

## 쇼트피닝 가공된 해양구조용강의 피로파괴에 미치는 응력비의 영향

박경동\* · 한건모\*\* · 진영범\*\*\*

\*\*부경대학교 기계공학부

\*\*동아대학교 해양·토목공학부

\*\*\*부경대학교 기계공학부 대학원

### The Effect of Fatigue Fracture in shot peening Marine structural steel at stress ratio

, KYOUNG-DONG PARK\*, KUN-MO HAN\*\*, YOUNG-BEOM JIN\*\*\*

\*Pukyong National University DEPT. of Mechanical Engineering, Busan 608-739, Korea

\*\*Dong-A University School of Civil and Ocean Engineering, Busan 604-600, Korea

\*\*\*Pukyong National University DEPT. of Mechanical Engineering, Busan 608-739, Korea

**KEY WORDS:** Marine Structural Steel 해양구조용강, Shot Peening 쇼트피닝, Crack Growth 균열성장, Stress Ratio 응력비, Threshold Stress Intensity Factor 하한계 응력확대계수, Fatigue Crack Growth 피로균열성장, Stress Intensity Factor 응력확대계수, Compressive Redisual Stress 압축잔류응력,

**ABSTRACT:** Recently, the request for the light weight is more increased in the area of industrial environment and machinery and consistent effort is needed to accomplish high strength of material for the direction of light weight. we got the following characteristic from crack growth test carried out in the range of stress ratio of 0.1, 0.3 and 0.6 by means of opening mode displacement. At the constant stress ratio, the threshold stress intensity factor crack range  $\Delta K_{th}$  in the early stage of fatigue crack growth (Region I) and stress intensity factor range  $\Delta K$  in the stable of fatigue crack growth (Region II) with an increase in  $\Delta K$ . Fatigue life shows more improvement in the Shot-peened material than in the Un-peening material. And compressive residual stress of surface on the Shot-peening processed operate resistance force of fatigue. So we can obtain followings. (1) The fatigue crack growth rate on stage II is conspicuous with the size of compressive residual stress and is depend on Paris equation. (2) Although the maximum compressive residual stress is deeply and widely formed from surface, fatigue life does not improve than when maximum compressive residual stress is formed in surface. (3) The threshold stress intensity factor range is increased with increasing compressive residual stress.

#### 1. 서 론

일반산업과 해양구조물에 있어서 설계 및 구조전성 평가 및 파손방지를 위한 다가적인 노력에도 불구하고 예기치 않는 파손사고가 일어나 인명이나 물적재산에 많은 피해를 준다. 이에 대형 중요 구조물이나 항공기, 선박, 건설 등에서 구조물 파괴를 방지하기 위해 학문적 연구 분야로 파괴역학의 발전을 연구하고 있다. 재료의 피로파괴는 환경에 따른 강도, 부식과 더불어 재료의 수명을 단축하고 구조물의 내구연한을 결정짓는 가장 중요한 사항으로서 피로수명 평가의 필요성이 증대되고 있다. 특히 최근 기계, 선박, 자동차 산업 등에서는 신소재 개발과 재료의 고응력화, 경량화를 요구하고 있지만 고가의 기기와 많은 시간, 노력을 필요로 한다는 많은 문제점을 갖고 있다.

피로수명의 연장방법으로는 피로손상보수, 잔류응력의 부여,

제1저자 박경동 연락처: 부산시 남구 용당 산100

051-620-1592 parkkd@pknu.ac.kr

(ASTM, 1998), 휴식기간의 부여 등의 방법이 있으며 잔류응력을 도입하여 피로수명 및 성질을 개선하는 방법인 쇼트피닝에 의해 표면에 압축잔류응력을 부여하는 방법이 1927년 Herber가 높은 곳에서 강판에 작은 강구를 낚하시켜 금속표면의 경화 등을 시험한 것을 시초로 1935년에 Weibel이 엔진밸브스팅에 다양한 쇼트볼을 투사시켰으며 1940년에 Zimmerli는 금속표면처리 심포지엄에서 코일 스프링에 쇼트피닝을 처리한 결과 피로강도가 42% 증가된다는 것을 실증하여 미국의 자동차와 항공부품업계 및 선박부품업계에서 지속적으로 연구하고 실용화함으로서 SAE 쇼트피닝 위원회에서는 쇼트피닝 가공에 대한 규격과 작업 표준안을 제정하게 되었다(정성균등, 2001).

이러한 쇼트피닝가공에 의해 금속 표면부에 형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속 표면부에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는應력을 감소시켜 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시켜주고 균열의 안정성장을 지연시키어 피로수명을 향상시킨다(Gillespie, 1993; Wohlfahrt, 1984; 박경동과 손명근, 2002; 박경동과 류찬욱, 2002; 박경동과 정찬기, 2001).

그리고, Verpoort와 Gerdes는 쇼트볼이 가하는 투사 에너지를 변환 시켜보기 위해서 쇼트볼의 질량, 속도, 투사량을 변경하여 시험한 결과 쇼트피닝할 때 에너지가 높은 것만이 좋은 것은 아니고 적절한 쇼트조건을 가지는 것이 좋다는 연구를 하였다.

또한 Tange, Takamura와 Natto, Ochi는 쇼트피닝의 압축잔류응력과 피로크랙진전파의 관계를 연구한 결과 피로크랙진전 수명에 있어서 표면에 형성된 최대 잔류응력이 표면에 가까울수록 피로수명이 증가함을 연구하였다. 한편, 영역 II에서의 피로균열성장거동은 피로균열성장속도, 미세구조, 실험분위기 및 하중조건등의 내적·외적 인자에 의해 크게 좌우되며 실험이 Paris 영역,  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 의 식이 성립하는 영역에서 주로 행해지는 반면에  $\Delta K$ 가 감소하여 영역 I에 들어가면 피로균열성장속도가 급격히 감소하여  $\Delta K_{th}$  이하에서는 피로균열이 성장하지 않는다. 피로파괴의 대부분은 피로균열의 개시와 피로균열의 안정성장과정에서 소비되므로 피로균열의 개시와 안정성장과정의 해석과 예측이 매우 중요한 사항이 되고 있다. 균열의 개시와 균열의 성장과정은 반복하중, 부식환경, 고온환경, 저온환경 내에서 균열의 개시조건과 균열의 진전속도를 특성 짓는 것이 파괴역학의 파라미터로서 피로균열 전파속도 -  $da/dN$  또는  $da/dt$  ( $a$  : 균열길이,  $N$  : 외력의 반복수,  $t$  : 재하시간)가

$K$  또는  $\Delta K$ 의 함수로서  $da/dN = f(\Delta K, K)$ ,  $da/dt = f(K)$ 에 의해 파괴조건이 기술되어지는 선형파괴역학이 응용되고 있으며 응력 확대계수( $K$  : Stress intensity factor)와 파괴인성( $K_C$  : Fracture toughness)은 중요한 파라미터이다.

그리고 선형파괴역학(Liner Elastic Fracture Mechanics)은 1959년 Irwin에 의해 제정된 이래 매우 활발히 연구한 결과 새로운 학문체계로서 완성해 가고 있다.

균열근방의 탄성응력장을 특성 짓는 파라미터  $K$ 를 사용하여  $K \leq KC/S$ 에 의해 취성파괴를 방지하는 조건을 기술하려는 입장이 소위 선형파괴역학이며 기본적으로 탄성해석에 의해 취성파괴를 방지하는 조건을 기술하려는 입장이 소위 선형화이며 기본적으로 탄성해석에 의해 파괴조건이 기술되며 균열선단근방에 생긴 조성역이 균열이나 다른 부재 치수에 매우 작다는 소위 소규모항복범위(Small Scale yielding)는 파괴문제에 대해 유효하다.

본 연구에서는 실험적으로 어려운 해양구조물, 선박용 스티로로 주로 사용되고 있는 SUP-9강에 대하여 종래에 발표된 Un-peening재와 앞서 피로수명 및 기계적 성질을 개선한 Un-peening재에 Shot-peening 가공하여 반복하중을 10cycle/sec로서 응력비  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ ,  $R=0.6$ 으로서 피로강도 향상과 피로수명 향상에 대하여 연구하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 해양구조물, 선박용 및 자동차 현가장치에 주로 사용되고 있는 해양구조용강(JISG SUP-9)이며,

이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고, Table 2는 열처리(Quenching & Tempering)한 시편의 기계적 성질이다.

본 시편은 피로균열 진전거동을 관찰하기 위하여 CT시험편은 두께 12.5mm로 하였고 시험편의 채취는 열간압연된 프레바 상태에서 L-T방향으로 채취하였다. 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 Fig. 1과 같으며 외형가공은 밀링으로 노치홈은 와이어커틱팅 방전가공기에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈 반지름 0.1mm이 되게 가공하였다.

Table 1 Chemical Composition of Specimen(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88

Table 2 Mechanical Properties of Specimen

Tensile Strength (MPa)	Hardness(HRC) after Quenching	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
1226	55	47	1079

그리고 기계 가공된 노치는 실제로는 매우 둔한 첨단을 갖는다. 이에 비하여 피로균열성장시험의 기본역학인 선형탄성파괴역학(LEFM)은 이상적으로 날카로운 균열을 전제로 하고 있다. 따라서, 기계 가공된 노치로부터 날카로운 예비균열을 성장시켜 가공된 노치의 영향과 균열 첨단모양 및 하중 이력으로 인한 영향을 감소하고 예상 경로를 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며 25°C 정도의 온도환경과 항복강도 이내의 응력범위에서 ASTM E647-93 규정에 의거해 3mm의 피로예비균열을 주었다(이용복 등, 1999; Kobayashi, H., 1993).

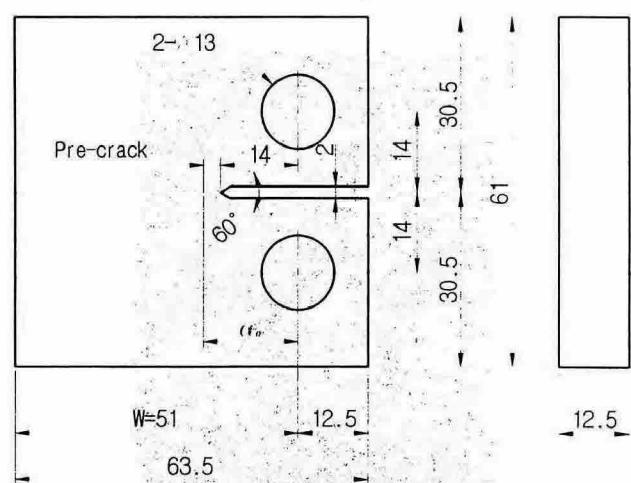


Fig. 1 Dimension of CT specimen(unit:mm)

## 2.2 시험편의 압축잔류응력

2.1항과 같이 완성된 CT 시험편의 쇼트피닝 가공면에 균일한 압축잔류응력을 부여하기 위해 Fig. 2 형상의 치구에 고정하여 고속회전 터빈방식 쇼트피닝기로 Table 3과 같은 조건 하에서 시험편을 제작하였다.

Table 3 Condition of Shot-Peening(wt%)

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



Fig. 2 Fixture of specimen

## 2.3 실험장치

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기(Instron 8501, 100KN)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 적용 하중 파형은 정현파로 하고 적용 응력비  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ ,  $R=0.6$  주파수는 10Hz로 하였으며, 피로균열 길이측정은 COD 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 ASTM E647-95a의 규정에 따라 상온에서 실험하였다.

Fig. 3은 전기유압서보 피로시험기이다.



Fig. 3 Apparatus of fatigue test machine

## 2.4 실험방법

### 2.4.1 압축잔류응력의 측정

쇼트피닝 가공된 시험편 표면의 압축잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기(Rigaku - MSF2M, Fig. 4)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20μm 단위로 연마 해가면서 Table 4와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffraction	Condition	
X-Ray Source	Taget	Cr-V
	Voltage	30KV
	Current	10mA
	Ø	0°, 15°, 30°, 45°
2θ	140° ~ 170°	
Diffraction	Scintillation Counter	

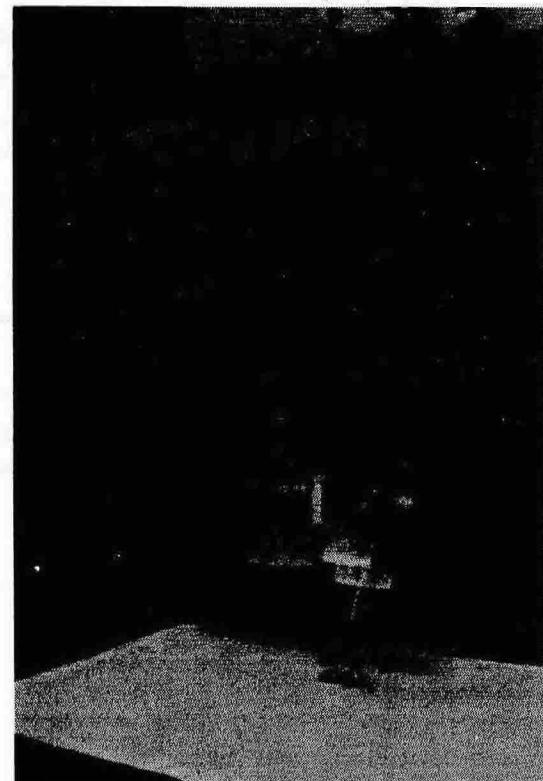


Fig. 4 Photograph of X-Ray diffraction machine

### 2.4.2 피로균열진전 실험

시험편의 초기 크랙은 초기응력확대계수 범위  $\Delta K$ 를 10 MPa $\sqrt{m}$ 으로 하여 초기  $\Delta K$ 의 95% 범위내에서  $\Delta K$  증가법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였고 초기 크랙진전길이 3~5mm 지점에서 다시 95%범위내의  $\Delta K$ 감소법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다.

본 실험에 적용된 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 의 계산식은 다음과 같다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.46\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

$$\alpha = a/W \quad (a/W \geq 0.2) \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ 는 하중중심에서의 균열길이,  $W$ 는 하중중심에서의 시험편길이,  $B$ 는 시험편의 두께이며  $\Delta P$ 는 하중변위이다.

$$\Delta K = \begin{cases} K_{\max} - K_{\min} & (K_{\min} > 0) \\ K_{\max} & (K_{\min} \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

및 응력비

$$R = K_{\min} / K_{\max} \quad (3)$$

의 함수가 되며, 여기서  $R$ 의 영향을 제외하면 특정의  $\Delta K$ 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어진다. 그것을 Paris 법칙(ASTM E647-81, 1981; Kobayashi H., 1993; Japan mechanic institute standard, 1981)인

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

으로 나타내고 양대수 선도상에서 직선적으로 변하며  $\Delta K$ 의 기울기는

$$C_g = \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{da}{dN} \geq 0.08 \text{ mm}^{-1} \quad (5)$$

$da/dN$ 의 측정범위  $\Delta a \leq 0.5 \text{ mm}$ 이다.

여기서  $C$ 와  $m$ 은 각각 재료상수, 피로균열진전지수로서 이것으로 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 된다(박경동과 박상오, 2002; 정찬기와 박경동, 2002).

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 피로파괴 전파 특성에 미치는 응력비의 영향

피로균열진전 Stage II 영역에서 피로균열전파는 탄소성변형에 의해 균열닫힘과 열림이 반복적으로 일어나면서 안정성장하여 피로파면에 그 특유의 스트라이에이션을 형성하고 그 속도는  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 을 만족시키며 시험편의 미세조직, 응력비, 환경, 두께의 영향을 거의 받지 않지만, 응력확대계수가 점점 감소함에 따라 피로균열 진전속도는 진전식  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에서 예측하는 것보다 영향을 많이 받는다. 따라서 균열진전속도가 낮아지는 Stage I 영역에서의 피로균열진전속도는 시험편의 미세조직환경, 응력비의 영향을 많이 받는다.

Fig. 5는 쇼트볼 투사속도 70m/sec로 쇼트피닝 가공한 시험편의 응력비를  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ ,  $R=0.6$ 으로 하여 진전속도와 응력확대계수관계를 도시하였다.

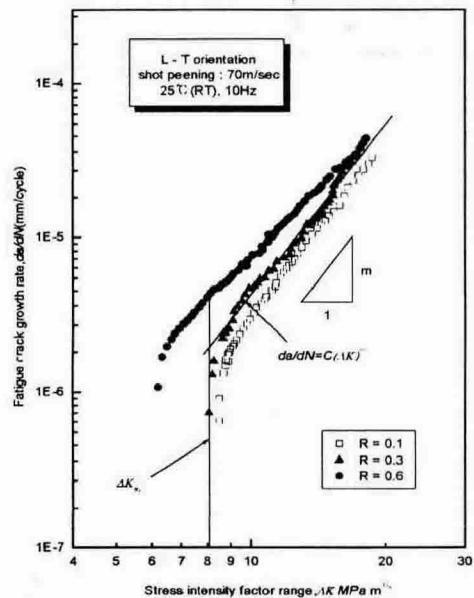


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

#### 3.2 재료상수 $C$ , 피로균열진전지수 $m$ 관계

Fig. 6은 피로균열진전거동에서 Stage II의 진전식  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에 따른 재료상수  $C$ 와 피로균열진전지수  $m$ 의 관계를 응력비  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ ,  $R=0.6$ 별로 도시하였다.

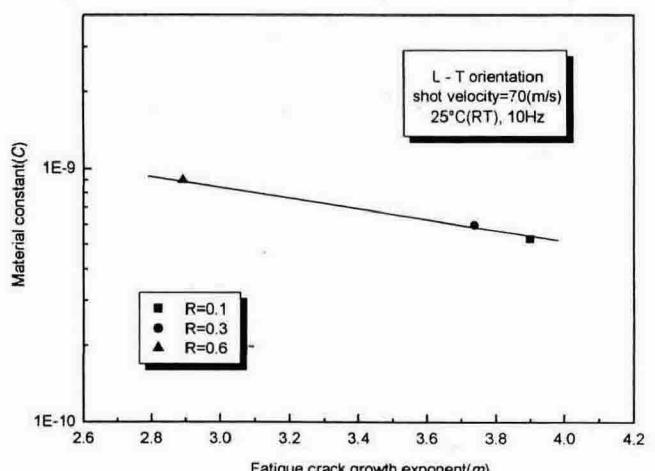


Fig. 6 Correlation between  $C$  and  $m$  in Paris equation

여기서 응력비 증가에 따라 재료상수  $C$ 의 값은 증가하고 균열진전지수  $m$ 값은 감소되어 응력확대계수  $\Delta K$ 는 증가하게 된다.

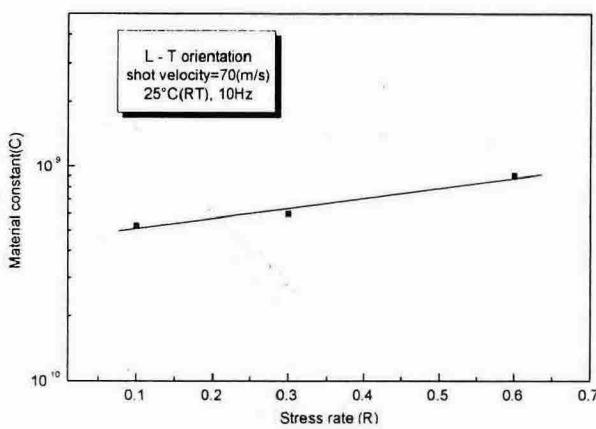


Fig. 7 Relation between material constant C and stress rate R

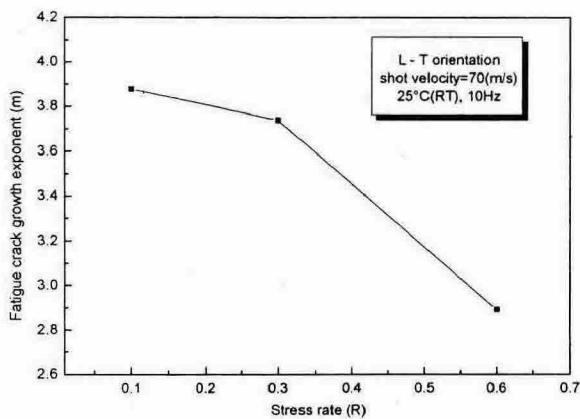


Fig. 8 Relation between fatigue crack growth exponent m and stress rate R

따라서 피로균열진전속도  $da/dN$ 은 가속된다고 판단할 수 있으며 응력비가 큰  $R=0.6$ 에 그현상이 현저하였다. Fig. 7은 재료상수 C와 응력비와의 관계를 도시하였다. 응력비 증가에 따라 C는 근사적인 비례값으로 증가하고 있고,  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ 인 저응력비 구간에서는 C의 값의 변화가 미미하게 관찰되고 있다. Fig. 8은 피로균열진전지수 m과 응력비와의 관계를 도시하였다. m값은 앞서 고찰한 C의 값과는 다른 경향을 보여주고 있다. m값은 응력비 증가에 따라 감소하고 있으나  $R=0.1 \sim R=0.3$ 인 저응력비 구간에서는 완만한 감소 현상을 보여주고 있다. 상기에 고찰한 바와 같이 저응력비 구간인  $R=0.1 \sim R=0.3$ 에서 C값과 m값의 변화는 거의 없으나,  $R=0.3$ 이상의 고응력비구간에서는 C와 m값의 변화를 현저하게 보여주고 있다. 이 현상은 쇼트피닝가공에 의한 압축잔류응력이  $R=0.3$ 이하의 저응력비에서는 피로균열진전거동에 대한 고응력비에서는 압축잔류응력의 구속력이 급속히 감소되는 것으로 판단되었다.

### 3.3 균열길이와 반복횟수와의 관계

Fig. 5는 응력비별 피로균열진전길이와 하중횟수와의 관계를 도시하였다. 각 시험편은 쇼트볼 투사속도를 70m/sec로 하여 동일조건의 쇼트피닝 가공을 실행하였다. 피로균열진전길이 28 mm지점에서 하중횟수는 응력비  $R=0.1$ 일 경우  $N=1,113,410$ 회  $R=0.3$ 일 경우  $N=867,207$ 회,  $R=0.6$ 일 경우  $N=534,144$ 회로써 응력비가 커질수록 피로수명이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이와같이 응력확대계수  $\Delta K$ 가 큰 구간에서는 응력비의 영향을 작게 받아 응력비별 피로수명은 근사하게 유지되고 있으나,  $\Delta K$ 가 작아질수록 응력비의 영향을 크게 받음으로써 응력비별 피로수명은 큰차이를 보여주고 있다.

특히 응력비가  $R=0.1$ 과  $R=0.3$ 이고 응력확대계수  $\Delta K$ 가  $\Delta K=10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이상인 경우 응력비 영향을 적게 받아 동일한 피로수명을 유지하였으며,  $R=0.6$ 과 상당한 피로수명차 이를 보여주고 있다. 따라서 압축잔류응력의 영향은 응력확대계수  $\Delta K$ 가 작고  $R=0.3$ 이하의 저응력비에서 크게 나타나는 것으로 판단되었다.

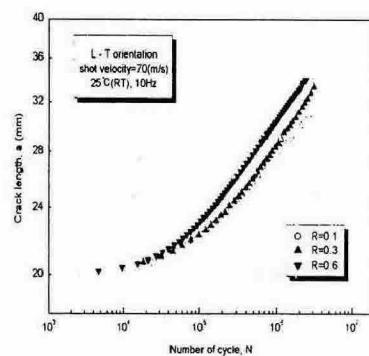
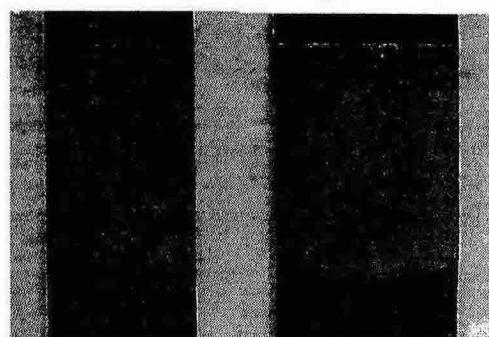


Fig. 9 Relation between crack length and number of cycle

### 3.4 피로균열진전 파면의 양상

쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전기구에 미치는 영향을 관찰하기 위해, 고사이클 반복하중을 받는



Un-peening(RT)      Shot-peening(RT)  
Fig. 10 Photographs of fracture surface

CT시험편의 피로균열파단면을 주사식전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

Fig. 10은 압축잔류응력이 부여되지 않은 언피닝시편의 실험파 단면과 본 실험의 쇼트피닝 가공된 시편에 대한 응력비 실험파 단면을 비교하였다.

Fig 11~12는 균열선단표면부의 30배 확대 전자현미경 사진이다. 언피닝 시편의 파면과 쇼트피닝 시편의 파면양상은 현저한 차이를 보이고 있으며, 이 현상은 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전 과정에서 균열선단 소성영역을 구속하므로 피로균열진전이 지연되는 현상을 관찰 할 수 있다.

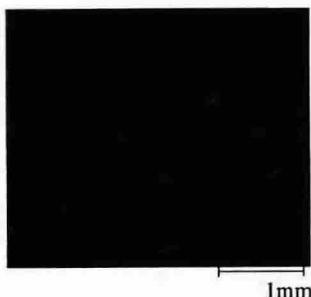


Fig. 11 SEM photographs of un-peening(RT)fracture

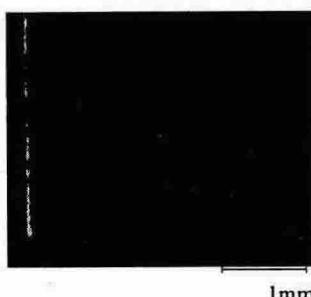


Fig. 12 SEM photographs of shot-peening(RT)fracture

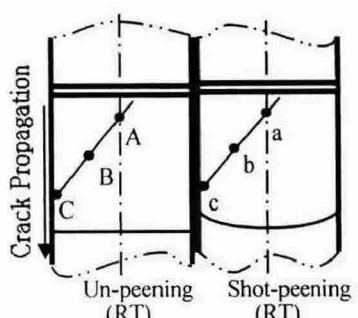


Fig. 13 Picture point of fracture surface

Fig. 13은 파단면을 미시적으로 관찰하기 위한 SEM 사진촬영 지점이고, Photo 5~6은 각 지점의 2000배 확대 사진으로서 각 지점의 파면양상을 미시적으로 관찰한 결과 시편표면부에 형성된 압축잔류응력은 피로균열진전 과정에서 Fig. 14와 같이 균열선단 소성영역 중심부와 표면부의 스트라이에이션 방향형성에 현저한 차이가 있었다.

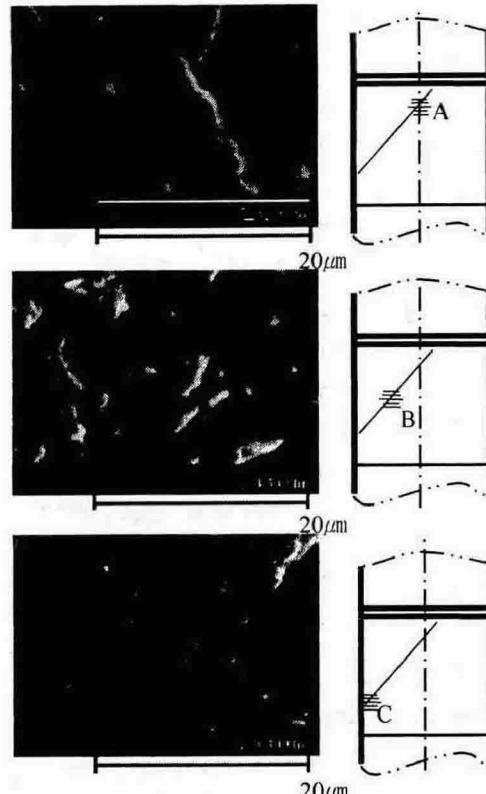


Fig. 14 Striation of fatigue crack propagation by SEM  
(Un-peening, RT)

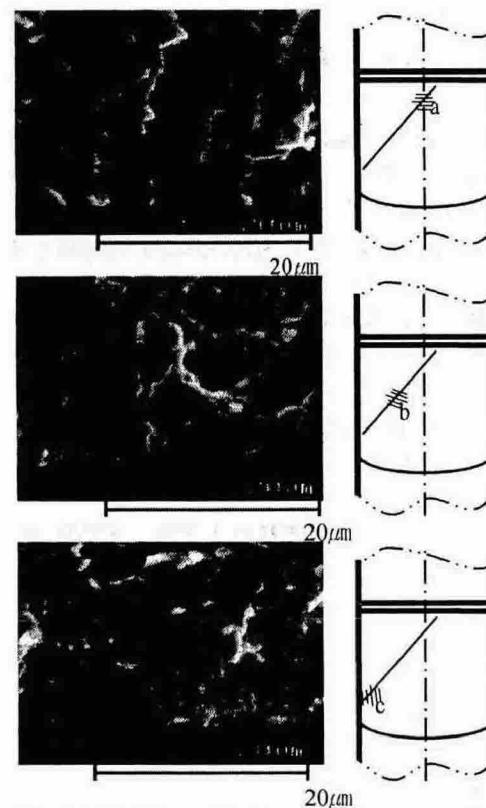


Fig. 15 Striation of fatigue crack propagation by SEM  
(Shot-peening, RT)

#### 4. 결 론

쇼트피닝 가공한 해양구조용강(JISG SUP-9)의 압축잔류응력이 피로균열 진전거동에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 압축잔류응력의 영향은 응력확대계수  $\Delta K$ 가 적고  $R=0.3$  이하의 저응력비에서 크게 나타나는 것으로 판단된다.
- (2) 쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력이  $R=0.3$ 이하의 저응력비에서는 피로균열진전거동에 영향을 주어 피로균열진전에 대한 구속력이 강하게 미치고 있지만,  $R=0.3$ 이상의 고응력비에서는 압축잔류응력의 구속이 급속히 감소된다.
- (3) 피로균열진전 파단면의 양상관찰에서 쇼트피닝가공에 의한 압축잔류응력이 피로균열선단소성영역내의 탄소성변형기구에 작용하여 피로균열진전이 억제된다.
- (4) 동일한 압축잔류응력이 형성된 시험편의 피로균열진전 Stage II에서  $R=0.3$ 이하의 시험응력비는 피로균열진전속도  $da/dN$ 에 영향을 미치지 않았고,  $R=0.3$ 이상의 응력비에서는  $da/dN$ 이 가속되었다.
- (5) 피로균열진전의 거시적인 양상은 하중제어 응력비를  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ ,  $R=0.6$ 으로 하였으며 균열의 성장면은 정상적인 스트라이에이션을 형성하였고, 균열의 성장은 응력의 작용방향에 대하여 수직으로 진행되었다.

#### 참 고 문 헌

- 박경동, 류찬욱 (2002). "스프링강의 저온피로크랙 전파특성에 관한 평가", 대한기계학회 부산지부 추계학술대회, pp 49~56
- 박경동, 박상오 (2002). "SUP9강의 저온피로크랙 전파특성에 관한 연구", 한국해양공학회지 제1권, 제5호, pp 80~87
- 박경동, 손명군 (2002). "쇼트피이닝 가공된 스피링강의 피로균열진전에 미치는 고온의 영향", 대한기계학회 부산지부 추계학술대회, pp 30~34
- 박경동, 정찬기 (2001). "JISG4081 SUP7-DIN50CrV4강의 피로강도에 미치는 쇼트피이닝의 영향", 한국해양공학회 논문집, 제15권, 제4호, pp 66~72
- 이용복, 김호경, 정진성 (1999). "피로해석의 기초", 청문각, pp 99~125.
- 정성균, 이승호 (2001). "쇼트피닝 가공개론", 세화출판사, pp 6~12.
- 정찬기, 박경동 (2002). "압축잔류응력이 스피링강의 고온환경 피로균열 진전거동에 미치는 영향", 한국해양공학회지 제1권, 제5호, pp 73~79
- ASTM (1981). E647-81
- ASTM (1998). E1426.
- Gillespie, R. D. (1993). "Its effect on process consistency and

resultant improvement in fatigue characteristics", Proc. of the 5th international conference on shot peening, Vol 1, oxford, pp 81~90.

Japan mechanic institute standard (1981). "Elastic-plastic deformation J<sub>IC</sub> method of examination", JSME S 001-1981

Kobayasi, H. (1993). "Fracture Mechanics", National publication corporation

Wohlfahrt, H. (1984). "The influence of peening conditions on the resulting distribution of residual stress", Proc. of the 2nd international conference on shot peening, Vol 1, Chicago, pp 316~331.

Gillespie, R. D. (1993). "Its effect on process consistency and resultant improvement in fatigue characteristics", Proc. of the 5th international conference on shot peening, Vol 1, oxford, pp 81~90.