

입계부식법에 의한 고온플랜트 요소의 크리프 잔여수명 평가

윤기봉*, 한상인**, 강태연**, 박종진***

중앙대학교 기계공학부*, 한국가스안전공사**, 한국중공업 기술연구원***

1. 서론

고온플랜트 설비 고온요소의 재질열화 정도를 평가하기 위해서 사용되는 방법 중 입계부식법은 시험절차가 간단하고 실제 플랜트에서의 적용이 용이하여 안전 및 수명진단시에 많이 이용되어 왔다[1][2][3].

본 논문에서는 오랜 기간 고온에서 사용된 고온·고압플랜트의 실기 요소에 입계부식법을 적용하여 재질의 고온에서의 장시간 노출에 의한 인성저하로 발생되는 잔여수명을 평가한 결과를 제시하였다. 실제 고온에서 운전되는 요소의 열화도 측정을 위한 변수로서는 입계부식법으로 측정된 격자절단비(N_i/N_o)를 사용했다. 격자절단비는 표면을 나이탈 부식했을 때의 격자수에 대한 피크린산으로 5분 부식했을 때의 격자수의 비율로 정의된다. 또한, 실험실에서 열처리된 시편으로부터 측정된 격자절단비와 Larson Miller Parameter와의 상관관계를 사용하여, 장시간 가동한 고온플랜트 요소에서 측정된 격자절단비로 잔여수명을 평가할 때의 고려사항을 기술하였으며, 고온요소의 신재 및 가동후 폐기하여 채취한 시편의 크리프파단시험을 통한 수명과 실제 고온요소의 수명예측에 격자절단비를 적용하였을 때의 크리프 잔여수명과 비교를 논의하였다.

2. 실험 및 결과

2-1. 재료 및 시편

실험재료는 고온요소의 내열부재로서 사용되는 2.25Cr-1Mo강이며 화학성분은 Table 1과 같다. 이 강을 대상으로 장시간 사용되어 열화된 실기부재와 유사한 미세조직을 얻기위해서 일반사용온도(500~538℃)보다 높고 뜨임온도보다 낮은 온도(630℃)에서 등온노화열처리(Isothermal aging heat treatment)를 행하였다 [4][5]. Table 2는 신재에 대한 기계적 성질을 보인 것이다.

2-2. 입계부식시험 방법

본 연구에 사용된 시험은 격자절단비를 정량화하기 위해서 5분 입계부식시험과 나이탈 부식 시험을 행하였다. 5분 입계부식시험을 위해 사용된 표준부식액은 증류수를 100℃에서 충분히 가열하여 탈기한 후, 냉각하여 25℃에서 증류수 100cc에 피크린산 1.3gr을 용해시키고 여기에 계면활성화제인 sodium tridecylbenzen sulfonic acid 1gr을 용해시켜 제작하였다. 나이탈 부식액은 알콜 95%에 질산 5%를 첨가한 용액을 사용하였다.

시험편은 표면을 #1500까지 습식연마한 후, #6μ #1μ의 순서로 diamond paste를 사용하여 연마하였다. 격자수측정판을 이용하여 각각에 대해서 교차된 격자수를

계산하고 격자절단비(Ni/No)를 구한다⁽⁸⁾.

2-3. 입계부식법의 실기 적용시험법

실기적용시험은 인위적으로 모의열화시킨 재료로 정량적으로 측정된 입계부식법의 격자절단비를 사용해서 얻은 master curve를 가동중의 고온고압하에 장시간 사용한 부재에 대해 적용했을때, 그 적용 타당성을 검토하기 위해서 실시하였다.

적용시험 대상설비는 현재 가동중의 국내의 화력발전설비, 원유정제·석유화학설비로서 사용시간이 약 10~20만 시간 이상의 이력을 갖고있는 고온요소중 Cr-Mo강을 주로 사용하는 주증기관, 과열증기관, 반응기 및 고온 압력용기에 대해서 실시했다. 대상설비 및 이력은 Table 3과 같다.

적용시험의 개략적인 방법은 다음과 같다.

먼저 열화진단 및 수명평가 필요한 중요요소 및 취약부위를 선정한다. 선정된 부위의 스케일(scale)을 제거하기 위해 연삭(grinding)한다. 스케일 제거된 부위를 이동식 연마기를 이용하여 수지연마지로 #100~#1200까지 연마한다. 연마된 부위의 표면을 다이아몬드 연마제(diamond paste)를 이용하여 6 μ m, 1 μ m 순으로 연마하여 경면상태를 유지시킨다. 5% 나이탈 부식액을 이용하여 부식시킨다. 실기의 시편채취는 불가능하므로 부식된 부위를 표면복제용 필름을 이용하여 조직을 복제한다. 표면복제필름을 부착한 후 약 5분이 경과한 후, 조직복제필름을 떼어 보관하고 부식된 부위를 #400~1 μ m까지 다시 연마하여 부식면을 제거한다. 연마된 면에 입계부식을 위한 표준부식액으로 5분 부식을 행한다. 부식된 부위를 같은 방법으로 표면복제한다.

3. 시험결과 및 고찰

3-1. 시효시간에 따른 격자절단비의 변화

Fig. 1은 2.25Cr-1Mo강에 대해 피크린산 표준액을 사용하여 5분 입계부식 시험후에 측정된 격자교차수를 시효시간에 따라 나타낸 것이다. 5분 표준액부식의 경우에는 시효시간이 증가하여 재료가 열화된 입계의 출현량이 점차적으로 증가하는 반면, 나이탈부식의 경우는 시효시간과 관계없이 거의 일정한 입계출현량을 나타냄을 알 수 있다. 즉, 등온노화열처리재에서 열화시간의 증가에 따라 입계에 탄화물과 불순물이 편석되고 그 양도 증가하며, 이를 표준부식액으로 5분 부식후 측정된 격자교차수로 표시할 수 있음을 보이는 것이다. 또한 나이탈 전면부식의 출현된 입계수가 거의 일정한 값을 나타내는데, 이는 재질의 열화정도와는 관계없이 재료의 원래 입계특성을 나타내는 것이므로 이 값으로 5분 입계부식의 격자교차수를 무차원화(normalizing)한 격자절단비를 사용하여 재질열화도를 정량화 할 수 있을 것이다.

3-2. 격자절단비와 Larson Miller 변수와의 관계

Fig. 2는 2.25Cr-1Mo강의 격자절단비와 LMP와의 관계를 나타낸 것이다. 크리프 파라미터로서 널리 사용되는 Larson Miller Parameter(LMP)는 온도와 사용시간에 따른 재료열화도를 나타내는 파라미터로서 $LMP \times 10^3 = (T+273)$

$\times (20 + \log t)$ 로 표시된다. 이때 사용온도 T 는 시효온도인 630°C , 시간 t 는 등온 노화열처리재 시효시간을 대입하였다. 그림에서도 알 수 있듯이 데이터의 산포가 적고 2.25Cr-1Mo강의 경우 각각 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$N_i/N_0 = 11.543(\text{LMP})^2 - 1.277(\text{LMP}) + 0.03654 \quad (1)$$

식(1) 또는 Fig. 2에 나타낸 관계식을 이용하면 고온플랜트 요소에서 격자절단비값을 측정함으로써, 측정값으로부터 고온요소의 그 때까지의 사용시간 또는 운전온도 등을 평가할 수 있을 것이다. 또한 격자절단비를 측정하면 측정당시의 재질열화정도를 알게 되어 향후 사용시간이나 사용온도에 따른 열화진행속도를 예측할 수 있게 된다. 이를 이용하여 고온 요소의 잔여수명을 평가할 수 있다.

3-3. 입계부식법의 실기 적용

위에서 설명한 입계부식법(GEM)을 실기에의 적용시험 목적은 실험실에서 인위적으로 등온노화열처리한 재료의 입계부식데이터에 근거해서 유도해낸 격자절단비와 LMP의 관계가 고온고압하에서 장시간 사용된 부재에 대해서도 적용되는지 확인하기 위해서이다.

실제 적용시험은 가동중인 원유정제, 석유화학플랜트 및 노후 화력발전소의 보일러 헤더 및 주 증기관 등의 고온부재에 대해 정기정점 기간중 현장에서 격자절단비를 측정함으로써 행하였다. 측정결과는 Table 4에 보인 바와 같다. 석유정제, 석유화학플랜트 요소 및 발전소 요소재료의 구성성분은 Cr-Mo강의 경우 2.25Cr-1Mo강의 성분과 꼭 일치하지는 않았으며, 2.25Cr-1Mo강, 1.25Cr-0.5Mo강 등으로 구성되어 있으나 이들 모두에 대해 적용시험을 실시하였다.

Fig. 3은 Table 4의 결과를 각각 Fig. 2의 회귀선에 함께 표시한 것이다. 기호 “-”는 앞절에서 설명한대로 등온노화열처리재에서 측정한 격자절단비를 나타낸 회귀선이며 각각의 기호는 고온 실기에서 측정한 값을 나타낸다. 그림에 보인 바와 같이 등온노화열처리재의 데이터 회귀선에 적용시험의 측정값들이 잘 일치하고 있다.

Fig. 3에서 기준 회귀선으로부터 평가된 LMP보다 실제요소의 LMP가 약간 높게 나타났다. 이 이유는 기준선도의 측정은 시료로부터 직접관찰된 것이고 요소에서 측정된 값은 표면복제후 필름을 관찰함으로써 평가되므로 여기서 오는 오차일 수 있으며 응력과 온도의 차이로 생각된다. 평가에 큰 오차는 없으나, 이 점에 대해서는 향후 더 연구할 필요가 있다.

이상의 결과를 종합하여 볼때, N_i/N_0 와 LMP의 관계를 이용하면 실기요소의 연차적인 열화의 진행상황을 알 수 있으며 이로부터 잔여수명을 추정할 수 있다.

4. 결론

등온노화 열처리한 2.25Cr-1Mo강을 대상으로 하여 재료의 열화도 평가의 비파괴적인 방법인 입계부식법의 격자절단비를 이용하여 고온부재의 잔여수명 및 열화 진행 정도의 정량적인 평가과정에 대해 연구하였으며, 이를 현재 가동

중에 있는 고온요소에 대해서 적용시켜본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 등온노화 열처리한 2.25Cr-1Mo강에 대해 입계부식을 적용한 결과 격자절단비와 LMP는 선형적인 상관관계가 성립하고, 고온에서 10~25년 사용된 실기에서 측정된 데이터를 회귀선에 대입한 결과 산포가 크지 않음을 알 수 있었다.
- (2) 격자절단비와 LMP의 회귀선에 의하여 사용온도나 사용시간을 추정할 수 있으며, 실기요소의 열화의 진행상황으로부터 잔여수명을 추정할 수 있다.

5. 참고 문헌

- [1] 野方 文雄, "粒界腐食法によるプラント用高温部材の経年劣化評價法について", HIAKAI. KENSA(J.NDI) Vol.36 No.8 1987
- [2] 野方 文雄, "粒界腐食法によるタービンロータの経年劣化評價法について", J. of the Japanese soc. for strength and fracture for materials, Vol. 23, No.3, pp83-92, 1988
- [3] 김정기, "高温機器部材의 経年材質劣化 評價에 관한 研究", 全北大學校 博士學位論文, 1993
- [4] Abdel-Latif. A. M., Corbett. S. M., Sidey. D. and Taplin D. M. R., "Effect of micrstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2-1/4Cr-1Mo Steel", Fifth Canadian Conference on 'Fracture', pp. 1613~1620, 1981.
- [5] Abdel-Latif. A. M., Corbett. S. M. and Taplin D. M. R., Metal Science, Vol.16, pp.90-96, 1982.
- [6] 渡邊 豊, "耐熱鋼の経年的材料損傷とその電氣化學的 非破壊計測.評價手法の開発に關する研究" 平成3年1月

Table 1 Chemical composition for the tested 2.25Cr-1Mo steel(wt.%)

Elements	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
%	0.13	0.01	0.42	0.02	0.29	0.12	2.23	1.12	-

Table 2 Mechanical properties

Yield strength (kgf/mm ²)	Ultimate tensile strength(kgf/mm ²)	Elongation(%)	Vickers Hardness(5kgf)
31.2	52.7	28.8	122

Table 3 Petroleum · chemical, Power Plant Components and their operation history for on-site measurements using grain boundary etching method

PLANTS	LOCATION	운전온도 (°C)	가동시간 (hr)	Material
A정유	Knock out drum	427	8,000	Cr-Mo
B정유	Soaker	470	40,000	
C석유화학	Reactor	460	180,000	
D화학	Hot shift conveter	482	140,000	
A화력 1호기	Bend superheater outlet	515	151,000	
A화력 2호기	Rear butt weld	480~500	183,000	
B화력 1호기	Main steam line terminal weld	523	174,000	
C화력 2호기	Super heater inlet header	538	100,000	

Table 4 Results of on-site GEM measurements at several domestic petroleum · chemical plants and power plants

PLANTS	LOCATION	LMP × 1000	N _i /N _o
A정유	Knock out drum	16.73	0.21
B정유	Soaker	18.28	0.33
C석유화학	Reactor	18.50	0.49, 0.51
D화학	Hot shift conveter	18.93	0.54
A화력 1호기	Bend superheater outlet	19.72	0.51
A화력 2호기	Rear butt weld	19.53, 19.91	0.42, 0.53
B화력 1호기	Main steam line terminal weld	20.90	0.73, 0.77
C화력 2호기	Super heater inlet header	20.28	0.53, 0.57

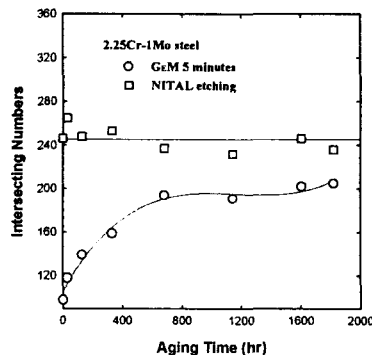


Fig.1 Variation of intersecting number ratio with aging time

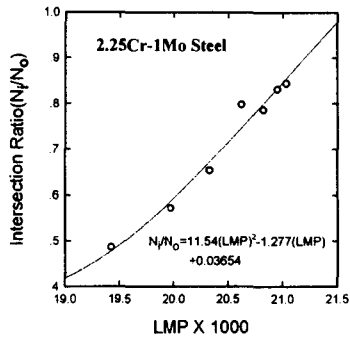


Fig. 2 Relation between intersection ratio and Larson Miller parameter for 2.25Cr-1Mo steel.

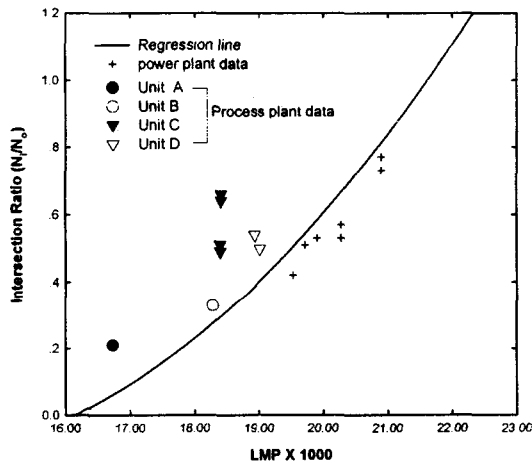


Fig. 3 On-site measurement results for 2.25Cr-1Mo steel.