렷한 차이를 나타내어 저온일수록 취성파괴가 발생한 것으로 판단된다.

4. 결 론

해양구조용강(SUP9강)에 대하여 쇼트피닝 가공법으로 -735MPa의 압축잔류응력을 주면서 가공하였다. 응력비 R=0.3로 25°C, -60°C, -80°C 및 -100°C의 저온에서 크랙전파시험을 실시하여 해양구조용강의 저온에서의 크랙전파속도, 크랙전파특성 및 하한계 응력확대계수를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 저온일수록 재료의 탄성계수가 증가되어 초기균열 저항성이 증가되고, 피로균열진전저항이 증가되므로 응력확대 계수 ΔK

는 증가하게 된다.

- 2) 하한계 응력확대계수범위는 온도가 저하될수록 재료특성 상 탄성계수의 상승으로 인한 피로균열 저항성이 크게 작용하여 그 값이 증가하는 것으로 판단되었다.
- 3) 저온환경도 다른 환경과 마찬가지로 피로균열진전 파단면의 양상관찰에서 쇼트피닝가공에 의한 압축 잔류응력이 피로균열선단소성역내의 탄소성변형기구에 작용하여 피로균열진전이 억제되고 있다는 것을 주사식전자현미경(SEM)에 의한 균열성장 스트라이에이션의 진행방향관찰에서 확인되었다.
- 4) 해양구조용강에도 쇼트피닝가공법이 표면에 압축잔류응력을 형성하여 피로강도가 향상됨을 알수 있었으며, 특히 심해의 저온환경에서도 쇼트피닝이 피로강도향상에 효과가 있음을 알수 있었다.

참 고 문 헌

박경동, 정찬기, "DIN50CrV4-SAE9254강의 피로강도에 미치는 압축잔류응력의 영향", 한국해양학회지, 제15권 제3호, pp.93-99, 2001

백상도, "열처리한 스프링강의 쇼트피닝에 따른 疲勞特性", pp.28-35, 1997

서유원, "쇼트피닝 가공에 따른 材料 舉動에 關한 研究", pp. 2-12, 2000

이종규, 김정규, "피로강도 및 수명에 미치는 Shot Peening에 의한 잔류응력의 영향", 대한기계학회 논문집 A권, 제 21권, 제9호, pp.1498-1506, 1997

정성균, 이승호, 정석주, "쇼트피닝 가공조건이 피닝강도에 미치는 영향", 대한기계학회논문집 A권, 제25권, 제10호, pp.1590-1596, 2001

A. Tange and N. Takamura, "Relation Between Shot-peening Residual Stress Distribution and Fatigue Crack Propagation Life in Spring Steel", Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening, Vol. 1, Tokyo, pp.243-253, 1990

A. Wöhler, "Experiments on the strength of metals Engineering", pp.160, 1967

F. P. Zimmerli, "Heat Treating, Setting and Shot Peening of Mechanical Springs", Metal Progress, Vol. 67, No. 6, pp.997-106, 1952

Y. Watanabe, N. Hasegawa, K. Namiki and A. Hatano, "The Influence of Broken Shots on Peening Effect of Hard Shot Peening", Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening, Vol.1, pp.63-72, 1990

加藤容三, 高藤新二郎, 桐山貞紀, "Ti-6Al-4V 合金の高溫度 疲勞強度に ばす ショットピーニング影響", 日本材料學會 論文集, Vol. 45, No. 1, pp.43-47, 1996