

발전 설비용 CrMo강의 탄화물 구조와 조성 변화에 미치는 열화 및 크리프 손상의 영향

주연준 · 홍경태 · 이현웅* · 신동혁* · 김제원**

한국과학기술연구원 금속연구부

*한양대학교 금속재료공학과

**포항제철 에너지부 에너지기술팀

The Effects of Thermal Degradation and Creep Damage on the Microstructure and Composition of the Carbides in the CrMo Steels for Power Plant

Y. J. Joo, K. T. Hong, H. W. Lee*, D. H. Shin* and J. W. Kim**

Division of Metals, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791

*Dept. of Metallurgy & Materials Science, Hanyang University, Ansan Kyunggi-Do, 425-791

**Energy Technical Team, Pohang Iron & Steel Co., Pohang 790-735

(1999년 4월 17일 받음, 1999년 8월 26일 최종수정본 받음)

초 록 2.25Cr1Mo강 및 9Cr1Mo강에서 사용 온도 및 응력이 고온 설비의 열화에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 20년 이상 사용된 여러 종류의 2.25Cr1Mo 튜브와 미사용재 9Cr1MoVNb 튜브를 실험하였다. 전자의 경우 M_2C 탄화물의 양 및 크기가 시효 및 사용 시간에 따라 증가하였다. 사용재의 탄화물 (M_2C , M_6C) 석출 거동은 사용 온도에 따라 변화하였다. 그러나 미사용재 9Cr1MoVNb의 경우 다른 탄화물 석출 과정을 보이는데, 이는 Cr, V 및 Nb의 높은 함량 때문이다. Cr-rich $M_{23}C_6$ 탄화물의 양은 시효 시간에 따라 증가하나, 고온에서 M_6C 탄화물은 시효 시간에 무관한 것으로 나타났다.

Abstract The effects of operating temperature and stress on degradation of components in high temperature steam generator were investigated. Several 2.25Cr1Mo tubes which had operated over 20 years and an unused 9Cr1MoVNb tube were tested. For the former samples, the amount of M_6C carbide and its size are increased with the aging or operating time. The precipitation behavior of carbides (M_2C , M_6C) is changed with the operating temperature of the tubes. However, unused 9Cr1MoVNb samples show a different carbide precipitation process due to high chromium, vanadium, and niobium contents. The amount of Cr-rich $M_{23}C_6$ carbide is significantly increased with aging time, but that of M_6C type carbide is rarely changed with aging time at elevated temperatures.

1. 서 론

최근 고온 및 고압의 가혹한 사용 조건으로 인해 발전설비의 보일러 부품과 석유화학 설비 등이 열화되어 파열되는 사고가 빈번하게 발생하고 있으며 그에 따른 사회적, 경제적 손실이 심각하게 초래되고 있다. 발전설비의 파열 사고가 발생하게 되면 발전설비의 운전을 중지하여야 하므로, 발전설비의 파열을 미연에 방지하는 것이 전력의 안정적인 공급 및 발전설비의 관리에 있어서 대단히 중요하다. 발전설비와 같이 고온 및 고압 분위기하에서 장시간 사용되는 설비의 경우 주로 사용 중에 누적되는 열적인 손상과 크리프 손상에 의하여 설비가 파손된다. 열적 및 크리프 변형이 가해지면 재료의 조직 변화가 발생하고 탄화물의 형상과 간격이 변화될 뿐만 아니라 탄화물의 형태와 조성이 변화게 된다.^{1~5)} 이러한 미세 조직 변화와 기지내 불순물(P, Sn, As, Sb)의 확산으로 기계적 특성이 저하되며, 탄화물의 조대화 및 석출로 인해 연성과 취성을 띠게 된다.⁶⁾

전형적 CrMo강의 고온 강도, 즉 고온 인장강도 및 크리

프 강도에 영향을 끼치는 인자로는 1) 탄화물의 형태 2) 탄화물의 종류 3) 기지내에 잔존하는 합금원소의 양 등이 있으며, 특히 기지 조직내에 잔존하는 Mo 양에 직접적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다.⁷⁾ 또한, 고온 강도는 탄화물 입자 사이의 간격 변화와 고용체 내에 존재하는 합금원소에 의존하며, 사용 시간이 증가할수록 침상인 M_2C 형태의 탄화물과 구상인 M_6C 형태의 탄화물이 석출하는 경향이 커진다.⁸⁾ 이러한 탄화물들의 석출 및 조대로 인해 기지내 Mo와 C 같은 합금원소가 크게 감소하게 되며, 앞에서 언급된 탄화물의 형태 변화 및 새로운 석출로 인해 인성이 감소된다.⁷⁾ 만일 시효 및 크리프 시험중에 나타나는 탄화물의 변화와 재료의 손상 정도 사이에 정량적인 관계를 구할 수 있다면, 설비의 열화정도 파악이 가능하여 예기치 못한 설비의 파손을 방지할 수 있을 것이다.

이로부터 본 연구에서는 발전설비의 수명 예측을 위하여 탄화물 변화의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 실제 설비에서 장시간 사용한 2.25Cr1Mo강 튜브, 크리프 파단 시험한 시료 및 열처리한 시료에서의 탄화물 변화에 대

한 연구를 수행하였다. 잔사 추출로부터 얻어진 탄화물에 대하여 XRD 분석을 하여 손상 정도에 따른 정량적인 자료를 얻고자 하였으며, 사용 조건에 따른 탄화물 변화 차이를 조사하였다. 또한 9Cr1MoVNb강을 이용하여 크리프 시험과 열처리를 행하여 발생하는 탄화물 변화 거동을 XRD를 이용하여 관찰하였고, 크리프 손상이 탄화물 변태에 미치는 영향을 조사한 후 이를 2.25Cr1Mo강의 탄화물 변화와 비교하여 합금조성에 따른 탄화물의 변화 특성을 파악하였다.

2. 실험 방법

열화정도에 따른 탄화물 조대화 및 변화 거동을 평가하기 위해 사용된 재료는 2.25Cr1Mo강 및 9Cr1MoVNb강이다. 2.25Cr1Mo강의 경우 미사용재와 40,000 시간 및 176,000 시간 사용된 소재와 당시 과열된 소재를 사용하였는데, 열화정도를 비교하기 위해 추정 사용시간이 거의 20여년 정도(170,000시간)이나 손상이 거의 되지 않은 장기 사용 소재를 함께 사용하였다. 또한 근래 사용되기 시작한 9Cr1MoVNb강의 경우는 미사용재를 사용하여 열처리를 수행하고 크리프 시험을 행하였다. 표 1에 2.25Cr1Mo와 9Cr1MoVNb강의 조성이 나타나 있으며, 본 연구에서 사용한 시편의 이력이 표 2에 나타나있다.

2.25Cr1Mo강의 기계적인 특성을 조사하기 위해 발전소 튜브의 실제 사용온도(538℃)보다 높은 650℃ 온도에서 일정 하중 크리프 시험을 하였다. 또한 EPRI 보고서⁹⁾에 나타난 방법을 따라 내부 산화층 두께를 측정하여 사용 온도를 추정하였다. 9Cr1MoVNb강은 600℃와 650℃에서 크리프 시험을 하였고 동시에 같은 온도 및 시간 동안 열처리한 시료의 경도변화를 크리프 시험한 시료의 경도 변화와 비교하였다.

2.25Cr1Mo 미사용재 및 장시간 사용한 튜브, 크리프 시험한 2.25Cr1Mo 시료, 그리고 미사용 9Cr1MoVNb 시료에서의 시간에 따른 전체적인 탄화물 변화 거동 차이는 잔사 추출을 통해 조사하였다. 이를 위해 실제 발전소에서 사용된 튜브, 크리프 시험한 시편 및 열처리만 수행한 시료로부터 탄화물을 전기화학적으로 추출하였다. 이 경우 스케일을 제거한 시편을 10%HCl-90%methanol 전해액 중에 위치시킨 후 약 3~4V 정도의 전류를 5시간 정도 흘려주어 탄화물만을 선택적으로 추출하여 XRD를 사용하여 탄화물을 분석하였다.^{10~12)} 이 때 가속 전압은 40kV, 튜브 전류는 25mA 하에서 CuK α ($\lambda=1.5418\text{\AA}$)으로 측정하였으며 step으로 counting하였다. 또한 두 종류의 강에 대하여 탄화물의 형태 및 조대화 정도를 SEM으로 확인하였다.

Table 1. Chemical compositions of 9Cr1MoVNb and 2.25Cr1Mo steels.

| | Chemical composition (wt.%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------------------------|---------------|---------------|-------|-------|-------|---------------|---------------|---------------|-------|-----------------|---------------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | V | Al | N | Nb |
| 9Cr1MoVNb | 0.08 -0.02 | 0.20 -0.50 | 0.30 -0.60 | ≤0.02 | ≤0.01 | ≤0.40 | 8.00 -9.50 | 0.85 -1.05 | 0.18 -0.25 | ≤0.04 | 0.030 -0.070 | 0.06 -0.10 |
| 2.25Cr1Mo | ≤0.15 | ≤0.50 | 0.30 ~0.60 | ≤0.03 | ≤0.03 | | 1.90 ~2.60 | 0.87 ~1.13 | | | | |

Table 2. Prehistory of service-exposed specimens.

| Steel | Operating time(hr) | Exposed temp.(℃) | Operating plants |
|-----------|--------------------|------------------|------------------|
| 2.25Cr1Mo | 0 | - | - |
| | 40,000 | 565 | A |
| | 170,000 | 452 | B |
| | 176,000 | 571 | C |
| 9Cr1MoVNb | 0 | - | - |

3. 결과 및 고찰

2.25Cr1Mo강의 탄화물 잔사 추출

재료의 강도에 영향을 미치는 탄화물의 전체적인 변화 거동을 파악하기 위해 여러 조건에서 사용된 튜브로부터 전해 추출 방법으로 탄화물을 잔사 추출한 후, 그 분말을 XRD를 이용하여 변화를 조사하였다. 미사용 2.25Cr1Mo강을 650℃에서 50MPa 및 70MPa 응력하에서 크리프 시험한 시험편과 미사용재에서 추출한 탄화물을 XRD 분석한 결과가 그림 1에 나타나있다. 여기서 2 값이 약 45°에서 관찰되는 M₂₃C₆ 탄화물의 peak 값이 가장 현저하게 나타났으

며, 크리프 시험 시간이 긴 경우 M₆C 탄화물의 peak는 2θ가 43° 부근에서 나타났다.

미사용재, 40,000시간, 176,000시간 사용재와 176,000시간 사용 후 과손된 튜브의 화염부와 비화염부에서 채취한 탄화물의 X-ray 분석 결과가 그림 2에 나타나있다. 여기서 과열된 튜브의 경우 M₆C 탄화물의 양이 현저히 증가하여 43°에서 그 peak가 M₂₃C₆ peak와 거의 같아지는 것을 알 수 있으며, 전반적으로 사용조건이 가혹하며 사용기간이 길수록 M₆C 탄화물의 peak가 증대되었다. 이들 튜브의 사용온도는 산화층 두께(X)와 사용기간(t)으로부터 EPRI 보고서⁹⁾에 나타난 방법($\log X = C_1 + C_2 + C_3 \log t$, 여기서

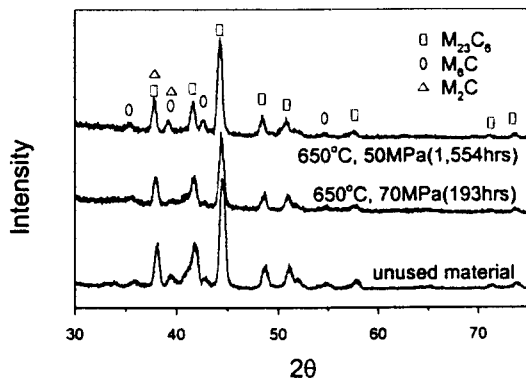


Fig. 1. XRD patterns of extracted carbides after creep tested at 650°C and unused 2.25Cr1Mo.

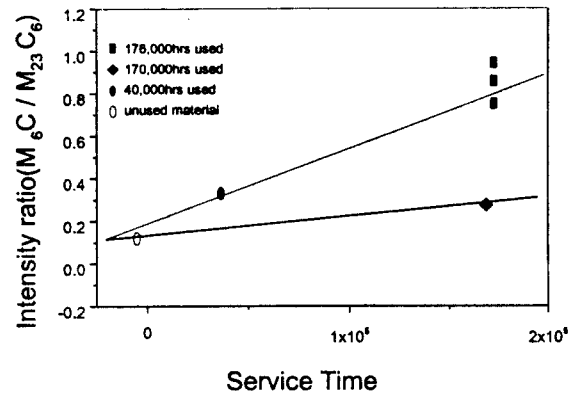


Fig. 4. $M_6C/M_{23}C_6$ ratio changes with service time and conditions.

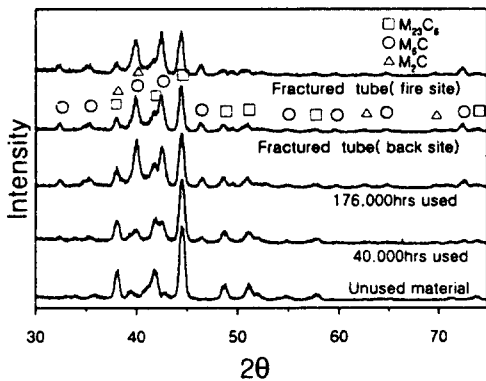


Fig. 2. XRD patterns of carbides extracted from several 2.25Cr1Mo steel tubes with service time.

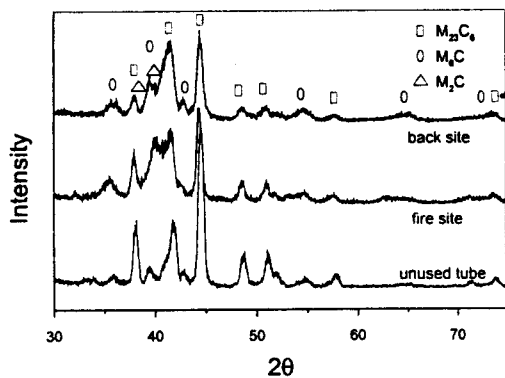


Fig. 3. XRD patterns of carbides extracted from 170,000hrs used 2.25Cr1Mo steel tubes and unused tube.

C_1 , C_2 및 C_3 는 상수이다)으로 분석하였을 때 약 565~571°C 정도로 추정되었다.

B사에서 사용된 튜브의 화염부와 비화염부에서 각각 추출한 탄화물을 XRD 분석한 그림 3에서 보면 M_6C 는 미약하며 M_2C 와 $M_{23}C_6$ 형태의 탄화물이 대부분을 차지하는 것을 알 수 있다. 또한 SEM을 통하여 M_2C 로 추정되는 침상의 미세한 탄화물들을 확인하였으며, 이때 사용온도는 튜브 내부의 산화층 두께와 사용기간으로부터 약 452°C 정도로 추정된다. Qu와 Kuo¹³⁾에 따르면 vanadium이 존재하면

Mo-rich인 탄화물의 증가가 억제되며, 540°C에서 재료를 사용할 때 M_6C 의 석출이 M_2C 의 석출보다 우세하게 된다고 하였다. 그러나 본 연구 결과에서는 이와 달리, 2.25Cr1Mo강에는 vanadium이 존재하지 않아 탄화물 석출에 영향을 미칠 수 없는데도 이러한 탄화물 석출의 차이가 발생하였다. 이 이유는 장기간 사용시 100°C 정도의 사용 온도 차이로 인해 온도가 높은 경우(565~571°C)는 M_6C 가 주를 이루는 석출이 이루어지고, 낮은 경우(452°C)는 M_2C 가 대다수인 석출이 발생하였기 때문으로 생각된다. 즉 재료의 석출거동의 차이는 사용 온도차로 인한 열적 활성화 과정이 탄화물 생성기구에 다르게 작용하여 생기는 차이라고 보여진다.

M_6C 탄화물 peak와 $M_{23}C_6$ 탄화물의 peak를 그림 4에서 비교하여 나타내었다. 미사용재, 40,000시간 사용한 소재, 176,000시간 사용한 소재, 그리고 파열된 튜브의 화염부와 비화염부의 소재에서 사용시간이 증가함에 따라 $M_6C/M_{23}C_6$ 탄화물의 비율이 증가되고 있다. 반면 약 452°C에서 사용된 소재(B사, 170,000시간)의 경우는 탄화물 비율이 증가하는 기울기가 완만하고, 또한 사용하지 않은 재료와 비율에 차이가 없어 손상 정도가 크지 않다고 판단된다.

2.25Cr1Mo강에서 잔사 추출된 탄화물의 형태를 보여주는 SEM 사진이 그림 5에 나타나있다. 미사용재의 경우(그림 5(a)) 탄화물이 상대적으로 미세하며 40,000시간 사용재(그림 5(b))와 176,000시간 사용재의 경우(그림 5(c)) 사용시간에 따라 탄화물의 크기가 성장하는 것을 알 수 있다. 탄화물이 이렇게 조대화 되려면 계속 탄화물이 생기기 보다는 기존 탄화물에 합금 성분이 계속 공급되면서 그 크기가 커지는 것으로 여겨진다. 이런 과정에서 기지내에 고용된 성분이 석출하고, 미세한 탄화물은 크리프 변형과 기지내의 농도 변화로 불안정하게 되어 재용해가 일어나며 다시 조대한 탄화물을 계속 성장시킨다고 여겨진다. 이런 경우 탄화물 사이의 간격과 크기는 계속 커지며, 사용조건이 가혹할수록 커지리라 생각된다. 이에 비하여 B사에서 사용된 재료의 경우는 사용한 시간이 장기간임에도 불구하고 탄화물의 크기가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다

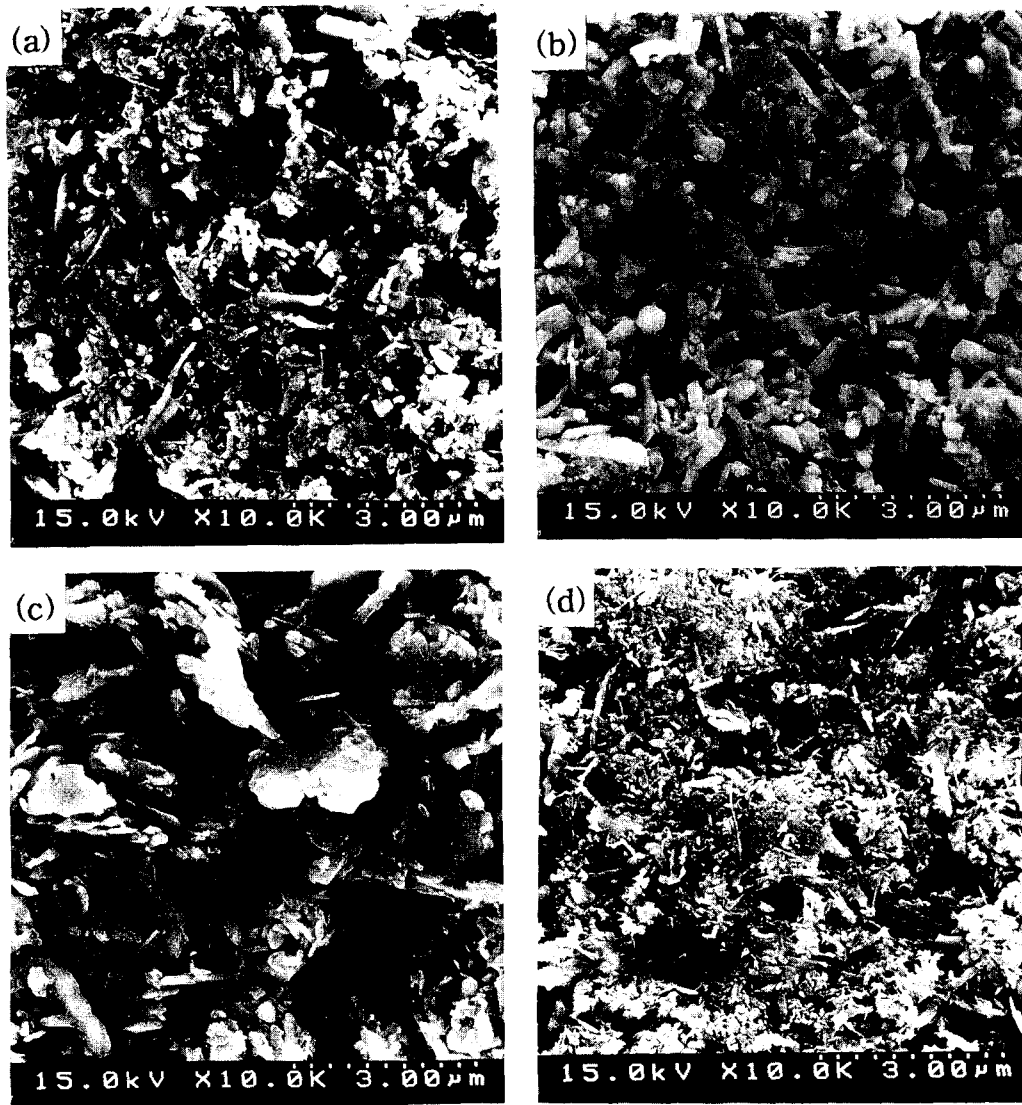


Fig. 5. SEM photographs showing shape of the carbides extracted from 2.25Cr1Mo tube (a) unused tube, (b) 40,000hrs used, (c) 176,000hrs used and (d) 170,000hrs used.

(그림 5(d)). 일반적으로 사용온도가 높을수록 탄화물의 조대화가 심하며 열화의 정도가 크다고 생각되어지므로, 장시간 사용되었음에도 탄화물 크기가 미세한 이유는 앞에서 언급된대로 추정 사용온도가 452℃로 176,000시간 사용재(사용온도 : 565~571℃)에 비해 낮기 때문이라고 생각된다.

이상에서 본 실험에서 사용한 시험들, 즉 탄화물의 상 분석, 산화층의 두께 측정 등을 통하여 보일러 튜브의 실제 사용온도와 손상정도를 예측함으로써 사용중인 설비의 잔존 수명예측이 가능할 것으로 판단된다.

9Cr1MoVNb 강의 경도측정

9Cr1MoVNb강의 경우 크리프 시험한 시료 및 열처리만을 행한 시료의 경도변화를 조사하였다(그림 6). 이때 열처리한 시료의 경우, 온도 조건을 크리프 시험 온도와 같게 하고 열처리 시간도 크리프 시험 시간과 같이 하였다. 그림 6에 나타난 바와 같이 열처리만 행한 경우에는 경도에 뚜렷

한 변화가 없었으나, 크리프 파단된 시편의 경우 열처리만 행한 시료에 비해 경도가 10% 이상 감소되었다. 이 경우 경도 감소는 크리프 시험 조건 변화와 무관하게 나타났는데, 이에 대하여는 추가적인 확인 실험이 필요하다. 이와같은 9Cr1MoVNb강의 결과는 미세한 VC 및 NbC 등에 의한 강화 효과가 열처리에 따라 변화하지 않기 때문이라고 보여진다.^{14, 15)}

열처리(650℃에서 200시간 및 500시간)만 행한 9Cr1MoVNb강 시편에서 잔사추출된 탄화물을 XRD를 이용하여 분석한 결과가 그림 7에 나타나 있고, 650℃에서 100MPa 및 120MPa로크리프 시험한 시편에서 잔사추출된 탄화물을 분석한 결과가 그림 8에 나타나있다. 두 시료 모두 공통적으로 소량의 MC와 다량의 M₂₃C₆ 탄화물로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 그러나 크리프 시험한 시료의 경우 열처리만을 행한 시료와는 달리 M₆C 탄화물이 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 열처리 이외에 크리프 응력

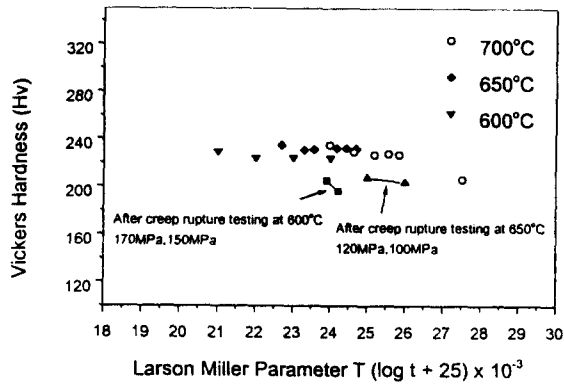


Fig. 6. Changes in Vickers hardness after creep tested at 650°C and 600°C, and aged at 600, 650 and 700°C.

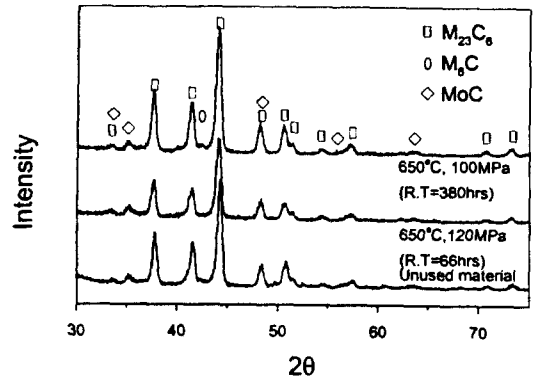


Fig. 8. XRD patterns of 9Cr1MoVNb after creep tested at 650°C (100 and 120MPa).

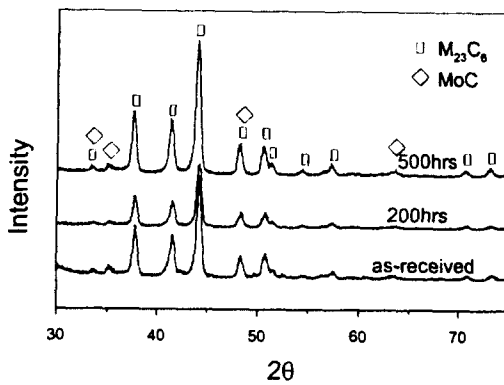


Fig. 7. XRD patterns of 9Cr1MoVNb after aging at 650°C (200 and 500hrs) and unused material.

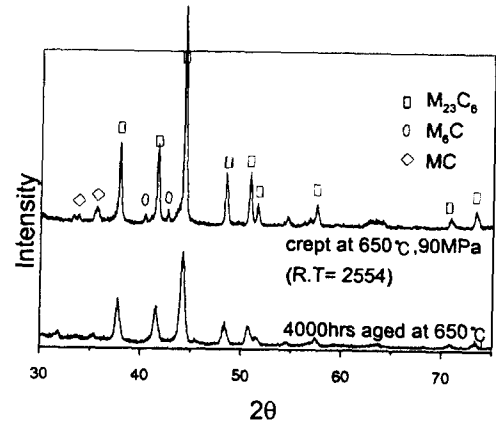


Fig. 9. XRD patterns of carbides from 4,000hrs heat treated and crept at 2,554hrs at 650°C.

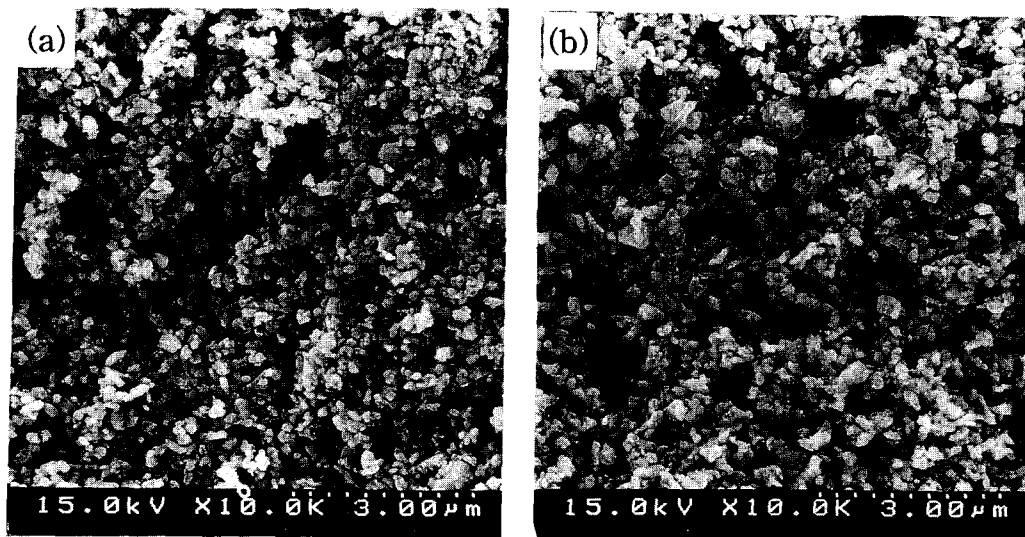


Fig. 10. SEM photographs showing shape of the carbides extracted from 9Cr1MoVNb tube material (a) unused tube and (b) 4,000hrs aged.

에 의해 M_6C 탄화물의 형성이 가속되어지고 있다는 사실을 나타낸다. 따라서 탄화물 변화에 대한 응력 영향 유무에

대한 관명이 중요한 관심사이다. 이를 위해 9Cr1MoVNb 강을 650°C, 90MPa 하에서 2,554시간 크리프 시험한 시

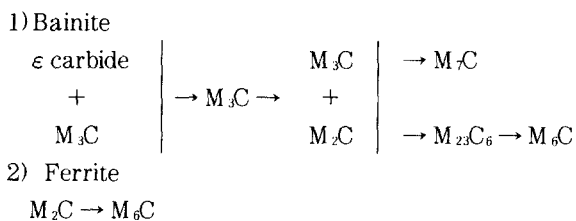
료와 4,000시간 열처리 한 시료에서 탄화물을 추출하여 변화 거동 차이를 확인하고자 하였다(그림 9). 이전까지 미약하던 M_6C 탄화물이 90MPa 실험조건에서 확실하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 열처리 이외에 크리프 응력에 의해 9Cr1MoVNb강내에서 M_6C 탄화물 형성이 가속되고 있다는 사실을 나타내고 있다.

또한 사용하지 않은 재료와 4,000시간 시효처리 한 9Cr1MoVNb강에서 추출한 탄화물의 SEM 사진(그림 10)에서 보면, 이전의 2.25Cr1Mo강에서 추출한 탄화물과는 달리 형태가 거의 일정한 구형의 탄화물들로 이루어져 있다. EDAX분석을 통해 Cr-rich 탄화물(Cr : 85.3wt.%, Mo : 14.7wt.%) 과 미세한 (Nb,V)C의 탄화물(V : 32.5wt.%, Nb : 67.5wt.%) 들로 구성되었음을 확인할 수 있었다. 여기서 열처리를 통해 탄화물의 크기 차이를 확인할 수는 없었지만 장시간 사용할 때에는 2.25Cr1Mo강에서처럼 탄화물의 변화가 발생할 것으로 예측된다.

2.25 Cr1Mo강과 9Cr1MoVNb강의 탄화물 변화 양상 비교

2.25Cr1Mo강과 9Cr1MoVNb강에서 탄화물 변화 양상을 비교하기 위하여, 잔사 추출된 탄화물을 XRD 분석한 후 시간에 따른 M_6C 탄화물과 $M_{23}C_6$ 탄화물간의 비율 변화를 그림 11에 함께 나타내었다. 일반적으로 저합금강을 고온에서 장시간 사용시 미세구조가 변화되고, 이러한 미세구조의 변화는 기계적 특성의 저하를 가져온다. 즉 M_2C , M_6C 탄화물의 석출과 조대화로 인해서 기지내 Mo의 함량이 감소되어 고온 강도가 감소하고, 기지조직내의 Mo 함량 감소는 입계를 취화시키는 P가 결정립계에 석출되는 것을 억제하는 기능을 상실함으로써 크리프 강도의 감소를 가져오게 된다.^{16,17)} 그림 11에서 2.25Cr1Mo강에서는 $M_6C/M_{23}C_6$ 비가 시간에 대하여 지수적으로 증가하는 것처럼 보이나, 9Cr1MoVNb강에서는 $M_6C/M_{23}C_6$ 비는 시간에 따라 변화하지 않는 경향을 보인다. 석출물의 형태는 시료내에 존재하는 Cr량에 따라 달라지는데, $M_{23}C_6$ 탄화물은 기지내 Cr 양이 증가할수록 안정화된다고 보고되고 있다. 즉 9Cr1MoVNb강에서의 탄화물은 9wt.%의 Cr의 존재로 인해서 Fe 함량이 적은 Cr-rich의 매우 미세하고 안정된 $M_{23}C_6$ 탄화물이 래스 계면, 오스테나이트 계면에 석출된다.¹⁵⁾

일반적인 2.25Cr1Mo강에서의 탄화물 변태 반응은 다음과 같다.¹⁴⁾



여기서 2.25Cr1Mo강의 경우는 탄화물 변화가 심하여, 실제 고온 고압하에서 장시간 사용되는 발전 설비용 소재로 사용될 때, 소재의 특성이 초기와 다르게 변화되는 경년 열화 가능성이 크다. 한편 Cr 함량이 7wt.% 이상 함유된 강

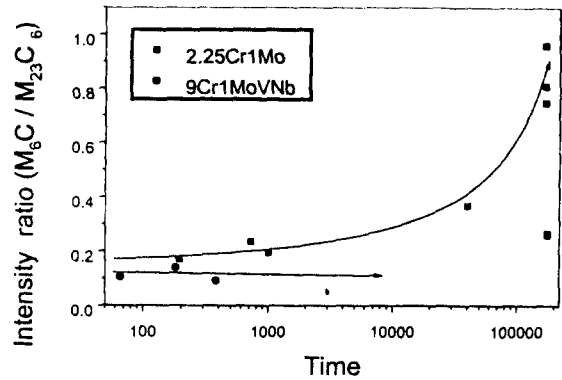
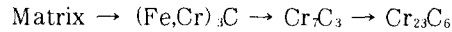


Fig. 11. Changes in XRD intensity ratio of $M_6C/M_{23}C_6$ for 2.25Cr1Mo and 9Cr1MoVNb with time.

에서의 탄화물의 석출은 다음과 같다.¹⁵⁾



즉 Cr 함량이 증가할수록 $Cr_{23}C_6$ 와 Cr_7C_3 는 동시에 석출하기 시작하며, $Cr_{23}C_6$ 탄화물이 석출 및 성장할 때 Cr_7C_3 와 Cr_2C 형태의 탄화물은 소모된다. 따라서 Cr 함량이 높은 9Cr1MoVNb강에서는 조직 내 Cr/C의 높은 비율로 인해 Cr-rich의 $M_{23}C_6$ 탄화물의 석출 및 성장이 다른 탄화물에 비해 지배적이다. 또한, 9Cr1MoVNb강에서 탄화물이 시간에 따라 변화가 없는 것은 V이 Mo-rich 탄화물의 형성 속도를 감소시키며,¹³⁾ Nb 및 V과 같은 원소들이 $M_{23}C_6$ 탄화물의 조대화를 억제하여 상 안정성을 증가시키기 때문으로 여겨진다.

이상에서 9Cr1MoVNb강은 경년 열화의 정도가 작으나 크리프 응력을 장시간 받을 경우 경년 열화가 예상보다 빠르게 진행될 수 있어(그림 6 및 그림 9), 크리프 조건이 탄화물의 변화에 미치는 영향에 대한 연구가 앞으로 필요하다 고 여겨진다.

4. 결 론

9Cr1MoVNb강과 미사용 2.25Cr1Mo강 및 여러 사용재를 사용하여 600°C와 650°C에서 열처리 및 크리프 시험을 하였고, 또한 사용재와 열처리 및 크리프 시험한 시료에서 탄화물을 추출한 후 XRD와 SEM으로 분석한 후 열화정도를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 2.25Cr1Mo강에서 사용 시간에 따라 M_6C 와 M_2C 비율이 증가하였고 탄화물의 조대화와 구상화가 일어났다.
- 2) 9Cr1MoVNb강의 경우 $M_{23}C_6$ 와 MC 탄화물들로 이루어져 있고 일정한 구형의 모양을 가지며, 크리프 응력이 9Cr1MoVNb강내의 M_6C 탄화물의 생성을 가속시켰다.
- 3) 2.25Cr1Mo강에서는 $M_6C/M_{23}C_6$ 비율이 시간에 따라 증가하는 반면, 9Cr1MoVNb강에서는 $M_6C/M_{23}C_6$ 비율의 증가 속도가 현저히 느린 경향을 나타내었다. 이는 재료내 존재하는 탄화물 형성 원소인 Cr량의 상대적 차이에 의해서, 즉 조직 내 Cr/C의 높은 비율로 인해, M_7C_3 에서 $M_{23}C_6$ 로의 변태를 발생시키며 또한 $M_{23}C_6$ 성장은 M_2

C와 M_7C_3 를 소비하며 가속되기 때문이다.

4) 장기간 사용한 2.25CrMo강 중 온도가 높은 경우 (565~571°C)는 M_6C 가 주를 이루는 석출이 이루어지고 낮은 경우 (450°C 정도)는 M_2C 가 다량으로 석출되었다. 이러한 석출거동의 차이는 사용 온도차로 인한 열적 활성화 과정이 재료에 다르게 작용하여 생기는 차이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 한국과학재단의 특정 기초 연구지원 (96-0300-01-01-3)으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. K.R. Williams and B. Whilshire : Mater. Sci. Eng., **47**, 151 (1981).
2. F. Abe, S. Nakazawa, H. Araki and T. Noda : Metall. Trans., **23A**, 469 (1992).
3. J. Janovec, A. Vyrostkova and M. Svoboda : Metall. Trans., **25A**, 267 (1994).
4. P.J. Ennis, A. Zielinska-Lipiec, O. Wachter and A. Czyska-Filemonowicz : Actamater., **45**, 4901 (1997).
5. A. Vyrostkova, A. Kroupa, J. Janovec and M. Svoboda : Acta mater., **46**, 31 (1998).
6. N.S. Cheruvu : Metall. Trans., **20A**, 87 (1989).
7. G.C. Gould : ASTM, Spec. Tech. Publication. **407**, 90 (1968).
8. K.R. Williams and B. Whilshire : Mater. Sci. Eng., **28**, 289 (1977).
9. EPRI CS-5564, Remaining Life Assesment of Superheater and Reheater Tubes (1988)
10. F. Abe, H. Araki and T. Noda : Metall. Trans., **22A**, 2225 (1991).
11. R.L. Klueh and P.J. Maziasz : Metall. Trans., **20A**, 373 (1989).
12. Y. Watanabe and T. Shoji : Metall. Trans., **22A**, 2097 (1991).
13. Z. Qu and K.H. Kuo : Metall. Trans., **12A**, 1333 (1981).
14. A. Afrouze, M.J. Collins, and R. Pilkington : Metal Technol., **10**, 461 (1983).
15. W.B. Jones, C.R. Hills, and D.H. Polonis : Metall. Trans., **22A**, 2225 (1991).
16. J.M. Vitek and R.L. Klueh : Metall. Trans., **17A**, 1191 (1986).
17. L.K.L. Tu and B.B. Seth : Metal Technol., **5**, 79 (1978).