

X20CrMoV12.1강의 열화에 따른 기계적특성 평가 The Evaluation of Mechanical Property of X20CrMoV12.1 Boiler Tube Steels

김범수 · 이성호 · 김두수 · 정남근

B. S. Kim, S. H. Lee, D. S. Kim and N. G. Jung

Key Words : Boiler Tube(보일러 관), X20CrMoV12.1, Indentation Test(압입시험),

Abstract : Boiler is one of the most important utilities providing steam to turbine in order to supply mechanical energy in thermal power plant. It is composed of thousands of tubes for high efficient heat transfer. The material for boiler tubes is used in such high temperature and pressure condition as 540℃, 22MPa. The boiler tube material is required to resist creep damage, fatigue cracking, and corrosion damages. 2.25%Cr-1Mo steel is used for conventional boiler tubes, and austenitenite stainless steel is used for higher temperature boiler tubes. But the temperature and pressure of steam in power plant became higher for high plant efficiency. So, the property of boiler tube material must be upgaded to fit the plant property. Several boiler tube material was developed to fit such conditions. X20CrMoV12.1 steel is also developed in 1980's and used for superheater and reheater tubes in supercritical boilers. The material has martensite microstructures which is difficult to evaluate the degradation. In this thesis, degrade the X20CrMoV12.1 steel at high temperatures in electric furnace, and evaluate hardness with Vickers hardness tester and strengths with Indentation tester.

1. 서 론

최근 10년간 국내 전력 수요량은 200%이상의 급격한 증가세를 보이고 있으며 현재에도 새로운 발전설비가 계속 건설되고 있다. 그러나 발전소 건설을 위한 부지확보는 쉽지않은 형편이며 환경규제도 강화되어 신규 발전설비의 단위 용량의 증가, 발전설비의 고온 고압화를 통한 대용량화·고효율화가 필요하게 되었다. 발전설비의 고온·고압화는 재료에 대하여 보다 향상된 성능을 요구하게 되었다. 일반적으로 보일러 과열기관(Superheater Tubes)과 재열기관(Reheater Tubes) 재료의 선정은 관벽 온도와 내식성, 사용압력, 경제성, 가공성 등의 관점에서 검토되는데 통상 관벽온도가 590℃까지는 2.25Cr-1Mo강(SA213 T22)을 사용하고 590℃ 이상에서는 오스테나이트계 스테인레스 강이 사용되어

왔다. 그러나 발전소의 효율을 상승시키기 위하여 발전설비가 고온화, 고압화됨에 따라 2.25Cr-1Mo강은 내식성의 한계를 보여주었다. 또한, 오스테나이트 스테인레스강은 가격이 비싸고 환경 조건에 따라 응력부식 균열(Stress Corrosion Cracking)이나, 입계부식(Intergranular Corrosion)등의 손상이 많이 발생되었고 페라이트 강과 비교하여 큰 열팽창계수와 낮은 열전도도를 갖고 있어 열전달 효율과 열응력 등의 관점에서 많은 문제점을 내포하고 있었다. 이와 같은 이유로 기존페라이트 강의 사용한계를 초과하는 고온영역에서 오스테나이트 스테인레스강을 대체할 수 있는 새로운 페라이트강을 요구하게 되었다. 유럽 및 미국과 일본 등지에서 새로운 고온 재료 개발에 많은 연구를 한 결과 기존의 페라이트강보다 고온강도 및 내식성이 뛰어나며 파괴인성(Fracture Toughness)이 향상된 페라이트(Ferrite Steel)계열의 고 크롬강(Cr: 8~14%)을 개발하였다^{1),2)}

X20CrMoV12.1강은 12% Cr을 포함한 페라이트계 보일러튜브 재료로 국내에서는 22MPa, 540℃의 중기조건을 갖는 초임계압 보일러 튜브 재료로 사용하고 있다. 그러나 합금조성의 특성으로 기본조직

접수일 : 2004년 3월 23일
김범수(책임저자) : 한전전력연구원 발전연구소
E-mail : kims@kepri.re.kr Tel. 042-865-5316
이성호, 정남근, 김두수 : 한전전력연구원 발전연구소

이 마르텐사이트로 되어 있어 열화에 따른 조직의 변화가 심하지 않아 열화 상태를 평가하는데에 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 고온 조건에서 열화에 따른 경도 및 강도 등의 기계적성질 변화특성을 경도시험기와 연속압입시험기를 통하여 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 열화실험 방법

본 실험에 사용된 12% Cr강인 X20CrMoV12.1 재료는 현장에서 건설시에 제공된 과일기 튜브 재료를 사용하였으며 화학성분은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of the 20CrMoV12.1 steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0.2	0.28	0.69	0.012	0.001	11.32	0.83	0.42	0.27

열화시편은 규격이 38.0mm x 8.5mm(외경 x 두께)의 튜브를 10mm길로 절단하고 원주방향으로 4 등분하여 사용하였다. Fig. 1은 열화실험 조건을 보여주고 있으며, 튜브재료의 실제 사용온도와 오스테나이트상 변태가 일어나지 않는 온도 조건인 610, 660, 700, 750°C에서 6시간에서 2,500시간까지 단계별로 열화실험을 진행하였다.

또한, 일반 금속재료들이 초기 크립단계에서 금속 조직 및 물성의 변화가 심하게 발생하는 것³⁾을 고려하여 열화초기에는 짧은 시간간격으로 열화를 시켰고 이후에는 점차 긴 시간간격으로 열화실험 간격을 채택하였다.

그림에서 LMP는 크립에 의한 열화정도를 나타내는 Larson-Miller Parameter(이하 LMP)³⁾ 다음과 같이 표현된다.

$$LMP = (T+460)(\log(t)+C) \quad (1)$$

여기서, T는 온도(°F), t는 열화 시간(hr), C는 재료에 따른 상수 값으로 본 논문에서는 20을 사용하였다. 열화시료는 연마 및 고정을 위하여 그림과 같이 mounting하였으며, mounting 시 mounting 재료의 물성에 의한 시료의 물성값의 영향을 최소화하기 위해 302.3kg/cm²- 180°C의 고온·고압 조건에서 10분간 유지하여 분말이 충분히 용착될 수 있도록

하였다. 또한, mounting재료의 영향을 최소화하기 위해 여러 가지 재료를 사용하여 물성변화 실험을 하였으며, 실험 결과 시료의 강도에 영향을 거의 주지 않는 penol 분말을 사용하였다.

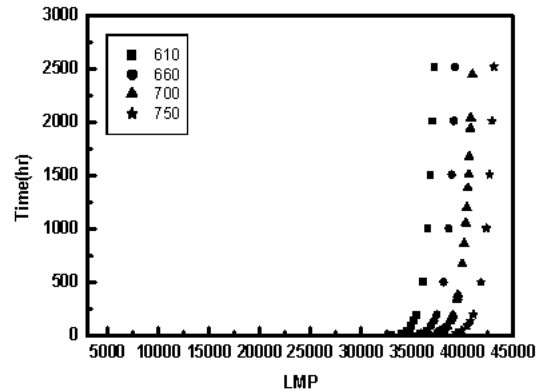


Fig. 1 Degradation test condition

2.2 경도시험 방법

열화 재료의 경도변화를 측정하기 위해 Vickers 경도계의 Diamond 압입자를 사용해 500g-15sec의 하중으로 실험을 하였다. 시편의 전체적인 경도를 측정하기 위해 튜브재료의 외면으로부터 내면으로 5mm 간격으로 5개 이상 point를 측정하여 평균값을 적용하였다.

2.3 압입실험 방법

강도 실험은 연속압입시험기인 Frontics사의 AIS 2000을 사용하여 압입 인장 물성 평가 법(KSB 0950)에 의해 항복강도, 인장강도 및 가공경화지수를 구하였다. 실험은 직경 0.5mm의 구형 압입자를 사용하여 10회 다중 실험을 하였으며, 하중제거율은 50%, 압입속도는 0.3mm/min로 500ms동안 최대하중을 유지하도록 하였다. 또한, mounting 재료의 영향을 최소화하기 위해 최대 변위를 90μm로 하여 변위제어 압입시험을 하였다. 실험 재료는 경도시험과 동일하게 열화재료를 penol 분말을 사용하여 mounting하였고, 4, 5회 압입실험을 수행하여 평균값을 적용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 경도시험 결과

실험 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 열화재에 대한 경도 값은 최대 값은 Hv 257이고 최저 값은 Hv 167이었으며 모든 온도 조건에서 LMP 값이 증가됨에

따라 저하되고 있음을 보여주고 있다. 또한, 모든 열화재료에 대하여 온도 값은 온도조건 보다는 LMP 값에 의존하고 있는 것을 보여주고 있다. 온도 값의 변화 경향은 LMP에 따라 직선적으로 저하되고 있으며, 다음과 같은 1차식으로 표현될 수 있다.

$$H_v = 577.55 - 0.0096 \text{ LMP} \quad (2)$$

여기서, H_v 는 비커스 경도이다.

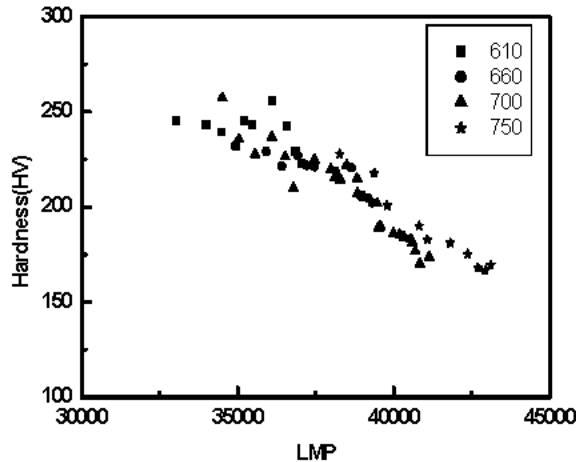


Fig. 2 The change of hardness of the degraded materials at high temperatures

3.2 압입실험 결과

열화가 되지 않은 신 재료에 대하여 연속압입을 수행한 결과 항복강도, 인장강도, 가공경화지수, 소성지수는 각각 508MPa, 908MPa, 0.187, 1242MPa로 Holloman equation³⁾은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma = 1242 \varepsilon^{0.187} \quad (3)$$

여기서 σ 는 진응력, ε 은 진 변형율을 나타낸다.

이것은 어닐링한 0.05% 탄소강(Holloman equation : $\sigma = 530 \varepsilon^{0.26}$)에 비해서 완전 소성 고체에 가까우며 강도가 훨씬 더 높음을 나타내고 있다.(완전소성 : 가공경화지수 0, 완전탄성 1)

고온에서 열화시킨 재료의 LMP와 인장강도의 관계를 Fig. 3에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 인장강도도 LMP 값의 증가에 따라 저하되고 있으며 온도보다는 크립 특성 Parameter인 LMP 값에 따라 변화되고 있음을 보여주고 있다. 750°C에서 열화시킨 재료의 인장강도 값들은 Scattering이 다소 심하게 나타나고 있으나 열화의 초기단계인 LMP값이 37,000이하에서는

일정한 값을 유지하다가 LMP 값이 38,000이상으로 증가하면 열화도에 따라 선형적으로 저하됨을 보여주고 있다.

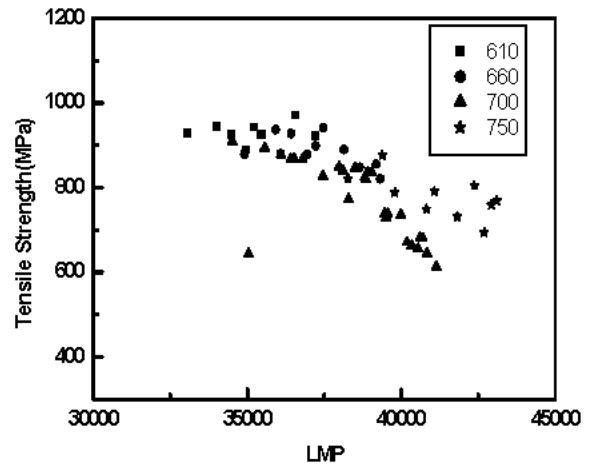


Fig. 3 The change of Tensile strength of the degraded materials at high temperatures

고온에서 열화시킨 재료의 LMP에 따른 항복강도의 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

항복강도 값도 열화의 초기단계인 LMP가 37,000까지는 변화가 적으나 이후에는 모든 온도조건에서 열화도에 따라 직선적으로 저하되는 경향을 보여주고 있다. 또한, 항복강도 값은 인장강도 값에 비해 산포도가 적은 것을 보여주고 있다.

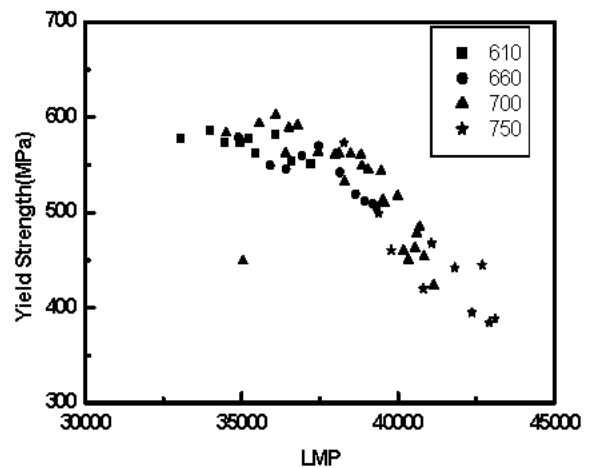


Fig. 4 The change of Yield strength of the degraded materials at high temperatures

가공 경화지수는 재료의 강도특성과 파괴특성에 대한 정보를 동시에 제공할 수 있기 때문에 재질 열화도 평가의 새로운 변수로 활용할 경우 가장 큰 장

점을 지나는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 일반적으로 재료는 열화가 진행될수록 강도 특성(연화 또는 경화)과 파괴특성(취화, 피로 등)의 변화를 동시에 수반하게 된다. 재료의 강도적 변화만을 나타낼 수 있는 변수인 항복강도, 인장강도 및 경도 등과 다르게 가공경화지수는 재료의 변형 능력과 관련된 인자로 재료의 파괴특성인 취화도를 나타내는 변수로서 해석 가능하다.⁶⁾ 이는 소성변형거동이 Hollomon equation을 따르는 재료에 대하여 가공경화지수가 인장시험시 최대하중에서의 진변형을 값인 균일 연신율과 동일한 값을 나타내기 때문이다. 따라서 압입시험에서 구한 가공경화지수는 다양한 금속재료에 대하여 인장강도에서의 진변형율과 일정한 비례관계를 갖고 있는 것으로 알려져 있다.⁶⁾

연속압입시험을 통하여 측정된 가공경화지수의 변화를 Fig. 5에 나타내었다.

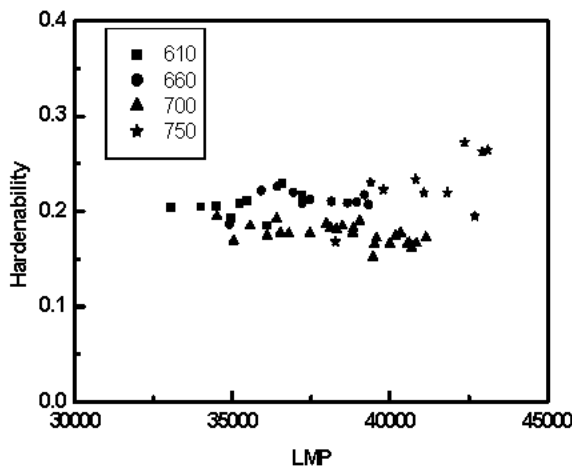


Fig. 5 The change of hardenability of the degraded materials at high temperatures

X20CrMoV12.1강에 있어서의 가공경화지수는 열화를 시키지 않은 신재에 비해 다소 증가되었으며 750℃에서 열화시킨 재료의 가공경화지수는 다소 증가하는 추세를 보이고 있으나 다른 온도에서의 실험 결과는 열화도에 따라 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 재료의 취화에 의한 연신율의 감소는 크지 않은 것으로 평가되었으며 열화특성을 평가할 수 있는 큰 변화가 발견되지 않고 있어 열화도 평가를 위한 인자로 사용하기에는 곤란한 것으로 판단된다.

Fig. 6에 탄소강과 X20CrMoV12.1 강의 강도와 이에 대응하는 경도의 값을 나타내었다. 그림에서 나타나는 바와 같이 X20CrMoV12.1 강은 강도와 경

도가 밀접한 관계를 갖고 있는 것을 보여주고 있으며, 산업체에서 일반적으로 강도를 환산하고 있는 탄소강 재료에 대한 경도-강도 관계⁷⁾와는 상당한 차이를 보여주고 있다. 따라서 X20CrMoV12.1 강과 같은 고합금강에 대하여는 경도값으로 강도값을 추정할 때 새로운 상관관계를 적용하여야 한다.

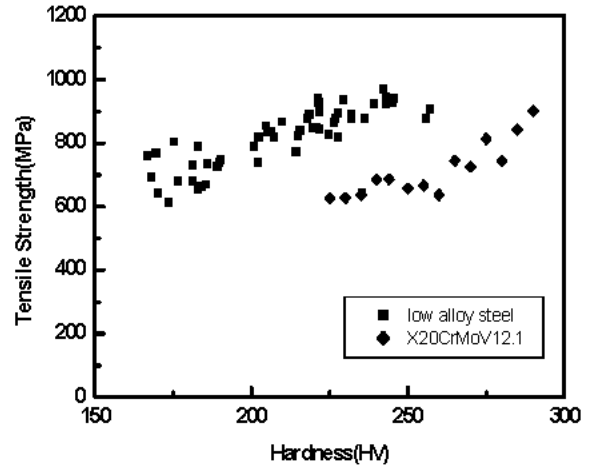


Fig. 6 The relationship between tensile strength and hardness on X20CrMoV12.1 steel

5. 결 론

국내 표준화력 보일러의 과열기, 재열기튜브에 사용되고 있는 X20CrMoV12.1 강에 대한 열화특성을 평가하기 위하여 튜브재료를 고온에서 열화시키고 경도 및 강도특성을 시험한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 경도(Hv)는 열화도와 선형적인 관계를 갖고 있어 X20CrMoV12.1 강의 열화평가 특성으로 사용 가능하여 정량적인 관계로 표현하였다.
- 2) 항복강도 값은 LMP가 37,000이상이 되는 열화도에서 열화에 따라 선형적으로 저하하는 것으로 나타나 X20CrMoV12.1 강의 열화평가 특성으로 사용 가능한 것으로 평가되었다.
- 3) 재료의 소성변형 시 Hollomon식에 의해 표현되는 가공경화지수는 재료의 연신율과 선형관계를 갖고 있어 재료의 취화도를 평가하는 파괴특성 변수로 사용 가능할 것으로 추천되고 있으나⁶⁾ X20CrMoV-12.1강에서는 큰 차이를 보이지 않고 있어 열화평가 특성으로 사용하기에는 부적절한 것으로 평가되었다.
- 4) 탄소강에 일반적으로 적용하고 있는 경도 값과

인장강도 값의 환산 자료는 X20CrMoV12.1 강에서는 많은 차이를 보이고 있어 사용이 불가능한 것으로 평가되었다.

참고 문헌

1. A. Flemming, R. V. Maskell, L. W. Buchanan and T. Wilson, 1998, "Materials development for supercritical boiler and pipework", Proceedings of conference on materials for high temperature power generation and process plant application, London, pp. 45-75
2. V. K. Sikka, C. T. Ward, K. C. Thomas, 1981, "Ferritic steels for high temperature application", ASM International, Ohio, pp. 65-83
3. R. Viswanathan, 1989, "Damage mechanisms and life assessment of high temperature components", ASM International, Ohio, pp. 66-72
4. 권동일, 김정태외 4인, 2002, "연속압입 시험기법을 이용한 석유화학설비 경년손상의 새로운 평가 변수 고찰", 대한기계학회 논문집 A권 제 26권 제 5호, pp. 881-889
5. 권동일, 김정태외 4인, 2001, "경년열화에 대한 현상평가 변수로서의 가공경화지수와 항복비", 15회 재료강도학회 논문지, pp. 167-174
6. R. W. Herzberg, 1996, "Deformation and fracture mechanics of engineering materials", John willy and sons, New York, pp. 16-31
7. J. R. Cahoon, 1972, "An improved equation relating hardness to ultimate strength", Metallurgical transactions, Vol. 3, pp. 30-40