

장기간 사용한 Cr-Mo강의 피로강도향상 방법에 관한 연구

진 영 준

충주대학교 기계설계학과
(2001. 4. 3. 접수 / 2001. 6. 25. 채택)

A Study of Fatigue Strength Improvement for Cr-Mo Steel in Long Term service

Yeung-Jun Jin

Department of Mechanical Design, Chungju National University
(Received April 3, 2001 / Accepted June 25, 2001)

Abstract : For the purpose of healing the degradation part, CO₂ laser beam was irradiated with different irradiation condition(power, diameter, velocity and beam type) to find out optimum irradiation condition. The test series of hardness, residual stress measurement, and fatigue were carried out after the irradiation. Experimental results show that micro-hardness values on the surface of the irradiated specimens were approximately 2.5 times higher than those of un-irradiated ones. Fatigue tests show that the fatigue life was improved by the compressive residual stress after laser beam irradiation. However, some specimens with different conditions show the shorter fatigue life. It means that laser beam irradiation with optimum irradiation condition and optimum absorb energy, Q can improve the fatigue strength.

Key Words : degradation, irradiation, residual stress, stress intensity factor range

1. 서 론

산업 발전과 더불어 1960년대 초반에 원자력 발전 설비, 고온, 고압 용기 등과 같은 기계·구조물들이 건설되기 시작하면서 1970년대에 이르러서는 급격히 그 수가 증가되었다.

특히 누적 운전 시간으로 볼 때에는 사용 기간이 길어짐에 따라 수명상의 문제가 제기되고 있으며, 이에 따라 검사, 보수, 교환, 사용 정지, 운전 조건의 제한, 재건설, 안전성 및 신뢰성의 검토 등, 기존 기계·구조물들을 좀더 지속적이고 좀더 안전하게, 그리고 효율 좋게 사용하려는 요구가 커져 가고 있다.

이와 같은 관점에서 기계·구조물의 수명 예측 및 건전성 평가는 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 그러나 각종 기계·구조물의 수명을 지배하는 인자는 매우 많지만 재료의 사용 조건, 사용 이력 등 시간과 더불어 재료의 강도 특성이 변화하는 현상, 즉 열화(Degradation)^{1,2)}의 영향을 기계·구조물

의 수명 예측 또는 건전성 평가에 도입하는 것은 대단히 중요한 의미를 갖는다.

열화는 장기간 사용에 따라 품질, 성능, 강도 등이 저하하는 현상으로 기계구조물의 수명예측, 또는 건전성 평가를 위해서는 매우 중요하다고 생각된다. 현재 재료강도학적 검토 대상이 되는 열화의 종류는 재질열화(Material degradation), 부식에 의한 열화(Corrosion degradation), 파괴 파손의 도중단계 등으로 나눌수 있다. 재질열화는 내부까지 재료의 변화를 동반하는 현상이며, 부식에 의한 열화는 주로 외부 표면 등과 같은 경계면의 열화현상으로 나타나며, 파괴 파손 도중단계는 피로, 부식용력, 크리프 등과 같은 현상을 들수 있다.

기계·구조물 열화의 가장 큰 원인은 재질 열화로 나타난다. 재질 열화를 발생시키는 요인은 오랜 사용 시간, 고온 환경, 부하 조건, 부식 환경 등이며, 대개의 경우는 복합적으로 작용하여 열화를 진행시킨다.

재질 열화의 현상적 특징들은 McLean, McMahon^{3,4)} 등 여러 학자들에 의해 오랜 연구로부터 광범위하

게 지적되어 오고 있다.

아울러 이러한 열화 현상이 발생한 기계 및 구조물의 수명을 연장시키기 위한 노력의 일환으로 산업체의 각 분야에서는 신소재 및 신기술의 개발에 지대한 관심을 기울이고 있다. 특히, 신기술인 산업용 레이저는 고밀도의 에너지를 이용하여 용접, 절단 및 초정밀 가공 등의 재료 가공 분야에 주로 이용되고 있지만, 최근에는 레이저 빔을 재료 강도 향상에 응용하는 방법^{5,6)}이 주목을 받고 있다.

아울러 본 연구에서는 고온, 고압의 압력용기에 사용되는 Cr-Mo강의 장기적으로 사용된 열화재를 사용하여 레이저 빔 조사시의 레이저 출력, 조사속도 및 조사 빔의 직경을 변수로 한 조사 밀도를 변화시켜가면서 다수의 피로시험편을 제작하여 피로 균열의 발생 및 진전특성에 미치는 레이저 빔 조사의 영향과 레이저 빔 조사에 의해서 피로 강도 개선 가능성을 검토해 보고자 한다.

2. 실험용 재료 및 시험편

2.1. 실험용 재료

레이저 빔 조사에 의한 열화재(Degraded material)의 강도개선을 검토하기 위해 사용된 실험용 재료는 430℃에서 장기간 사용된 2¼Cr-1Mo강 열화재를 사용하였으며, 동 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1과 2에 각각 나타내었다. 본 실험에 사용된 시험편 형상은 ASTM E647⁷⁾에 명시된 중앙관통균열(Middle Tension, MT)을 가진 시험편을 이용하였으며, 먼저 외형 가공한 후 시험편 중앙의 노치는 드릴을 이용하여 0.2mm 구멍을 가공한 다음에 방전 가공기로 인공노치의 길이 $2a=6.6mm$, 곡률반경 $\rho=0.2mm$ 로 일정하게 가공하였다.

Table 1. Chemical compositions of Cr-Mo steel

C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Cu	Mo	As
.16	.29	.55	.014	.17	2.40	.20	1.04	.30

Table 2. Mechanical properties of Cr-Mo steel

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Degraded	416	599	26.6	65.4
Recovered	400	581	29.8	69.8

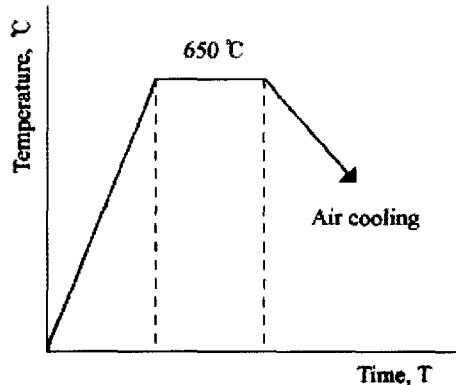


Fig. 1. Recovering method for degradation material

이렇게 가공한 후 레이저 빔을 조사한 시험편의 균열진전 거동을 정확하게 측정하기 위해서 시험편의 표면에 에머리 페이퍼(Emery paper)를 #600~#1500까지 연마한 후 산화 알루미늄으로 경면 연마하여 피로 균열진전 시험을 수행하였다. 또한 열화된 재료의 강도를 비교하기 위해서는 Fig. 1과 같은 방법으로 열화재를 650℃에서 1시간 가열한 후 냉각시킨 재료를 회복재(Recovered material)로 사용하였다.

2.2. 레이저 빔 조사방법

일반적으로 레이저 빔 조사시 금속인 경우 표면으로 부터 빛 반사의 영향으로 흡수율이 떨어지는 경향이 있다. 이를 방지하기 위해서 시험 표면에 레이저 빔을 흡수시키는 흡수재를 코팅시켜서 흡수량을 증가시키고 있다.

본 연구에 사용한 레이저는 출력 5KW의 CO₂ 레이저(Model No. HGL 8950)를 사용하였으며, 일반적으로 흡수재로서는 흑연 분말, 흑색 페인트, 인산염(Phosphate) 등이 널리 사용되고 있다. 본 실험에서

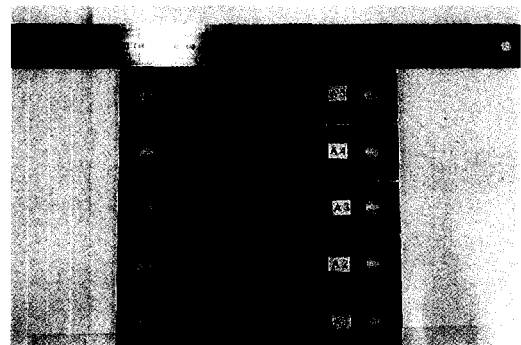


Fig. 2. Shapes of specimen after laser beam irradiation

는 시험편 T-1, 2, 3 및 8, 9, 10 11, 12, 13, 15에 대해서는 레이저 빔 조사시 흡수재로 흑색 페인트를 사용하였다. 그리고 시험편 T-4, 5, 6, 7 및 14의 5개에 대해서는 레이저 빔 조사시 흡수재로 인산염을 사용하여 코팅처리 한 후 각 시험편에 레이저 빔을 조사하였다. Fig. 2에서는 레이저 빔 조사후의 피로시험편의 형상을 나타내고 있다.

아울러, 시편에 흡수되는 에너지는 레이저 빔의 조사속도(Velocity), 레이저 빔 조사 출력(Power), 빔의 직경(Diameter), 레이저 빔 형상(Type)에 따라 변화됨으로 정확한 피로수명연장의 파라메타(Parameter)를 찾기 위해서 각종 파라메타를 변화시켜가면서 레이저 빔 조사를 실시하였다. Table 3은 시험편에 레이저 빔을 조사한 조건을 나타낸 것으로 동 표에서 나타난 바와 같이 시험편 T-1, 2 및 3은 조사속도, 레이저 빔 직경, 형상 등은 유사하게 하여, 시험편의 전·후면에 대해 조사하였다.

시험편 T-4에서 7번까지 레이저 빔의 직경, 형상 및 조사속도를 동일하게 하고, 레이저 빔의 출력은 시험편 T-4, 5, T-6, 7 및 T-8, 9을 각각 동일하게 유지하면서 조사하였다. T-14번은 시험편의 전면만 조

사하였다.

그리고 시험편 T-15의 경우는 레이저 빔 조사가 균열발생 된 부분에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 먼저 열화재를 피로시험하여 균열길이(Crack length, Δa)를 약 3mm 정도 발생시킨 후에 레이저 빔 조사를 하였으며, 피로시험을 통하여 균열진전 속도를 열화재와 비교하여 보았다.

3. 레이저 빔 조사재의 재질특성변화

3.1. 레이저 빔 조사부의 조직관찰

모재(Base material)인 열화재와 회복재 및 레이저 빔이 조사된 시험편의 금속조직의 변화를 관찰하기 위하여 3종류의 재료에 대해 시료를 채취하여 마운팅작업후 폴리싱을 하고, 5%의 나이탈(Nital)용액에서 20초간 에칭을 실시하였다.

Fig. 3에서는 본 실험에 사용한 Cr-Mo강의 열화재, 회복재 및 레이저 빔 조사재 (시험편 T-6)의 조직사진을 나타낸 것이다. 열화재와 회복재는 베이나이트(Bainite) 및 페라이트(Ferrite)의 형상을 나타내고 있으며, 레이저 빔이 조사된 경화층에서는 마르

Table 3. Information of laser beam irradiation parameter in Cr-Mo specimen (F:Front surface, B:Back surface)

Specimen	Irradiated parameter			Laser beam type	Energy density (W · sec/mm ²)	Note
	Power (W)	Velocity (mm/sec)	Diameter (mm)			
T-1	1391~1340	27	5.5	square	1.67	F,B
T-2	1392~1400	27	5.5	square	1.70	F,B
T-3	1395~1396	27	5.5	square	1.70	F,B
T-4	900~910	9.2	6(4)	oval	5.22	F,B
T-5	900~910	9.2	6(4)	oval	5.22	F,B
T-6	910~930	9.2	6(4)	oval	5.30	F,B
T-7	910~930	9.2	6(4)	oval	5.30	F,B
T-8	1800	18.18	6.6(5.8)	oval	3.29	F,B
T-9	1800	18.18	6.6(5.8)	oval	3.29	F,B
T-10	1200	14.32	6.9(5.9)	oval	2.62	F,B
T-11	750	7.5	7.1(4.9)	oval	3.66	F,B
T-12	800	9.5	6.8(5.2)	oval	3.03	F,B
T-13	815	9.5	7.2(5.4)	oval	2.81	F,B
T-14	971~1025	5.5	6	square	2.52	F
T-15	1210	11.5	5(4.72)	oval	5.67	F,B

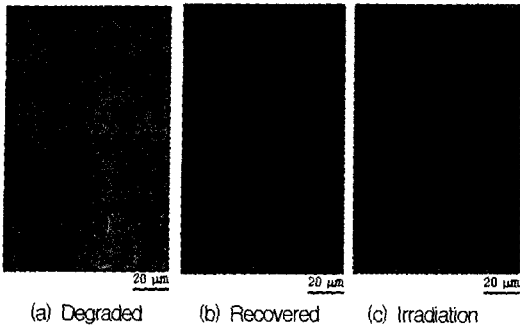


Fig. 3. Optical micrographs of degraded, recovered and CO₂ laser beam irradiated Cr-Mo steel

텐사이트(Martensite) 조직이 주종을 이루고 있으나, 열영향(Heat affect)을 받지 않은 부분에서는 모재의 조직을 유지함을 알 수 있었다.

3.2. 레이저 빔 조사부의 경도측정

레이저 빔의 출력, 조사속도 및 직경을 달리하여 조사된 시험편의 경화깊이 및 경도치를 비교하기 위하여 비커스 경도(Vicker's hardness)시험을 수행하였다. 실험조건은 부하하중 500g, 하중시간 15 sec, 하중속도 50 μm/sec로 일정하게 각 시험편에 대하여 실험을 수행하였다.

Fig 4는 레이저 빔이 조사된 표면의 X=10mm 지점에서 0.5mm간격으로 Y방향에 따라 경도시험을 행하여 각 위치의 값을 평균한 결과를 플롯팅한 것이며, Fig 5는 레이저 빔 조사 후 시험편 표면에서 두께방향(Z 방향)으로 0.2mm씩 등간격 측정된 경도 분포를 평균하여 나타낸 것이다. 모재의 경도치는 220Hv정도이며 레이저 빔 조사 조건에 따라 경도치

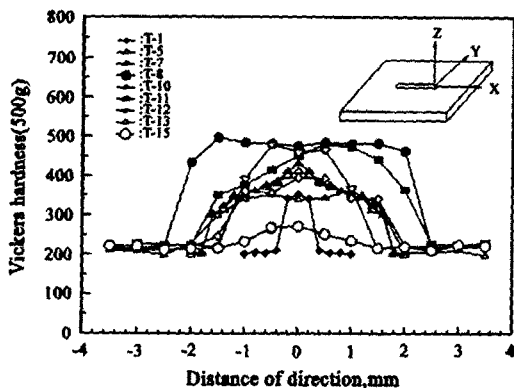


Fig. 4. Vicker's hardness distribution of laser beam irradiated Cr-Mo(y direction)

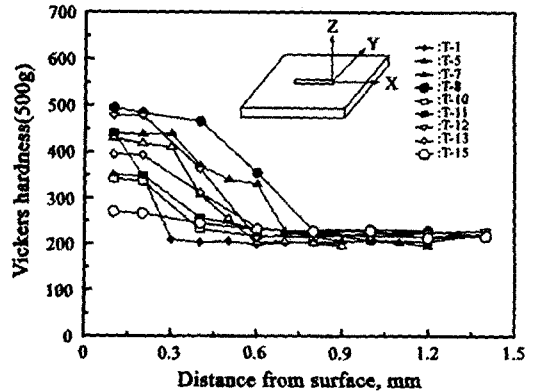


Fig. 5. Vicker's hardness distribution of laser beam irradiated Cr-Mo(z direction)

는 최대 450-500 Hv로 약 2.5배 증가됨을 볼 수 있다.

Fig. 4 및 5로부터 경화폭(Hardening width)과 경화깊이(Hardening depth)가 큰 것은 레이저 빔 조사재 T-8로써 경화 깊이는 약 0.7mm 경화폭은 약 4.5 mm정도인 반면에 레이저 빔 조사재 T-1과 T-15에서는 경화폭은 약 0.4mm, 2 mm이고, 경화깊이는 약 0.2 mm, 0.4mm으로서 경화층이 가장 작게 나타났다. 이 결과 레이저 빔의 출력, 속도 및 직경에 따라 측정된 경도 분포가 다르게 형성됨을 나타내고 있다.

3.3. 레이저 빔 조사부위의 잔류응력 측정

고온의 레이저 빔을 시험편에 조사하게 되면 금속 조직의 변화에 따른 잔류응력(Residual stress) 거동을 관찰하기 위하여 X선회절 장치(X-ray diffractometer, Model No MSF-2M, 용량 0.3KW)를 이용하여 잔류응력 측정을 해보았다. 잔류응력 측정은 열화재, T-8, T-10, T-11, T-12 및 T-13의 시험편을 사용하여 노치선단에서 X방향으로 2, 5 및 9.5mm의 세 지점에 대해 측정하여 보았다. 측정 방법은 Glocker 법[8]에 의해 회절각 (Diffraction angle, θ)를 0, 15, 30 및 45°로 변화시켜가면서 측정된 일예를 Fig. 6에 나타내고 있다.

측정된 회절선의 최대 피크를 결정하는 데에 반가폭 중점법(半價幅 中點法)과 포물선 근사법(拋物線 近似法)이 사용되고 있지만, 본 실험에서는 회절선 강도곡선의 절반 높이에서 백그라운드에 평행하게 선을 긋고 이 선의 중심(즉 회절각 2θ 의 1/2)을 최대의 피크 위치로 결정하는 반가폭중점법을 이용하였으며, 이렇게 측정된 결과를 Fig. 7에 플롯팅하여 레이저 빔 조사에 의한 잔류응력의 변화를

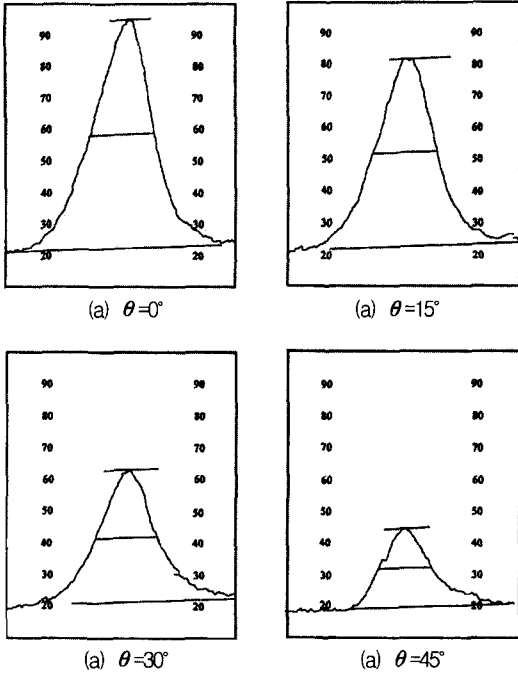


Fig. 6. The energy distribution of irradiated laser beam with the different incident angle on the specimens

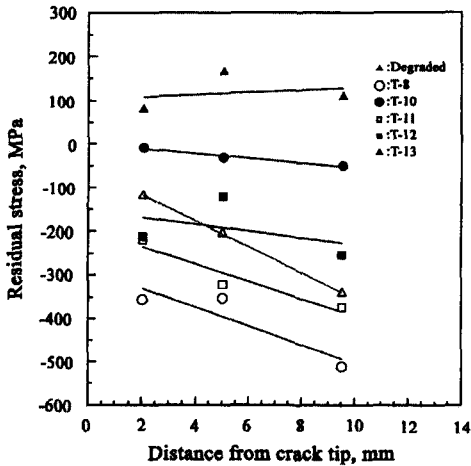


Fig. 7. Residual stress distribution on the crack tip of the degraded material and the laser beam irradiated specimen

관찰하여 보았다.

경도치가 높을수록 많은 압축잔류응력(Compressive residual stress)이 발생하는 것을 알 수가 있었으며 이는 피로시험에서 균열이 진전할 때 진전속도를 지연시키는 효과를 가지게 되며, 이로 인하여 피로 수명이 연장 될 것으로 예측된다. 특히 모재인 열화

재의 경우에는 인장잔류응력(Tensile residual stress)이 존재하는 것으로 나타났는데 이는 시험편 가공 시에 발생된 응력이라고 추정된다.

4 레이저 빔 조사시의 최대경도 분포곡선 제안

4.1. 레이저 빔의 에너지 밀도

일반적으로 레이저 빔 조사시의 파라메타(Parameter)로는 여러 종류가 있지만, 본 연구에서는 레이저 빔의 조사속도(Velocity), 출력(Power) 및 지름(Diameter)을 주된 파라메타로 하여 레이저 빔 조사시의 시험편에 흡수되는 에너지 밀도(Energy density, Q)와 최대 경도 분포영역을 추정하여 보았다.

따라서 본 연구에서는 레이저 빔 조사시의 에너지 밀도 Q를 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$Q = \frac{P}{V \cdot A} \quad (W \cdot \text{sec}/\text{mm}^3) \quad (1)$$

여기서 P는 레이저의 출력(W)이며, V는 조사 속도(mm/sec) 그리고 A는 빔의 단면적을 각각 나타내며, 각 시험편의 레이저 빔 조사시의 에너지 밀도 Q를 Table 3에 나타내었다.

4.2. 에너지 밀도와 경도치와의 관계

본 연구에 사용된 2¼Cr-1Mo강 열화재의 최적 레이저 빔 조사조건을 추정하기 위하여 레이저 빔의 에너지 밀도 Q와 경화 깊이(Hardening depth)와의 관계를 규명하기 위하여 이들 관계를 Fig. 8에 플롯

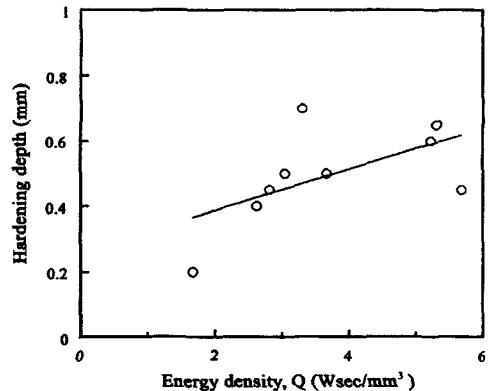


Fig. 8. Relationship between energy density of laser beam and hardening depth

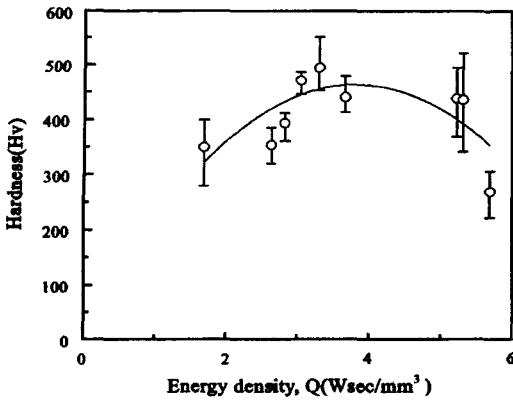


Fig. 9. Relationship between energy density of laser beam and maximum hardness

팅하였다. 에너지 밀도가 증가함에 따라 경화깊이는 깊어 가는 것을 파악 할 수 있었다. 그러나 Fig. 9에 나타난바와 같이 에너지 밀도와 최대 경도치와의 관계를 검토하면 2¼Cr-1Mo강에서 레이저 빔 조사 시의 에너지 밀도가 약 3~5 (W·sec/mm²)인 영역에서 최대 경도구역으로 나타났다. 그러나 레이저

빔 조사시 최대경도 구역보다 더 높은 에너지 밀도에서는 축적된 열이 전도되기 전에 템퍼링 된 조직을 연화시켜 경도치가 낮아진 것이라고 사료된다.

5. 피로균열진전 특성

5.1. $\Delta a-N/N_f$ 선도

각 시험편에서 피로시험 결과 측정하여 얻은 균열 길이(a)와 하중 반복회수(N)의 데이터로부터 $\Delta a-N/N_f$ 선도 및 $\Delta K-da/dN$ 선도를 작성하여 레이저 빔 조사가 피로균열 진전특성에 미치는 영향을 고찰하여 보았다.

Fig. 10은 열화재, 회복재 및 레이저 빔 조사재의 피로수명 사이클 당 진전하는 균열길이 (Δa)를 비교하여 나타낸 것이다. 열화재와 회복재의 균열진전비는 유사한 형태로 나타나는 반면에 레이저 빔 조사재의 경우 초기 균열은 압축잔류응력 때문에 상당히 지연되어 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 적절한 레이저 빔 조사가 이루어질 경우에는 장기 사용으로 템퍼링 취화된 열화재를 레이저 빔 조사

Table 4. Number of cycles for initiation, number of cycles to failure and material constants m and C in degraded, recovered and laser beam irradiated Cr-Mo steel (F:Front surface, B:Back surface)

Specimen	0.1mm Ni (cycle)	Nf (cycle)	m	C ($\times 10^8$)	Note
T-1	40,000	289,300	3.58	2.08	F,B
T-2	40,000	295,300	3.52	2.54	F,B
T-3	50,000	278,900	3.50	2.68	F,B
T-4	70,000	475,000	3.18	2.35	F,B
T-5	100,000	452,200	3.32	1.73	F,B
T-6	180,000	561,600	3.38	1.38	F,B
T-7	160,000	543,000	3.20	2.27	F,B
T-8	160,000	561,300	3.69	0.504	F,B
T-9	130,000	531,270	4.12	0.097	F,B
T-10	95,000	466,800	2.94	3.51	F,B
T-11	110,000	511,100	2.83	7.79	F,B
T-12	120,000	452,400	2.52	19.81	F,B
T-13	130,000	489,000	2.86	7.38	F,B
T-14	140,000	488,400	3.23	2.16	F
T-15	-	-	3.53	0.477	F,B
Recovered	92,222	584,500	3.81	0.32	F,B
Degraded	82,000	457,400	4.23	0.13	F,B

한 정량화 작업에는 몇 가지 방법들이 사용되어지고 있다.

본 연구에서는 레프리카로 채취된 피로균열의 경로에 대하여 박스 법이라고도 하는 간편한 방법으로 차원해석을 하였다. 이 방법은, 대상으로 하는 균열의 현미경 사진에 정방형의 격자를 씌워서 균열이 지나가는 정방형의 개수 $N(\eta)$ 를 구한다. 정방형 변의 길이 η 를 변화시켜서 같은 작업을 반복하여 정리하면 프랙털 특성이 존재 할 경우에는 다음 식이 성립한다^{4,6)}.

$$N(\eta) = C\eta^{-D} \quad (4)$$

여기서 C와 D는 정수이며, 특히 D를 프랙털 차원이라 한다. D는 1차원에서는 $1 \leq D < 2$, 2차원에서는 $2 \leq D < 3$, 3차원에서는 $3 \leq D < 4$ 가 된다. D가 커질수록 직선 또는 평면으로부터 기복이 심해짐을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

회전굽힘 피로시험으로부터 얻어진 S-N곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 그림 중의 데이터는 초기균열 발생까지의 회전수를 표시하고 있으며 화살표를 붙인 시험편은 균열이 발생되지 않았음을 의미한다. 피로한도는 170 MPa 정도로 이 값은 상 항복응력 442 MPa의 약 38 %에 해당한다.

원주방향의 균열진전속도 ds/dN 과 원주방향 균열 길이 s 와의 관계를 Fig. 5에, 깊이방향의 균열진전속

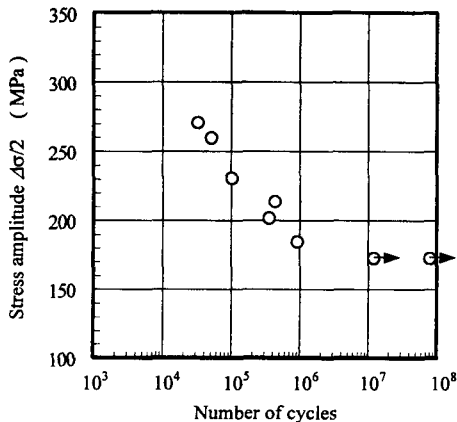


Fig. 4. Relationship between stress amplitude ($\Delta\sigma/2$) and number of cycles(N)

도 db/dN 과 깊이방향 균열길이 b 와의 관계를 Fig. 6에 각각 나타내었다. 이들 두 그래프에는 미소 노치의 영향이 미치고 있는 범위라고 생각되는 $s < 0.5$ mm의 값은 표시하지 않았다. 약간의 변화폭은 있으나 두 그래프 모두 동일 s 및 b 에 대한 균열진전속도는 응력 진폭 크기에 의존성을 나타내고 있으며 거의 직선적인 관계가 인정되었다. 또한 $s < 0.5$ mm에서의 관계를 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내고 있으나 이 두 그래프에서는 응력 의존성이 인정되지 않았으며, 균열진전속도가 큰 폭으로 변화하고 있다. 그

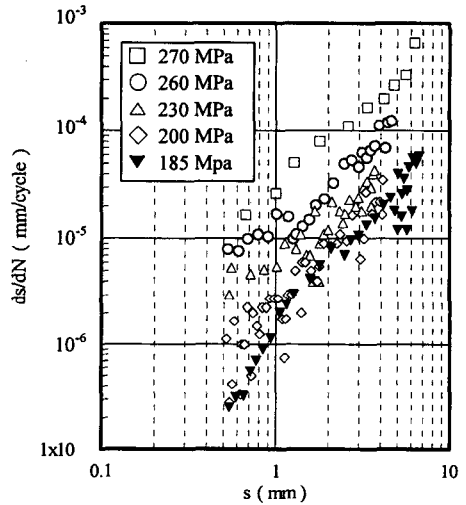


Fig. 5. Relationship between crack growth rate (ds/dN) and crack length(s)

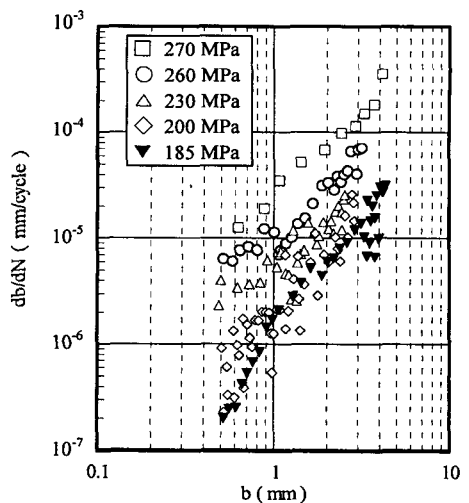


Fig. 6. Relationship between crack growth rate (db/dN) and crack length(b)

또한 템퍼링 취화는 결정립계에 P, Sn, Sb 및 As와 같은 불순물이 입계에 편석되어 결정립의 응집력을 감소시키며, 그 중 P가 취화 감수성을 증가시킨다고 발표되어 진다. 그러나 Erhart⁹⁾의 보고에 의하면 결정립계 내의 P의 평균농도는 온도가 증가함에 따라 감소하고, 결정내의 P의 평균농도가 증가한다고 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 레이저 빔의 고온의 열원을 이용함에 따라 결정립계에 편석된 불순물 P의 농도를 감소시키면서 결정립의 응집력이 증가되었다고 추정된다.

Fig. 12에서는 각각 시험편에 대한 ΔK - da/dN 의 관계로부터 Paris식에 의한 피로균열 진전법칙에서의 상수 m 및 C 값을 최소 자승법에 따라 산출하여 나타내었고, Table 4에 결과를 나타내었다.

실제 구조물에서 균열이 발생되었을 때 레이저 빔에 의한 영향을 관찰하기 위하여 열화재를 먼저 피로시험하여 균열길이(Δa)를 약 3mm 진전시킨 후 레이저 빔을 조사하였다. 이들의 피로시험한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 이때 레이저 빔 조사재 T-15의 흡수에너지 밀도 Q 는 $5.67(W \cdot \text{sec}/\text{mm}^3)$ 이다. Fig. 14에서는 레이저 빔 조사재 T-15와 열화재 및 회복재의 균열진전속도를 비교하기 위하여 동일한 ΔK - da/dN 선도상에 플롯팅하여 나타내어 보았다. 레이저 빔 조사재 T-15의 균열진전 속도가 열화재 및 회복재의 균열진전 속도에 비해 상당히 지연되는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 균열이 발생된 부위에서도 적절한 레이저 빔 조사를 할 경우에는 균열의 진전을 지연시키는 효과를 가져올 것으로 사

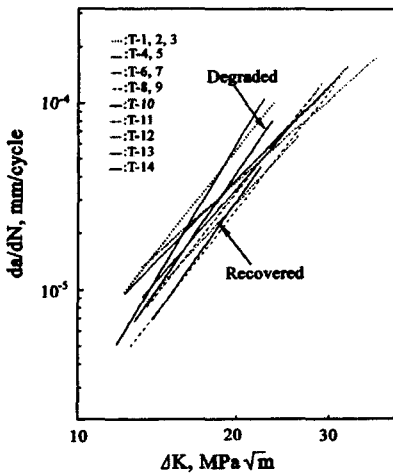


Fig. 12. Relationship between stress intensity factor range ΔK and crack growth rate da/dN

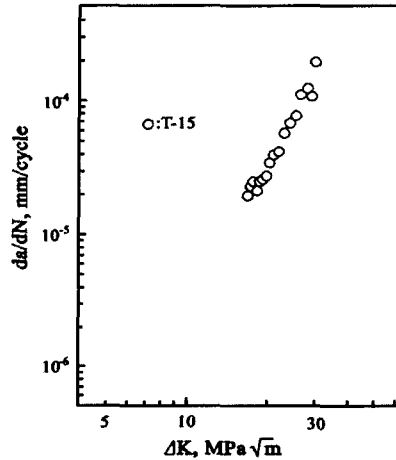


Fig. 13. Relationship between stress intensity factor range ΔK and crack growth rate da/dN (T-15)

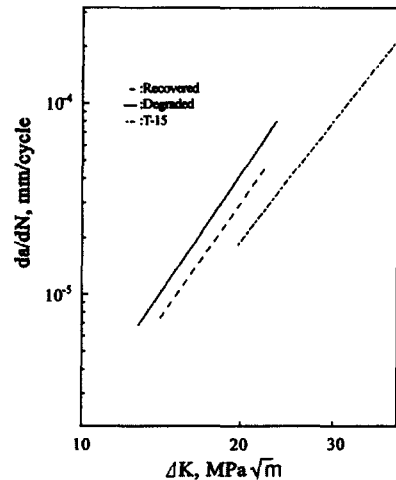


Fig. 14. Relationship between stress intensity factor range ΔK and crack growth rate da/dN (T-15)

료된다.

이상의 피로균열진전 시험 결과로부터 장기 사용에 의해 열화된 재료에 적절한 레이저 빔을 조사할 경우에는 경도치의 향상과 압축잔류응력에 의한 피로균열진전 속도가 지연, 그리고 결정립계 내의 P의 농도감소에 따라 열화 치료가 가능함을 시사한다.

또한 레이저 빔 조사시의 변수, 즉 출력, 이송속도, 빔의 직경 및 빔의 형상을 함수로 한 레이저 빔의 에너지 밀도와 압축 잔류응력(Compressive residual stress)과의 관계, 그리고 레이저 빔의 고온에 의한 불순물의 변화거동에 대해서는 구체적으로 검토할 사항이라고 사료된다.

6. 결 론

2¼Cr-1Mo강 열화재의 피로강도 향상을 목적으로 레이저 빔 조사 방법을 이용하여 경도시험, 잔류응력 측정, 금속 조직 관찰 및 피로 균열 진전 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 2¼Cr-1Mo강의 레이저 빔 조사시의 에너지 밀도가 약 3~5(W·sec/mm³)인 영역이 최대 경도구역으로 나타났으며, 경도치는 모재인 열화재가 약 220 Hv이고, 레이저 빔 조사 조건에 따라 경도치는 최고 450-500Hv으로 약 2.5배 상승되었다.

2) 조직관찰한 결과 장기 사용한 열화재 및 회복재는 베이나이트(Bainite) 및 페라이트(Ferrite)의 형상을 나타내고 있는 반면에 고온의 레이저 빔을 조사할 경우, 표면 경화층이 마르텐사이트(Martensite) 상변태로 인한 압축 잔류응력이 발생되었으며, 이런 잔류응력들이 피로강도를 향상시킨 원인이라고 판단된다.

3) 피로시험을 수행한 결과, 레이저 빔의 조사 조건에 따라 피로 균열진전 속도가 빨라진 경우도 있었으나, 최대 경도영역 부근에서의 레이저 빔의 에너지 밀도로 조사하게 되면 균열의 진전 속도를 지연시키는 효과를 얻을 수 있었다. 그리고 균열길이를 약 3mm 진전시킨 후에 레이저 빔을 조사하여 피로시험한 결과에서도 균열진전 속도가 열화재와 회복재에 비해 지연되었으며, 이는 레이저 빔 조사에 의해 열화재의 피로 강도의 개선이 가능하다는 것을 시사한다.

참고문헌

- 1) H. Kitagawa, J. D. Kwon, "Degradation Problems in life Prediction", Proceedings of the KSME/JSME Joint Conference, pp. 708~713, 1990.
- 2) K. D. Challenger, A. K. Miller, "An Explanation for the Hold Perid on the Elevated Temperature Fatigue Behavior of 2¼Cr-1Mo steel", Tran of ASME, Vol. 103, pp. 7~14, 1982.
- 3) McLean, D. and Northcott. L., "Micro- Examination and Electrode potential Measurement of Temper-Brittle steel", Tran. American Society for Metal, Vol. 39, pp. 109~138, 1947.
- 4) C. J. McMahon, Jr., "Temper Brittleness Interpretation Review", ASTM STP 407, pp. 127~166, 1968.
- 5) Li Changchun, Zhou Yawen, Li Xiping and Li Guangxia "A Fatigue Damage Evolution Law for Laser Beam Irradiated Cylindrical Specimens", Int J Fatigue 11 No. 3, pp. 183~186, 1989.
- 6) Huang Peiyan and LiChangchun, etc "Effect of Laser Beam Radiation on Fatigue Crack Growth Behaviour", Fatigue Fract. Engng Mater, Struct. Vol. 8, No. 1, pp. 89~99, 1985.
- 7) ASTM E647, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rate", 1999.
- 8) B. D. Cullity, "Element of X-ray diffraction", pp. 556~593, 1990.
- 9) J. R. Hawtborne and T. R. Mager, "Relationship Between Charpy V and Fracture Mechanics KIC Assessments of A533-B Class 2 Pressure Vessel Steel" ASTM. STP 514, pp. 151~163, 1971.
- 10) H. Tada "The Stress Analysis of Cracks Handbook", Del Research Corporation, 1973.