

표면특수가공에 따른 재료의 피로균열에 관한 연구

이태연* · 이승호** · 강진식***

(2000년 9월 27일 접수)

A Study on the Fatigue Crack of Material by Surface Non-Traditional Machining

S. H. Lee, T. Y. Lee and J. S. Kang

Abstract

The influence of the fatigue crack propagation by shot peening was studied in this paper. Fatigue tests were carried out on the unpeened and shot peened CT specimens. The changes of mechanical properties, residual stress, fatigue fracture surface etc. by shot peening were investigated. The mechanical properties and hardness did not change so much by shot peening. For the fatigue crack propagation test, peened specimen improved in fatigue life up to 14% by shot peening. The reason of increase in the fatigue life was closely related with the compressive residual stress, which was 519.7MPa on surface. Another reason was the constraint on crack opening on surface region, it is due to the decrease in slope of crack propagation direction.

Key Words : Shot Peening, Fatigue Strength, Fatigue Crack Propagation, Fatigue Crack Growth, Compressive Residual Stress

1. 서론

과학기술의 발달과 더불어 금속재료는 점차 보다 특별한 조건하에서 사용되며, 금속재료의 고강도화, 경량화 및 높은 피로강도의 요구가 고조되고 있는 추세이다. 이로 인하여 기계부품의 용도 및 성능에 적합한 성질을 부여하면서 동시에 경제적, 시간적 비용을 최소화하는 표면특수가공법들이 개발되고 있다.

기존의 가공방법과 이론이 다른 가공법인 표면특수가

공법은 크게 기계적 특수가공, 전기적 특수가공, 화학적 특수가공으로 분류할 수 있다. 이들 중 기계적 표면 특수가공법인 쇼트피닝은 경제성의 측면과 피로강도 및 수명 향상의 관점에서 보면 우수한 표면가공법이라 할 수 있다⁽¹⁾.

표면특수가공법인 쇼트피닝은 1940년대 이 후부터 본격적으로 산업분야에 실용화된 기술로서, 쇼트피닝 가공에 의해 생성된 압축잔류응력은 재료의 피로균열진전수명과 피로강도 및 피로수명에 매우 밀접한 영향을 미치는

* 원주대학 동력기계과
** 경기공업대학
*** 서울산업대학교 대학원 기계공학과

것으로 보고되고 있다^(2~4). 또한 근래 들어서는 쇼트피닝 가공에 있어서의 최적조건에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^(5,6).

이에 본 연구에서는 특수가공법에서의 쇼트피닝 가공에 따른 재료의 기계적 성질의 변화와 피로균열진전시험을 통하여 쇼트피닝 가공이 재료의 거동에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

2. 표면특수가공에 의한 쇼트피닝

쇼트피닝은 작은 금속입자를 고속으로 금속재료표면에 충돌시키는 가공방법으로, 투사기에서 투사된 쇼트볼은 큰 운동에너지를 가지고 금속재료표면에 충돌한다. 쇼트볼의 충돌은 재료표면의 소성변형을 유발시켜 영구변형을 일으킨다. 즉, 소성변형에 의한 냉간 가공의 효과를 얻게 되는 것이다⁽⁷⁾.

쇼트피닝의 가공변수로는 쇼트볼의 속도, 경도, 크기, 분사각, 무게 등이 있으며, 이 변수들의 변화에 따라 피닝의 정도가 결정된다. 피닝의 정도는 피닝강도(peening intensity)라 하며 아크하이트(arc height)와 커버리지(coverage)로 표시된다. 일반적으로 100% 커버리지에서의 아크하이트를 피닝강도로 나타낸다.

아크하이트는 금속표면에 쇼트피닝을 실시하였을 때, 쇼트볼이 분사된 면이 불룩하게 굽어진 정도를 나타내는 것으로, 이는 'SAE' 규격에 의해 세계 공통적인 단위로 사용되고 있다. 아크하이트를 측정하는데는 알멘스트립(almen strip)이라는 강판을 사용하며, 이를 고정구(almen strip holder)에 고정시킨 후 피가공물에 부착시켜 실제 쇼트피닝을 실시하고 고정구에서 알멘스트립을 떼내어 아크하이트 게이지로써 측정한다. 알멘스트립은 피닝 강도에 따라 A, B, C strip으로 사용된다.

커버리지(coverage)는 피닝강도의 측정방법으로 피사체에 쇼트볼이 맞는 밀도, 즉 일정면적에 대한 쇼트볼 자국면적의 백분율로 표시된다.

3. 실험방법

3.1 재료 및 시험편

실험에 사용된 재료는 스프링강(SPS5A)을 열처리한 것으로 Table 1,2에 재료의 화학적 성분과 기계적 성질이 나타나있다. 열처리는 800℃에서 30분간 가열 후 유중에서 담금질하고 500℃로 70분간 뜨임하였다.

Table 1 Chemical composition of spring steel (wt %)

| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| SPS5A | 0.61 | 0.27 | 0.84 | 0.01 | 0.01 | 0.83 | 0.03 | 0.12 |

Table 2 Mechanical properties of spring steel

| | SPS5A |
|------------------------|-------|
| Yield strength(MPa) | 720 |
| Tensile strength(MPa) | 920 |
| Fracture strength(MPa) | 740 |
| Elongation(%) | 18.5 |
| Hardness(Hv) | 280 |

인장시험편은 KS B0801규격의 제4호 시험편을 사용하였으며, 피로진전균열시험에 사용된 CT시험편은 Fig. 1과 같다. 시험에 사용된 시험편은 모두 열처리를 하였으며, 열처리 후 쇼트피닝 가공을 하였다. 쇼트피닝 가공은 2단계에 걸쳐 수행되었으며, 쇼트볼은 임펠러를 3,100rpm으로 회전시켜 투사하였다. 1단에서는 직경 0.6mm 쇼트볼을 사용하고 8분 동안 가공하여, 90%의 커버리지를 달성하였다. 2단 쇼트피닝 가공 후 2단에서는 직경 0.4mm 쇼트볼을 사용하고 6분동안 가공한 결과, 98%의 커버리지를 달성하였다. 아크하이트(Almen A strip 사용)는 1단의 경우는 0.375mm, 2단의 경우는 0.42mm의 결과를 얻었다.

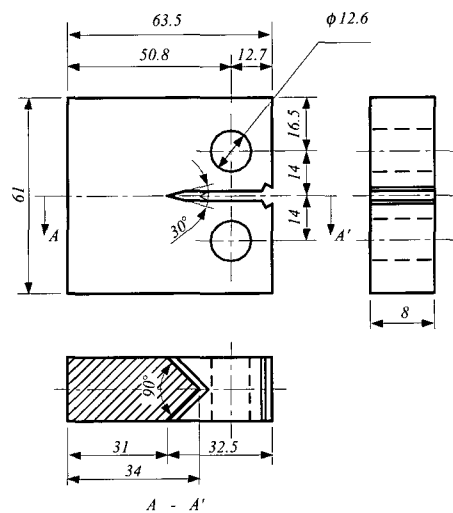


Fig. 1 CT specimen

3.2 시험방법

인장시험은 ASTM E8을 참고로 하여 시행하였고, 시험속도는 3mm/min으로 하였다. 경도는 마이크로비커스 경도계(MOK-E3)을 이용하여 측정하였다.

피로균열진전시험은 ASTM E647⁽¹¹⁾에 의거하였고, 100kN 용량의 유압서보식 시험기(MTS 810)를 이용하여 일정진폭하중하의 피로시험을 행하였다. 응력비 R ($\sigma_{min} / \sigma_{max}$)은 0.1이고, 주파수는 10Hz의 정현파로 하였다. 균열개이지(crack gauge)를 시험편의 전면에 부착하여 하중-변위 곡선을 얻었고, 컴플라이언스법(compliance method)을 적용하여 균열길이를 계산, 측정하였다. 응력확대계수(stress intensity factor, ΔK)의 계산은 식(1)을 이용하였고, 균열진전속도(crack growth rate, da/dN)의 계산은 7점 다항식 근사법(7-point incremental polynomial method)을 이용하였다.

다음 식에서 B 는 시험편의 두께, W 는 시험편의 폭, a 는 균열길이, $\alpha = a/W$ 이다.

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

압축잔류응력의 측정은 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKU-MSF-2M)⁽¹²⁾를 사용하여 표면에서부터 전해 연마를 실시하며, 반복하여 중심으로 0.25mm까지 측정하였다. 측정조건은 Table 3에 나타내었으며, 이때 계산법은 $2\theta - \sin^2\phi$ 법을 이용하였다.

Table 3 Measuring condition of residual stress

| X-Ray diffraction | Condition | |
|-------------------|-----------------------|-------|
| X-Ray source | Target | Cr-V |
| | Voltage | 30 kV |
| | Current | 10 mA |
| ϕ | 0°, 15°, 30°, 45° | |
| 2θ | 140° ~ 170° | |
| Diffraction | Scintillation counter | |

4. 시험결과 및 고찰

4.1 기계적성질의 변화

표면쇼트피닝 가공 후의 기계적 성질의 변화를 살펴본 결과, 파단강도에서 14.6%정도의 증가를 보였을 뿐 다른 기계적 성질들은 크게 변화하지 않았다. Table 4는 인장 시험의 결과를 보여주고 있다. 쇼트피닝 가공 후의 경도값의 측정에서도 표면에서 약간의 증가를 보이고 있으나, 전체적으로는 변화가 거의 없었다. Fig. 2는 시험편의 깊이 방향으로 경도값의 분포를 나타내고 있다.

Table 4 Material properties of spring steel after shot peening

| Material | Heat treatment | Shot peening |
|------------------------|----------------|--------------|
| Yield strength(MPa) | 820 | 835 |
| Tensile strength(MPa) | 1230 | 1235 |
| Fracture strength(MPa) | 960 | 1100 |
| Elongation(%) | 15.1 | 12.2 |

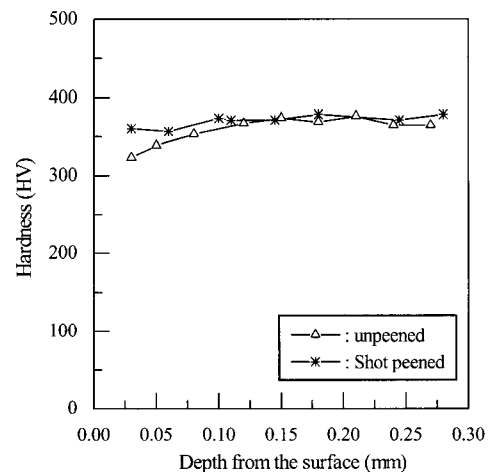


Fig. 2 Hardness distribution

4.2 표면특수가공에 따른 재료의 변화

4.2.1 피로균열진전거동의 변화

Fig. 3은 하중 반복수 (N)에 따른 CT 시험편의 균열 길이 (a)를 보여주고 있다. 그림에서 같은 하중 반복수에 대해 쇼트피닝 가공한 시험편의 균열길이가 적음을 알 수 있다. 즉, 쇼트피닝 가공에 의해 같은 피로균열의 전파과정에서 피로수명의 증가를 나타내었다.

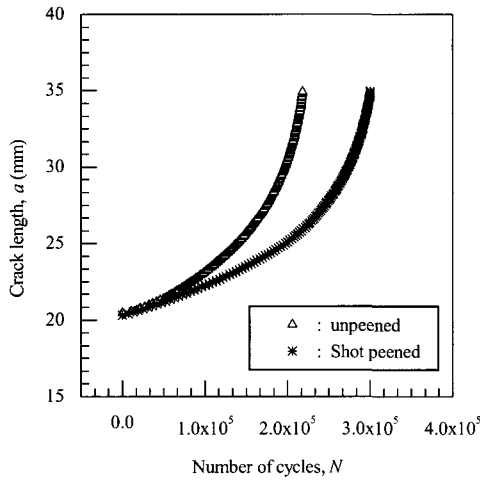


Fig. 3 $a-N$ curve for CT specimen

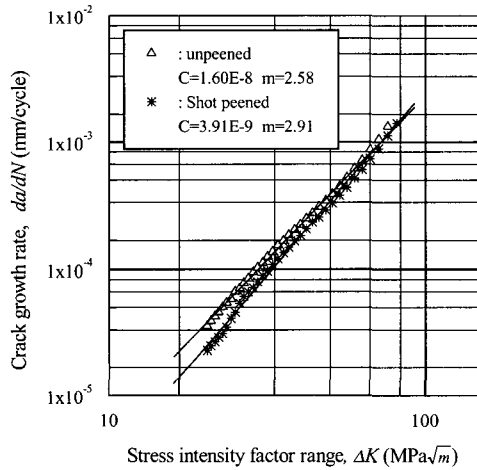


Fig. 4 $da/dN-\Delta K$ curve for CT specimen

Fig. 4는 응력확대계수범위에 대한 균열진전속도의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 직선은 Paris-Erdogan에 의한 적합곡선으로 아래의 식(2)으로 표현된다. 여기에서 C 는 상수, m 은 log-log 그래프 상에서의 직선의 기

울기이다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

그림에서 쇼트피닝 가공의 경우는 가공 전에 비해 균열진전의 초기부분에서 그 진전속도가 작음을 보이나, 균열이 계속 진전할수록 점차 원래의 균열진전속도에 접근하는 것으로 나타났으며, 쇼트피닝 가공이 균열의 발생부분에 해당하는 영역에서 효과가 나타남을 알 수 있었다.

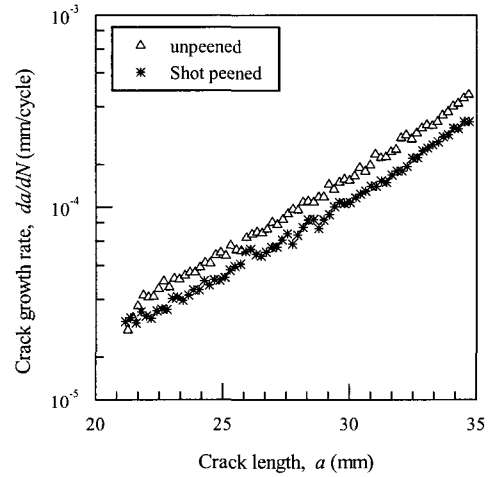


Fig. 5 $a-da/dN$ curve for CT specimen

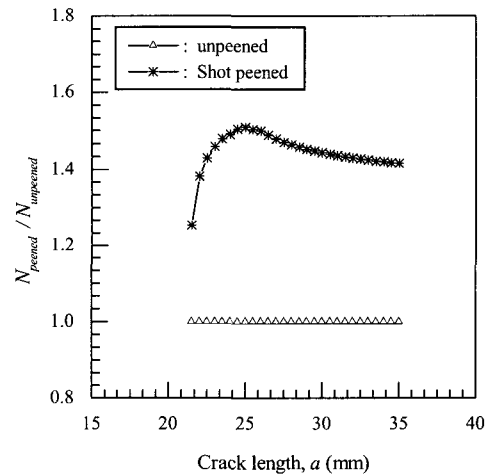


Fig. 6 Comparison of cycle reached to certain crack length

Fig. 5는 균열길이에 대한 균열진전속도를 나타낸다. 여기서에도 가공 전에 비하여 쇼트피닝 가공 후에 균열진전속도의 지연이 나타남을 확인할 수 있었다.

피로균열진전의 전과부분에서의 피로수명향상은 Fig. 6에서와 같이 일정균열길이에 이르는 하중 반복수의 비(repeat load ratio)로서 나타낼 수 있다. 쇼트피닝 가공의 경우에 가공 전보다 1.4배 정도 피로수명의 향상을 얻을 수 있었다.

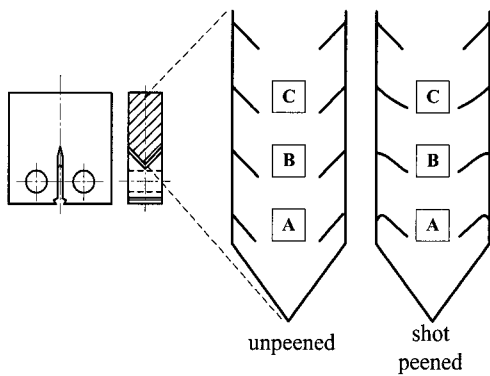


Fig. 7 Idealized representation of crack profile

3.2.2 재료파단면의 변화

쇼트피닝 가공에 의한 피로균열진전 양상의 변화를 알아보기 위하여 피로균열진전시험 후에 그 파단면을 관찰하였다. Fig. 7은 CT 시험편의 파단면 표면부의 균열진전 경향을 간략하게 보여주고있다. 균열길이에 따른 경향을 살펴보기 위해 A, B, C 세 부분에 걸쳐 관찰하였다. Fig. 8은 각 부분의 SEM(S-2300, Hitachi) 사진을 나타내고 있다. 각각의 경향을 비교해 보면, 균열발생 초기에서 쇼트피닝 가공한 CT 시험편 표면부에서는 균열진전 억제에 의해 진전 무늬의 방향이 표면부에서 완만해짐을 볼 수 있다. 또한 A에서 C부분으로 갈수록 조직 사진에서의 무늬방향의 기울기가 점차적으로 급해짐을 알 수 있다.

3.2.3 압축잔류응력의 생성

쇼트피닝 가공을 한 후 잔류응력분포의 변화를 측정하였다. 그 결과 Fig. 9와 같은 잔류응력의 분포를 얻을 수 있었다. 쇼트피닝 가공한 시험편의 최대 압축응력은 깊이 0.08mm에서 최대값 546MPa, 표면에서는 519.7MPa로 표면보다는 표면직하에서 최대값을 나타내었다. 기존의 대부분의 연구에서는 피로시험을 바탕으로 하여

쇼트피닝 가공에 의한 잔류응력의 생성에 의해 피로한도의 향상을 보이고 있으며⁽¹³⁾, 피로균열진전 과정에서도 잔류응력에 의한 피로수명의 향상을 나타내고있다⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾. 본 연구에서도 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로진전거동의 향상이 나타남을 알 수 있었다.

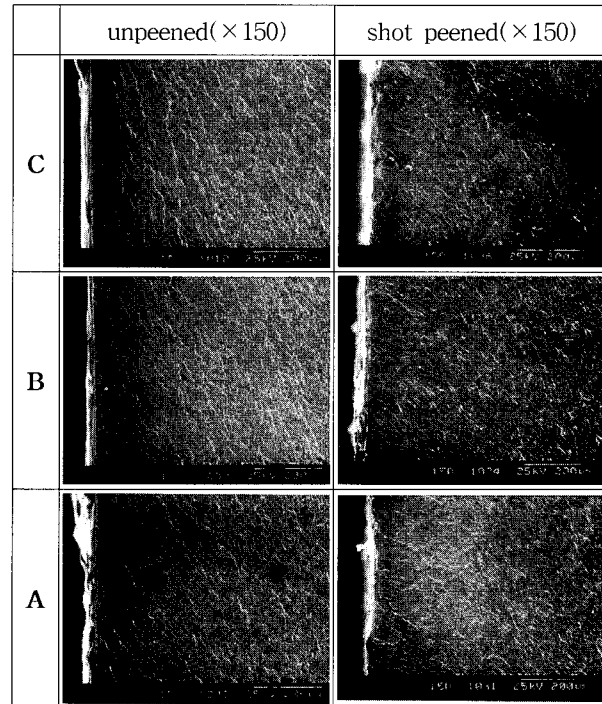


Fig. 8 Fatigue fracture surface of CT specimen

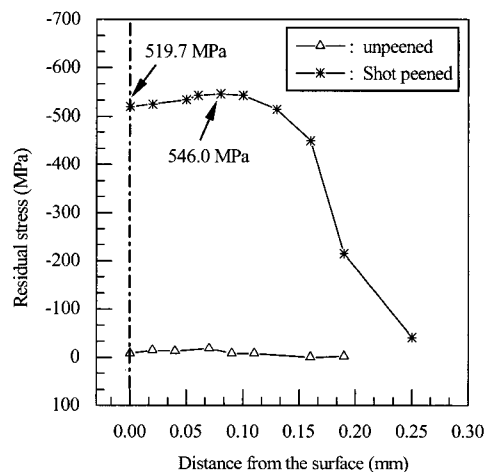


Fig. 9 Residual stress distribution

쇼트피닝의 잔류응력에 따른 균열진전연구⁽¹⁶⁾에서는 재료의 표면부에서의 미시균열진전 억제 효과는 압축잔류응력에 기인한다고 보고 되고있다. 본 연구에서도 쇼트피닝 가공 후의 피로균열진전시험과 그 파단면을 관찰한 결과, 피로진전 거동의 향상을 알 수 있었다. 이는 쇼트피닝에 의해 생성된 압축잔류응력이 재료의 표면에서 발생하는 초기 균열을 지연시킬 뿐만 아니라, 균열 전파의 기율기를 완만하게 함으로서 피로균열진전을 지연시키는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 표면 특수가공법인 쇼트피닝 가공에 의한 기계적 성질과 피로균열진전 거동의 변화를 관찰하였다. 또한 쇼트피닝 가공 효과를 규명하고자, 피로균열진전 파단면과 압축잔류응력을 고찰하였다.

시험결과, 쇼트피닝 가공에 의한 기계적 성질의 변화는 미소하였다. 쇼트피닝 가공으로 발생된 얇은 경화층은 경도와 기계적 물성의 변화에는 큰 영향을 미치지 못하였다. 피로균열진전시험에서는 쇼트피닝가공에 의해 피로수명의 향상을 나타내었다. 파단면을 관찰한 결과, 피로균열진전 양상이 쇼트피닝 가공에 의해 표면부에서 균열진전방향의 기율기가 완만해지는 것을 알 수 있었으며, 쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력은 표면에서 519.7MPa, 최대값은 546MPa로 나타났다. 이 발생된 압축잔류응력이 재료 표면에서의 균열 열림을 구속하므로써 피로수명을 향상을 초래하게 된다.

참 고 문 헌

- (1) J.K. Xenophon, 1989, "Shot Peening Viable Method to Extending Component Life", SAE Technical Paper Series 891932, pp. 1~8.
- (2) Tange, A, and Takamura, N., 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.
- (3) Natto, K., Ochi, T., Takahashi, T. and Suzuki, T., 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.
- (4) 이종규, 김정규, 1997, "피로강도 및 수명에 미치는 Shot Peening에 의한 잔류응력의 영향", 대한기계학회 논문집 A권, 제 21권, 제9호, pp.1498~1506.
- (5) K. Yozo, K. Shinzaburo and K. Masaki, 1996, "Effect of Shot Peening on Fatigue Strength of Ti-6Al-4V Alloy at Elevated Temperatures," J. of The Society of Materials Science in Japanese, Vol.45, No.1, pp. 43~47.
- (6) C. M. Verpoort, C. Gerdes, 1989, " Influence of Shot Peening on Material Properties of Turbine blades", Shot peening theory and application, IITT-International, France, pp. 11~70.
- (7) H. J. Plaster, 1973, "Blast Cleaning and Allied Processes" Vol.II.
- (8) R647-95a, 1997, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", Annual Book of ASTM Standard.
- (9) Riga-Ku, 1991, X-ray stress Analyzer Manual, pp. 9~17.
- (10) 이승호, 김희송, 정성균, 1998, "쇼트피닝에 의한 재료의 특성에 관한 연구", 한국공작기계학회지, 제7권, 제2호, pp. 15~22.
- (11) G. Glinka, 1979, "Effect on Residual Stresses on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments under Constant and Variable Loads", ASTM-STP 677, American Society for Testing and Materials, pp. 198~214.
- (12) N.E. Frost, K.J. Marsh, L.P. Pook, 1974, Metal Fatigue, Clarendon Press, Oxford.
- (13) D.W. Hammond, S.A. Meguid, 1990, "Crack Propagation in the presence of Shot peening Residual Stresses", Engineering Fracture Mechanics, Vol.37, No.2. pp.373~387.