

Replica 법에 의한 X20CrMoV12.1강 용접부의 비파괴 평가

강계명[†] · 최중운
서울산업대학교 신소재공학과

Nondestructive Evaluation of X20CrMoV12.1 Steel Weldment by Replica Method

Kae Myung Kang[†] and Jong Un Choi

Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(2003년 12월 13일 받음, 2004년 1월 5일 최종수정본 받음)

Abstract In this study, the degree of creep damages on the weldment accelerated creep degradation was nondestructively evaluated by replica method. The frequency of creep cavities occurrence has been observed highly at the intercritical HAZ. The life fraction of weldment damaged by creep has shown from 0.25(damage grade : 2) to 0.75(damage grade : 4) when it ruptured. The degree of creep damages is considered to be evaluated by the metallographic replica method which is one of nondestructive evaluation methods.

Key words creep damages, replica method, weldment, HAZ

1. 서 론

발전설비의 대용량화와 고효율화는 기존의 보일러용 1Cr-Mo, 2.25Cr-Mo의 저합금강을, 고온강도가 우수하고 내식성이 향상된 9Cr-Mo, 12Cr-Mo의 고합금강으로 대체시켰다.^{1,2)} 그러나 내열·내식성이 우수한 고합금강이라 할지라도 고온·고압 조건하에서 장시간 사용에 따른 용접부의 열화현상은 발전설비에 국부적 손상과 함께 파손으로 이어져 발전설비의 안정성에 주요 문제로 제기되고 있다. 이에 따라 고온·고압 발전설비의 안전성과 신뢰성 평가에 사용 중 설비에 손상을 주지 않고 용접부를 평가할 수 있는 정량적 비파괴 평가기법의 확립이 중요 과제로 부각되고 있다.³⁾

한편 화력발전소의 보일러 고압증기관의 용접부등에 적용되는 비파괴적 손상 평가방법으로는 전기저항법, 경도 측정법, 입계부식법, 초음파시험법, 압입시험법 등이 있다. 그러나 이들 평가방법들은 평가부위가 제한적일 뿐만 아니라, 검사과정이 복잡하고 결과 도출에 장시간과 고비용이 소요되며, 측정변수에 따라 다양한 해석이 가능하고 평가의 신뢰도가 낮은 등 많은 문제점을 내포하고 있다. 이에 따라 평가기술 단점의 보완과 함께 검사의 간편성과 높은 정밀도 및 결과 해석의 신속성 뿐만 아니라, 열화의 진전과정도 추적 가능한 것으로 보고되고 있는 표면복제법에 관한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.^{4,5)}

더욱이 발전소의 보일러와 고압증기 배관의 용접부 건

전성 평가는 크립 손상평가와 크립 균열 성장 거동 해석에 관한 수명평가로 연구되고 있다.^{6,7)} 그러나 국내의 경우, 용접부 열화에 관한 표면복제법에 관한 연구는 거의 수행되지 않고 있으며, 특히 건설되고 있는 화력발전소의 고온·고압설비용 마르텐사이트계 X20CrMoV12.1강의 크립 손상에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 500 MW급 화력발전소의 보일러와 고압증기관에 사용되는 X20CrMoV12.1강을 SMAW(submerged arc welding) 용접하여 용접된 시료를 가속 크립 열화시켰다. 이들 가속 크립열화시킨 시료강 표면부의 미세조직을 현미경으로 관찰 조사하여, 이들 시험결과를 Replica 표면복제법을 이용하여 조사한 결과와 비교 검토하여, 크립 손상의 정도를 비파괴적 평가방법인 표면복제법으로 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 크립 시험

실험에 사용된 시험체는 DIN 17175의 규격에 규정된 X20CrMoV12.1강으로 화학적 조성은 Table 1과 같다. Table 1에는 SMAW 용접금속의 조성도 함께 나타내었다. 먼저 크립 시험용 시험편 제작을 위하여, 외경 $\phi 323.9$ mm, t 42 mm인 파이프에 Table 2와 같은 조건으로 SMAW 다층 용접하였다. 용접전과 후 200°C에서 각각 예열 및 후열처리하였다.⁸⁾

SMAW 용접부의 크립 시험편은 용접부 중 용접금속이 시험편의 평행부 중앙에 위치하도록 하여 용접된 시료를 채취하여, ASTM E139-(83) 규격의 크립 시험편으로 제

[†]E-Mail : littbird@snut.ac.kr

Table 1. Chemical compositions of X20CrMoV12.1 steel and filler metal (wt%).

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	w
Specimen Steel	0.2	0.28	0.69	0.012	0.001	11.32	0.83	0.42	0.27	-
Filler Metal	0.19	0.23	0.58	0.017	0.01	10.65	0.83	0.32	0.39	0.54

Table 2. Submerged arc welding conditions.

Filler Metal		Current (A)		Volts Range (V)	Speed Range (cm/min)	Welding Process	Root Gap (mm)
DIN Class	Size (mm)	Type	Range				
ECrMoWV12	3.2	DCRP	80~130	22~28	6~15	Manual	3

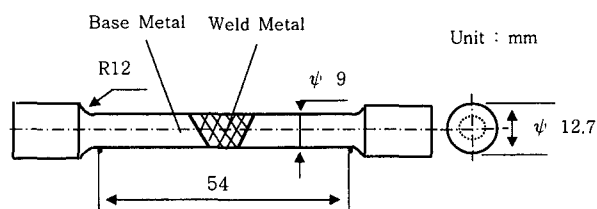
작하였으며, 이를 Fig. 1에 나타내었다.⁹⁾

한편 가속열화를 위한 크립시험은 Applied test system (주) model 2320의 크립시험기를 이용하여, Table 3과 같은 온도—하중—시간 조건하에서 크립시험하였다. 이들 크립시험의 온도, 응력 및 시간은 X20CrMoV12.1강의 크립파단 시험시간을 기준으로 하여 크립시험시간을 설정하였다.¹⁰⁾ 시험은 시험편의 평행부에 직접 열전대를 부착한 후, 각 시험편의 온도를 시험온도 $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위 내로 유지시키면서 100 MPa의 일정응력이 부가되도록 크립시험하였다.

2.2. 용접부 조직 및 Replica 조직

각 용접부의 용접부 조직과 일대일 대응시킨 Replica 복제조직의 비교 관찰을 위하여, 먼저 용접된 용접부의 미소경도를 측정하였다. 미소경도는 $\times 50$, 5 kg에서 비커스 경도계를 사용하여 0.1 mm 간격으로 미소경도를 측정하였다. 경도 측정 후, 각 용접부위의 압흔을 기준으로 용접부의 각 부위(용접금속, HAZ, 모재)를 확인하였으며, 이를 표면복제법의 Replica film 기준으로 활용하였다.

표면복제는 용접부 조직관찰이 끝난 시험편의 표면을 알코올을 사용 세척 및 건조시킨 표면에 acetate film을 아세톤에 적신 후, 밀착 및 고착시켜 표면을 복제하였다. 복제조직의 관찰성을 높이기 위하여 표면복제된 필

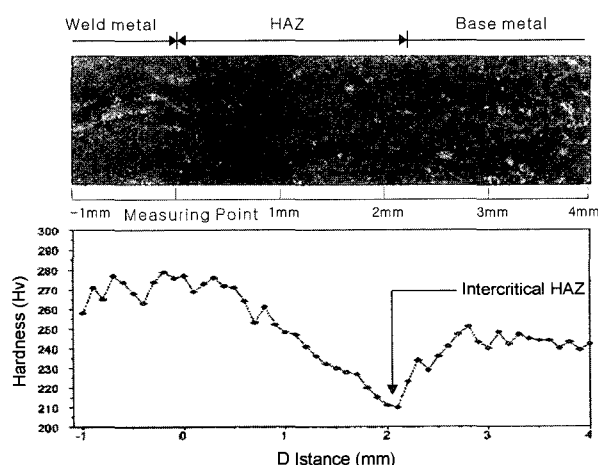
**Fig. 1.** The creep test specimen of welded joint.

름의 표면을 금도금하였다.^{11,12)} 현미경 조직 관찰은 경도를 측정된 부위를 기점으로 각 부위의 미세조직을 광학현미경과 SEM을 사용하여 관찰, 조사하였고, Replica 표면 복제조직 역시 광학현미경과 SEM을 사용하여 관찰 조사하였다

3. 결과 및 고찰

3.1. 용접부 조직

SMAW 용접시킨 X20CrMoV12.1강 용접부의 경도분포와 현미경 조직을 관찰한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Figure에서 볼 수 있듯이 경도분포는 Bond부에서 최고 경도인 Hv 268~277의 경도범위로부터 Bond로부터 멀어질수록 경도가 감소하는 것을 알 수 있다. 2.1 mm HAZ (intercritical HAZ)에서 Hv 210의 최소경도로서, 이후 모재로 갈수록 모재의 경도, Hv 240의 값으로 회복되는 현

**Fig. 2.** Measurement of microhardness and microphotographs of welded joint.**Table 3.** Creep test conditions for accelerated degradation.

Specimen	Temperature ($^\circ\text{C}$)	Stress (MPa)	Test Time (hrs)	Remark
#1	600	100	1,060	1/4 t_{rupt}
#2	600	100	2,121	1/2 t_{rupt}
#3	600	100	3,182	3/4 t_{rupt}
#4	600	100	4,243	Rupture

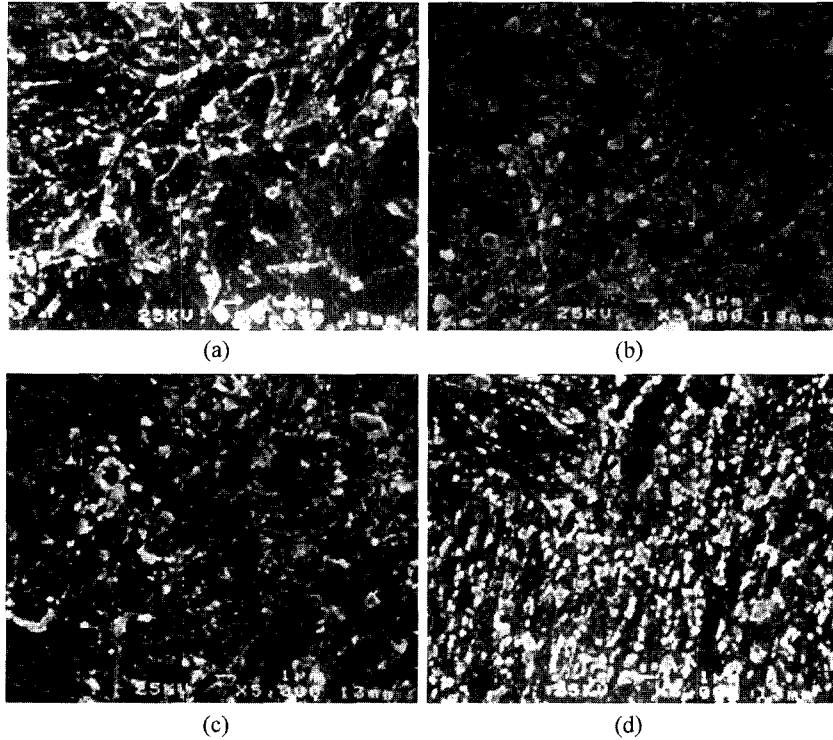


Fig. 3. SEM micrographs of intercritical HAZ by the replica (×5,000) at (a) 1,060 hrs (b) 2,121 hrs (c) 3,182 hrs and (d) 4,243 hrs.

상으로 나타났다. 이는 후판 용접부 경도분포와 일치하는 결과로서, Bond의 경우 결정입도의 조대화에 따른 최대 경도를 보이며 입열량 냉각조건에 따라 용접금속으로부터 멀어질수록 즉 모재에 가까운 HAZ로 갈수록 경도가 감소하는 것을 알 수 있다.

특히 본 실험의 2.1 mm HAZ는 A1 온도구역으로서, 고탄소강 열처리시 나타나는 탄화물의 구상화 현상과 함께 조직의 연화에 기인한 경도의 변화로 생각할 수 있다. 이의 구상화 조직특성을 Fig. 3의 SEM 사진에 나타내었다.

3.2. 크립 표면조직과 Replica 표면조직

가속 열화시킨 크립 표면조직과 Replica 표면조직을 각각 대비시켜 조사하기 위하여, 먼저 가속 열화시킨 용접부 표면조직을 관찰한 사진을 Fig. 4에 나타내었다. 사진에는 크립시간에 따른 용접 각 부위(기지조직, HAZ, 용접금속)의 표면조직 사진이다. 크립시간이 1/4 t_{rup}(1,060 hrs)에서 3/4 t_{rup}(3,182 hrs)로 증가함에 따라 조직내 기공의 수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 기공수의 증가와 더불어 기공의 직경 역시 커지는 것을 알 수 있다. 한편 용접부내 기공의 발생은 용접금속에 비하여 HAZ에서 더욱 확연하게 관찰되었고, 이는 HAZ가 크립 열화에 의한 민감한 구역임을 알 수 있다. 따라서 HAZ의 기공으로서 열화의 정도를 평가할 수 있는 것으로 생각되고, 본 연구의 열화평가는 HAZ의 기공으로 평가하였다.

Fig. 5는 크립시험된 HAZ의 크립시간에 따른 용접부 표면 광학현미경사진이다. 사진에는 비커스 경도의 압흔

과 깊은 부분으로 나타나는 기공을 볼 수 있다. 또한 Replica 처리된 용접부 복제표면조직사진은 Fig. 6으로서, 앞서 Fig. 5와 비교하여 보면, 표면복제에 기인한 조직의 변화는 적은 것을 알 수 있다. 이는 Replica 처리된 복제조직사진으로도 시료강의 조직특성의 평가가 가능한 것으로 생각할 수 있다. 따라서 원 표면조직과 Replica 처리된 복제조직사진으로부터 각각의 크립 기공면적과 직경 및 기공수를 측정하여 크립시간에 따른 경년열화의 정도를 정량화하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4는 크립 시험시킨 시험편의 표면조직과 Replica 처리된 시험편 표면조직으로서 조사된 기공의 면적과 직경 및 기공수를 나타내고 있다. 두 표면조직의 조사결과는 거의 일치하는 것으로, 크립시간이 길어짐에 따라 기공면적과 직경 및 기공의 수 모두 증가하였다. 즉 기공면적의 경우 최대 7% 오차범위내에서 4,243시간의 크립 파단시간의 경우에는 1% 이하 범위내로 일치함을 알 수 있었다. 이는 기공 직경과 기공수의 경우와도 비슷한 경향을 보여, Replica로서 경년열화의 평가는 정밀도를 지닌 재료 열화의 비파괴 평가수단임을 확인할 수 있었다.

3.3. 기공 정량화

이들 크립 열화손상의 정도를 수명소비율(life consumption rate)로 비교 검토하여 보았고, 수명소비율과의 관계를 Neubauer 방법과 ERA법으로도 비교 평가하여 Table 5에 나타내었다. Table에서 볼 수 있듯이 크립기공이 발생하기 시작하는 시기는 시간에 따라 다르지만, 크립시험편 중에서 0.25의 수명소비율에서도 크립기공이 관찰된 것으로 보아 수명의 초기에서부터 크립기공이 발생함

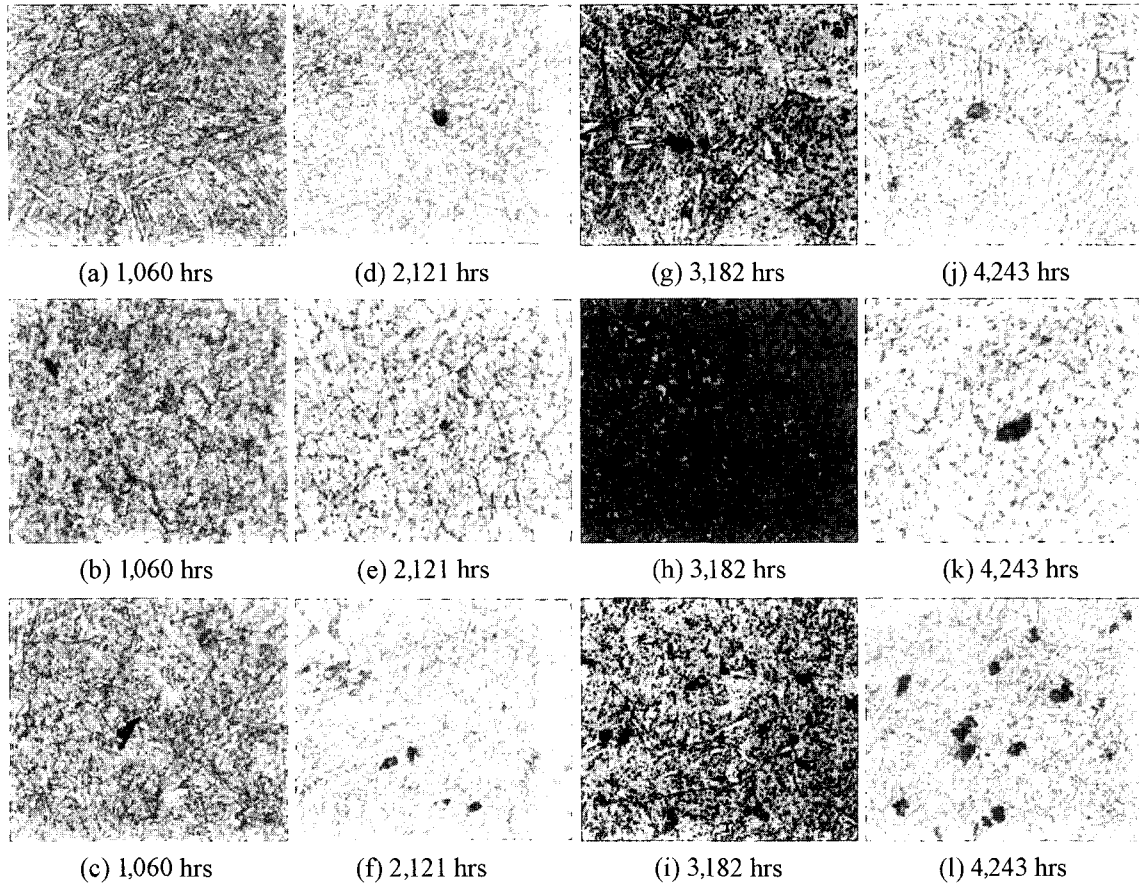


Fig. 4. Optical micrographs of (a)(d)(g)(j) base metal, (b)(e)(h)(k) weld metal and (c)(f)(i)(l) intercritical HAZ ($\times 500$).

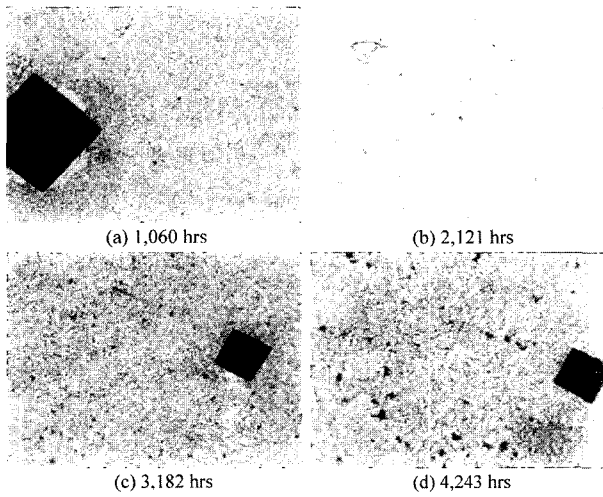


Fig. 5. Optical micrographs of HAZ with creep test.

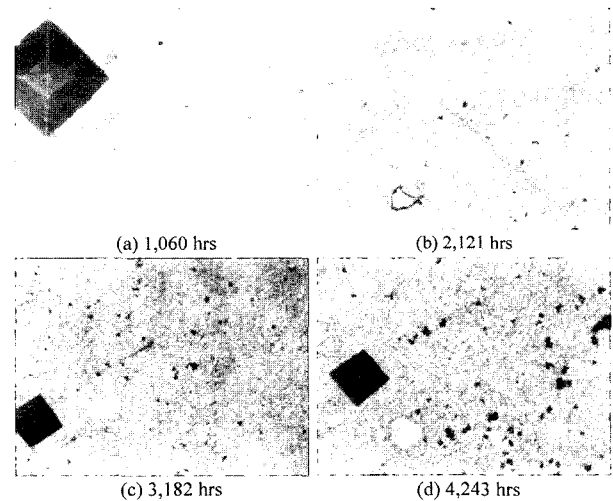


Fig. 6. Optical micrographs replicated by Fig. 5.

Table 4. Area fraction of cavity, average diameter and the number of cavity on the each specimen.

Creep Time (hrs)	Result		Area of Cavity (%)		Average Diameter of Cavity (mm)		Number of Cavity (n/0.25 mm ²)	
	Replica	Specimen	Replica	Specimen	Replica	Specimen	Replica	Specimen
1,060	0.22	0.19	0.0024	0.0023	15	15		
2,121	0.43	0.39	0.0043	0.0041	40	40		
3,182	1.38	1.35	0.0056	0.0054	48	47		
4,243	2.58	2.55	0.0087	0.0085	64	63		

Table 5. Creep damage evaluation by the replica method

Creep Time (hrs)	Classification of Creep Damage		Creep Life Consumption Rate (%)
	Neubaur	ERA	
1,060	1	A	0.00~0.27
2,121	2	B	0.04~0.46
3,182	3	C	0.30~0.65
4,243	4	D	0.30~0.84

을 알 수 있다. 크립기공이 수명의 초기에 발생되므로 용접부의 크리프 수명평가를 위한 방법으로 크립기공을 정량적으로 계산함으로써 수명평가가 가능한 것으로 생각된다.

한편 기공수는 크립 수명소비율에 따라 측정된 기공수는 매우 분산되어 있고, 크립 수명소비율에 따라 증가하는 경향도 매우 불규칙적이다. 이와 같은 이유는 크립 손상이 진행될수록 크립 기공은 계속 증가하지만 손상정도가 심해지면 인접한 기공사이에 합체가 일어남으로써 전체 기공수는 새로 발생하는 기공수와 합체됨으로써 줄어드는 기공수가 서로 상쇄되어 별로 증가하지 않거나 오히려 감소할 수도 있다. 따라서 크립 손상평가를 위한 파라미터로서는 상대적으로 가장 신뢰성이 낮은 것으로 판단되었다.

4. 결 론

SMAW 용접된 X20CrMoV12.1강 용접부의 가속된 크

립열화에 따른 표면복제법의 비파괴적 평가로부터 다음과 같은 결론을 얻었다. Replica 표면복제법과 원 표면조직과의 기공측정결과는 평균직경과 면적을 및 기공수에서 최대 7% 이하의 오차범위내에 존재함을 알 수 있었다. 또한 크립 열화조직과 표면복제법에 의한 복제조직의 대비는 상호 일치하는 연구결과는, 표면복제법으로 용접부 크립 손상에 대한 재료의 열화현상을 평가할 수 있는 것으로 사려된다.

참 고 문 헌

1. S. H. Hong and K. S. Kim, Journal of The Korea Welding Society, **16**(4), 1 (1998).
2. S. H. Jung, Journal of The Korea Welding Society, **13**(2), 1 (1995).
3. J. S. Ha, KRC-93G-S05, 11-50 (1994).
4. H. M. Lee, KRIS-98-081-ET, 1-63 (1998).
5. K. Y. Kim, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, **19**(2), 129 (1994).
6. Vassil Bojinov, Scandinavian Journal of Metallurgy, 214-220 (1989).
7. Karl Kussmaul, Steel Research, **62**(2) 83-85 (1991).
8. Karl Kussmaul, nuclear Engineering and Design, **72**(1), 1-2 (1982).
9. ASTM E139, Standard Practice for Conducting Creep Creep-Rupture and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials, (1983).
10. G. KALWA, Nuclear Engineering and Design, **84**(2), 87-95 (1985).
11. ASTM E1351, Standard Practice for Production and Evaluation of Field Metallographic Replicas, (1990).
12. K. B. Un, KRIS-SRG-9402, 3-85, 95-127 (1994).