〈技術論文〉

레이저빔 조사에 의한 압력용기용 강의 피로강도 향상방법 개발

권재도* · 진영준** · 류승우** · 김상태* · 최선호* ·
李春植*** · 李長春*** · 李光霞***

(1993년 8월 28일 접수)

Fatigue Strength Improvement of Pressure Vessel Steel by Laser Beam Radiation

Jae-Do Kwon, Yeung-Jun Jin, Sung-Woo Ryu, Sang-Tae Kim, Sun-Ho Choi, Chunzhi-Li, Changchun-Li and Guanxia-Li

Key Words: Laser Beam Radiation(레이저빔 조사), Degraded Material(열화재), Hardness (경도), Residual Stress(잔류응력), Fatigue Crack Growth Test(피로실험), Radiation Condition(조사조건)

Abstract

Degradation problem due to long term service in machine or structure is now one of important problems in whole industrial field. In this study, pressure vessel steel, Cr-Mo steel, which was used more than 60,000 hours, was surface-modified by laser beam radiation for the improvement of fatigue strength. To find out optimum radiation condition, hardness, residual stress measurement and fatigue tests were carried out with the specimen of different radiation conditions. Experimental results show that micro-hardness values on the surface of the radiated specimens were approximately 2.2 times higher than those of un-radiated ones. In the depth direction of the specimen, hardness on the surface showed maximum value and was decreased at the inside the specimen. Different hardness values are due to the energy density Q which was absorbed by the specimen. Fatigue tests show that fatigue life was improved by the compressive residual stress after laser beam radiation. However, some specimens with differednt conditions show the shorter fatigue life. It means that laser beam radiation with optimum parameter can improve thae fatigue strength.

1. 서 론

최근 산업의 발달과 더불어 첨단 기술을 실현시키기 위한 요구에 부응하기 위해 종래와는 다른 개념에서 새로운 재료 및 새로운 기술에 대한 관심이 집중되고 있다. 이와 더불어 레이저광이 공학에 응용되어 각광을 받기 시작했다. 특히, 레이저광이 기계공학에 응용된 것은 광선으로서 특성이 우수하여 광간섭에 의한 정밀측정에 응용과 고밀도의 에

*정회원, 영남대학교 기계공학과
**영남대학교 기계공학과 대학원
***China, Huazhong Univ. of Science and Technology Department of Machnics

너지를 이용한 용접, 절단 및 초정밀 가공 등의 재료 가공분야[1,2]에 주로 이용되어 왔다.

그러나 기계부품, 기계구조물들의 경량화와 소형화에 따라 품질향상, 강도향상에 대응하는 신소재 및 신기술의 개발과 더불어 표면층의 경도만을 높여주는 이른바 표면개질법에 관한 연구에 착수해서 많은 연구가 이루어지고 있다.

이와 같은 표면 개질법에 레이저빔을 열원으로 이용하기 시작한 것은 최근 일로서, 레이저빔에 의한 재료 표면개질의 응용에 관한 연구[3,4,5]가 시도되면서, 레이저빔 조사에 관한 경화기구[3] 및 경화조직에 대한 연구, 내마모성에 대한 연구,[4] 피로강도상승 효과에 대한 연구,[5,9] 파괴 인성치 상승효과에 대한 연구[6] 등의 다양한 분야에서 국제적으로 다수의 연구가 시작되어 왔으나, 국내에서 이와 같은 연구는 전무한 실정이다.

이와 더불어 특수 환경하에서 장기간 사용한 기계 구조물들은 반드시라고 하여야 좋을 만큼 열화(degradation) 현상이 생기게 되며, 재질열화가 재료강도에 미치는 영향에 대한 다수의 연구[11,12]가 행지져서 어느정도 성과도 올리고 있다.

그러나 장기 사용하여 열화된 기계구조물의 건전성 평가 및 신뢰성에서 인류의 꿈이라고 할수 있는 것은 열화재를 특수한 신기술로 그 강도를 회복 시키는 방법 즉, 열화의 치료방법이다.

따라서 본 연구에서는 고온, 고압의 압력용기에 사용되는 Cr-Mo강의 장기 사용한 열화재를 사용하여 레이저 빔 조사시의 레이저출력, 조사속도 및 조사 빔의 직경을 변수로 한 조사 밀도를 변화 시켜가면서 다수의 피로시험편을 제작하여 피로균열 발생 및 진전특성에 미치는 레이저빔 조사의 영향과 레이저빔 조사에 의해서 피로개선(열화의 치료) 가능성도 연구 검토해 보고자 한다.

2. 실험용 재료 및 시험편

2.1 실험용 재료

레이저빔 조사에 의한 압력용기용 강의 피로강도 향상방법을 개발하기 위한 연구용 재료로는 $2^1/_4$ Cr-1Mo강으로 약 430℃에서 60,000시간 정도 사용되어 템퍼링취하(temper embrittlement)된 재료를 선정하였다. 동 재료는 석유정제용 압력 용기용 강으로 그 화학성분은 Table 1과 같고, 기계성질은 Table 2와 같다.

열화된 재료의 강도를 비교하기 위해서는 건전재가 필요하나 실제 장시간 사용된 재료와 동일한 신재료의 입수가 불가능하기 때문에 열화재를 650℃에서 1시간 가열한 후 냉각시킨 재료를 회복재료 사용하였다.

그러나, 대형 압력용기를 이 방법에 의해 전체를 가열하여 회복시키는 것은 기술적으로도 매우 어려운 일이므로 레이저빔을 이용한 국부적 열원에 의한 필요부위 또는 강도 취약부 등의 열화치료를 하기 위한 목적으로 동 재료를 사용하였다.

2.2 시험편 형상

Cr-Mo강의 모재 및 열화재를 Fig. 1과 같은 형태로 외형을 가공한 후, 시험편 중앙의 노치는 드릴을 이용하여 0.2 mm 구멍을 가공한 다음에 방전가공기로 인공노치의 길이 2a=6.6 mm, 곡율반경 ρ=0.2 mm로 일정하게 가공하였다.

이렇게 가공한후 레이저빔을 조사한 시험편의 크

Table 1 Chemical compositions of $2^1/_4$ Cr-1 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 propertie of $2^1/_4$ Cr-1 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

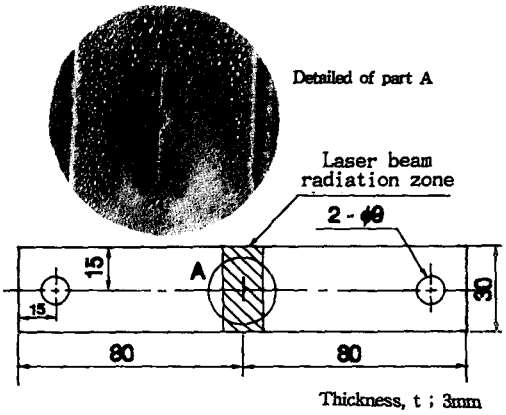


Fig. 1 The geometry of specimen (dimension; mm)

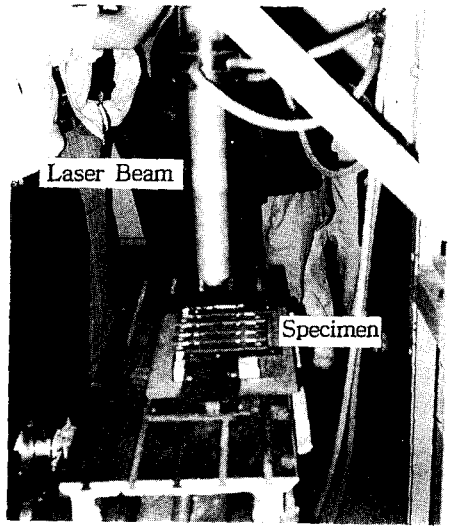


Fig. 2 The scene of laser beam radiation by using CO_2 laser

랙진전거동을 정확하게 측정하기 위해서 시험편의 표면에 #200부터 #1500까지의 에머리페이퍼(emery peper)를 사용하여 연마한 후 피로균열 진전실험을 수행하였다.

2.3 시험편에 레이저빔 조사방법

일반적으로 레이저빔 조사시 금속인 경우 표면으로부터 반사의 영향으로 흡수율이 떨어지는 경향이 있다. 이를 방지하기 위해서 시편 표면에 레이저를 흡수시키는 흡수재를 코팅시켜서 흡수량을 증가 시키고 있다.

Fig. 2는 중국 화중 이공대학의 모델 No. HGL 8950, 출력 5 kW의 CO_2 레이저를 사용하여, 레이저빔을 조사하는 장면을 나타내고 있다.

흡수재로는 흑연분말, 흑색페인트, 인산철 등의 재료가 사용되고 있으며, 본 실험에서는 시험편 No. 1, 2, 3의 3개에 대해서는 레이저빔 조사시 흡수재로 흑색페인트를 사용하였으며, 시험편 No. 4, 5, 6, 7, 8의 5개에 대해서는 레이저빔 조사시 흡수재로 인산철을 사용하여 각 시험편에 레이저빔을 조사했다.

아울러, 시편에 흡수되는 에너지는 레이저빔의 조사속도(velocity), 밀도(density), 지름(diameter), 레이저빔 형상(type)에 따라 변화됨으로 정확한 피

Table 3 Information of laser beam radiation parameter in Cr-Mo specimen

Material	Radatied parameter				Laser beam type	Energy density Q (W sec/mm³)	Note
	P(W)		V(mm/sec)	d(mm)			
Laser No. 1	F : 1391	B : 1340	27	5.5	square	3.34	F, B
Laser No. 2	F : 1392	B : 1400	27	5.5	square	3.42	F, B
Laser No. 3	F : 1396	B : 1395	27	5.5	square	3.42	F, B
Laser No. 4	F : B : 900~910		9.2	6(4)	oval	10.44	F, B
Laser No. 5	F : B : 900~910		9.2	6(4)	oval	10.44	F, B
Laser No. 6	F : B : 910~930		9.2	6(4)	oval	10.61	F, B
Laser No. 7	F : B : 910~930		9.2	6(4)	oval	10.61	F, B
Laser No. 8	F : 971~1025		5.5	6	square	10.08	F only

(F : Foront surface rasiation, B:back surface radiation)

로수명연장의 파라메터를 찾기 위해서 각종 파라메터를 변화시켜가면서 레이저빔 조사를 실시하였다. Table 3는 시험편에 레이저빔을 조사한 조건을 나타낸것으로 동 표에서 나타낸 바와 같이 시험편 No. 1, 2 및 3은 조사속도, 레이저빔 직경, 형상들은 유사하게 하여, 시험편의 전, 후면에 대해 조사하였다. 시험편 No. 4에서 7번까지 레이저빔의 직경, 형상 및 조사속도를 동일하게 하고, 레이저빔의 출력은 시험편 No. 4, 5 및 No. 6, 7을 각각 동일하게 유지하면서 조사하였다. No. 8번은 시험편의 전면만 조사하였다. 이와 같이 조사된 시험편에 흡수되는 에너지 밀도, Q를 본 연구에서는 다음과 같이 정의하였다.

$$Q=\frac{P}{VA}(\mathrm{W\cdot sec/mm^3}) \quad (1)$$

여기서 P는 레이저의 출력(W)이며, V_1는 조사속도(mm/sec), 그리고 A는 조사 빔의 단면적 (mm^2)을 나타낸다.

레이저 No. 1, 2 및 3번의 시험편 경우 조사 빔은 5.5 mm의 4각 단면 형상을 사용하였으며, 시험편 No. 4에서 7번까지의 경우 조사 빔의 형태는 장축 6 mm, 단축 4 mm인 타원형을 사용하였고, 시험편 No. 8은 조사빔이 6 mm인 4각 단면형상을 이용하여 각각 조사하였다.

각 시험편에 조사된 에너지 밀도Q를 Table 3에 나타내었다.

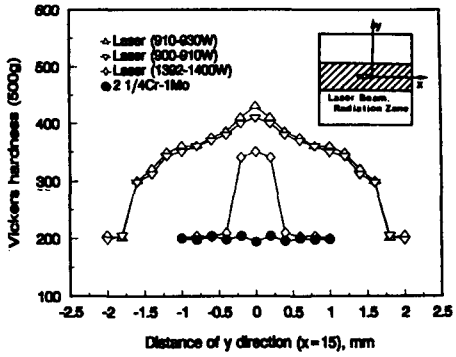


Fig. 3 Vickers microhardness distribution of laser beam radiated Cr-Mo specimen to the y direction

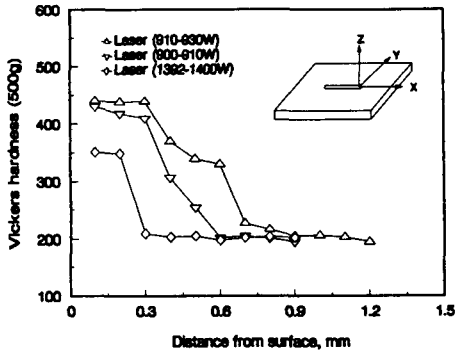


Fig. 4 Vicker microhardness distribution of laser beam radiated Cr-Mo specimen to the thickness direction (−Z)

3. 레이저빔 조사부의 경도, 잔류응력 및 조직관찰

3.1 레이저빔 조사재 표면의 버커스 경도

레이저빔의 출력, 조사속도, 직경 및 형태를 달리하여 조사된 시험편 표면의 조사 방향에 대한 직각 방향에 비커스 경도시험을 수행하였다. 실험조건은 하중 10 kg, 하중시간 15 sec, 하중속도 7로 일정하게 각 시험편에 대하여 실험을 행했다.

Fig. 3는 레이저빔이 조사된 표면이 x=15~20 mm 지점에서 1 mm간격으로 y방향에 따라 경도실험을 행하여 각 위치의 값을 평균한 결과를 Plot한 것이며, Fig. 4는 레이저빔 조사후 시험편 표면에서 두께방향(−z방향)으로 1 mm씩 등간격 측정한 경도 분포를 평균하여 나타낸 것이다. 이 결과 레이저빔의 출력, 속도, 직경 및 형태에 따라 측정된 경도 분포가 달라짐을 보여주고 있다.

아울러, 모재의 경도치는 200 Hv정도인 반면에 레이저빔 조사후 경도는 350~440 Hv로 약 2.2배 증가됨을 볼 수 있다.

Fig. 3 및 4로부터 에너지밀도 Q=10.44 및 W · sec/mm^3(레이저 No. 4~7)로 조사한 레이저빔 조사재의 경화깊이는 약 0.6 mm 경화폭은 약 4 mm 정도임을 알 수 있으며, 에너지밀도 Q=3.42W · sec/mm^3의 레이저빔 조사재의 경화 깊이는 약 0.2 mm, 경화폭은 약 1 mm정도임을 알 수 있다.

Fig. 3 및 4와 Table 3을 비교하면 경화처리 가능 범위에서 조사속도가 감소할수록 경화 깊이 및 경화 폭이 증가함을 볼 수 있고, 출력을 증가시키고 속도를 빨리 함에 따라 경화 깊이 및 폭은 감소함을 볼 수 있다.

이현상을 흡수에너지 밀도 Q로 표시하면 Q가

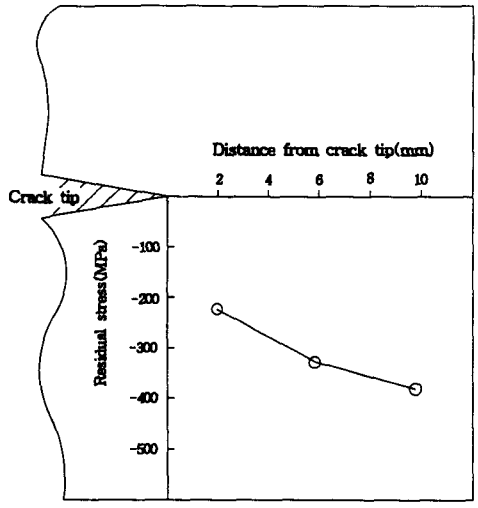


Fig. 5 Residual stress distribution of crack tip on the laser beam radiated specimen

크면 경화깊이 및 경화폭이 증대되고 Q가 감소하면 경화깊이 및 폭이 감소함을 의미한다.

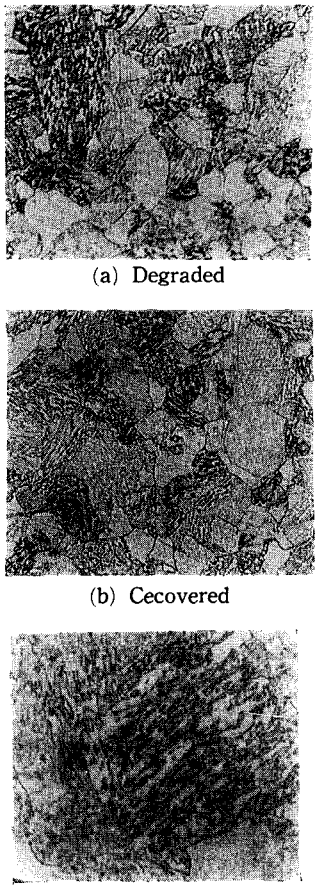
3.3 레이저빔 조사 부위의 잔류응력 측정

시험편 표면에 레이저빔을 조사하면 조직이 마르텐사이트로 바뀌고, 온도차에 의한 압축잔류응력이 생길것으로 예상되어 X선 회절장치(X-ray diffractometer, Model No. MSF-2M, 용량 0.3KW)을 이용하여 잔류응력 측정을 해보았다. 잔류응력 측정은 흡수에너지 밀도 $Q=10.61$ W · see/mm^{3}인 시험편을 사용하여 노치선단에서 X방향으로 2, 5 및 9.5 mm의 세지점에 대해 측정하였으며, 측정방법은 Glocker법에 의해 회절각 θ를 0, 15, 30, 45°로 변화시켜가면서 측정하였다.

이 회절선을 반가폭 중점법을 사용하여 최대 피이크위치를 결정하였으며, 이때 X=2, 5 및 9.5 mm에서 각각 −219, −320 및 −372 MPa의 압축잔류응력이 발생하는 것을 알수가 있으며, 이결과를 Fig. 5에 플롯팅하였다. 이는 피로 시험에서 균열이 진전할때 진전속도를 지연시키는 효과를 가지게 되며, 이로 인하여 피로 수명이 연장 될것으로 예측된다.

3.4 레이저빔 조사 부위의 조직 관찰

모재인 열화재와 회복재 및 레이저빔이 조사된 시험편의 금속조직 변화를 고찰하기 위하여 3종류의 재료에 대해 시료를 채취하여 마운팅작업 후 폴리싱을 하고, 나이탈(Nital) 5%에서 30초간 에칭(etching)을 실시하였다.



(a) Degraded

(b) Cecovered

(c) Laser beam radiation

Fig. 6 Optical Micrographs of degraded, recovered and CO_2 laser beam radiated Cr-Mo steel (X100)

Fig. 6에서는 본 실험에 사용한 Cr-Mo강의 열화재, 회복재 및 레이저빔 조사재(레이저 No.6)의 조직사진을 나타낸 것으로 열화재와 회복재는 페라이트(perite), 베나이트(bainite)를 나타내고 있으며, 레이저빔이 조사된 경화층에서는 마르텐사이트 조직이 주종을 이루고 있음을 알수있다.

4. 피로실험방법

레이저빔 조사에 따른 피로강도 향상효과를 알아보기 위해서 열화재, 회복재 및 레이저빔 조사시의

파라메터를 다르게한 레이저빔 조사재에 대한 피로실험을 수행하였다.

본 실험에 사용한 피로시험기는 Instron사의 유압서보 시험기(hydroulic-servo fatigue test machine; model 1332)로 최대 용량은 250 kN(25ton)이다. 실험조건은 사인파형(sine wave)의 인장-인장(tension-tension) 하중제어방식으로 주파수 10 Hz, 응력비($R=p_{min}/p_{max}$) 0.05로 상온에서 응력진폭범위 $\Delta\sigma=115.8$ MPa, 초기 응력확대계수 범위 $\Delta K_i=11.8\,\mathrm{MPa}\sqrt{m}$의 일정조건하에서 실험을 실시하였다.

피로균열길이 측정은 시험기에 부착된 이동식 현미경을 사용하였으며, 시험편 전면, 좌우측의 균열 증가분을 측정한 후 초기 노치길이를 더하여 균열길이 $2a$로 정의하였고, 정확한 균열의 발생 수명을 측정하기 위하여 피로균열이 발생하기 전부터 0.3 mm 이상 진전할 때까지 각 시험편마다 약 5~6회 정도 표면 레프리카(replica)를 채취해서 현미경을 사용하여 균열발생 여부를 확인하였다.

5. 피로균열진전 실험결과

5.1 a-N 선도

각 시험편에서 피로 시험 결과 측정하여 얻은 크랙길이(a)와 하중 반복회수(N)의 데이터로부터 a-N 선도 및 ΔK-da/dN 선도를 작성하여 레이저빔 조사가 피로균열진전 특성에 미치는 영향을 고찰하여 보았다.

Fig. 7은 레이저빔 조사재에 대해 피로실험의 데이터로부터 균열길이(a)와 하중 반복회수(N)과의 관계를 나타낸 a-N 선도이며, Table 4에는 레이저빔 조사에 의한 각 재료의 0.1 mm 피로균열 발생수명(Ni), 파단수명(Nf) 및 ΔK-da/dN 선도로부터 얻은 피로균열진전 법칙에서의 상수C와 m의 값을 나타내었다.

피로균열의 0.1 mm 발생 수명은 회복재 및 열화재보다 레이저빔의 출력 1340~1400 W, 즉 흡수에너지 밀도 $Q=3.34\sim3.42$ W · sec/mm³으로 조사시킨 No. 1, 2 및 3 레이저 빔 조사재가 빨리 발생하였고, 출력을 900-910 W, 즉 흡수에너지 밀도 $Q=10.44$ W · sec/mm³로 조사시킨 No. 4, 5 레이저빔 조사재의 피로균열발생 수명은 열화재와 비슷함을 볼 수 있었다. 그러나, 한 쪽면 만을 출력 971~1025 W로 조사시킨 No. 8의 레이저빔 조사

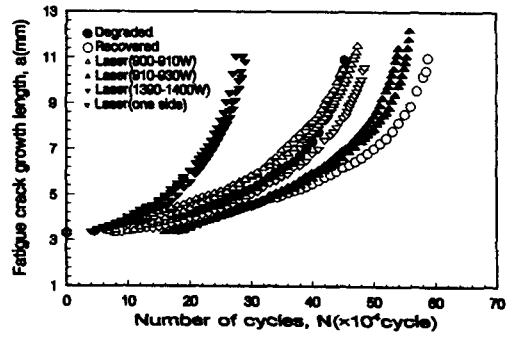


Fig. 7 Relationship between fatigue crack lengh(a) and number of cycle(N) in degraded, recovered and laser beam radiated Cr-Mo steel

재, 910~930 W, 즉 흡수에너지 밀도 $Q=10.61$ W · sec/mm³으로 조사시킨 No. 6, 7의 레이저빔 조사재의 피로균열발생이 상당히 지연됨을 볼 수 있다. No. 6, 7 및 8의 레이저빔 조사재의 초기균열 발생이 현저히 지연되는것은 레이저빔 조사시 표면층의 압축잔류응력으로 인하여 피로수명의 연장과 동시에 균열발생의 가능성을 감소시킨 것으로 생각된다.

특히, 레이저빔 조사재 No. 1, 2 및 3번의 경우 레이저빔 조사조건에 따라 피로수명을 현저히 감소시킬 수 있는 반면에 No. 6 및 7번의 레이저 빔 조사재가 회복재와 비슷한 파단수명을 보여 주고 있는데 이것은 장기사용으로 템퍼링 취화된 열화재를 레이저빔 조사방법에 따라 수명연장을 할 수 있는 가능성을 나타내고 있는 반면에 레이저 빔 조사를 잘 못할 경우 피로수명을 현저히 감소시킬수도 있음으로 유의할 필요가 있다.

5.2 ΔK-da/dN선도

피로크랙의 진전에 대한 Paris의 연구결과에 의하면 시험편과 하중조건에 따른 피로크랙 진전속도(da/dN)이 응력확대계수 범위 (ΔK)의 함수로서 피로크랙 진전속도 법칙은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$da/dN=C(\Delta K)^m \tag{2}$$

여기서, m 및 C는 크랙진전법칙에서의 지수 및 상수이다.

본 실험에서 피로크랙 진전속도(da/dN)의 계산은 크랙길이(a)와 하중반복회수(N)에 대한 데이터로부터 시컨트(secant)법에 따라 계산하였으며,

Table 4 Fatigue crack initiation fracture life and material constants m and C in dgraded, recovered and laser beam radiated Cr-Mo steel

Material	0.1 mm Ni (cycle)	Nf (cycle)	m	C (x 10^{-9})	Note
Laser No. 1	40,000	289,300	3.58	2.08	F, B
Laser No. 2	40,000	295,300	3.52	2.54	F, B
Laser No. 3	50,000	278,900	3.50	2.68	F, B
Laser No. 4	70,000	475,000	3.18	2.347	F, B
Laser No. 5	100,000	452,200	3.32	1.733	F, B
Laser No. 6	180,000	561,600	3.38	1.38	F, B
Laser No. 7	160,000	543,000	3.20	2.27	F, B
Laser No. 8	140,000	488,400	3.23	2.16	F only
Recoverd	92,222	584,500	3.81	0.32	
Degraded	82,000	457,400	4.23	0.13	

응력확대계수 범위 ΔK는 다음과 같은 Tada H. 식을 사용해서 구했다.

$$\text{즉, } K_I=\sigma\sqrt{\pi a}\cdot F_I(\alpha)^*,\ \alpha=2a/W$$
$$F_I(\alpha)^*=(1-0.025\alpha^2+0.06\alpha^4)\cdot F_I(\alpha)$$
$$F_I(\alpha)=\sqrt{\sec(\alpha\pi/2)} \quad (3)$$

또한 응력진폭범위 $\Delta\sigma$=115.8 MPa, 초기 응력확대계수 범위 ΔK=11.8 MPa$\sqrt{m}$하에서 각각 실험한 시험편들에 대한 a-N관계로부터 크랙진전속도(da/dN)와 응력확대계수 범위(ΔK)를 계산하여 ΔK와 da/dN사이의 관계를 양대수(log-log) 그래프상에 프롯트(plot)한 것을 Fig. 11~17에 나타내었다.

Fig. 8는 레이저 No. 1, 2및 3번 시험편에 대한 피로균열 진전속도와 응력확대계수와의 관계를 나타내었으며, Fig. 9은 레이저 No. 4 및 5 시험편에

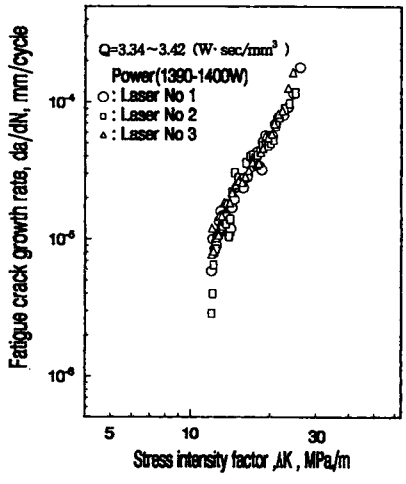


Fig. 8 Relationship between stress intensity factor range ΔK and crack growth rate da/dN in laser beam radiated Cr-Mo steel

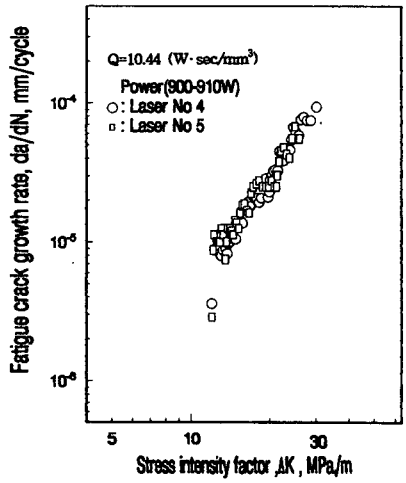


Fig. 9 Relationship between stress intensity factor range ΔK and crack growth rate da/dN in laser beam radiated Cr-Mo steel

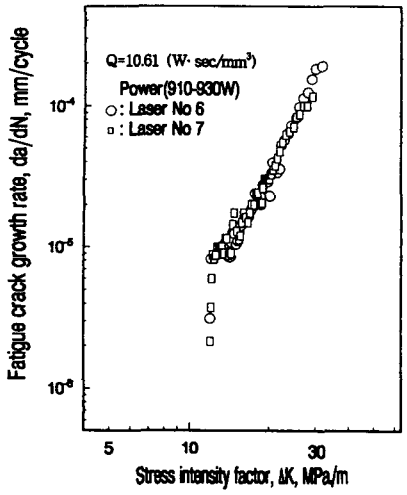


Fig. 10 Relationship between stress intensity factor range ΔK and crack growth rate da/dN in laser beam radiated Cr-Mo steel

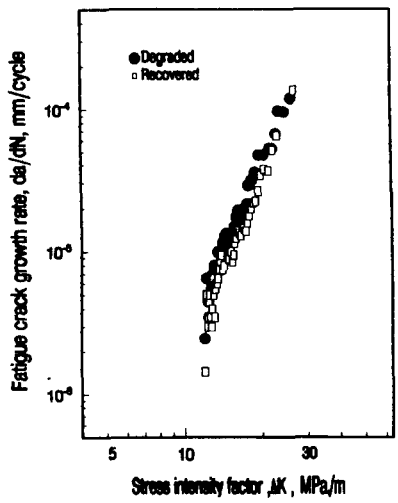


Fig. 12 Relationship between stress intensity factor range ΔK and crack growth rate da/dN in degraded and recovered Cr-Mo steel

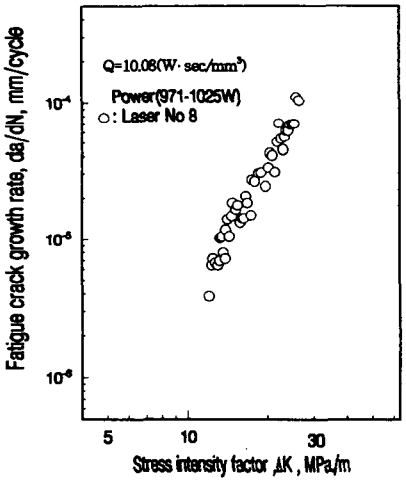


Fig. 11 relotionship between stress intensity factor range ΔK and crack growth rate da/dN in laser beam radiated Cr-Mo steel

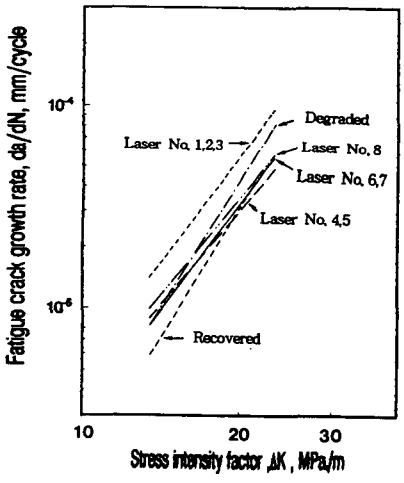


Fig. 13 Relationship between stress intensity factor range ΔK and crack growth rate da/dN in degraded, recovered and laser beam radiated Cr-Mo steel

대한 피로균열 진전속도와 응력확대계수와의 관계를, Fig. 10은 레이저 No. 6 및 7 시험편에 대한 피로균열 진전속도와 응력확대계수와의 관계를, Fig. 11는 레이저 No. 8 시험편에 대한 피로균열 진전속도와 응력확대계수와의 관계를 나타낸 것이다. 한편 Fig. 12은 열화재와 회복재에 대한 피로균열 진전속도와 응력확대계수와의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 13은 상기 Fig. 8에서 12에 대해 Paris의 균열진전법칙에서의 지수 m 및 상수 C의 값을 최소자승법에 따라 산출하여 하나의 그래프상에 나타낸 것이다. 이 경우의 C 및 m이 값을 Table 4에 나타내었다.

Fig. 13에서 레이저빔 조사재 No. 1, 2 및 3번의 경우가 열화재보다 ΔK의 전영역에서 피로균열 진전속도가 크게 증가됨을 나타내는 반면에 No. 4, 5, 6, 7 및 8번의 경우에는 피로균열 진전속도가 회복재에 비해 균열이 진전할수록 지연되는 것을 관찰할 수 있었는데, 이는 레이저빔 조사로 인한

압축잔류응력 등에 의해 피로균열 진전속도의 지연 효과가 생긴 것으로 사료된다.

6. 결 론

Cr-Mo강의 피로강도 향상을 목적으로 열화재, 열화를 회복시킨 회복재 및 레이저빔 조사재를 사용하여 경도실험, 잔류응력측정, 금속조직관찰 및 피로균열진전 시험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 비커스경도 실험결과 흡수에너지 밀도 $Q=10.44\sim10.61\ W\cdot sec/mm^3$의 레이저빔 조사재가 모재보다 약 2.2배 경도가 향상되었으며, 경화 깊이는 약 0.6 mm 경화폭은 4 mm정도 임을 알 수 있고, $Q=3.34\sim3.42\ W\cdot sec/mm^3$의 레이저빔 조사재는 경화깊이가 0.2 mm, 경화폭 1 mm정도로, 조사 에너지밀도에 따라 표면 경화층이 다르게 형성됨을 알수 있었다.

(2) 레이저빔을 열화재에 조사했을때 피로수명이 길어진 원인으로 생각되는 부분은 고온의 열원에 의한 표면 경화층이 마르텐사이트 상변태로 인한 압축잔류응력의 발생과 장기 사용에 따른 결정 입계에 편석된 불순물이 고온의 열원에 의해 확산되는 요인들이 복합적으로 작용하여 피로수명이 연장되었다고 사료된다.

(3) 레이저빔 조사재와 열화재, 회복재에 대해 동일조건에서 피로시험을 수행한 결과, 레이저 빔의 조사 방법에 따라 피로수명이 단축되는 경우도 있었으나, 적당한 흡수에너지를 주면서 조사하게 되면 수명이 연장되어 회복재와 같은 피로시험 결과를 얻을 수 있었다. 이는 레이저빔 조사방법에 따라 피로수명연장을 할 수 있는 가능성이 있는 반면에 레이저빔 조사를 잘 못할 경우 피로 수명을 현저히 감소시킬수도 있으므로 유의해야 할 부분이라고 생각된다.

(4) 레이저빔 조사시 레이저의 출력, 이동속도, 직경 또는 면적 등의 함수로 표시하여 조사시 에너지 밀도와 피로 수명 및 경도 등과의 관계에 대해 구체적으로 검토해 볼 필요가 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 1992년도 교육부 국제협력 연구지원으로 수행되었으며, 관계자 제위께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) J. F. Ready, 1978, *Industrial Application of Laser*, Academic Press, New York(I , II, III).

(2) 오 명, 강민호, 1987, "레이저 응용" 청문각, pp. 4~11.

(3) Pyutarou Jimbou, Masahisa Inagaki and Takeo Tamamua, 1981, "Laser Heat Treatment," *Japan Soc. Heat Treatment*, Vol. 21, No 5, pp. 223.

(4) Gasser, A., Hoffmann, D. Jansen, F., Kreutz, E. W., Lugscheider, E. and Wissenbach, K. 1981, "Remelting of Surface Coating on Steel by CO_2 Laser Radiation," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 45, pp. 409~416.

(5) Li Changchun, Zhou Yawen, Li Xiping and Li Guangxia, 1989, "A Fatigue Damage Evolution Law for Laser Beam Irradiated Cylindrical Specimens," *Int. J. Fatigue*, Vol. 11, 11 No. 3, pp. 183~186.

(6) Huang Peiyan, Li Changchun, Zheng Qiguang, Li Guangxia and Hao Lee, 1985, "Effect of Laser Beam Radiation on Fatigue Crack Growth Behaviour" *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct*, Vol. 8, No. 1, pp. 89~99.

(7) Nagashima, T. and Yamashita, K., 1991, "Improvement of Fatigue Damage Using Laser Treatment" *JSME*, Vol 57, No. 542, pp. 297~303.

(8) Sing, H.B, Coppley, S.M and Bass, M 1989, "Fatigue Resistance of Laser Heat-Treated 1045 Carbon Steel," *Metall Trans* 12A, pp. 138.

(9) Li Guangxia, Li Changchun, Huang Peiyan and Hao Lee, 1985, "Law of Creak Propagation of Metallic materials after Radiation by High Density Energy Flux," *Engineering Francture Mechanics*, Vol. 21, No. 5, pp. 969~976.

(10) Li Guangxia Li, Changchun Shaoxi Cai and Hao Lee, 1984, "Fracture Toughness Improent of Crack Tip by Irradiation with Electron Beam," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 20, No. 2, pp. 351~358.

(11) 北川英夫, 中曾根 祐司, 外 2名, 1984 "劣化材の 强度評價と 壽命 豫測の基礎研究," 日本機

械學會論文集A, 第51卷, 464號, pp. 1230~1234.
(12) Kwon, J. D., Nakasone Y. and Kitagawa, H., 1987, "A Reliability Approach to Fatigue Life Prediction of a Cr-Mo Steel Temper-Embrittled During Long Service," *JSME*, Vol. 36~408, pp. 927~933.

---

*대한기계학회논문집 제18권 제1호에 게재된 1993년도 논문심사위원 중 누락된 분들의 명단을 다음과 같이 추가로 게재합니다.

고승기 권태헌 김기태 김경웅 김승호 김송희 김영은 김재도 김호룡 김호영 김호철
김희술 김현진 김형의 김형종 김태룡 김태우 김태은 김태진 노병준 송진호 송재복
엄태봉 양상식 오상경 우종식 유정열 이귀영 이병무 이성근 이윤표 이영제 임윤철
박태학 전중환 정석주 정인석 정진택 최병륜 최성렬 최진민 최해진 홍용식