

발전설비용 2.25Cr-1Mo 강의 시효에 의한 기계적 강도 특성 변화에 대한 연구

양 현 태* · 김 상 태**
(1999년 9월 28일 접수)

A Study on the Mechanical Strength Change by Thermal Aging of 2.25Cr-1Mo Steel

Hyuntae Yang and Sangtae Kim

Key Words: Thermal Embrittlement(열취화), Carbide Extract(탄화물추출), Fatigue Test(피로시험), Energy Transition Temperature(에너지전이온도), High Temperature Tensile Test(고온인장시험),

Abstract

The purpose of this study is to investigate the thermal embrittlement and the mechanical properties of 2.25Cr-1Mo steel aged at high temperature for the extended periods. Original, aged artificially and used material were tested to obtain the tensile strength, hardness and impact absorbed energy. Tensile strength, hardness and impact absorbed energy decreased with the increasing aging time. The carbide morphology with the thermal embrittlement was found to contribute to the mechanical property change by X-Ray diffraction method.

1. 서 론

고도 급속 성장기에 건설하기 시작한 고온·고압용기, 원자력 발전설비 등과 같은 기계구조물들은 그 사용기간이 길어짐과 더불어 수명상의 문제가 제기되기 시작할 것이며, 이에 따라 기계구조물에 대한 검사, 보수, 교환, 사용정지, 운전조건의 제한, 재건설, 안정성 및 신뢰성의 검토 등이 요구되고 있다. 최근 우리나라에서도 설계수명에 임박했거나 경제성을 향상시키기 위하여 가혹운전이 행하여지고 있는 발전 플랜트와 화학공장 등과 같은 고온 설비들의 수가 증가 추세에 있다. 그 중에서도 고온에서 장시간 운전되어야 하는

화력·원자력 발전설비의 잔존 수명이 감소하여 감에 따라 설비의 점검 지침을 구축하기 위한 노력이 경주되고 있으며, 다른 선진국에서는 나름대로 독자적인 설계지침이 완료되어 가고 있다.

이와같은 관점에서 보면, 구조물의 수명예측 및 건전성 평가는 매우 중요한 문제로 등장하고 있으며, 특히 고온에서의 재질 변화로 인한 강도 특성 변화 즉 열화문제는 현재까지도 그 열쇠를 얻지 못하고 있다.

재질열화 중, 주로 탄소강 또는 저합금강에서 장시간 시효과정에서 일어나는 열취화(Thermal Embrittlement)는 이 재료가 300~600℃의 온도범위에서 유지될 때 결정입계에 C, P, Sn, Sb, As 등 미량원소가 여러 합금원소와 결합하여 안정한 탄화물 등의 여러 가지 화합물 형태로 석출되면서 유발되는 취화현상을 지칭한다.⁽¹⁾ 이러한 열화에 대해서는 현재에 이르기까지 열화기구 및 파괴형태등에 대한 연구⁽²⁾와 결정입계에 따른 취성

* 영남대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : stkim@yu.ac.kr

TEL : (053)810-2456 FAX : (053)813-3703

파괴를 방지하기 위한 열처리 방법에 관한 연구,⁽³⁾ 불순물 원소의 입계편석을 방지하기 위한 각종 원소들이 열화에 미치는 영향 등에 대한 연구^(4,5) 등이 연구되어졌다. 입계의 부식도와 불순물의 편석량과의 상관관계를 입증하기 위한 입계부식법⁽⁶⁾을 응용하여 열화의 정도를 판단하기도 한다.

또한 열화는 재료의 정적 강도에는 큰 영향을 미치지 않으나 충격치에는 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, Charpy 충격치로부터 K_{IC} 를 환산하는 방법에 관한 연구,^(7,8) J_{IC} 와 K_{IC} 사이의 관계에 대한 연구⁽⁹⁾ 등이 수행되었다.

아직까지 취화에 대한 기구는 명확히 밝혀지지는 않았지만, 최근 여러 분석장비의 출현으로 열취화의 보다 상세한 연구가 가능하게 되었다. 특히, 입계탄화물 석출설, McLean 등의 평행 편석설 및 Guttmann의 식 등이 이에 대한 연구이다. 열취화의 기본적인 특성은 평행 편석설을 통하여 잘 설명 될 수 있으나, 여러합금 원소의 영향에 대하여는 평행 편석설 이론을 다원계에 확장시킨 Guttmann의 식에 의해 획기적인 결과를 얻을 수 있었다.

이상과 같이 특정온도범위로 가열된 상태에서 재료를 장시간 사용함에 따라 발생하는 시효현상은 근년에 설계시에 적절한 재료가 선택되며, 동시에 가동온도가 비교적 낮으므로 열취화의 가능성은 거의 무시될 수 있다고 믿어져 왔다.

하지만, 실제의 경우 낮은 온도 범위에서도 새로운 석출물이 생성하기에 충분한 온도이며, 또한 용접시에 열영향부와 같이 이미 제작과정 중에 생성된 미세한 석출물들이 존재하는 경우, 비록 매우 늦은 속도라 하더라도 석출물의 성장이 가능하며, 따라서 장시간의 설계수명 기간동안 낮은 온도에서의 완전한 취화의 진행은 가능하리라 본다.

이와 동시에 운전조건 변화에 따른 가열, 냉각 과정으로부터 기인하는 방향으로 작용하여, 새로운 석출물의 생성 및 성장을 촉진한다고 생각할 때 설비의 안전성 확보의 측면에서 재료의 열적 인 열화는 반드시 확인되어야 할 인자로 받아들여지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 원자력 또는 화력 발전

소의 압력용기 및 배관용으로 주로 사용되고 있는 2.25Cr-1Mo강이 고온분위기에서 장시간 사용됨으로써, 온도와 시간에 의한 기계적특성 변화를 규명하기 위하여, 고온시효에 의한 재료의 강도변화에 대하여 연구하였다.

2. 연구방법

열취화의 정도를 판단하기 위한 종래의 이에 관한 연구로서, 파괴적인 열화평가법으로써는 고온크립 파단실험, CVN 충격시험, 고온인장 및 고온피로시험을 들 수 있다. 비파괴적인 열화평가법으로써는 전기분극법, 표면복제법, 입계부식법, 전기저항법 및 소형편치시험(Small Punch Test : SP)법 등이 있으며, 분류관점에 따라 조직 대비법, 결정립변형법, 석출물검사법, 기공정량화법 등으로 나눌 수 있다. 비파괴적인 평가법은 사용중인 구조물에 거의 손상을 주지 않고 분석할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, Data Base의 부족으로 정성적인 분석에 머무르는 수준이며, 열화평가에는 아직도 파괴적인 평가에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에 소재는 2.25Cr-1Mo 강으로서, 이 재료는 1930년대 이래로 발전소의 압력용기, 과열관, 헤드 및 보일러 증기관 등에 사용되어 왔다. 2.25Cr-1Mo강의 일반적인 표준 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서 시효에 의한 강도변화를 조사하기 위하여 530℃에서 장시간(500, 1000, 5000 시간) 전기로에서 인공적으로 시효시킨 재료(이하 시효재)와 530℃부근에서 약 10,000시간 사용된, 바깥지름이 50mm, 두께가 11mm인 엘보우 관(이하 사용재)을 이용하였다.

Table 1 Chemical composition of 2.25Cr-1Mo steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0.09	0.08	0.57	0.09	0.01	2.28	0.95	0.02	Bal

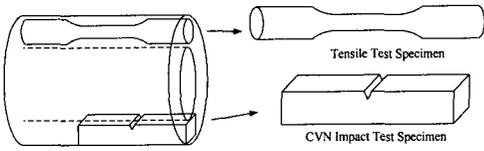


Fig. 1 Extraction procedure of tensile and impact test specimen

본 연구에서의 신재, 사용재 및 시효재를 이용하여 충격시험, 경도시험 및 온도를 변화시켜 인장시험을 행하여 그 결과를 비교·분석하였다. 또한 피로시험을 통하여 시효시간의 증가에 따른 영향에 대하여 분석하였으며, 각 시험편에서 탄화물을 전해추출하여 X선 회절분석을 함으로써 열처리 시간에 따른 탄화물의 거동에 대하여 실험을 통하여 비교, 분석하였다. 신재와 사용재의 조직변화를 관찰하고, 사용재 튜브의 각 단면에 대한 조직을 비교한다.

2.1 고온인장시험

신재와 사용재를 이용하여 온도를 변화시키며 인장시험을 행하였다. 시험에 사용된 시험기는 Shimadzu 사(Model : EFD-ED10-20L) 최대용량 10Ton의 Dynamic Servo Fatigue Testing Machine을 사용하였으며 전기로가 장착되어 있다. 전기로는 최고 작동온도가 1000℃이며 전용 콘트롤러가 달려있다.

사용재가 이용된 온도가 530℃부근이므로(물론, 사용환경에 따라서는 더 낮거나 높은 온도가 될 수도 있지만), 인장시험은 그 온도보다는 조금 높은 600℃까지, 100℃간격으로 시험하였다. 그 결과로써는 각 온도에서의 인장강도를 측정하였다.

2.2 경도시험

충격시험을 행하기 전에, 비커스 및 로크웰 경도시험을 행하였다. 우선 비커스 경도시험은 마이크로 비커스 경도기(Shimadzu, HMV 2000)를 이용하였으며, 시험조건으로 하중 1kg, 하중시간은 15초로 하여 시험을 수행하였다. 각 시험편에 대하여 각각 10개의 값을 얻어 평균을 취하였다.

2.3 충격시험

열화도를 분석하는데 있어 가장 널리 이용되는 방법인 충격시험을 행하였다.

충격시험에서는 신재와 시효재 및 사용재의 CVN 충격흡수 에너지를 구하고, 각 온도에 따른 시험 데이터를 이용하여 근사곡선을 찾는다.

근사곡선에 의하여 각 재료에 대한 에너지전이 온도를 구할 수 있다. 근사곡선식⁽¹⁰⁾은 다음과 같다.

$$E = A + B \times \tanh\left(\frac{T - Tr}{C}\right) \quad (1)$$

여기서, A, B, C, Tr는 파라미터

T : 충격시험온도

E : CVN 충격흡수 에너지

Tr는 바로 근사곡선을 구하기 위한 파라미터이기도 하지만, 이 값이 바로 CVN 충격흡수 에너지 천이온도이다.

2.4 피로시험

피로시험을 통하여 균열 안정성장 구간에서 각 균열 거동을 살펴보았다. 시험기는 Instron사 (Model : 8516) 최대용량 10Ton의 Dynamic Servo Fatigue Testing Machine을 사용하였다.

피로시험조건은 인장-인장의 정현파형(sine wave)으로 응력비를 0.1로 하였고, 주파수 10Hz로 하여 동일조건으로 시험을 수행하였다. 균열길이 측정은 1/100mm까지 측정이 가능한 이동식 광학현미경을 사용하였다.

2.5 탄화물 거동 분석

강재는 고온에 노출될 경우 재료는 안정화 되기까지 강내에 탄화물을 형성하고 이러한 탄화물의 석출순서는 ① 재료의 화학적 성질, ② 합금원소의 확산도, ③ 핵생성의 용이성 등에 의하여 결정된다. 열처리가 계속되면 합금원소를 포함하는 탄화물들은 합금원소 농도비율이 변화하는 일종의 연속적인 석출이 계속되어진다. 그리하여 보다 실제적인 거대한 탄화물을 전기 화학적으로 추출하였다. 전해추출방법은 95%의 메탄올에 5% 염산을 첨가시킨 전해액을 사용하였으며, Cathode 측에는 백금을 Anode측에는 시험편을 걸고, Power Supply를 이용하여 IV 전압을 가하여 약 12시간 정도 흘려주어 탄화물만을 선택적으로 추

출하였다. 용액 속에 포함된 탄화물을 여과하기 위하여 흡인여과기를 사용하였다. 추출된 탄화물을 XRD를 사용하여 성분분석하였다. 이 때 가속 전압은 40Kv, 튜브전류는 25mA 하에서 CuK α ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$)으로 측정하였다.

2.6 미세조직 관찰

신재 및 사용재의 미세조직관찰을 통하여 고온에서 장시간 사용된 강의 조직의 변화를 관찰하며, 사용된 튜브의 각 방향에서의 미세조직사진을 비교· 분석하였다.

3. 실험결과

장시간 사용한 보일러 튜브의 고온인장시험 결과 중 인장강도를 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 장시간 사용한 재료의 경우, 실온에서는 인장강도가 신재보다 약 40MPa정도 낮은 값을 보이고 있으며, 특히 사용온도인 530℃의 고온에서는 약 150MPa정도의 아주 큰 차이를 보이고 있었다. 일반적으로 고온인장강도는 합금성분의 분포와 밀접한 관계를 가진다. Cr, Mo, C 등의 성분원소가 고온역에서 인장강도에 미치는 영향은 Cr의 경우 400~500℃이고, C의 경우는 200℃ 부근이다. 이들 고온에서 영향을 미치는 성분원소가 장시간 사용으로 인하여 탄화물로써 입계에 석출되면 그 강화 효과는 줄어든다. Fig. 2에서 약 400℃ 부근에서 신재의 경우는 강화현상을 보이고 있으나 사용재의 경우는 큰 변화를 보이지 않고 있다.

로크웰 및 비커스 경도시험의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서는 신재와 사용재 사이의 경도값은 현저히 차이를 보이고 있으며, 열처리 시간의 경과에 따라 현저한 감소를 보이며, 구간 내에서는 선형성을 보이고 있다. 즉, 경도값이 시효시간의 함수로 정할 수 있는 근거가 됨을 알 수 있으며, 열취화도 평가에 경도시험을 이용하면 비파괴적인 검사가 가능하다.

Fig. 4와 5에 CVN 충격시험 결과를 보였다. Fig. 4에서는 CVN 충격시험 결과와 각 재료의 근사곡선을 나타내었으며, 근사곡선에서 구한 흡수

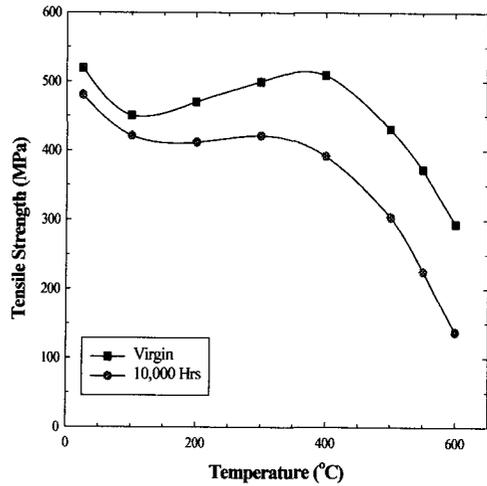


Fig. 2 High temperature tensile strength of virgin and used tube(10,000hrs)

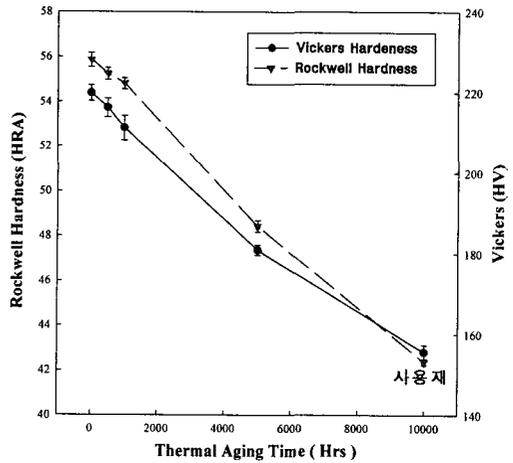


Fig. 3 Rockwell and Vickers hardness

에너지 천이온도를 이용하여 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서는 시간축을 Log 함수로 나타내었다. 시효시간의 변화에 따른 천이온도의 변화를 추정하기 위하여 얻어진 자료로 아래와 같은 근사곡선식 (2)를 구하였다.

$$Tr = -37 + 0.1027 \times t^{0.574} \quad (2)$$

여기서, Tr : 에너지 천이온도(°C)

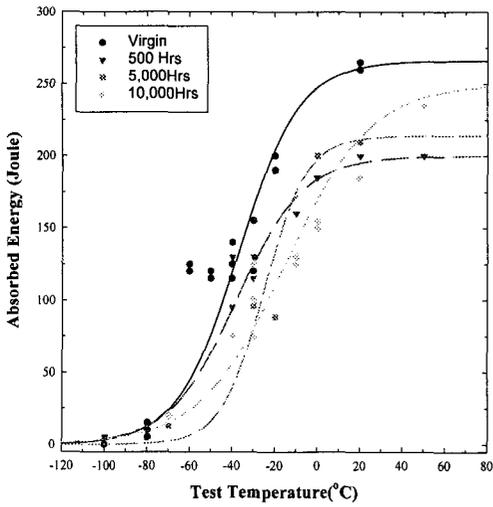


Fig. 4 CVN impact absorbed energy of 2.25Cr-1Mo steel

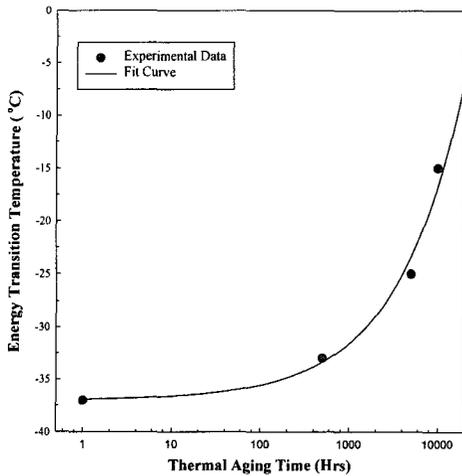


Fig. 5 Energy transition temperature

t : 열처리시간(Hrs)

이 근사식을 이용하여 장시간 사용된 2.25Cr-1Mo강 열취화도를 파피. 비파피적인 방법으로 평가하고, 그 구조물의 사용, 보수 및 교체 시기를 예측 할 수 있을 것이다.

피로시험 후 피로균열성장속도와 응력확대 계

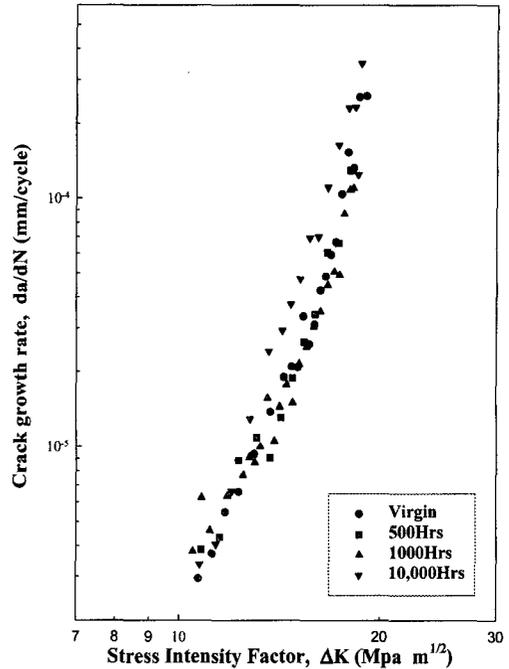


Fig. 6 Relation between da/dN and ΔK of 2.25Cr-1Mo steel

수에 대한 결과를 Fig. 6에 보였다. 신재와 시효재의 균열성장속도에는 뚜렷한 차이를 보이지 않으며, 사용재와는 다소 차이를 보이고 있지만 3가지 경우 모두 큰 차이를 보인다고 할 수는 없다. 이것은 시효시간의 증가에 따른 탄화물의 변화에도 피로균열성장속도의 차이는 보이지 않으므로, 탄화물의 거동이 피로에는 전혀 무관함을 알 수 있다.

시효시간의 증가에 따른 탄화물의 거동을 분석하기 위하여 탄화물 추출을 통하여 XRD 분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 신재, 시효재의 경우는 $M_{23}C_6$, M_2C , M_3C 의 탄화물이 발견되었으며, 시효시간의 증가에 따라 $M_{23}C_6$ 의 양이 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 고온에서 장시간 사용한 재료의 경우는 신재와 시효재의 분석결과와는 탄화물의 종류에서 다른 경향을 보였다. 사용재의 경우는 M_7C_3 탄화물의 출현과 이 탄화물의 양이 전체탄화물에서 아주 많은 부분을 차지하고 있다

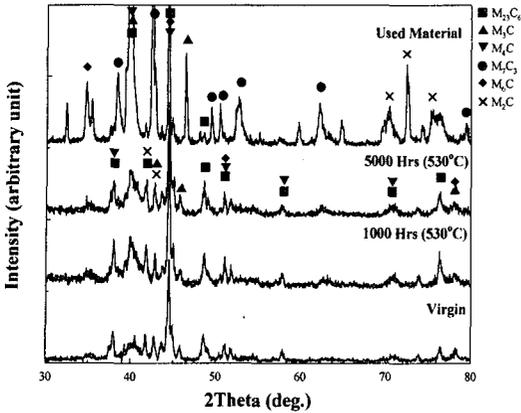
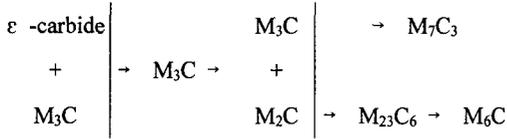


Fig. 7 X-Ray diffraction patterns, using CuK radiation, of carbides extracted from 2.25Cr-1Mo steel

는 것이며, 신재에서도 분석된 탄화물인 $M_{23}C_6$, M_2C , M_3C 도 발견되었다.

2.25Cr-1Mo 강이 고온에서 장시간 사용되어질 때의 일반적인 탄화물 거동은 다음과 같이 보고 되고 있다.⁽¹¹⁾



M_6C 탄화물은 고온에서 아주 안정한 탄화물로써, $M_{23}C_6$ 탄화물이 안정한 온도인 $760 \sim 850^\circ\text{C}$ 보다 높은 온도인 $815 \sim 980^\circ\text{C}$ 에서 안정한 탄화물로써 규정하였다.

실제 2.25Cr-1Mo 강 튜브의 사용온도 및 시효재의 열처리 온도는 530°C 정도이므로, $M_{23}C_6$, M_6C 탄화물이 안정한 온도인 $760 \sim 980^\circ\text{C}$ 보다 아주 낮은 온도이다. 그러므로, 위와 같은 탄화물은 530°C 에서 장시간 시효시킨 재료에서는 생성되지 않는다고 볼 수 있다. 여기서 신재와 시효재에서 볼 수 있는 $M_{23}C_6$ 탄화물은 재료의 생산시에 이미 생성된 탄화물이라고 볼 수 있다. 결국, Fig. 7에서와 같이 $M_{23}C_6$, M_2C , M_3C 탄화물이 변태

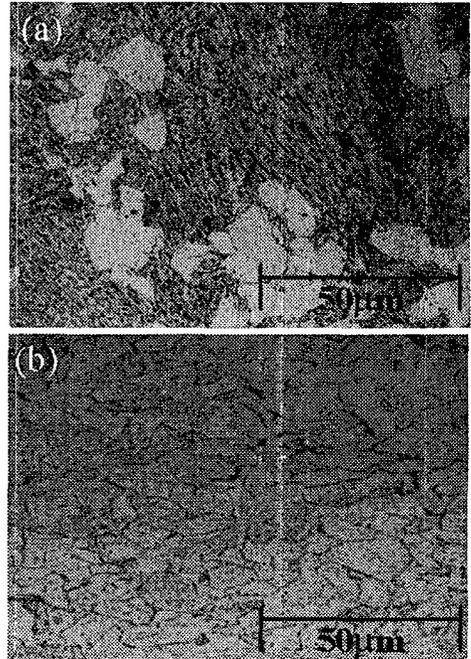


Fig. 8 Microstructure of 2.25Cr-1Mo steel (a) virgin (b) used material

반응을 일으켜 M_7C_3 탄화물을 형성시켰다고 볼 수 있다. 본 연구결과는 Cr함량이 낮은 금속에서는 준안정상인 M_7C_3 를 형성한다는 보고⁽¹²⁾와 일치한다.

2.25Cr-1Mo 강은 주로 페라이트조직 혹은 펄라이트 조직을 가진다. 이 강이 고온에서 장시간 사용되어짐으로 펄라이트 조직의 Fe_3C 탄화물이 다른 첨가원소와 결합하여 화합물을 형성함으로써 강내의 펄라이트조직이 페라이트 조직으로 바뀌어 Fig. 8에서 볼 수 있다. 이것은 XRD분석 결과에서와 같이 M_3C 탄화물의 양이 줄어들었다는 것으로도 알 수 있다.

Fig. 9는 사용재 튜브의 각 단면을 광학현미경을 이용하여 관찰한 것이다. 그림에서와 같이 옆면, 안쪽 및 바깥쪽은 결정립이 편상조직을 보이고 있으며, 전면의 결정립은 구상조직을 보이고 있다. 결정립의 형상은 럭비공모양과 같은 형상을 하고 있다고 할 수 있다. 이러한 결정립 형상을 가진 튜브가 고압, 고온에서 장시간 사용될 경우, 튜브길이방향으로 긴 결정립의 끝단은 균열의 생

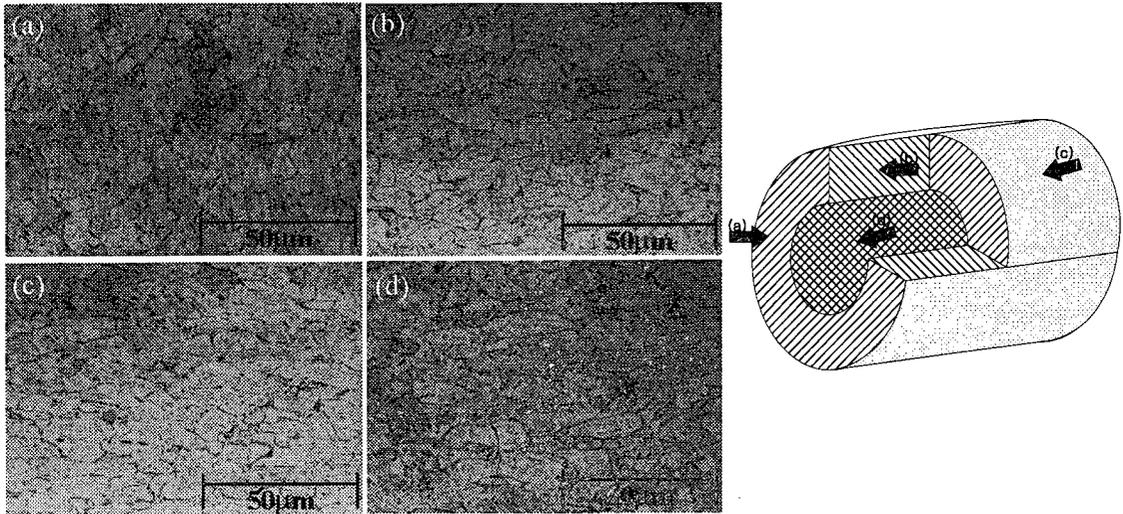


Fig. 9 Microstructures of used 2.25Cr-1Mo Steel Tube (a) front (b)side (c) outside (d) inside

성 및 성장을 촉진시키는 아주 민감한 부분이 되리라 생각된다. 또한 결정립계에 석출된 많은 탄화물들은 재료를 더욱 더 취화 시킨다고 할 수 있다.

4. 결론

2.25Cr-1Mo 강의 시효시간에 따른 열취화도를 분석하기 위하여 신재, 인공시효재 및 10,000시간 사용된 보일러 튜브를 이용하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 2.25Cr-1Mo 강의 신재와 사용재의 인장강도 차이는 실온에서보다 실제 사용온도인 530℃의 고온에서 크게 차이를 보이고 있으며, 이 때 사용재의 인장강도는 신재보다 150MPa 정도 낮음을 보이고 있다.

(2) 시효시간의 변화에 따른 열취화도를 예측하기 위한 경도시험과 충격시험에서, 경도값의 변화는 시효시간의 증가에 직선적으로 낮아짐을 보이고 있으며, 충격시험에서 에너지 천이온도의 변화는 시간의 함수로써 나타내어진다. 하지만, 본 연구에서 시효시간의 변화에 따른 피로균열성장 속

도에는 큰 변화를 보이지 않은 것으로 보아, 탄화물은 균열성장속도에는 별 영향을 미치지 않는다고 본다. 고온에서 장시간 사용된 재료는 탄화물의 영향으로 인장강도, 경도 및 충격치에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

(3) 추출된 탄화물의 성분분석에서 신재, 시효재 및 사용재에서 모두 $M_{23}C_6$, M_2C , M_3C 과 같은 탄화물이 발견되었다. 시효시간의 증가로 $M_{23}C_6$ 탄화물이 M_7C_3 탄화물로 변태하였다고 본다. 이러한 준안정상인 M_7C_3 탄화물의 생성과 양적인 변화로 인하여 재료는 더욱 취화되었다고 본다.

(4) 신재의 미세조직은 페라이트와 펄라이트 조직을 가지고 있으며, 사용시간의 증가로 펄라이트 조직으로 변한다. 사용재의 미세조직은 튜브길이 방향으로 긴 결정립 형상을 가지고 있으며, 튜브내부에 고압·고온상태가 장시간 지속될 때, 결정립의 끝단은 균열의 생성 및 성장을 촉진시키는 아주 민감한 부분이 되며, 또한 결정립계에 생성되는 많은 탄화물은 재료를 더욱 취화시킨다고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 기계공학연구과제(97-018-E00110)의 연구지원비로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Challenger, K. D. and Miller, A. K., 1981, "An Explanation for the Hold Period on the Elevated Temperature Fatigue Behavior of 2 1/4 Cr-1 Mo Steel," *Tran. of the ASME Jour. of Eng. Mat. and Tech.*, Vol. 103, pp. 7~14.
- (2) 許聖康, 洪灵兌, 都正萬, 1994, "고온설비의 잔존수명 예측법," *대한금속학회회보*, 제7권, 제4호, pp. 356~371.
- (3) Yutaka Watanabe and Tetsuo Shoji, 1991, "The Evaluation of In-service Materials Degradation of Low-alloy Steel by the Electrochemical Method," *Metal. Trans.*, A, Vol. 22A, Sep, pp. 2097~2106.
- (4) Nishizaka, Y., Hara, Y., Hori, A., Ysukahara, H., Miyano, K., Wada, T. and Cox, T.B., 1985, "Changes in Microstructure and Mechanical Properties of Cr-Mo Reactor Vessel Steels during long-time service," *Trans. of ASME, Jour. of Pressure Vessel Technology*, Vol.107, Aug. pp. 285~294.
- (5) Seung-Gun Lee, Yoon-Suk Chang and Tae-Eun Jin, 1999, "Material Property Determination of Aged Cast Austenitic Stainless Steel Components for LBB Application," *Tran. Of 15th Int. Conference on Struc. Mech. In Reactor Tech.*, pp. III-167~III174.
- (6) 金正基, 尹在永, 宋基旭, 李柱鎮, 鄭世喜, 1991, "입계부식법에 의한 플랜트용 고온용기의 경년 재질열화 평가에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제15권, 제3호, pp. 898~906.
- (7) Iwadata, T., Watanabe, J., and Tanaka, Y., 1985, "Prediction of the Remaining Life of High-Temperature/Pressure Reactors Made of Cr-Mo Steels," *Trans of the ASME Jour. of Pressure Vessel Technology*, Vol. 107, pp. 230~238.
- (8) Iwadata, T., Karaushi, T. and Watanabe, J., 1977, "Prediction of Fracture Toughnessrm KIC of 2 1/4 Cr-1 Mo Pressure Steels from Charpy V-Notched Test Results," *ASTM STP 631*, pp. 493~506.
- (9) Roberts, Richard, Krishna, G.V., and Nishanian, Jerar, 1980, "Fracture Behavior of A36 Bridge Steels," *ASTM STP 700*, pp. 552~577.
- (10) Stahlkopf, K.E., Smith, R.E., Server, W.L. and Wullaert, R.A., 1975, "Preliminary Results of a Program for Developing Fracture Toughness Data on Ferric Nuclear Pressure Vessel Steel," *ASTM STP 601*, pp. 291~307.
- (11) Arrouz, A., Collins, M.J., and Pilkington, R., 1983, "Microstructural examination of 1Cr-0.5Mo steel during creep," *Metals Technology*, Vol. 10, pp. 461~463.
- (12) Klueh, R.L. and Maziasz, P.J., 1989, "The Microstructure of Chromium-Tungsten Steel," *Met. Trans.*, Vol. 20A, pp. 373~382.