

# 자동차용 스프링강의 온도변화에 따른 피로 및 파괴인성에 관한 연구

김추용<sup>†</sup> · 박원조<sup>\*</sup> · 정재욱<sup>\*\*</sup> · 허선철<sup>\*</sup>

## A Study on Fatigue and Fracture Toughness on Change Temperature of Spring Steel for Automobile

Chu-Yong Kim, Won-Jo Park, Jae-Wook Jung, Sun-Chul Huh,

**Key Words:** Shot peening(쇼트피닝), Fatigue Crack Growth(피로균열진전), Fracture Toughness(파괴인성)

### Abstract

Recently, the steel parts used for automobiles and trains are required to be used under higher stress than ever before in need of the weight down. In this study, high strength and superior toughness spring steels as the suspension material, used for automobile and railroad industries were utilized to carry out the following in investigations ;

- 1) To evaluate the characteristics of fatigue crack propagation, the experiments of fatigue crack growth were respectively carried out at the room temperature(RT), 100℃, 200℃
- 2) Peening and unpeening materials at the each temperature were investigated for the effect on fracture toughness by compressive residual stress generated from the shot peening.

### 1. 서론

기술산업에서 요구되는 부품의 경량화는 소비차로부터 요구되는 필수적인 사항으로서 기계장치, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차 등에 필요한 철강소재 분야에서 활발히 연구되고 있다.<sup>1)</sup>

특히 철강소재분야에서 대체 재질 개발과 재료의 고응력화에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 부품의 설계 시 고려되는 금속의 고강도화는 부품의 경량화를 실현시킴으로써 재료와 연료절감이란 이점을 가지고 있으나, 고응력화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중, 진동조건 등에 따라 차이는 있지만 금속표면이나 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에도 균열이 개시되고 서서히 안정성장하여 최종적으로 금속 파괴 되는 현상이 발생된다. 이와 같이 금속에서

발생되는 피로파괴현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재해를 초래할 수 있으므로 현재와 같이 대형화 된 산업기술사회에 피로파괴 방지기술은 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

재료의 피로파괴는 환경에 따른 강도, 부식과 더불어 재료의 수명을 단축하고 구조물의 내구연한을 결정짓는 가장 중요한 사항으로서 피로수명평가의 필요성이 증대되고 있다. 특히 재료 및 부품의 고응력화와 경량화를 요구하는 현대의 산업사회에서 신소재의 개발이 필수적이지만, 고가의 장비와 많은 시간, 노력을 필요로 한다는 문제점을 가지고 있다. 이와 같이 피로강도 저하의 인자 중 철강재의 내부 비금속 개재물의 함유를 제외한 나머지 인자들은 철강재 표면부위의 결함이 되기 때문에 철강재 표면부위의 결함을 제거하고 표면부위의 피로강도 향상을 위한 방법으로 쇼트피닝 가공법이 널리 사용되고 있다.

쇼트피닝 가공법에 의해 금속 표면부에 형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속 표면부에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 작용하는 응력을 감소시키므로 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시키고, 균열의 안정성장을 지연시켜 피로수

<sup>†</sup> 경상대학교 대학원

E-mail : dumer1221@hotmail.com

TEL : (055)640-3183 FAX : (055)640-3188

\* 경상대학교 기계항공공학부, 해양산업연구소

\*\* 경상대학교 대학원 정밀기계공학과

명에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.<sup>2,4)</sup>

따라서, 금속 표면에 압축 잔류응력을 형성토록 함으로서 피로에 의한 균열의 생성과 균열의 전파 억지력을 향상시킨다고 볼 수 있으며, 여기서 압축잔류응력이 금속 표면부에 되도록 가까이 형성될 수 있도록 하고, 또 압축 잔류응력이 높게 형성될수록 피로수명은 향상된다고 보고되고 있다.<sup>5-6)</sup> 실제로 이러한 쇼트피닝 가공에 의해 금속 표면에 형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속의 응력을 감소시켜 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시켜주고 균열의 안정성장을 지연시켜 피로수명을 향상시킨다고 보고되었다.<sup>7-8)</sup>

따라서, 본 연구에서는 자동차용 스프링강으로 널리 쓰이고 있는 SUP-9강에 대하여 연피닝제와 쇼트피닝 가공한 피닝제의 고온에서의 피로균열진전거동과 파괴인성 특성에 미치는 압축잔류응력 영향에 대하여 연구하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 자동차 및 철도차량 현가장치에 주로 사용되어지고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, 재료의 화학적 성분을 Table 1, Table 2는 열처리 전·후의 기계적 물성치를 나타내고 있다.

Table 1 Chemical compositions of specimen

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
JISG SUP-9	0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88	-

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	$\sigma_{UTS}$	Hardness(HRC)		$\sigma_{YS}$	Elong. [%]
		after quenching	after tempering		
JISG SUP-9	1226	55	47	1079	9

### 2.2 쇼트 피닝

완성된 시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 고속회전터어빈식 쇼트피닝기에서 Table 3과

같은 조건으로 시험편 표면에 쇼트피닝 가공을 실행하였다.

Table 3 Conditions of shot peening

Specimen	Impeller diameter [mm]	Shot velocity		Shot ball diameter [mm]	Arc-height [mm]
		[m/sec]	[rpm]		
JISG SUP9	490	70	2200	0.8	0.39

### 2.3 피로균열진전 실험

피로균열진전거동을 관찰하기 위한 시험편은 ASTM E 647-95a에 의거하여 CT시험편으로 시험편의 채취는 열간 압연된 프렛바 상태에서 L-T방향으로 하였다. 노치의 가공은 와이어 커팅머신을 이용하고, 그 표면을 연마지(#400~1500)로 연마하였다. 그 후 양면을 쇼트피닝 가공하고 커버리지 85%이상의 공정검사 합격품을 이용하였다. Fig. 1은 피로균열진전에 사용된 시험편의 형상을 나타내고 있다.

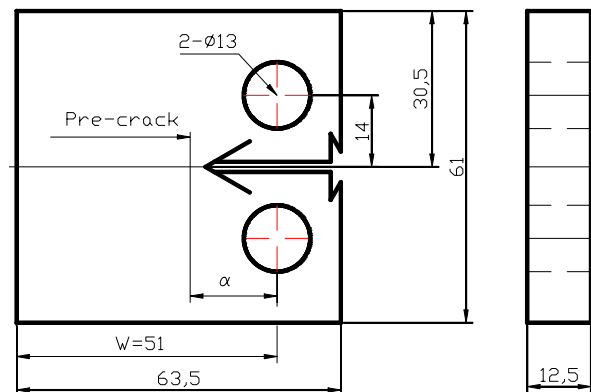


Fig.1 Geometry of fatigue crack growth specimen

### 2.3 파괴인성 시험

Fig. 2는 파괴인성실험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타내었다. 파괴인성 실험은 ASTM E399에 의거하여 CT(1/2T) 시험편으로, W=51mm, B=12.5mm 이며 초기 노치길이 a와 시험편의 폭 W의 비(a/W)는 0.50으로 하였다. 예균열의 조건은 주파수 15Hz, 정현파로 노치선단에서 1.5mm 삽입하였으며  $K_{IC}$  실험은 크로스 헤드 스피드 0.05mm/min으로 상온 및 고온(100℃, 200℃)에서 각각 실험하였다.

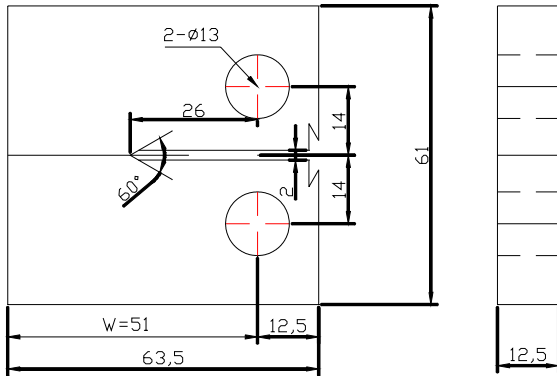


Fig. 2 Specimen shape of fracture toughness test

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 피로균열진전거동

Fig. 3과 4는 각각 언피닝소재와 피닝소재에 대한 피로균열진전속도( $da/dN$ )와 응력확대계수( $\Delta K$ )와의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와

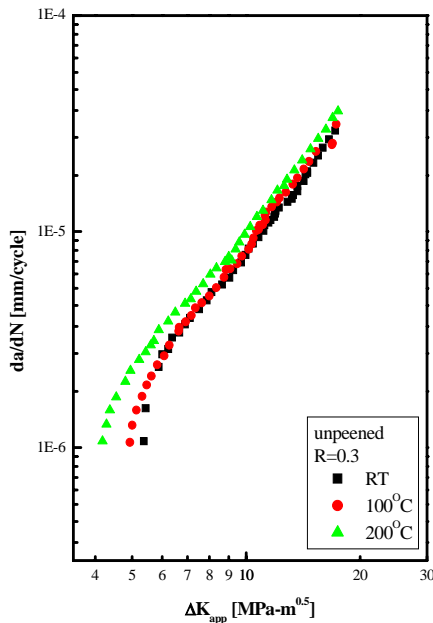


Fig. 3 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range in unpeened (RT, 100°C, 200°C)

같이 언피닝소재와 피닝소재 모두 고온으로 갈수록 피로균열의 진전이 빠르게 진행된다는 것을 알 수 있었다. 또한 Fig. 3과 4를 종합하여 나타낸 Fig. 5에서 볼 때 언피닝소재에 비하여 쇼트피닝소재의 피로균열진전속도는 상온에서 52%, 100°C에서 30%, 200°C에서 38%가 감소되고 있으나, 상온에서의 높은 피로균열속도감소현상에 비하여

동일조건외 온도 증가 구간에서 피로균열진전속도가 완만한 감소현상을 보이고 있다.

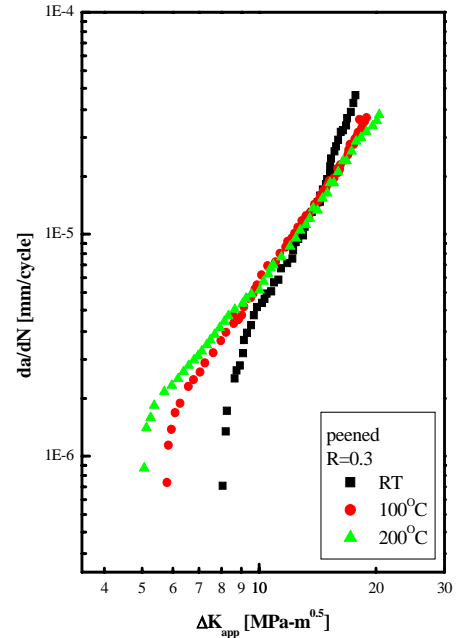


Fig. 4 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range in peened (RT, 100°C, 200°C)

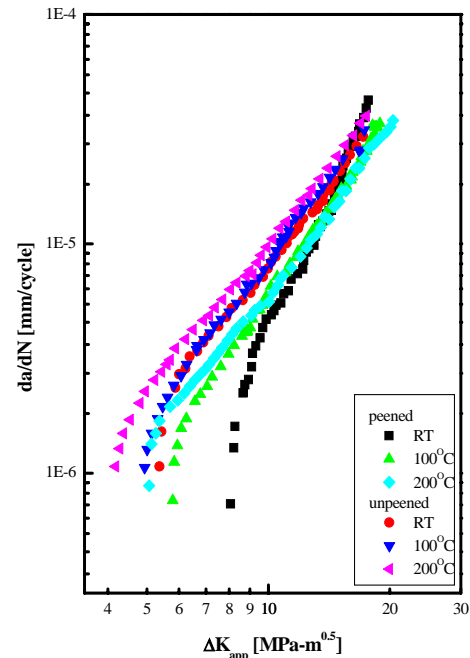


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range in peened and unpeened (RT, 100°C, 200°C)

특히, 상온과 고온 100°C사이에서 급속한 피로균열진전속도의 감소현상이 관찰되고, 이러한 현상은 온도가 증가할수록 쇼트피닝시편에 형성된 압

축전류용력이 온도의 영향으로 점차 소멸되기 때문이라 생각된다. 이와 같이 쇼트피닝가공에 의하여 형성된 압축잔류용력은 고온환경에서 일부가 소멸되지만, 피로균열전진과정에서 균열선단 내에 작용하여 균열전파 역지력을 향상시킴으로서 피로균열전진속도가 감소되는 것으로 생각한다.

### 3.2 파괴인성 특성

#### 3.2.1 언피닝소재의 파괴인성 실험 결과

Fig. 6, 7, 8은 상온과 고온 100℃, 200℃에서 각각의 파괴인성 실험 결과를 나타내고 있다. Table 3은 언피닝소재와 피닝소재의 파괴인성 실험결과를 종합하여 나타내었다. 그림에서 상온의 파괴인성 값은 101.55, 100℃인 경우 100.79, 200℃인 경우 90.94MPa·m<sup>0.5</sup>으로 측정되었다. 상온과 고온 100℃에서는 100℃의 파괴인성 값이 약간 증가하였으나 거의 유사하며, 200℃의 경우는 상온에 비해 파괴인성 값이 약 10%정도 감소한다는 것을 알 수 있었다. 이는 100℃에서는 온도의 영향을 거의 받지 않지만, 200℃부근에서 온도의 영향이 크게 나타나는 것은 A<sub>0</sub> 변태점으로 접근하면서 입자의 일부 이동으로 본래의 체심입방격자들의 움직임으로 인한 조직의 고온열화의 결과로 생각되며, 향후 온도의 추가상승을 통한 실험을 진행할 경우, 면심입방격자로의 전이가 진행되어 더욱 감소 할 것으로 생각된다.

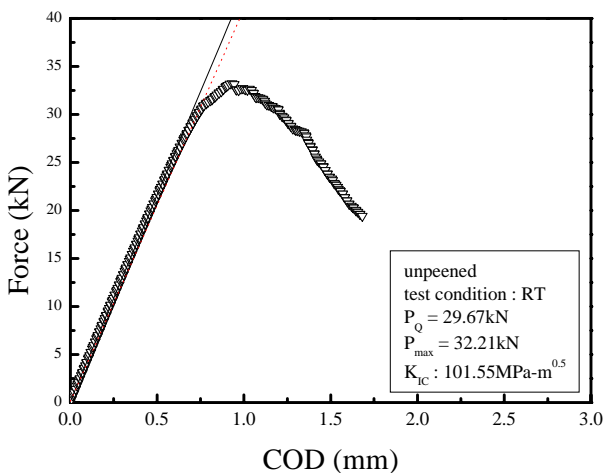


Fig. 6 Relations between load and COD in unpeened at RT

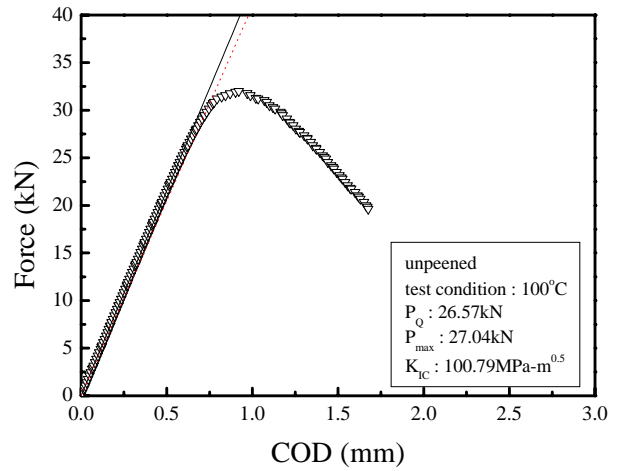


Fig. 7 Relations between load and COD in unpeened at 100℃

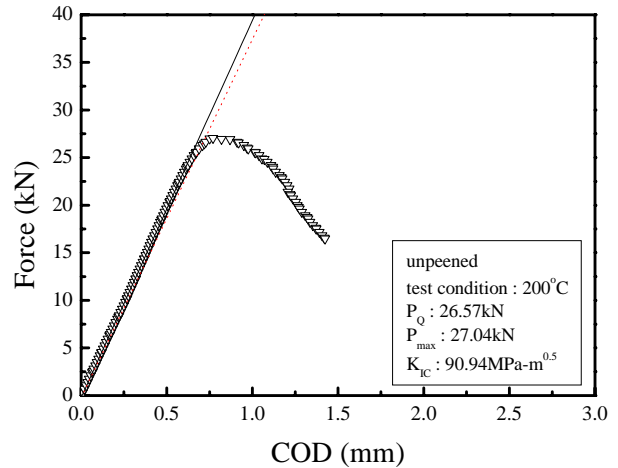


Fig. 8 Relations between load and COD in unpeened at 200℃

#### 3.2.2 피닝소재의 파괴인성 실험 결과

Fig. 9, 10, 11은 피닝재에서 상온과 고온 100℃, 200℃에서의 파괴인성 실험결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 것처럼 상온에서의 파괴인성 값은 78.75MPa·m<sup>0.5</sup>, 100℃는 79.35MPa·m<sup>0.5</sup>, 200℃는 83.95MPa·m<sup>0.5</sup>을 나타내고 있다. 즉, 상온보다 100℃의 경우가 약간 높았으나 거의 유사하며 200℃의 경우는 상온에 비해 오히려 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이것으로 보아 200℃부근에서 온도의 영향으로 고온열화에 의한 조직내의 결정립 변화로 인한 연성화와 표면에 형성된 압축잔류용력이 일부 소멸되기 때문에 오히려 파괴인성 값이 증가한다고 생각된다. 또한 표면에 형성된 압축잔류용력층은 소규모의 반복하중이 작용하는 경우는 균열의 성장을 지연시키는 효과

가 있지만 균열선단부의 대규모의 하중이 작용하는 경우 큰 효과를 기대하기 힘들다고 생각되므로 차후 세밀한 연구가 필요하다.

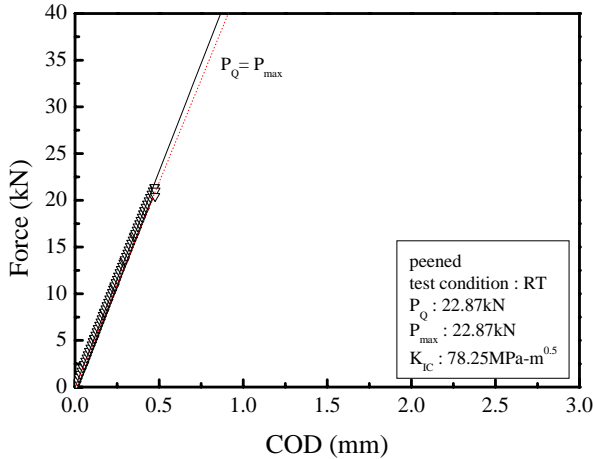


Fig. 9 Relations between load and COD in peened at RT

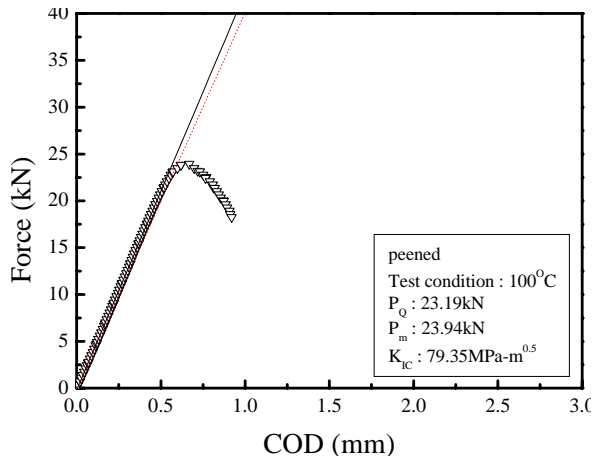


Fig. 10 Relations between load and COD in peened at 100°C

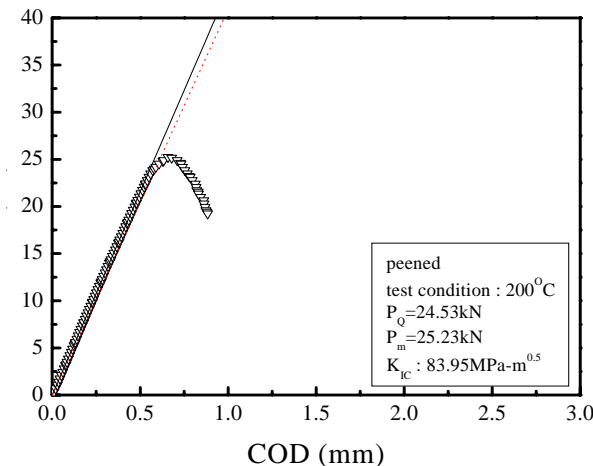


Fig. 11 Relations between load and COD in peened at 200°C

Table 3. Results of  $K_{IC}$  at every temperature in unpeened and peened

	Temp.	$P_Q$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$K_{IC}$ ( $MPa \cdot m^{0.5}$ )
unpeened	RT	29.67	32.21	101.55
	100°C	26.57	27.04	100.79
	200°C	26.57	27.04	90.94
peened	RT	22.87	22.87	78.25
	100°C	23.19	23.94	79.35
	200°C	24.53	25.23	83.95

#### 4. 결론

자동차용 스프링 재료로 많이 사용되고 있는 SUP-9강에 대하여 연피닝소재와 쇼트피닝 가공한 피닝소재에 온도변화에 따른 고온환경에서의 피로균열진전거동과 파괴인성 특성에 미치는 압축잔류응력의 영향에 대해서 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 연피닝재에 비하여 쇼트피닝재의 피로균열진전속도는 상온에서 52%, 100°C에서 30%, 200°C에서 38%가 감소되고 있으나, 상온에서의 높은 피로균열진전속도 감소현상에 비하여 온도의 증가에 따라 피로균열진전속도가 완만한 감소현상을 보여주고 있다.

(2) 쇼트피닝 가공재의 경우 연피닝소재보다 각 온도에서 균열의 개시점인 응력확대계수  $\Delta K$ 는 증가하였으나 고  $\Delta K$ 영역으로 갈수록 압축잔류응력의 영향이 감소된다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 향후 표면의 압축잔류응력층을 증대시키기 위해 2단 쇼트가공을 통한 보완 실험을 수행할 계획이다.

(3) 연피닝재의 파괴인성값은 상온 > 100°C > 200°C의 순으로 파괴인성값이 저하하였으며, 피닝재의 파괴인성값은 200°C > 100°C > 상온의 순서로 파괴인성값이 저하하였으며, 피닝재와의 경향은 차이가 난다는 것을 알 수 있었다. 이는 자동차 휠장치의 최적설계에 중요한 기초 데이터로 활용될 것으로 생각한다.

(4) 연피닝재에 비해 피닝재의 파괴인성값이 낮게 나타났으며, 이는 에크랙에 의해 크랙 팁 부분의 응력이 완화되어 대규모 항복을 동반하는 파괴인성실험을 실시하면 압축잔류응력의 영향은

사라지게 되고, 표면경화에 의해 오히려 취성과 파괴를 유도함으로써 파괴인성 값이 저하됨을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 경상대학교 지역대학육성사업단의 지원으로 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Marukami, Ominami, 1979, "A Guide Fracture Mechanics", O-mu Co., pp.121-127
- (2) S. K. Jung, S. H. Lee, 2001, "A Guide of Shot peening Processing", Se Hwa Pub, pp.6-12
- (3) R. D. Gillespie, 1993, "Its Effect on Process Consistency and Resultant Improvement in Fatigue Characteristics", Proc. of 5th International Conference on Shot peening, oxford, Vol.1, pp. 81-90
- (4) H. Wohlfahrt, 1984, "The Influence of Peening Conditions on the Resulting Distribution of Residual Stress", Proc. of the 2th International Conference on Shot peening, Chicago, Vol.1, pp.316-331
- (5)A. Tange and N. Takamura 1990, "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
- (6)K. Natto, T. Ochi, T. Takahashi and T. Suzuki. 1990, "Effect of Shot Peening on the Fatigue Strength of Carburized Steels", Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening, Vol. 1, Tokyo, pp. 519 ~ 526
- (7) D. Kirt, M. Jarrett, 1990, "Influnce of Shot peening on Fatigue and Corrosion-Fatigue Behavior

of Structural Steel", Proc. of 4th International Conference on Shot peening, Vol.1, Tokyo, pp.133~142

- (8) M. P. Muller, C. Verport, G. H. Gessinger, 1981, "The Influence of Shot peening on the Corrosion Fatigue Behavior of an Austentic-Ferritic Stainless Steel", Proc. of the 1st International Conference on Shot peening, Vol.1, Paris, pp.479~484