

균열진전에 대한 쇼트피닝 효과

심동석* · 이승호* · 이명호**

*경기공업대학 자동차과

**서울산업대학교 기계공학부

Effect of Shot-peening on Fatigue Crack Growth

DONG-SUK SHIM*, SEUNG-HO LEE** AND MYUNG-HO LEE

*Department of Automobile, Kyonggi Institute of Technology, Siheung Korea

**Department of Mechanical Eng, Seoul National Polytechnic University Siheung, Korea

KEY WORDS: Two-Step Shot-peening 2단쇼트피닝, Compressive Residual Stress 압축잔류응력, Fatigue Crack Growth 피로균열진전, Initial Stress Intensity Factor Range 초기응력확대계수범위, Fracture Toughness 파괴인성

ABSTRACT: In this study, to investigate the effects of shot peening on crack growth behavior, crack growth tests are conducted on spring steels and shot peened cracks. The probabilistic crack growth equation, which can represent the sigmoidal crack growth behavior as recently reported by Kim and Shim, is used to evaluate the experimental results. The results show that fatigue cracks grows slower in the shot peened specimen than in the unpeened one, due to the compressive residual stress occurring on the specimen surface. In the case of the shot peened specimen, the initial stress intensity factor range and the fracture toughness is higher than the non-peened specimen because the compressive residual stress affects crack growth and fracture of the specimen.

1. 서 론

기계 부품의 신뢰성을 향상시키기 위한 방법으로써 산업현장에서 널리 쓰이고 있는 쇼트피닝(shot peening)가공법은 기계 구조물의 경량화 및 고강도화를 이루기 위한 매우 중요한 표면처리법이다.

쇼트피닝의 효과는 주로 표면에 발생하는 압축잔류응력에 기인한다고 보고되고 있다. 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력의 효과에 대한 연구는 S-N 곡선에 대하여 피로수명의 향상 및 피로강도의 증가에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다(이종규와 김종규, 1997; 이승호와 김희송, 1999; Yozo et al., 1996; Natto, et al., 1990; Lyu et al., 1994). 이종규와 김종규(1997)은 피로강도 및 피로수명에 미치는 쇼트피닝의 효과를 검토하고 잔류응력을 고려한 피로수명예측을 행하였다. Yozo et al.(1996)은 고온에서 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로강도를 증가시킴을 실험적으로 증명하였다. 또한, Natto et al.(1990)은 쇼트피닝처리가 탄소강의 피로강도를 증가시킴을 보고하였다.

그런데, 쇼트피닝의 처리는 노치 등의 응력집중부위가 있는 구조물에 행하는 경우가 많다. 이러한 경우에는 균열의 진전에 대한 평가가 중요하다. 박경동과 노영석(2003), Tange and Takamura(1990) 및 Nelson (1982)은 쇼트피닝의 압축잔류응력과 피로 크랙진전과의 관계를 연구한 결과 피로 균열 진전 수

명에 있어서 표면에 형성된 잔류응력은 매우 중요한 인자이며 최대 잔류응력이 표면에 가까울수록 피로수명이 증가함을 연구하였다. 그러나 이들의 연구는 균열진전에 대한 쇼트피닝의 효과를 압축잔류응력에 연관하여 피로수명의 향상에 기여하는 것으로 설명할 뿐 균열진전의 전체 과정에 대한 쇼트피닝의 효과를 설명하지는 못하고 있다.

한편, 저자는 이전의 연구(이승호와 김희송 1999)에서 균열진전에 미치는 쇼트피닝의 효과에 대하여 정성적인 평가를 행하였다. 이는 주로 파면의 분석을 통하여 이루어졌다. 이의 결과 쇼트피닝처리로 시험편의 표면에 형성된 압축잔류응력이 균열의 진전을 구속함을 보고하였다.

본 연구는 이전의 연구를 심화시켜 균열진전식을 이용하여 균열진전과정에 대한 쇼트피닝의 효과를 평가하였다. 균열진전식으로는 균열진전의 초기뿐만 아니라 파손영역까지 평가할 수 있고 재료의 신뢰성을 평가할 수 있는 확률론적 균열진전식(Kim and shim 2000)을 사용하였다. 그리고 확률론적 균열진전식의 상수 값들을 비교하여 쇼트피닝의 효과를 설명하였다.

2. 이론해석

재료의 피로균열진전거동은 균열진전속도 da/dN (mm/cycles)와 응력확대계수범위 ΔK ($MPa\sqrt{m}$)의 관계로 표현되고 있다. Paris and Erdogan(1960)은 처음으로 이의 관계를 수식으로 나타내었다. 그들은 균열진전의 지배적인 영역인 da/dN - ΔK 그래프의 선형적인 부분에 대하여 다음과 같은 실험식을 보고하였다.

제1저자 심동석 연락처: 경기도 시흥시 정왕동 2121-3

031-496-4772 dssim@kinst.ac.kr

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

여기서 C 와 m 은 실험에 의하여 얻어지는 재료상수이다. 이 식은 간편하여 피로균열진전을 평가하는 식으로 많이 사용되어 오고 있다.

그러나 피로균열진전과정은 선형적이기보다는 완만한 S자형태의 비선형성을 나타내고 있다. 따라서 이러한 비선형적인 거동을 정확히 표현하려는 시도가 지속적으로 이루어져 왔다. 최근에 Kim and Shim(2000)은 균열진전의 전 과정을 묘사할 수 있는 새로운 균열진전식을 보고하였다. 이들이 보고한 식은 균열진전의 발생영역 뿐 만 아니라 정적인 파손영역까지를 평가할 수 있는 식으로 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = Z \frac{C(\Delta K - K_o)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (2)$$

여기서 K_c 는 파괴인성이고 K_o 는 응력확대계수범위의 초기 값으로 $\Delta K = K_o$ 에서 $da/dN \approx 0$ 이다. 그리고 C 와 m 은 재료상수이다. 이 식에서 Z 는 랜덤변수로 균열진전의 변동성을 나타내며 균열길이 및 응력상태에 관계없는 변수이다.

식 (2)의 상수 K_c , K_o , C 와 m 은 다음과 같이 얻어진다. 먼저 식 (2)의 양변에 대수를 취하고 Z 에 대하여 정리한 후에 각각의 실험결과에 대한 값으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \log Z_i &= \log \left[\{ (1-R)K_c - \Delta K_i \} \left(\frac{da}{dN} \right)_i \right] \\ &\quad - \log C - m \log (\Delta K_i - K_o) \\ (i &= 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 $\log Z_i$ 는 잔류치이다. 따라서 이 값들은 평균이 0 이고 정규분포를 따른다고 가정할 수 있다. 그리고 식 (2)의 균열진전식이 실험결과를 정확히 나타내기 위해서는 $\log Z_i$ 의 분산이 최소의 값을 가져야 한다. 이러한 제한조건을 이용하여 최적화 기법을 사용하면 식 (2)의 재료상수 값을 구할 수 있다.

3. 시험방법

3.1 재료 및 시험편

사용된 재료는 기계요소부품의 소재로 사용되고 있는 스프링강(SPS5A)을 열처리한 것으로 이의 화학적 성분은 Table 1 과 같다. 열처리조건은 880°C에서 30분간 가열후 유중에서 퀸칭(quenching)하고 500°C로 70분간 템퍼링(tempering)하였다. Table 2는 스프링강의 열처리 전, 후의 기계적 성질이다.

피로균열진전시험에 사용된 시험편은 폭 50.8 mm의 CT형 표준시험편으로 이의 형상은 Fig. 1과 같다. 시험편의 채취방향

은 압연방향과 부하방향이 평행하고 균열의 진전방향이 이에 수직인 L-T방향이다. 사용된 시험편은 모두 열처리하였으며, 열처리 후 2단 쇼트피닝 가공하였다.

Table 1 Chemical composition of SPS5A (wt%)

Material	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 SPS5A

	Yield strength	Tensile strength	Fracture strength	Elongation	Hardness
Raw material	720 MPa	920 MPa	740 MPa	18.5 %	HV280
Heat treatment	820 MPa	1230 MPa	900 MPa	15.1 %	HV350

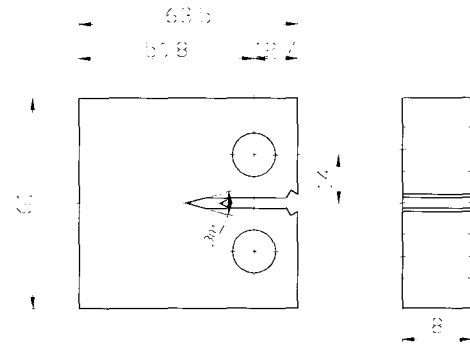


Fig. 1 Specimen configuration

3.2 쇼트피닝 가공 및 잔류응력 측정

쇼트피닝 가공은 임펠러의 원심력을 이용하는 기계식 쇼트피닝기를 이용하였다. 지름 0.6 mm 쇼트볼을 투사하여 1차 가공을 한 후, 지름 0.4 mm의 쇼트볼로 투사하여 2단으로 처리하였다. 가공 조건은 Table 3과 같다. 이렇게 2단계의 가공을 행하는 것은 재료의 표면에 더 큰 압축 잔류응력을 발생하게 하기 위해서이다. 쇼트피닝의 가공량을 측정하는 아크하이트(arc height)는 알멘게이지로 측정하였다. 사용된 알멘스트립은 A형이며 1단에서 0.375 mm의 아크하이트를 얻었으며, 2단에서는 0.42 mm의 아크하이트를 얻었다. 또한 커버리지는 1단에서는 90 %, 2단에서는 98 %로 나타났다.

시험편의 잔류응력 분포는 측정오차 ±0.03%인 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKU -MSF-2M)를 사용하여 Table 4와 같이 압축잔류응력을 측정하였으며, 이때 계산법은 2θ·sin2ψ법을 이용하였다. 잔류응력측정은 먼저 측정하고자하는 부위의 두께를 측정하고, 두께가 측정된 부위에서 표면층의 잔류응력을 측정 한 후, 전해연마를 실시하며 반복하여 시험편의 표면부에서 중심부로 0.25 mm까지 측정하였다.

Table 3 Conditions of shot peening

Content	1-step peening	2step peening
Shot ball diameter	0.6 mm	0.4 mm
Impeller velocity	3,100 rpm	3,100 rpm
Impeller diameter	360 mm	360 mm
Time	8 min	6 min
Coverage	90 %	98 %
Arc height (Almen A strip)	0.375 mm	0.42 mm

Table 4 Measuring condition of residual stress

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

3.3 시험방법

피로균열진전 시험은 ASTM E647(1997)에 의거하여 상온의 대기중에서 100 kN용 유압서보식 시험기를 이용하여 일정진폭 하중하의 피로시험을 행하였다. 사용된 하중파형은 정현파로 극대하중이 4.5 kN이고 응력비 R 이 0이다. 실험주파수는 10 Hz로 하였고 균열길이의 측정은 컴플라이언스법(compliance method)을 이용하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 압축잔류응력의 분포

Fig. 2는 시험편의 표면에서 중심방향으로 0.25mm 영역까지 측정된 잔류응력의 분포이다. 그림에서 보는바와 같이 시험편의 표면에서 0.25mm까지 측정된 결과, 최대 압축잔류응력은 1단과 2단 시험편에서 깊이 0.07mm에서 최대값 543.3MPa로 측정되었다. 그러나 시험편 표면에서의 압축잔류응력은 1단에서는 466.8MPa, 2단에서는 519.7MPa로 약 52.95MPa 개선됨을 알 수 있다.

Tange and Takamura (1990)은 극 표면에 압축잔류응력의 값이 증가할수록 재료의 피로강도가 증가됨을 보고하고 있다. 이의 연구에 의하면 재료의 피로수명은 균열이 표면에서 압축 잔류응력이 최대가 되는 위치까지 전파하는 동안에 대부분을 차지하므로 극표면의 압축잔류응력이 클수록 피로수명의 향상은 크다.

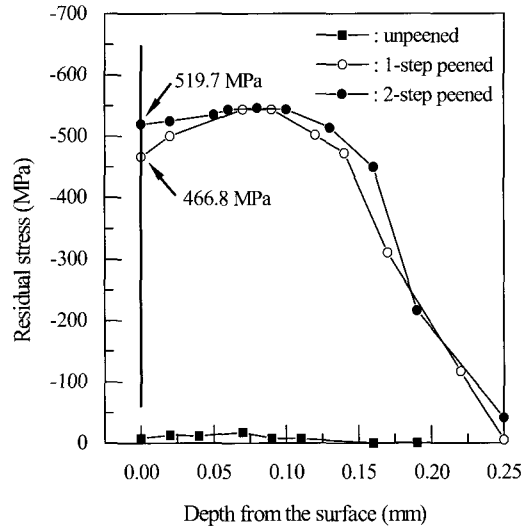


Fig. 2 Compressive residual stress distribution in HV350 specimen

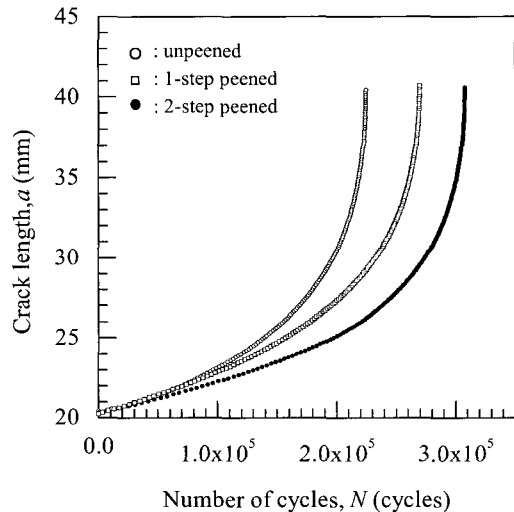
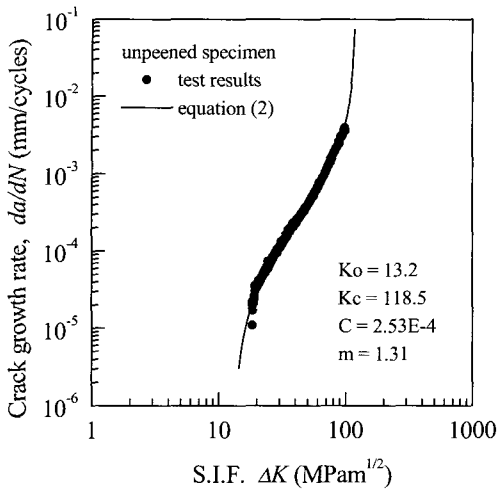


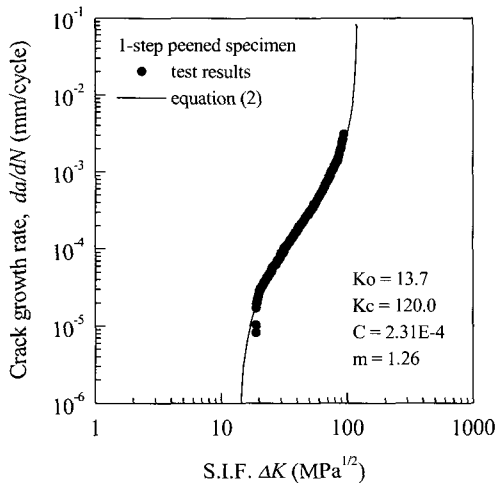
Fig. 3 a-N curves of spring steel

4.2 피로균열진전 거동

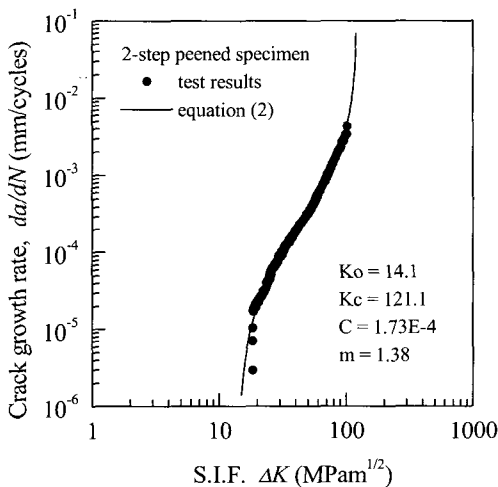
Fig. 3은 최대하중 4.5 kN 하에서 균열길이 a 와 하중 반복 수 N 의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 \circ 는 쇼트피닝처리를 하지 않은 재료의 결과이고 \square 는 직경 0.6mm의 강구로 1단계 쇼트피닝처리를 한 재료의 결과이며 \bullet 는 0.6mm 강구로 1차 가공을 한 후 0.4mm의 강구로 2차 쇼트피닝처리를 한 재료의 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 쇼트피닝한 시험편에서 균열진전수명이 증가함을 알 수 있다. 균열진전수명의 증가는 1단계 쇼트피닝처리를 한 시험편 보다는 2단계 쇼트피닝처리를 한 시험편에서 현저하다. 이는 Glinka(1979)와 Frost et al. (1974)에 의하여 보고된 바와 같이 쇼트피닝에 의하여 시험편의 표면에 형성된 압축잔류응력이 피로균열의 진전에 영향을 미쳐 피로수명을 향상시켰기 때문이다.



(a) Unpeened specimen



(b) 1-step Shot-peened specimen



(c) 2-step Shot-peened specimen

Fig. 4 da/dN-ΔK curves of spring steel

Table 6 Characteristic values of crack growth equation (2)

	Residual stress (MPa)	K_o MPa√m	K_c MPa√m	C	m
Raw material	0	13.2	118.5	2.53×10^4	1.31
1-step	466.8	13.7	120.0	2.31×10^4	1.26
2-step	519.7	14.1	121.1	1.73×10^4	1.38

4.2 피로균열진전 특성

균열진전의 특성은 일반적으로 균열진전속도 da/dN 와 응력확대계수범위 ΔK 의 관계로 평가되어 진다. Fig. 4(a), (b), (c)는 Fig. 3의 실험결과를 da/dN - ΔK 그래프의 형태로 나타낸 것이다. 그림에서 각 점들은 실험결과를 나타내고 있으며 실선은 식 (2)에 의하여 평가된 결과를 나타낸 것이다. 또한 Table 6은 Fig. 4의 결과를 종합하여 나타낸 것이다.

균열진전 거동은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 완만한 S자 형태의 비선형성을 이루고 있으며 이는 식 (2)에 의하여 묘사될 수 있음을 보이고 있다. 따라서 피로균열진전에 대한 쇼트피닝 효과는 식(2)의 상수 값을 비교함으로써 정량적으로 평가 할 수 있다.

먼저 균열의 진전이 시작되는 K_o 의 값에 대하여는 1단 쇼트피닝처리를 한 시험편이 $0.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (약 4%), 2단 쇼트피닝 처리 한 시험편이 $0.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (약 7%)높은 값을 나타내고 있다. 이는 시험편에 발생한 압축잔류응력이 균열의 열림을 억제하기 때문으로 생각된다. Hammand and Meguid(1990)는 쇼트피닝의 잔류응력에 따른 균열진전에 대한 연구에서 압축잔류응력으로 인하여 표면부의 미시균열의 진전이 억제된다고 보고하였다.

재료의 파괴인성을 나타내는 K_c 값도 쇼트피닝처리를 한 시험편에서 높게 나타나고 있으나 이 값의 차이는 2% 정도이다. 이는 정적인 파손 영역에서는 쇼트피닝의 효과가 적음을 의미한다. 재료의 정적인 파손은 시험편 내부의 균열진전력에 의하여 지배적인 영향을 받으므로 시험편의 표면에 발생한 압축잔류응력의 영향을 크게 받지 않는다. 따라서 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력은 균열진전의 초기에 많은 영향을 미치는 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 기계요소부품의 신뢰성향상을 위한 방법으로 제시되고 있는 쇼트피닝 효과를 평가하기 위하여 스프링강의 시험편에 균열진전실험을 행하고 이의 결과를 확률론적 균열진전식으로 평가하였다. 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 쇼트피닝은 시험편의 표면에 더 큰 압축잔류응력을 발생시

켜 피로수명에 영향을 미친다. 압축잔류응력은 균열의 진전을 구속하여 진전속도를 저하시킨다.

(2) 스프링강에서의 피로균열진전 거동은 완만한 S자 형태의 비선형성을 나타내고 있으며 이는 확률론적 균열진전식으로 묘사될 수 있다. 이 식을 이용하면 기계요소의 신뢰성을 평가할 수 있다.

(3) 시험편의 표면에 발생한 압축 잔류응력은 초기 응력확대계수범위 K_0 및 파괴인성 K_c 를 증가시켰다.

(4) 쇼트피닝한 시험편에서 초기 응력확대계수범위 K_0 의 증가비율이 큰 것은 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 균열진전의 초기에 영향을 미치기 때문이다.

후 기

본 연구는 2004 경기공업대학 재정지원사업의 일부 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

박경동, 노영석 (2003). "해양구조용강의 피로크랙진전특성에 미치는 쇼트피닝 투사속도의 영향," 한국해양공학회지, 제 17권, 제 2호, pp 47~53.

이승호, 김희송 (1999). "스프링강의 피로거동에 미치는 2단 쇼트피닝의 효과," 대한기계학회논문집 A권, 제 23권, 제 1호, pp 140~147.

이종규, 김정규 (1997). "피로강도 및 수명에 미치는 Shot Peening에 의한 잔류응력의 영향," 대한기계학회논문집 A권, 제 21권, 제9호, pp 1498~1506.

ASTM E647 (1997). "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," Annual Book of ASTM Standard.

Frost, N.E. and Marsh, K.J., Pook, L.P. (1974). Metal Fatigue, Clarendon Press, Oxford, 1974.

Glinka, G. (1979). "Effect of 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

Hammond, D.W. and Meguid, S.A. (1990). "Crack Propagation in the Presence of Shot-peening Residual Stresses," Engineering Fracture Mechanics, Vol 37, No 2, pp 373~387.

Kim, J.K. and Shim, D.S. (2000). "The Variation in Fatigue Crack Growth due to the Thickness Effect," International Journal of Fatigue, Vol 22, pp 611~618, 2000.

Lyu, S. K., Inoue, K. and Kato, M. (1994). "Effect of Surface Treatment on the Strength of Carburized Gear," Proc. International Gearing Conference, London, pp 183~188.

Natto, K., Ochi, T., Takahashi, T. and Suzuki, T. (1990). "Effect of Shot Peening on the Fatigue Strength of Carburized Steels," Proc. The 4th International Conference on Shot Peening, Tokyo, pp 519~526.

Nelson, D.V. (1982). "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation," Residual Stress Effect in Fatigue, ASTM STP 776, American Society for Testing and Materials, pp 172~194.

Paris, P.C. and Erdogan, F. (1960). "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws.," Journal of Basic Engineering, Vol 85, pp 528~534, 1960.

Tange, A. and Takamura, N. (1990). "Relation between Shot-peening Residual Stress Distribution and Fatigue Crack Propagation life in Spring steel", Proc. The 4th International Conference on Shot Peening, Tokyo, pp 243~253.

Yozo, K., Shinzaburo, T. and Masaki, K. (1996). "Effect of Shot Peening on Fatigue Strength of Ti-6Al-4V Alloy at Elevated Temperatures," Journal of The Society of Materials Science in Japanese, Vol 45, No 1, pp 43~47.

2004년 10월 14일 원고 접수

2004년 12월 13일 최종 수정본 채택