

현가장치 STABILIZER BAR의 저온피로강도에 미치는 쇼트피닝의 영향

박 경 동 · 정 재 옥*

부경대학교 기계공학부

Effect of Peening on Low Temperature Fatigue Strength Behavior of STABILIZER BAR in Suspension Material

Keyoungdong Park · Jaewook Jung*

Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received 7 February 2004 / Accepted 21 June 2004)

Abstract : The purpose of this study is to predict the behavior of fatigue crack propagation as one of fracture mechanics on the compressive residual stress. 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. There is a difference between shot peened specimen and unpeened specimen. Fatigue crack growth rate of shot peened specimen was lower than that of unpeened specimen. Shot peening is improve the resistance of crack growth by fatigue that make a compressive residual stress on surface. That is the constrained force about plasticity deformation was strengthened by resultant stress, which resulted from plasticity deformation and compressive residual stress in the process of fatigue crack propagation. Temperature goes down, fatigue crack growth rate decreased.

Key words : Shot peening(쇼트 피닝), Residual stress(잔류응력), Low temperature(저온), Fatigue crack propagation(피로균열전파)

1. 서론

금속재료는 매우 높은 수준의 강도를 경험하지 않더라도, 항복강도 이하의 낮은 수준의 하중을 장시간 경험하게 되면 손상을 입게 된다. 이러한 피로를 경험하여 발생하는 파손의 형태를 피로 파괴(Fatigue Fracture)라고 하며, 피로파괴는 피로균열로부터 시작된다.¹⁾

피로균열은 소재의 외부 또는 내부의 미세결함, 이방성에 기인해 하중이 반복작용하는 대부분의 재질에서 나타나게 된다. 따라서 피로균열 진전 예측

은 안전도가 최우선이면서 경량화가 절대적으로 필요한 항공기, 자동차, 선박, 건축 구조물 설계에서 우선적으로 필요하게 되었다.

피로균열은 상당한 시간이 지난후에 발생하는 것이 보통이며, 반복되는 하중이나 진동을 받는 장치에서 많이 발생한다. 피로균열은 대부분의 경우 서서히 진행되기 때문에 실제 하중이 가해진 상태에서, 육안으로는 안정된 상태로 여겨지기도 한다. 이렇기 때문에 피로파손, 즉 피로균열은 매우 위험하며 실제 구조물 설계시 이러한 피로파괴에 대한 대책을 수립하여 금속재료를 적용 및 설계하여야 한다.^{2,3)}

자동차의 여러 장치들 중에서도 피로균열에 의한

*To whom correspondence should be addressed.
parkkd@pknu.ac.kr

위험성이 가장 크다고 볼 수 있는 것이 바로 현가장치이며, 그 중에서도 스프링은 피로하중을 매우 많이 받는 부품중 하나이다. STABILIZER는 바로 이 스프링 중의 하나이며, 대부분의 차량에는 차량의 Roll Rate를 증가시켜 만족스런 승차감, 안전성 등을 얻기 위해 현가장치의 일부로서 채용하고 있다. STABILIZER BAR는 양바퀴의 상하높이차에서 발생하는 Rolling을 잡아주는 차량의 가로방향으로 설치된 Torsional Spring의 일종이다.⁴⁾

고온환경의 피로강도에 미치는 쇼트피닝의 영향에 대해서는 여러 가지 실험들^{5,6)}이 이루어졌고, 그 결과로 고온에서도 쇼트피닝이 피로수명 향상에 효과가 있음을 확인하였지만 저온환경에서의 DATA는 아직도 미비한 실정이다.

본 실험에서는 STABILIZER BAR의 재료로 사용되는 SUP-9강으로 시험편을 만들고 쇼트피닝가공이 피로강도에 미치는 영향, 균열성장률과 가해진 반복하중의 상관관계, 극한지방에서의 사용을 고려한 온도(저온)의 영향을 분석하여 이를 피로균열 진전예측 자료로 사용함으로써 STABILIZER BAR의 수명, 나아가서 자동차의 수명향상에 기여하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 Photo 1과 같이 STABILIZER BAR와 동일재료의 시험편으로서 자동차 STABILIZER BAR에 사용되고 있는 SUP-9강이다. Table 1에 재료의 화학적 성분을, Table 2에 열처리를 가한 재료의 기계적 성질을 나타내었다. 피로균열 실험에 사용할 CT시험편은 ASTM-95a 규정에 따라 가공하였고, 노치 부분은 와이어 방전가공으로 가공한 후 표면을 그라인딩 머신으로 연마하였다. 그 후 쇼트피닝 머신에 의해 2200rpm, 즉 70m/s로 $\phi 0.8\text{mm}$ 쇼트볼을 사용하는 연속식 콘베어에서 상온으로 양면 쇼트피닝의 공정을 통과하여 알멘강도 0.375mmA 이상, 커버리지 85% 이상의 공정검사 합격품을 사용한 것이며, 시험편의 형상과 치수는 Fig 1과 같다.



Photo. 1 STABILIZER BAR (폭스바겐 LUPO)

Table 1 Chemical composition of specimen (wt%)

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

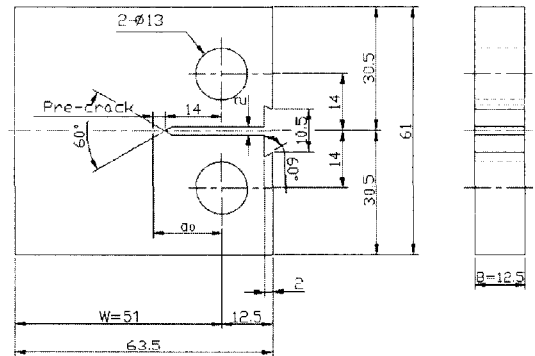


Fig. 1 Configuration of CT-specimen (unit : mm)

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	Tensile strength (MPa)	Hardness(HrC)		Yield strength (MPa)
		After quenching	After tempering	
SUP-9	1226	55	47	1079

2.2 실험장치 및 방법

Photo 2는 본 실험에 사용된 피로시험기 (INSTRON 8501, 10ton)를 나타내고 있다. 실험은 서보전기 유압식 피로시험기를 사용하여 하중감소 제어방식으로 주파수 10Hz, 정현파(Sine Wave)로 실험하였다.

피로균열의 길이측정은 COD(Crack Opening Displacement) 게이지를 통해 각각의 시험편을 실험하였으며 ASTM E647-93에 의거 Compliance법으로 하여 피로균열 진전이 정지될때까지 실험하였다.

본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK 의 계산식은 다음과 같다.

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

$$-13.32a^2 + 14.72a^3 - 5.6a^4$$

단, $a = a/W$ ($a/W \geq 0.2$)

여기서, a 는 하중중심에서의 균열길이, W 는 하중중심에서의 시험편 길이, B 는 시험편의 두께이고, $\Delta P(P \max - P \min)$ 는 하중변위이다.

쇼트피닝 가공시 쇼트볼의 투사에 의한 표면 경화가 균열진전에 미치는 영향을 알아보기 위해 본

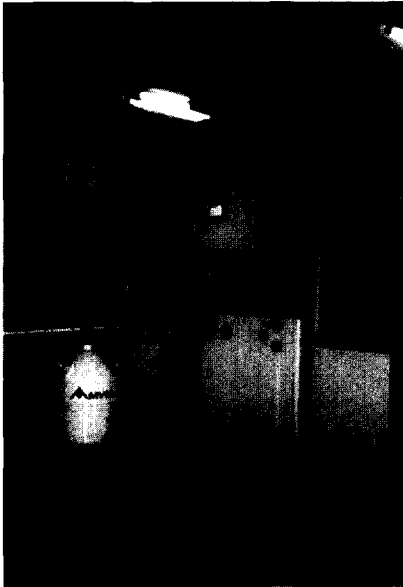


Photo. 2 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)



Photo. 3 Micro vickers hardness tester

실험에 들어가기 앞서 쇼트피닝 한 시험편과 그렇지 않은 시험편의 단면부를 각각 채취하여, 열경화성 수지에 고정하고 폴리싱 한 뒤 Photo 3의 마이크로 비커스 경도계(MHT-1)를 이용하여 극표면부의 압축잔류응력층 경도분포를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 쇼트볼 투사에너지와 표면경도

Fig. 2는 쇼트피닝 가공시 쇼트볼이 가공물 표면에 투사되어 표면이 소성변형되는 모습을 나타내었으며, Fig. 3은 쇼트피닝 가공을 하지 않은 언피닝 시험편 단면과 쇼트피닝 가공한 시험편 단면에 대한 경도분포를 비교하여 도시하였다.

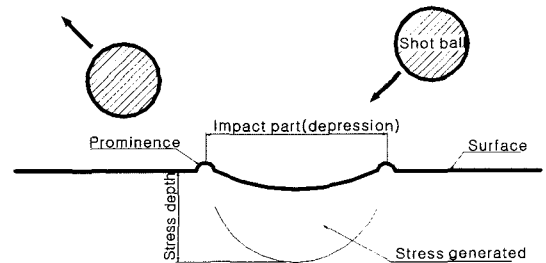


Fig. 2 Principle of controlled shot peening

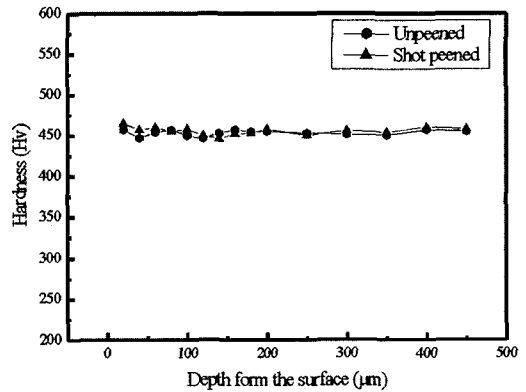


Fig. 3 Hardness distribution of specimen

쇼트피닝 가공시 쇼트볼이 시험편 표면에 투사되면서 발생하는 투사에너지는 국부적인 소성변형을 일으키면서 표면부의 조직을 조밀하게 형성시키므로 경도치가 시험편 내부보다 약간 높은 수치로 나타남을 알 수 있다.

시험편의 표면부에서 100 μ m까지의 경도가 높게 형성되고, 시험편의 재질(연질재, 경질재)에 따라 다르겠지만, 전체적으로 경도의 큰 변화는 없었다.

3.2 피로균열 진전특성

응력확대계수 $\Delta K=10MPa\sqrt{m}$ 일 때 언피닝과 쇼트피닝 소재에 대하여 피로균열 진전속도를 수치적으로 비교해 보면 다음과 같다.

Table 3 Relation between fatigue crack growth rate and low temperature(25 $^{\circ}$ C, -60 $^{\circ}$ C, -80 $^{\circ}$ C, -100 $^{\circ}$ C)

Temperature	균열진전지수(da/dN)	
	Unpeened	Shot peened
25	7.97×10^{-5}	4.9×10^{-5}
-60	6.92×10^{-5}	3.237×10^{-5}
-80	6.31×10^{-5}	2.178×10^{-5}
-100	5.68×10^{-5}	1.085×10^{-5}

Fig. 4는 두께 20mm 판재에서 산소 절단기를 이용, L-T방위(L-T orientation)로 채취하여 압연방향(L)이 하중방향이 되게 가공한 시험편을 상온(25 $^{\circ}$ C)과 각 저온(-60 $^{\circ}$ C, -80 $^{\circ}$ C, -100 $^{\circ}$ C)에서 피로시험을 실시해 피로균열 진전속도비 da/dN과 응력확대계수 ΔK 관계를 양대수 직선상에 각 온도별로 나누어 나타

낸 것이다.

온도의 하강에 따라 da/dN은 감소하고, ΔK 는 증가하는 것을 Fig. 4의 그래프를 통해 알 수 있는데, 이것은 온도가 하강할수록 재료의 피로균열 저항성이 증가하기 때문⁸⁾이라 생각되며, 쇼트피닝 가공으로 발생한 압축잔류응력은 저온환경에서도 피로균열 진전과정에 현저한 영향을 미치어 피로균열 진전속도의 지연효과가 있음을 확인하였다.

3.3 저온에서의 C,m 관계

Fig. 5,6은 쇼트피닝 가공 후 저온에서의 피로균열 진전거동에서 Paris 공식 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 에 따른 재료상수 C와 피로균열 진전지수 m을 정량적으로 비교 도시하였다.

3.4 쇼트피닝과 FE 해석의 비교

Fig. 7은 쇼트볼 투사속도 70m/s로 충돌하여 형성되는 응력의 분포를 유한요소 해석한 것이며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Fig. 8에는 쇼트볼 충돌 후 발생된 소재 표면부의 압축잔류응력을 소재표면으로부터 깊이에 따른 그 값을 표시하였다.

쇼트피닝 가공시 쇼트볼 투사에 의한 소재 표면부의 탄소성 변형은 표면 바로 아래에서 크게 이루

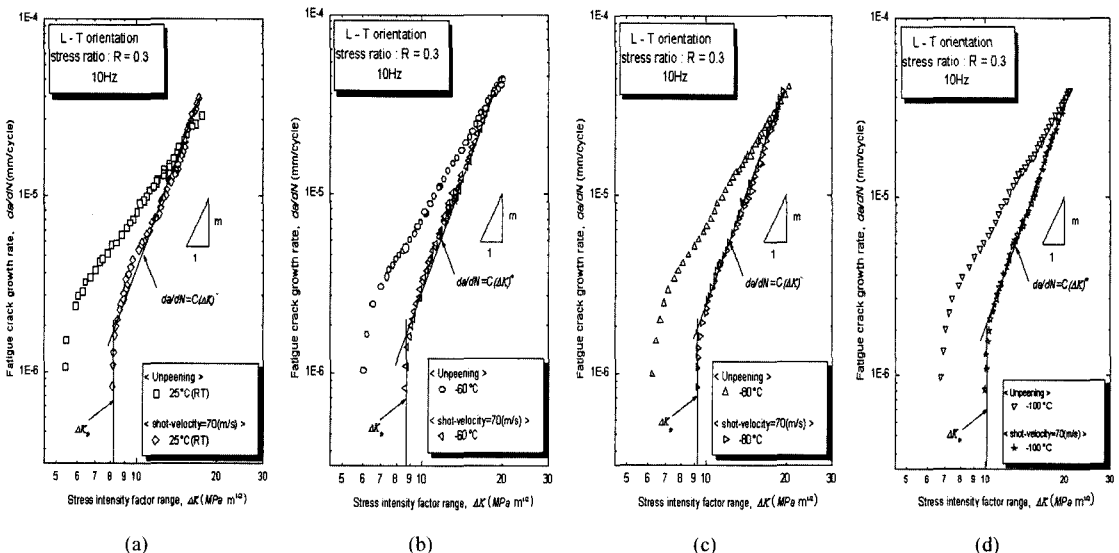


Fig. 4 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

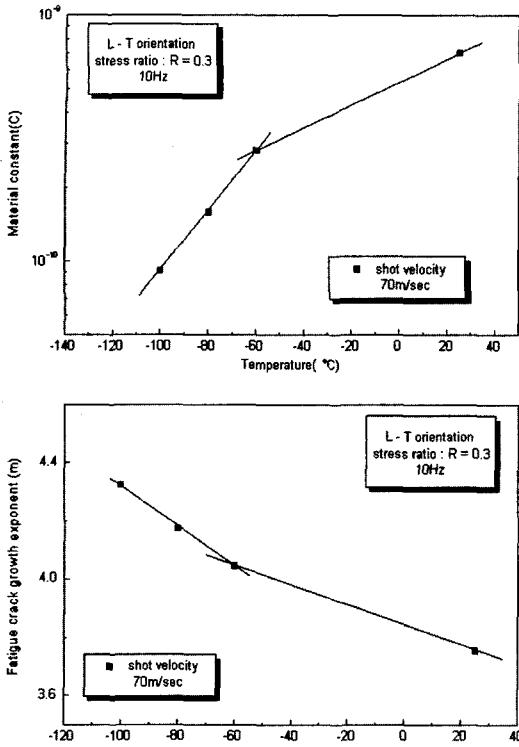


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth exponent C-Temperature (°C) & m-temperature (°C)

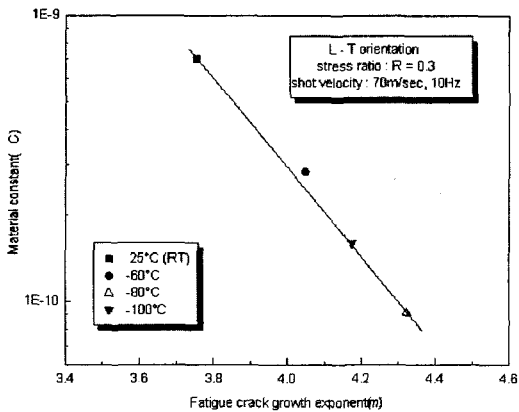
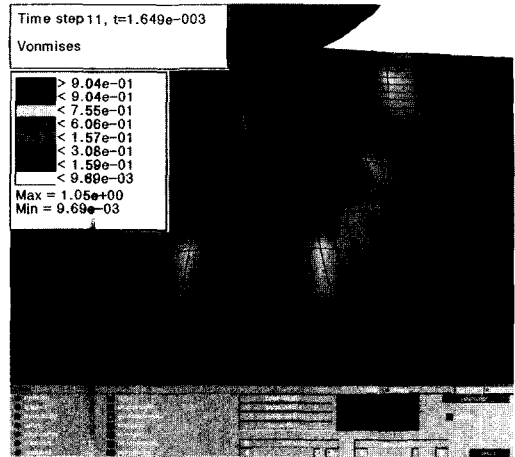
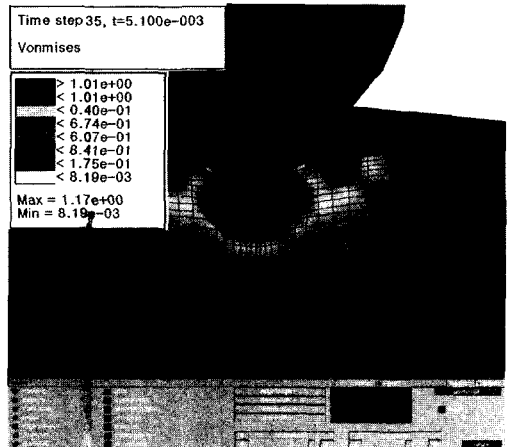


Fig. 6 Correlation between C and m in Paris law $da/dN=C(\Delta K)^m$

어 지므로 극표면의 압축잔류응력을 높일수록 피로 강도가 증가하여 피로수명이 향상된다.⁹⁾ 그리고 유한요소해석의 압축잔류응력값이 실제 쇼트피닝 가공에 의한 값보다 높게 형성됨을 알 수 있는데, 이것은 소재 표면에 쇼트볼이 접촉 또는 충돌할 때 쇼트



(a) Maximum deformation during impacting



(b) After impacting

Fig. 7 Von Mises stress distribution for velocity 70m/s of a ball

Table 4 Comparison of FE analysis result

Ball shot velocity m/sec	Duration of contact μsec	Depth of dent μm	Von mises residual stress MPa
70	0.75~0.95	29.6	1120

볼의 변형과 마찰열에 의한 소재의 소성변형에 대한 풀림현상을 고려하지 않았기 때문이라 생각된다.

유한요소해석과 실제 쇼트피닝 가공에 의한 값이 서로 다르긴 하나 기본적인 양상은 이론과 실제가 유사하다고 판단된다.

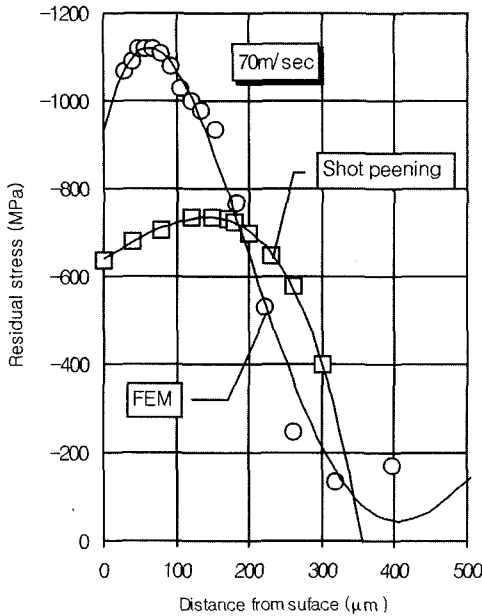


Fig. 8 Relation between compressive residual stress(MPa) and distance from surface(μm)

3.5 파단면 관찰

언피닝과 쇼트피닝 시험편의 파단면은 상온과 각 저온에서 거의 비슷한 양상을 보이고 있다. 그러나 쇼트피닝 시험편은 언피닝 시험편과 달리 압축잔류응력이 균열선단 소성영역을 구축하기 때문에, 쇼트피닝 가공된 파단면 양쪽 측면의 피로균열이 지연되어 전체적으로 라운드 형으로 균열이 진전됨을 확인할 수 있었다.

Photo. 4는 언피닝(RT)과 쇼트피닝(-100℃) 시험편의 각 파단면을 A,B,C 구간으로 나누어 균열진전 양상을 관찰한 SEM 사진들이다.

4. 결론

쇼트피닝 가공이 STABILIZER BAR의 저온피로강도에 미치는 영향에 관하여 실험적으로 연구한 결과는 다음과 같다.

1) Fig. 3에 나타나듯이 언피닝 시험편에 비해서 쇼트피닝 시험편은 극표면에서 내부 100μm까지 쇼트볼 투사에 의해 표면 경도값이 높은 것은 사실이나, 언피닝 시험편의 표면경도는 극표면에서 내부 200μm 이후까지 평균 453(Hv)이고, 쇼트피

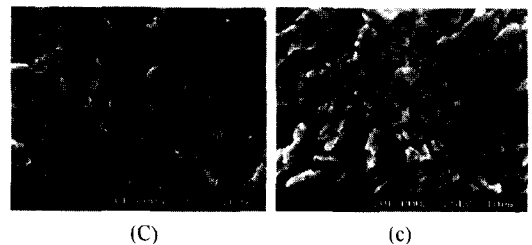
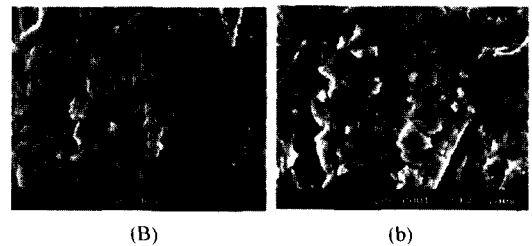
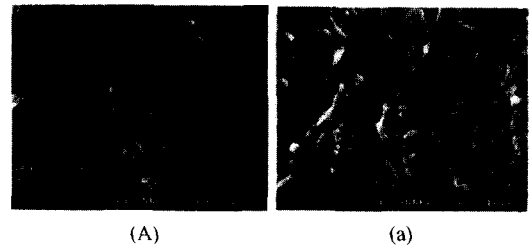
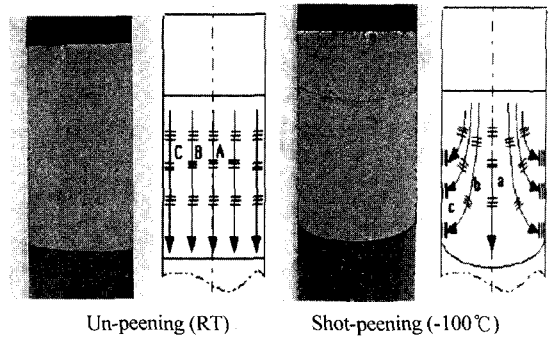


Photo. 4 Striation of fatigue crack propagation by SEM(RT)

닝 시험편의 경우는 평균 457(Hv)로 두 시험편의 경도값이 큰 차이는 보이지 않고 있다. 따라서 쇼트볼 투사에 의한 표면 경도값 상승은 시험편의 균열진전에 직접적인 영향을 준다고는 보기 어렵다고 판단된다.

2) Fig. 4와 Fig. 5를 통해 동일한 ΔK (ex: $\Delta K=10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)에서 언피닝 시험편과 쇼트피닝 시험편 모두 온도가 하강할수록 피로균열 진전속도비

와 재료상수 C 의 값은 감소하고, 반면에 응력확대계수 ΔK 와 균열진전지수 m 의 값은 상승함을 알 수 있다. 이는 온도가 하강할수록 금속의 수축 현상으로 인해 피로균열저항성이 증가하여, 균열진전을 억제하기 때문으로 판단된다.

- 3) 유한요소 해석의 값과 실제 쇼트피닝 값의 비교를 통해 유한요소 해석시 쇼트볼 변형과 마찰열 등의 고려가 필요함을 알 수 있었다.
- 4) 저온 피로균열진전 실험을 통해 파단면의 양상은 온도와 크게 상관없이 유사함을 확인하였으며, 저온환경에서도 쇼트피닝 가공은 균열진전 지연에 효과가 있었다.

References

- 1) J. H. Kim, "A Study of Fatigue Crack Propagation Characteristics in Mechanical Structural Steel," Chung-nam Univ. Thesis of Doctorate, pp.10-16, 1989.
- 2) J. Willenborg, R. M. Engle, H. A. Wood, "A Crack Growth Retardation Model using and Effective Stress Concept," AFFDL-TM-71-1-FBR, 1971.
- 3) 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.
- 4) E. S. Palma, E. S. Santos, "Cumulative Fatigue Damage in an Automobile Stabilizer Bar: Correlation between Laboratory and Road Experiments," SAE 2001-01-3175, 2001.
- 5) K. D. Park, J. H. Kim, H. K. Yoon, W. J. Park, "A Study on Fatigue Crack Propagation Behavior of Pressure Vessel Steel SA516/70 at High Temperature," KCORE Paper 15-2-456, pp.105-110, 2001.
- 6) E. G. Yoh, Y. S. Lee, "Analyses on the High Temperature Fatigue and Brittle Damage of the Casting Mould due to Thermal Stress," KSAE Paper 03-F0245, pp.1563-1568, 2003.
- 7) K. D. Park, C. G. Jung, "The Effect of Compressive Residual Stresses of Two-stage Shot-peening for Fatigue Life of Vehicle Spring Steel," Transactions of the KSAE, Vol.11, No.1, pp.185-192, 2003.
- 8) C. G. Jung, K. J. Ha, "A study on the Characteristics of Compressive Residual Stresses at Elevated Temperature," International Shot Peening Conference, pp.25-31, 2002.
- 9) A. Tange, 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, pp.243-253, 1990.
- 10) 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, pp.81-90, 1993.
- 11) J. Willenborg, R. M. Engle, H. A. Wood, "A Crack Growth Retardation Model using and Effective Stress Concept," AFFDL-TM-71-1-FBR, 1971.