

알루미늄 합금의 피로강도향상과 피로특성에 미치는 쇼트피닝 영향

전현배[†] · 임만배* · 박원조**

The Effect of Shot Peening on the Improvement of Fatigue Strength and Characteristics Fatigue Crack of the Aluminum Alloys

Hyun-Bae Jeon, Man-Bae Lim and Won-Jo Park

Key Words: Fatigue Strength(피로강도), Shot-peening(쇼트피닝), Brittle Striation(취성 스트라이에이션), Compressive Residual Stress(압축잔류응력), Fish eye(어목)

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of shot peening on the fatigue strength and fatigue life of two kinds of aluminum alloys. The fatigue strength behavior of aluminum alloys were estimated by the stress ratio and shot velocities. The fatigue life and strength increased with increasing the test shot velocity. However, at the shot velocity range between 50m/s and 70m/s, the compressive residual stress phenomena were observed in test conditions of different shot velocity. The optimal shot velocity is acquired by considering the peak values of the compressive residual stress, dislocations, brittle striation, slip, and fisheye on the fracture surface of test specimen. It was observed from the SEM observation on the deformed specimen that the brittle striation, fisheye were showed in the intergranular fracture structure boundaries at the this velocities. Therefore, fatigue strength and fatigue life would be considered that shot velocity has close relationship with the compressive residual stress.

1. 서 론

구조물은 사용 환경과 온도, 반복하중의 영향에 의하여 파손이 일어나지만, 실제 기계부품의 파손은 누적된 피로에 의한 피로파괴이다.

따라서 항공기부품설계에 있어 안전율을 낮게 하며 부품장치의 효율을 높이고 가혹한 환경에 생길 수 있는 피로파괴방지를 위한 구조물 수명평가를 필요로 하고 있다. 재료에 항복강도이하의 축 응력을 부가하면 소성변형과 파괴는 일어나지 않지만 상당한 사이클을 반복하여 부가하면 파괴가 일어난다. 그러나 표면 불균질성, 미세조직상 등에 의하여 국소적인 미소응력이 항복강도를 넘으면 국소적으로 소성변형이 일어난다. 항공기 부품에 사용되는 알루미늄합금은 경량화 및 고강도의 집합조직을 가지고 있기 때문에 여러 연구자들에 의해 연구되고 있다.¹⁴ 이러한 우수성과

† 경상대학교 대학원 정밀기계공학과

E-mail : jhb@gnu.ac.kr

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

* 경상대학교 정밀기계공학과

** 경상대학교 기계항공공학부, 해양산업연구소

함께 피로수명을 개선하는 연구가 동반 될 필요가 있다. 현재 우수한 기술력을 바탕으로 세계 시장점유율에서 우위를 차지하고 있는 우리의 자동차, 조선을 비롯하여, 항공기 산업은 점차 치열해지고 있는 세계 시장을 선점하기 위하여 부품 경량화와 더불어 피로수명개선 기술에 집중적인 투자를 할 필요성이 더욱 강조되고 있다. 따라서 기존 부품에 가장 최적의 쇼트피닝조건을 기초로 한 피로수명과 강도개선이 된다면 경제적인 효과를 가질 수 있다. 이러한 피로수명 개선에서 야기되는 문제점을 해결하기 위해서 선진국에서는 항공기부품 등의 취약한 부분에 쇼트피닝 가공을 거치며, 이미 피로를 받은 부분에도 쇼트피닝가공을 처리하여 피로수명을 증가시키고 있다.⁵ 또한 쇼트피닝가공은 부품의 피로강도 및 피로수명의 향상에 있어서 중요한 역할을 하고 있으며, 설계 제작된 부품 및 구조물에서 발생할 수 있는 예기치 않은 파괴, 파손을 미연에 방지 할 수 있는 특수가공 기술로 잘 알려져 있다. 국내 항공 우주산업분야에서도 피로수명 향상법의 하나인 최적의 쇼트피닝속도를 고려하여 손상허용설계에 적용하고 있다.⁶⁻¹²

본 연구는 Al7075-T6과 Al6061-T651 소재를 이용하여 쇼트볼의 투사속도 40 m/s, 50 m/s 및 70 m/s로 쇼트피닝 가공하여 하중이력을 고려한 최적의 투사속도와 균열이 성장함에 따라 시편의 실제 단면적이 감소하므로 재료표면 결함, 불균질성에 의한 스트라이에이션의 방향성과 어목현상을 고찰하여 최적피로강도 조건을 도출하였다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1 인장시험 및 피로시험

본 연구에 사용된 시험편인 알루미늄 합금의 화학적 조성은 Table 1에 표시하였으며, 인장시험은 ASTM E8규정에 의거하여 인장시험을 가공하여 시험을 시행하였다. 인장시험은 MTS(Model 810), 10 ton_r을 사용하여 상온에서 Crosshead Speed 1 mm/min의 조건으로 행하였으며 시험에서 얻어진 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다.

피로시험은 일정하중방식으로 응력비 R=0.1으로 일정하게 하였다. 주파수는 10 Hz, 정현파로 실온에서 실시하였다. Fig 1은 인장시험과 피로시

험에 사용된 시험편의 형상을 나타내고 있다.

2.2 쇼트피닝 가공

인장시험편과 피로시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 고속 회전 터빈식 쇼트피닝기에서 Table 3과 같은 조건으로 시험편 표면에 쇼트피닝을 실행하였다. 사용된 쇼트볼은 경강선(HSW)을 일정한 크기로 잘라서 만든 컷 와이어 쇼트볼을 사용하였다. 쇼트볼의 직경은 0.8 mm로 하였으며, 쇼트볼의 투사속도 40, 50, 70 m/sec로 분류하여 피닝을 실시하였다. 쇼트피닝은 품질조건에서 커머리지는 100 %를 유지하였으며 Arc Height 수준은 쇼트볼 투사속도 40, 50, 70 m/s에서 각각 0.292, 0.342, 0.368 mmA의 Arc Height 조건이 형성되었다.

Table 1. Chemical compositions of specimen (wt%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti+Zr	Al	
Al7075-T6	0.15	0.29	1.6	0.14	2.4	0.19	5.7	0.25	Remainder	
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Pb	Ti	Al
Al6061-T651	11.38	0.37	1.85	0.15	0.87	0.27	0.69	0.06	0.02	Remainder

Table 2. Mechanical properties of specimen

Material	Tensile strength [MPa]	Yield strength [MPa]	Elongation [%]	Vickers Hardness[HV]
Al7075-T6	661	610	11	175
Al6061-T651	404	372	17	107

Table 3. Conditions of shot peening

Specimen	Impeller diameter [mm]	Shot velocity [m/sec]	Time [min]	Shot ball diameter [mm]	Arc height [mmA]
Al7075-T6 Al6061-T651	250	40	2	0.8	0.292
		50			0.342
		70			0.368

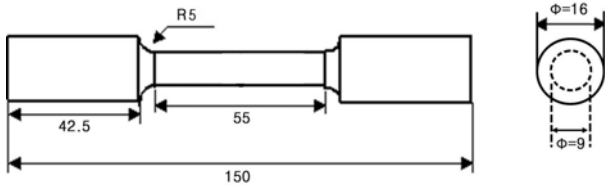


Fig 1 Geometry of tensile and fatigue test specimen (unit : mm)

2.3 잔류응력측정

알루미늄 합금에 쇼트볼의 투사속도에 따른 압축잔류응력을 측정하기 위해 ASTM E830-99의 규정에 준하여 실시하였으며, 분석용 프로그램은 미국의 Measurements Group사의 Re-stress (old version)와 H-Drill software (new version)를 이용하였다. 측정 깊이는 표면에서부터 1.6 mm까지 0.1 mm 간격으로 뚫으면서 측정하였다.

2.4 파면해석

실험 수행 후 피로수명시험편 파면의 양상을 관찰하기 위해서 압축잔류응력이 부여되지 않은 언피닝(un-peening) 시험편의 파단면과 쇼트피닝 가공된 시험편의 파단면을 비교하였다. 또한 균열시작점에서 균열진행방향으로 관찰하였으며, 스트라이에이션(striation)의 방향성과 피쉬아이(fish eye) 현상을 고찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 잔류응력측정 분포

Hole Drilling 방식의 잔류응력 측정에는 관통 방법인 Through Hole 방식과 일정한 깊이로 Hole 을 뚫어가는 Blind hole 방식이 있으며, 본 시험에서는 각각의 깊이에서의 값을 확인하기 위해 Blind Hole 방식을 채택하였고 표면에서 1.6 mm 까지 0.1 mm 간격으로 뚫으면서 측정하였다. Fig. 2는 쇼트볼의 투사속도에 따른 시험편에 형성된 압축잔류응력값을 나타내고 있다. ASTM E837-99에 규정에 의거하여 극 표면에서부터 0.2 mm에 형성된 압축잔류응력 값으로 하였다.

두 재질에 따른 잔류응력의 영향은 상대적으로 연질인 Al6061-T651이 경질인 Al17075-T6보다 압

축잔류응력이 낮게 평가 되었다. 속도에 따른 잔류응력의 영향은 낮은 속도에서 잔류응력이 높게 나타나며 속도가 높을수록 낮게 나타났다. 깊이 별 영향은 표층부에서는 압축의 힘을 받다가 깊이가 깊어질수록 힘의 크기는 감소하며 0.4~0.6 mm를 벗어나면 인장의 힘을 받게 되며 그 힘의 크기는 깊이가 깊어질수록 증가하게 되었다. 그러나 Al6061-T651과 Al17075-T6의 깊이에 따른 값의 변화는 다소 차이가 나지만 연한 재질인 Al6061-T651의 경우가 조금 더 깊은 곳에서 변화가 생겼다. 이러한 원인은 소재의 기계적 성질과 쇼트피닝에 조건에 따른 압축잔류응력분포가 Al17075-T6 소재에서 증가됨을 알 수 있다.¹³⁻¹⁵

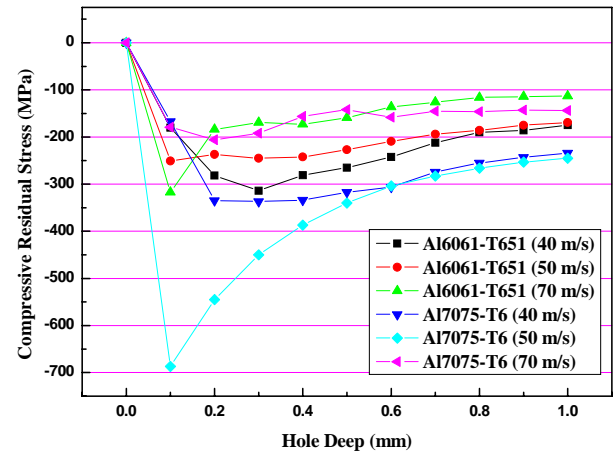


Fig. 2 Relation between hole deep and compressive residual stress

3.2 피로수명시험

Fig. 3과 4는 Al17075-T6, Al6061-T651의 쇼트볼의 투사속도를 40, 50, 70 m/s로 변화하여 투사한 시험편의 피로수명곡선을 나타내고 있다. 전자는 50m/s, 후자는 40 m/s 일 때, 가장 높은 피로강도를 나타내었고, 두 재료 모두 쇼트피닝속도가 증가할수록 오히려 피로강도가 떨어졌다. 이러한 원인은 오버피닝(over-peening)에 의해 소성변형으로 시험편 표면부의 심한 손상과 함께 응력집중을 유발하여 균열의 발생 및 성장에 기여했기 때문이라 생각된다. 또한 Al17075-T6은 50 m/s일 때보다 40 m/s 일 때 피로강도가 낮은 것은 언더피닝(under-peening)으로 압축잔류응력이 부족하기 때문이라 생각된다. 그러나 오버피닝과 언더피닝은 피닝가공을 하지 않은 모재에 비해 피로강도

가 향상되었다. 이는 표면의 손상 및 균열에 대한 영향보다 쇼트피닝에 의해 형성된 표면부의 조직변화와 압축잔류응력이 피로강도 향상에 더욱 영향을 주었기 때문이다.

특히 Al6061-T651과 같은 연질 재료의 경우 쇼트볼의 투사속도가 증가함으로써 전달되는 운동 에너지가 증가하여 시험편 표면의 소성변형이 크게 일어나 표면부에 노치역할을 하여 균열의 발생 및 성장을 가속시키는 응력집중의 원인이 되었다.

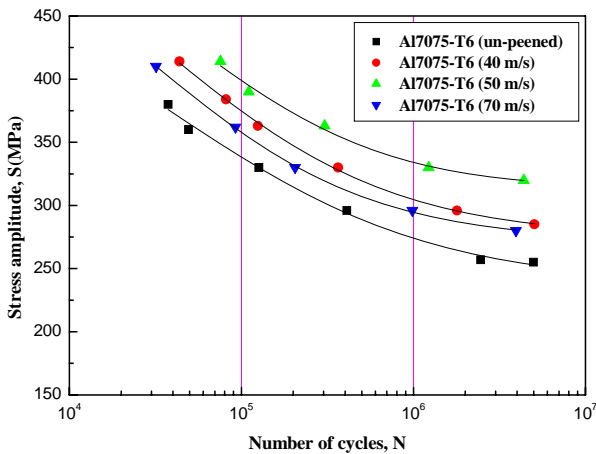


Fig 3 S-N curves of Shot Peened Al7075-T6

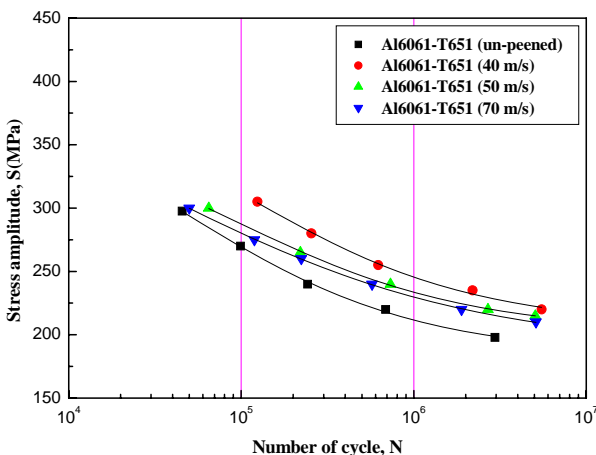


Fig 4 S-N curves of Shot Peened Al6061-T651

3.4 파면해석

피로파괴의 형태는 반복피로하중의 크기뿐만 아니라 응력집중 정도에 따라 크게 변한다. 파괴 양식과 파면에 남은 파단면형태 사이에 밀접한 연관성이 존재한다. 파단면 관찰에 의한 파면해

석은 파괴사고의 원인규명에 유력한 정보가 되고 파괴진행시의 정보 상태를 얻을 수 있어 사고예 방 및 해석이 가능하게 된다. 본 연구와 같이 과도한 쇼트피닝을 실시한 시험편은 표면부에 응력 집중이 유발되고 피로수명이 감소되는 경우 파면 해석을 기초한 원인 규명을 필요로 한다. 응력집중이 클 때는 표면부에서 다수의 균열이 동시에 개시 되어 균열을 진행한다.¹⁶ 응력집중을 고려하지 않을 정도로 적을 때는 균열의 시작점 수가 적게 된다. 노치 민감도가 낮은 un-peening재는 고 응력에서 표면에서 소성변형을 일으키고 표면에서 균열성장이 내부로 진행하고 표층에서 파괴가 진행되었다. Fig. 5는 un-peening재의 피로균열 개시점을 나타낸 모식도이다. 그림에서 보는바와 같이 일반강재에 나타나는 전형적인 표층에서 파괴가 시작되었고 시험편 직경을 기준으로 피로단면적이 peening재 보다 증가 되었다. Fig. 6은 노치 민감도가 높은 peening재 모식도에서 외부응력이 압축잔류응력에 의하여 표면에서 경감되어 내부응력이 크게 되므로 균열은 내부에서 발생함을 나타내었다. Fig. 7은 Al7075-T6, Al6061-T651재의 un-peening과 peening재의 파단면이다. 압축잔류응력에 의한 표면경화층이 존재하는 경우 표면경화층 강도가 외부응력보다 높아 균열기점이 내부에 나타나는 Fish Eye 현상이 나타남을 보여주고 있다. 또한 동일한 응력상태에서 un-peening재는 피로균열이 진행된 최종파단면의 면적이 넓어지며, 노치가 예리할수록 면적은 줄어들고 피로균열의 성장모양은 un-peening과 peening재 모두 방사선형상을 가진 피로파괴로 전과 되었다.

그리고 두 소재 모두 피닝속도가 70 m/s인 오버피닝과 Al6061-T651재와 같은 연질재는 표면에 과도한 손상이 노치 역할을 함으로써 표면부에서 균열기점이 되어 피로수명이 낮게 평가되는 원인을 제공하였다.

피로균열이 진행된 영역의 스트라이에이션 현상은 Al6061-T651의 un-peening과 피닝속도 40 m/s의 경우를 비교하면 전자가 후자보다 뚜렷하게 나타나고 있으며, 간격의 크기도 커짐을 알 수 있다. 균열이 성장함에 따라 시험편의 단면적이 감소하고 반복응력에 지배되는 구간으로 취성 스트라이에이션 간격이 증가함을 보였다. 간격의 크기가 크다는 것은 균열성장속도와 대응해보면 피로수명이 낮게 평가됨을 알 수 있다. 따라서

Un-peening 재 보다 peening재가 압축잔류응력의 영향이 피로균열진전에 필요한 구동력을 약화시켜 피로수명을 증가시킨 주요한 요인으로 판단된다.

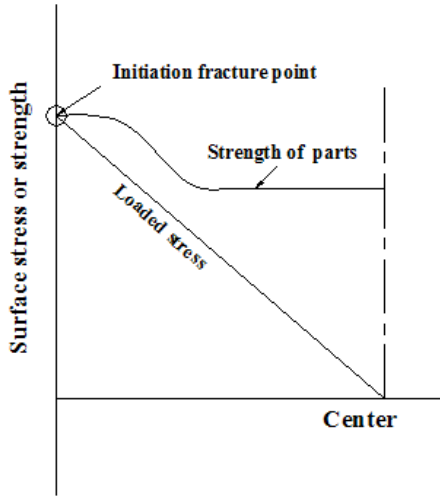


Fig. 5 Relation between stress distributed and initiation fracture point by the surface hardening layer (un-peening)

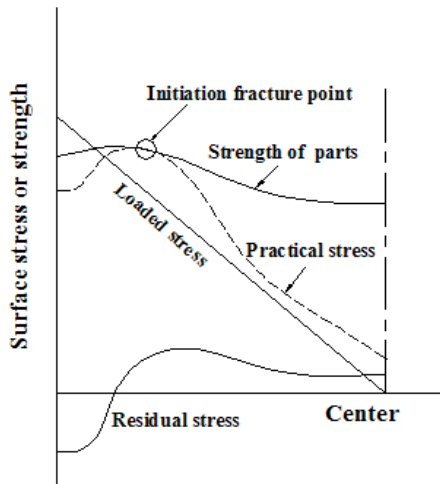


Fig. 6 Relation between stress distributed and initiation fracture point by the surface hardening layer (shot peening)

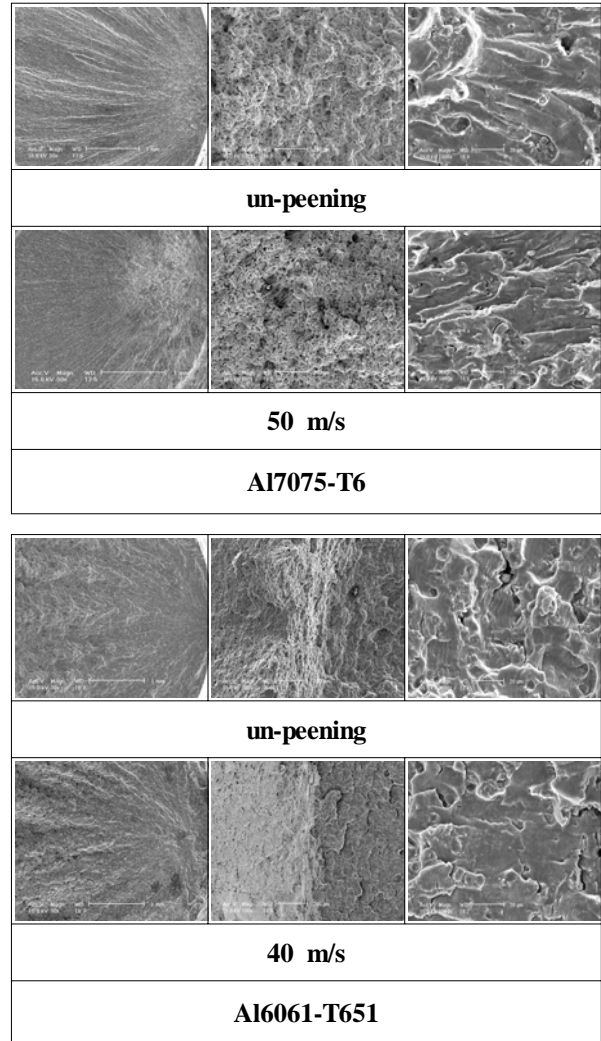


Fig. 7 SEM fractography showing fracture surface by the Al7075-T6 and Al6061-T651 alloy

4. 결론

본 연구에서 항공기 및 기계요소 부품의 신뢰성향상을 위한 방법으로 제시되고 있는 쇼트피닝 효과를 평가하기 위하여 사용된 Al7075-T6과 Al6061-T651의 시험편에 스트라이에이션(striation)의 방향성과 Fish Eye 현상을 고찰하여 최적피로강도 조건을 도출하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 쇼트피닝 처리 후 잔류응력 영향은 인장강도 높은 경질 Al7075-T6이 Al6061-T651 보다 압축잔류응력이 높게 평가 되었다.

2. 쇼트피닝재는 표면손상과 균열에 대한 영향보다 쇼트피닝에 의해 형성된 표면부의 조직변화와 압축잔류응력이 피로강도 향상에 더욱 영향을 주었다.

3. Al7075-T6는 50 m/s에서 최적의 피로수명을 나타내었고, Al6061-T651은 40 m/s에서 최적의 피로수명을 나타내었다.

4. 쇼트피닝에 의한 잔류응력이 표면경화층에 존재하는 경우 표면경화층의 강도가 외부응력보다 높아 내부에 균열기점이 나타나는 Fish Eye 현상이 나타난다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업, 경상대학교 학술진흥지원사업 및 2단계 BK사업으로 수행된 연구결과이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) M. S. Baxa, Y. A. Chang and C. H. Buck, 1978, "Effects of NaCl and Shot Peening on Corrosion Fatigue of AISI 6150 Steel", *Met. Trans.* 9A, 1141.
 (2) G. S. Was and R. M. Pelloux, 1979, "The Effect of Shot Peening on the Fatigue Behavior of Alloy 7075-T6", *Met. Trans* 10A, 665.
 (3) O. Vohringer, 1987, "Changes in the State of the Material by Shot Peening", *Shot Peening*, DGM, 185.
 (4) W.B. Koster, 1991, "Effect of Residual Stress on Fatigue of Structural Alloys", *Practical Applications of Residual Stress Technol.*, Proc. of the Third Int. Conf., Indianapolis, IN, USA. 1.
 (5) L. Wanger, 1999, "Mechanical Surface Treatments on Titanium, Aluminium and Magnesium Alloys", *Materials Science & Engineering A* 263~270.
 (6) S. K. Cheong., S. H. Lee and S. C. Chung, 2001, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening", *Transation of the KSME A*, Vol. 25, No. 10, pp.1590~1596.

(7) H. Aoki, E. Nagashima and T. Miura, 1990, "Effect of Shot Peening Conditions on Fatigue Strength of Carburized Steel", *Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening*, Tokyo, pp.513~518.
 (8) Gary, G. T, Williams, J. C. and Thomposon, A. W.1983. "Roughness-Induced Crack Closure. An Explanation for Microstructurally Sensitive Fatigue Crack Growth", *Met. Trans.* Vol. 14A: 421~433.
 (9) Barsom, J. M. 1971. "Fatigue Crack Propagation in Steels of Various Yield Strengths". *Journal of Engineering for Industry*, Trans. of ASME:1190~1196,
 (10) Saleh, Y and Margolin, H. 1983. "Low Cycle Fatigue of Ti-Mn-Alloy, Microstrustural Aspects of Fatigue Crack Growth." *Met. Trans.* vol. 14A:1481~1486.
 (11) Ritchie, R. O. 1977. Influence of Microstructure on the Near-Threshold Fatigue Crack Propagation in Ultra-High Strength Steel. *Metal Science*: 36 8~381.
 (12) Paris, F. C. and Erdogan, F. 1963. "A Critical Analysis of Crack Propagation Law". *Trans. ASME. A of Basic Eng.*, Vol. 85. pp. 528-532.
 (13) D. W. Hanmmand and S. A. Meguid, 1990, "Crack Propagation in Presence of Shot Peening Residual Stress", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 17, No. 2, pp. 373~387.
 (14) G. Glinka, 1979, "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments under Constant and Variable Loads", *ASTM-STP 677*, ASTM, pp. 198~206.
 (15) N. E. Frost, K. J. Marsh and L. P. Pook, 1974, "Metal Fatigue, Clarendon Press", pp. 198~246.
 (16) Masaharu Kage, Hironobu Nisitani, 1990, "Effect of Inclusions and Laminated Structures on the Anisotropy of the Fatigue Process in Rolled Steels", *Current Japanese Maerials Research* Vol.6 pp. 53~86.