

SS 400 일반 구조용 압연 강재의 재질열화에 관한 연구

백운봉 · 박종서 · 김대룡* · 김호연*

한국표준과학연구원 환경안전계측연구센터 · *에너지관리공단 검사지원실

1. 서론

보일러는 관리 주체에 따라 구분하면 크게 산업용 보일러와 발전용 보일러로 나눌 수 있다. 발전용 보일러는 한국 전력의 5개 자회사에서 운전 및 관리를 담당하고 있고, 설계조건이 통일되어 비교적 체계적으로 연구 되고 있으나 산업용 보일러의 경우 운전 및 관리가 개별적으로 나뉘어있고 그 운전조건이 다양하여 체계적인 연구가 이루어지지 못한 실정이다. 그럼에도 불구하고 1978-2003년 사이 우리나라에서 발생한 산업용 보일러의 사고는 총 89건으로 223명의 사상자가 발생하였으며 사망자수는 54명에 이른다.⁽¹⁾ 따라서 노후화된 산업용 보일러 설비에 대한 정밀 진단 및 평가가 반드시 이루어져야 한다. 발전용 보일러의 경우 정밀진단 및 수명평가를 위해서 국내·외에서 많은 연구가 이루어 졌으며 1993년부터 국내기술로 노후 화력발전설비를 대상으로 정밀 진단 및 수명평가⁽²⁾를 수행함으로써 사고빈도를 줄이고 점검주기를 늘렸으며, 또한 사용 수명을 연장하고 있다. 이는 그동안 발전설비의 수명평가 기술 분야에 많은 투자와 연구가 수행되었기 때문이다. 그동안 산업용 보일러에 대한 주기점검은 체계적으로 잘 수행되고 있다. 그러나 대부분 육안점검에 그치고 있으며, 과학적이고 객관적인 관리가 절실하다 하겠다. 본 논문에서는 산업용 보일러 재질인 SS 400 강에 대하여 모사 시효 열처리를 통하여 1만 시간부터 15만 시간까지 사용재를 모사하였다. 이들 각 시효 시간별 재료에 대한 금속조직변화, 경도변화, 인장강도변화 그리고 충격실험을 통한 취성-연성 전이온도변화를 관찰하여 SS 400 강에 대한 수명평가 및 사고원인분석의 객관적인 기초 자료로 활용코자 한다.

2. 실험방법

2.1. 실험재료 및 시험편

국내 산업용 보일러의 설계조건현황을 보면 점검대상 전체 보일러의 53.4%가 압력 1 MPa, 온도 179 °C에서 운전되고 있다.⁽³⁾ 따라서 본 연구에서는 압력 1 MPa, 온도 179 °C에서 운전되는 노통 연관식 보일러의 노통에 주로 사용되는 KS D 3503 SS 400 열간 압연강 으로서 두께 14 mm 판재를 사용하였으며 화학성분은 Table 1에서 보는바와 같다. 시험편은 압연방향을 따라서 가공하였다.

Table 1 Chemical composition of KS D3503 SS400 steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Fe
wt. %	0.1581	0.222	0.67	0.020	0.005	Bal

2.2. 시효열처리

실제 보일러에서 장시간 사용된 재료를 입수한다는 것이 사실상 어려우므로 열화재와 유사한 미세조직을 갖는 시험편을 얻기 위해서 Fe의 자기확산에 필요한 활성화 에너지산출에 근거하여 사용온도 (179 °C) 보다 높으나, 뜨임온도보다는 낮은 온도인 199 °C에서 가속 열처리 한 후 공냉하여 고온 장기 사용재의 미세조직을 시뮬레이션하였다. 노화시간은 Fe의 자기확산에 필요한 활성화 에너지에 근거하여 계산하였다.

Abdel-Lafit 등⁽⁴⁾은 2.25Cr-1Mo강을 가속 열처리하여 장시간 사용재와 유사한 미세조직과 역학특성을 갖는 인공 시효재를 만들었다고 보고하였다. 이들은 Fe의 자기확산에 필요한 활성화 에너지를 이용하여 시뮬레이션에 필요한 시간을 결정하였다. 즉

$$D_1 = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT_1}\right) = \frac{Const}{t_1} \quad (2.1)$$

$$D_2 = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT_2}\right) = \frac{Const}{t_2} \quad (2.2)$$

이며, $D_1 = D_2$ 이다. 식 (2.1), 식 (2.2)로 부터

$$t_2 = t_1 \exp\left[\frac{Q}{R}(T_2^{-1} - T_1^{-1})\right] \quad (2.3)$$

의 관계식이 성립한다. 여기에서 R은 기체상수이고, T는 온도(°K), Fe의 자기확산에 필요한 활성화 에너지, Q는 약 65 Kcal/mol이다. 따라서 열화시간에 따른 가속 시효열처리 시간을 계산하면 Table 2에 보는바와 같다.

2.3. 금속조직관찰 및 경도 측정

열화 시간별 금속조직의 변화를 관찰하기 위하여 각 열화시간 마다 시험편을 문헌⁽⁵⁾의 절차대로 표면 처리하여 광학현미경을 이용하여 관찰 하였다. 금속 조직관찰이 끝난 시험편에 대해서 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 시험하중 1 kgf, 유지시간 10 초로 10회 측정하여 그 평균값을 구하였다.

2.4. 인장시험

인장시험은 상온과, 사용온도 179 °C, 고온에서 실시하였다. 상온인장시험은 5 ton 만능재료시험기를 이용하였으며, 직경은 6.25 mm의 환봉시험편에 표점거리 25 mm인 연신율계를 부착하였고 ASTM E8에 준하여 실험을 실시하였으며, 실험 속도는 0.3 mm/min 변위제어 방식으로 실험하였다. 고온 인장시험은 ASTM E21에 준하여 실시하였다. 저항식 전기로를 이용하여 179°C로 가열한 후 5시간 이상 유지하고 실험하였다. 직경은 6.25 mm의 환봉시험편에 표점거리 25 mm인 고온용 연신율계를 부착하였으며, 실험 속도는 0.3 mm/min 변위제어 방식으로 실험하였다.

2.5. 충격시험

충격시험은 각 열화조건에 따라 10개씩 시험편을 가공하였으며, 전산화된 계장화 사르피 충격시험기를 이용하여 각 시험편에 따라 시험온도를 변화시켜 가면서 ASTM E23에 의해 충격시험을 실시하였다. 실험온도는 -200 ℃에서 200 ℃까지로 하였으며, -200 ℃에서 0 ℃에서는 액체 질소와 알코올을 혼합하여 원하는 온도를 만들었고 설정온도에서 적어도 10분 이상 유지한 후 실험하였다. 상온 에서 200 ℃사이에서는 silicon oil을 사용하여 시험편 온도를 유지시켰다. 본 연구에서는 신재 및 4만 시간, 10만 시간 그리고 15만 시간 열화제에 대한 천이온도를 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 금속조직 관찰 및 경도측정

고온, 고압에서 사용되는 저합금강의 경우 열화 정도를 크리프 기공 유.무 와 미세조직구조의 변화 2가지로 나누어 평가하고 있다⁽⁶⁾. 그중에서도 미세조직구조의 경우 저합금강이 고온, 고압에 오래 동안 노출되어 있으면 초기 페라이트(Ferrite)와 펄라이트(Pearlite)구조로 되어 있던 미세조직이 탄화물이 구상화 되면서 입계로 석출되고 더욱 열화가 진행되면 펄라이트 구조가 구상화 되면서 종국에는 전체 기지조직에 구상화된 탄화물 입자가 고루 분산되어 분포하게 된다⁽⁷⁾. 이러한 금속의 미세조직 관찰을 통하여 고온 설비의 수명을 정성적으로 평가 할 수 있다.

따라서 본 연구에서도 SS 400 강이 열화정도에 따라서 미세조직이 어떻게 변화 하는지를 관찰하고자 신재로부터 15만 시간 시효 열처리한 열화제의 금속 조직을 관찰하였다. 금속 조직관찰 간격은 신재를 비롯하여 2만 시간, 4만 시간, 8만 시간, 10만 시간 그리고 15만 시간 등 각 시효 시간에 따라 실시하였다. 금속 조직관찰 결과 Fig. 2의 (a)와 (b)에서 보듯이 신재와 열화제간의 구분은 분명하였다. 그러나 Fig. 2의 (b)와 (c), (c)와 (d), 그리고 (d)와 (f)에서 보듯이 각 열화 시간별 금속조직에서는 구상화된 탄화물석출 등 두드러진 변화를 관찰할 수 없었다.

또한 저합금강의 경우 고온, 고압에 오래 노출되어 있으면 경도값의 저하를 가져온다⁽⁸⁾. 본 연구에서는 열화 시간에 따른 경도값의 변화를 관찰 하기위하여 신재를 비롯하여 9개의 열화 시간에 대해 경도값을 측정을 하였다. 경도 측정결과 Fig. 3에서 보는 것과 같이 1만 시간 열화제에서 경도값의 급격한 상승을 관찰할 수 있었다. 그러나 3만 시간 열화제에서 안정한 상태를 보였으며, 이후 15만 시간 열화제까지 큰 변화를 보이지 않았다.

Table 2 Compare of degradation time vs simulation aging heat treatment time

열화시간 (× 1,000 hr)	20	40	60	80	100	150
모사열처리 시간(hr)	930	1,860	2,789	3,719	4,648	6,972

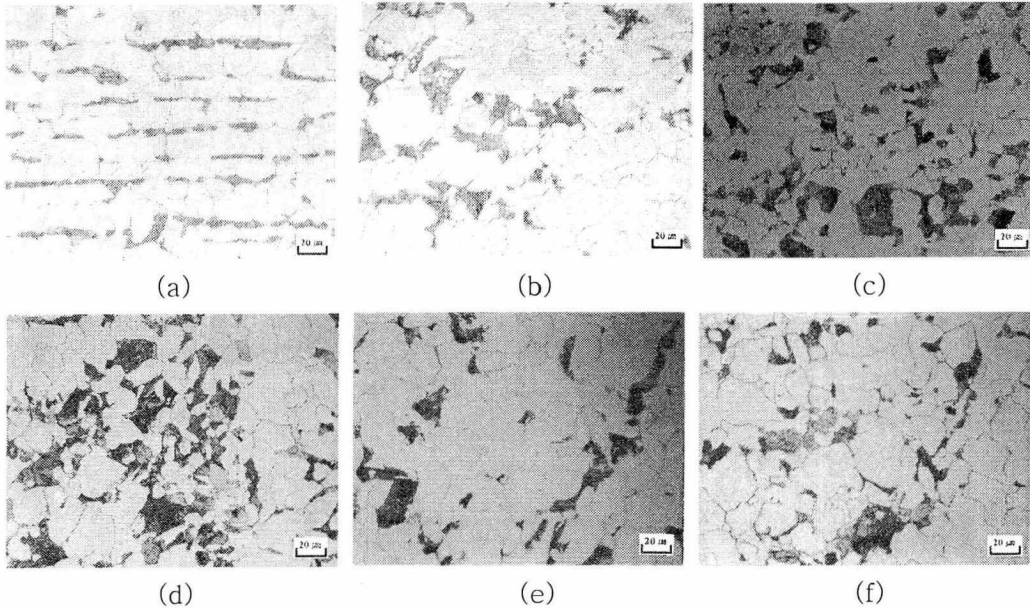


Fig. 2 Optical micrographs of SS 400 plate with simulated degradation time : (a) As Received, (b) 20,000 hr, (c) 40,000 hr, (d) 80,000 hr, (e) 100,000 hr and (f) 150,000 hr.

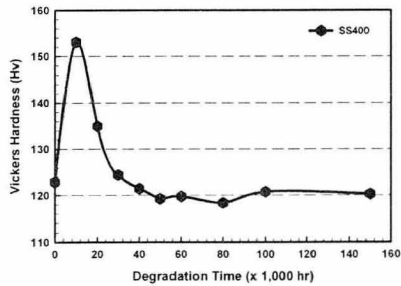


Fig. 3 Vickers hardness test results of SS400 plate with simulated degradation time

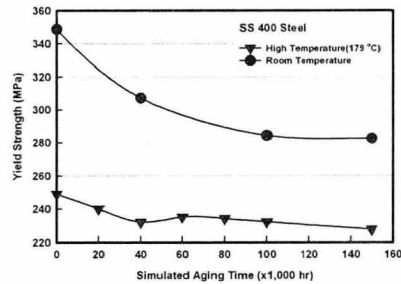


Fig. 4 Yield strength of SS 400 steel at room and high temperature condition with degradation time

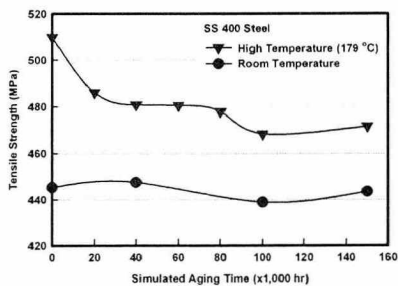


Fig. 5 Tensile strength of SS 400 steel at room and high temperature condition.

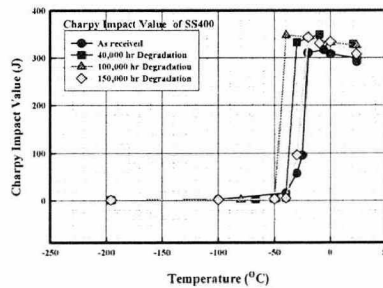


Fig. 6 Ductile to brittle transition temperature of SS 400 steel with degradation time.

3.2. 인장시험

인장 시험은 상온과 고온으로 나뉘어 실시하였다. 상온 인장 시험은 신재와 4만, 10만, 15만 시간 열화재에 대하여 항복응력과 인장강도를 측정하였다. 179 °C에서는 신재 및 2만, 4만, 6만, 8만, 10만 그리고 15만 시간 열화재에 대해서 실험하였다. 실험 결과 항복강도의 경우 Fig. 4에서 보는바와 같이 상온에서의 항복강도가 고온에서보다 높게 나타났다. 상온 항복강도의 경우 10만 시간 열화재가 66 MPa 정도 감소하였다. 그러나 고온 항복강도의 경우 상온 항복강도에 비해 감소 폭이 낮았다. 그러나 재질이 열화 됨에 따라서 강도의 감소를 관찰 할 수 있었다.

인장강도의 경우 Fig. 5에서 보는바와 같이 고온 인장강도가 상온인장강도보다 높음을 알 수 있다. 이는 고온에서의 연신률이 높으면서 가공경화가 많이 일어나는 결과라고 사료된다. 상온에서의 인장강도는 열화시간의 변화에도 크게 변화하지 않음을 알 수 있다. 그러나 고온에서의 인장강도는 신재와 비교할 때 10만 시간 열화재가 40 MPa 의 강도 저하가 있음을 알 수 있다.

3.3. 충격시험

금속재료는 취성-연성 천이온도를 갖고 있으며, 천이온도보다 낮은 온도에서 재료를 사용하게 되면 취성과파괴가 일어나게 된다^{(9), (10)}. 그러나 고온에서 재질이 열화하게 되면 천이 온도가 점점 상승하게 된다. 따라서 본 연구에서는 SS 400재질이 179 °C에서 장시간 사용되었을 때 천이온도의 변화를 관찰하기 위하여 열화시간에 따라 충격실험을 실시하였다. 충격실험 결과 Fig. 6에서 보는 것과 같이 사용시간에 따른 천이온도는 - 50°C ~ - 20 °C사이로서 천이온도의 변화는 일어나지 않음을 알 수 있다. 또한 사용온도인 179 °C에서는 15만 시간 열화 된 재질에서도 불안정 파괴가 일어나지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

산업용 보일러에 소재인 SS 400 압연 탄소강을 인공 시효열처리를 통하여 장기 사용재로 모사하였다. 열화시간에 따른 금속조직 변화, 경도값의 변화 상온 및 179 °C에서 인장물성의 변화, 취성-연성 천이온도의 변화를 관찰하기 위하여 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 금속 조직관찰 결과 신재와 열화재간의 구분은 분명하였다. 그러나 10만 시간 열화재에서도 구상화나 탄화물 석출 등은 관찰할 수 없었다.

(2) 1만 시간 열화재에서 경도값의 급격한 상승을 관찰할 수 있었다. 그러나 3만 시간 열화재에서 안정한 상태를 보였으며, 이후 15만 시간 열화재까지 큰 변화를 보이지 않았다.

(3) 인장실험결과 상온에서의 항복강도가 고온에서보다 높게 나타났다. 상온 항복강도의 경우 10만 시간 열화재가 신재에 비해 66 MPa 정도 감소하였다. 고온에서의 인

장강도는 10만 시간 열화재가 신재에 비해 40 MPa 의 강도 저하가 있었다.

(4) 충격실험 결과 사용시간에 따른 천이온도는 $-50^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 사이로서 천이온도의 변화는 크지 않았다. 또한 사용온도인 179°C 에서 15만 시간 열화 된 재질에서도 불안정 파괴가 일어나지 않음을 알 수 있다.

(5) 열화시간에 따른 금속조직변화 및 경도값의 변화가 두드러지지 않았다. 이상의 결과로 볼 때 179°C 에서 운전되는 SS 400 압연강의 경우 15만 시간 운전하여도 열화에 의한 손상은 크지 않았다.

감사의 글

본 연구는 에너지 관리공단 “보일러 열화도 평가를 위한 표준 금속 조직개발” 과제 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) "보일러 및 압력용기 안전사고 사례", 에너지 관리공단, p. 3-7, 2001.3
- (2) “노후 취약설비 정밀진단 및 수명평가” KRISS-93-171-IR 연구보고서, 1993. 12
- (3) “보일러 열화도 평가를 위한 표준금속 조직개발”, KRISS/IR-2004-086 연구보고서, 2004.11
- (4) Abdel-Lafit, A.M., Corbett, J.M. and Taplin, D.M.R. “Analysis of Carbides Formed During Accelerated Ageing of 2.25Cr-1Mo Steel”, Metal Science, 16, 90-96., 1982.
- (5) 박중서, 이해무, 백운봉, “고온설비 수명평가를 위한 표면 복제 절차의 표준화”, 기계학회 논문집 A권 제 24권 제9호 pp. 2381-2386, 2000.
- (6) R. Viswanathan, Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components, ASM, 1989.
- (7) L.H. Toft and R. A. Mardsen, The structure and properties of 1%Cr0.5%Mo steel after service in CEGB power stations, in Conference on structural processes in creep, JISI/JIM, London, 1963, p275
- (8) A. D. Batte and D. J. Gooch, Metallurgical Aspects of Remanent Life Assessment of high Temperature Rotor Forging, in life assessment and Improvement of Turbo generator Rotors for Fossil plants, R. Viswanathan, Ed., pergamon Press, New York, 1985, p3.79-3.100.
- (9) W. D. Biggs, The Brittle Fracture of Steel, Pitman, New York, 1960.
- (10) E. R. Parker, Brittle Behavior of Engineering Structures, John Wiley & Sons, New York, 1957.