

액체금속로 전열관용 Cr-Mo강의 특성 연구

Study on Characteristics of Cr-Mo steels for Liquid Metal Reactor Heat Transfer Tube

김성호, 송병준, 한창석, 류우석, 국일현

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

액체금속로 전열관재료용 Mod.9Cr-1Mo강과 W를 1.9 wt% 첨가한 T92강에 대한 tempering 온도에 따른 기계적특성 및 미세조직의 변화를 조사하였다. 미세조직을 관찰한 결과 tempering시 나타나는 전위회복에 의해 형성되는 cell구조는, Mod.9Cr-1Mo강의 경우 tempering 온도가 700°C인 반면, W를 첨가한 T92강의 경우는 750°C인 점으로부터 W 첨가에 의해 전위회복이 지연되었음을 알 수 있다. Tempering 온도에 따른 경도변화에서는 T92강의 경도감소 정도가 작았다. 고온 인장시험 결과 W를 첨가한 T92강은 Mod.9Cr-1Mo강에 비해서 tempering 온도 전 영역에 걸쳐 높은 고온 인장강도와 항복강도를 나타내었으며, 이것은 W 첨가로 인한 미세구조의 안정화에 기인하는 것으로 보인다. 상온 충격시험에서는 항복강도가 낮은 Mod.9Cr-1Mo강이 더 높은 충격흡수에너지값을 가졌다.

Abstract

Microstructure and mechanical properties of Mod.9Cr-1Mo and W added T92 steels for LMR heat transfer tube were investigated. The tempering temperatures which cell structure was formed were 700°C in Mod.9Cr-1Mo steel and 750°C in W added T92 steel. The cell structure was formed at higher temperature in T92 steel because the recovery of dislocation was delayed by the addition of W. Microhardness, ultimate tensile strength and yield strength of T92 steel were higher than those of Mod.9Cr-1Mo steel. But toughness of Mod.9Cr-1Mo steel was superior to that of T92 steel.

1. 서론

최근 전세계적으로 에너지 절약을 목적으로 터빈로터, 보일러, 화력 및 원자력 발전소 등 에너지 플랜트에 대한 내구성 향상 및 고효율화가 추진되고 있으며, 이에 따라 높은 온도와 압력에서 견딜 수 있는 내열재료의 개발 연구에 많은 노력을 기울이고 있다[1-3]. 기존의 화력발전소의 고온·고압 분위기에 사용되었던 내열재료로서는 2.25Cr-1Mo강 및 1.25Cr-0.5Mo강 등이 있으나 최근에 초초임계압 발전의 요구에 따라 최근 20년간 9Cr-1Mo강과 12Cr강 등에 대하여 많은 연구개발이 이루어졌다. 국내에서도 2010년경 액체금속로 실증로를 건설하려는 계획을 추진하고 있으며, 이에 따라 많은 연구를 수행하고 있다[4]. 이를 위하여 기술 블록화 추세 속에서 액체금속로 개발 선진국에서 기술 전수를 꺼리는 핵심요소 기술의 확보가 실증로 개발에 매우 중요한 요인으로 고려된다. 이 요소기술 가운데 하나로 액체금속로 증기발생기 전열관 재료는 액체나트륨 및 물과 접촉하고 있어 물과 액체나트륨에서의 내부식성과 응력부식균열에 대한 저항성이 요구되고 있다. 9Cr-1Mo강은 고온강도, 용접성 및 가공성 등이 우수하고 특히 응력부식균열과 액체나트륨에서의 탈탄 저항성이 우수하여 [5,6] 국내에서도 향후 액체금속로용 증기발생기 전열관의 주요 소재로 활용될 후보재료이다. 최근 기존의 9Cr강에서 탄소 함량을 감소시키고, Mo의 함량을 증가시킴과 동시에 V, Nb 등의 합금원소를 미량 첨가시켜 V(C,N), Nb(C,N) 등과 같은 고온 안정화 탄질화물을 형성시킨 개량형 9Cr-1Mo강(이하 Mod9Cr-1Mo강이라고 함)이 개발되었다. 이 강은 높은 온도에서도 우수한 고온강도와 안정성을 가지고 있는 재료이다. 특히 최근에는 9Cr-1Mo강에 V, Nb 이외에 W를 첨가하여 고온강도를 더욱 향상시키고자 하는 연구가 일본뿐만 아니라 국내에서도 활발히 연구되고 있다. 이와 같이 Mod9Cr-1Mo강은 tempering온도와 같은 열처리조건뿐만 아니라 합금원소의 첨가에 의해서도 미세조직 및 기계적 특성에 영향을 미친다.

따라서 본 실험에서는 액체금속로 전열관에 적용할 재료개발의 기초연구로써 Mod9Cr-1Mo강과 이 강에 W를 첨가시킨 내열강(T92강)을 이용하여 tempering 온도를 변화시켰을 때 나타나는 미세조직 및 기계적 특성 변화에 대하여 살펴보았다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 진공유도용해로(vacuum induction melting furnace)를 사용하여 30 kg의 잉곳으로 제작하였으며, 이 잉곳을 아르곤 분위기에서 1150°C까지 가열한 뒤 2시간 동안 유지한 후 열간압연하여 최종적으로 15 mm와 4 mm 두

계의 판재를 제작하였다. 본 실험에 사용된 시편의 화학조성을 표 1에 나타내었다. 9Cr강계의 열처리는 normalizing과 tempering 처리를 함으로써 고온 기계적 성질을 향상시키는 것이 일반적인 방법으로 알려져 있다. 열처리는 진공 tube로를 이용하였다. Normalizing 처리는 900°C부터 1100°C의 온도범위에서 50°C 간격으로 1시간 동안 하였으며, normalizing 처리 후에 공기 중에서 냉각하였다. 그리고 tempering 처리는 500°C부터 800°C의 온도범위에서 50°C 간격으로 2시간 동안 하였다. 광학현미경 및 TEM을 이용하여 열처리한 시편의 조직을 관찰하였다. 그리고 열처리 조건에 따른 경도 값의 변화를 살펴보기 위하여 Vickers microhardness로 경도 값의 변화를 측정하였으며, 열처리 조건 및 시험온도에 따른 인장특성을 파악하기 위하여 고온인장시험을 하였다. 그리고 사피충격 시험기를 이용하여 상온에서 충격시험을 하였다.

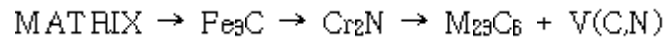
3. 결과 및 고찰

1. 열처리에 따른 미세조직 변화

W 첨가에 따른 미세구조의 변화를 살펴보기 위하여 두 강종의 미세조직을 TEM을 이용하여 관찰하였다. 그림 1에 1050°C에서 normalizing한 후 tempering 온도에 따른 마르텐사이트 래스 조직변화를 나타내었다. Mod9Cr-1Mo강을 500°C부터 650°C까지의 온도범위에서 tempering한 경우에는 normalizing 조직과 별다른 차이를 보이지 않았다. 그러나 700°C에서 tempering한 경우에는 래스 내부에서 전위 회복 현상에 의해 전위들의 재배치로 인하여 래스내에 cell구조가 형성되는 것이 관찰되었다. 이러한 cell구조는 750°C에서 tempering처리 후 더욱 뚜렷해졌으며, 전위가 래스경계에 수직방향으로 재배열되는 것을 관찰할 수 있었다. 800°C에서 tempering한 후에는 래스내의 전위는 대부분 사라지고, 래스구조가 좀 더 조대한 크기의 등축구조(equiaxed structure)로 변한 것을 관찰할 수 있었다. 1050°C에서 normalizing한 T92강의 tempering온도에 따른 마르텐사이트 래스조직의 변화를 보면, Mod9Cr-1Mo강에 비하여 W를 1.9 wt% 첨가한 T92강에서는 700°C에서 tempering한 조직에서도 래스내에 전위가 높은 밀도로 분포하고 있는 것을 알 수 있으며, 전위 회복 현상에 의해 전위들의 재배치로 인하여 형성되는 cell구조가 뚜렷하게 관찰되지 않았다. 그러나 tempering 온도를 750°C로 상승시키면 T92강에서도 래스 마르텐사이트내에 전위회복에 의해 cell구조가 형성되는 것을 관찰할 수 있었다. 즉 tempering에 의한 전위회복 현상이 나타나는 온도는 W를 첨가한 T92강의 경우가 Mod9Cr-1Mo강보다 좀 더 고온으로 상승하였음을 알 수 있다. 또한 800°C에서 tempering한 조직을 보면, T92강의 경우에는 아직도 래스내에 전위들이 재배치하고 있음을 알 수 있으며, 래스폭과 cell의 크기도 Mod9Cr-1Mo강의 경우에 비해서 작

은 것을 알 수 있었다. 즉 9Cr-1Mo강에 첨가된 W은 기지내 합금원소, 특히 Fe의 자기확산속도(self-diffusion rate)를 감소시켜[7] 전위회복이 지연되는 현상이 나타났다.

9Cr-1Mo강은 normalizing 처리 후 tempering 처리를 함에 따라 급냉 후 형성된 마르텐사이트의 과포화상태가 풀리고 혼합상 등이 평행에 접근하면서 여러 가지 탄화물들이 석출된다. 일반적으로 9Cr-1Mo강에서 tempering 처리에 따라 나타나는 탄화물의 생성은 다음과 같이 보고되고 있다[8].



Mod9Cr-1Mo강과 T92강에서 tempering할 때 생성되는 석출물을 그림 2에 나타내었다. Mod9Cr-1Mo강에서는 1050°C에서 1시간 동안 normalizing한 후에는 구형의 NbC만 존재하고 있었으며, 다른 석출물들은 완전히 분해되었다. 500°C에서 tempering하면 래스 내부에 침상의 Fe-rich M₃C와 구형의 NbC가 존재하고 있었으며, 500°C에서는 이외에도 침상의 Cr₂N이 석출하고 있었다. Tempering 온도가 600°C로 높아지면 래스경계와 오스테나이트 입계에 M₂₃C₆가 석출하고 있었다. Cr₂N은 700°C에서 tempering할 때까지 존재하고 있었으나, 750°C에서 tempering하였을 때는 사라지고 대신 침상의 V(C,N)이 석출하고 있었다. NbC는 모든 tempering 온도에서 존재하고 있었다. T92강에서도 Mod9Cr-1Mo강과 비슷한 석출거동을 보이고 있었다. 1050°C에서 1시간 동안 normalizing한 후에는 역시 구형의 NbC만 존재하고 있었으며, Nb함량이 많은 Mod9Cr-1Mo강에 훨씬 많은 NbC가 석출하고 있었다. 각 tempering 온도에서 생성되는 석출물의 EDS 분석결과 W을 함유한 T92강에서는 모든 석출물에 W이 포함되어 있었다.

2. 기계적 특성 변화

그림 3은 Mod9Cr-1Mo강과 T92강의 각각의 tempering 온도에 따른 미세경도의 변화를 나타내었다. 두 강종 모두 tempering 온도가 상승함에 따라 미세경도값은 전반적으로 감소하였으며, W를 첨가한 T92강의 미세경도값이 Mod9Cr-1Mo강에 비해서 약간 높은 값의 미세경도값을 나타내고 있다. Tempering 온도 증가에 따른 미세경도값의 감소정도는 tempering 저항성을 나타내는 것인데 W를 첨가한 T92강에서의 경도감소가 Mod9Cr-1Mo강에서 보다 적은 결과로부터 T92강의 tempering 저항성이 더 우수한 것으로 생각된다.

그림 4는 1050°C에서 normalizing 처리한 후, tempering 온도를 변화시킨 Mod9Cr-1Mo강과 T92강을 600°C에서 인장시험한 결과를 나타낸 것이다. T92강이 Mod9Cr-1Mo강에 비해서 모든 tempering 온도구간에서 높은 인장강도와 항복강도를 보이는 반면 연신율은 낮은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이와 같이 W를 첨가한 T92강이 Mod9Cr-1Mo강에 비해서 우수한 고온인장강도를 보이는 것은 앞에

서도 언급한 바와 같이 W첨가에 따른 Fe의 자기확산속도(self-diffusion rate)의 감소로 인한 전위회복의 지연효과라고 생각된다.

그림 5는 1050°C에서 normalizing 처리한 후, 750°C에서 tempering한 시편을 시험 온도를 변화시키면서 고온인장시험한 결과이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 시험 온도가 높아짐에 따라 인장강도와 항복강도는 점차적으로 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 반면에 연신율은 증가하는 전형적인 고온인장시험의 결과를 나타내고 있다. W를 첨가한 T92강은 시험온도 전 영역에 걸쳐 Mod9Cr-1Mo강보다 높은 인장강도와 항복강도를 나타낸 반면 연신율은 낮은 값을 가지는 것으로 나타났으며, 시험온도가 증가함에 따라 두 강종의 인장강도와 항복강도의 차이는 줄어들었으나, 연신율의 차이는 더 커지는 것을 알 수 있다.

그림 6은 1050°C에서 1시간 normalizing 처리한 후, tempering 온도에 따른 충격 흡수 에너지 값을 나타낸 것이다. Mod9Cr-1Mo강은 tempering 온도 650°C까지의 충격흡수 에너지 값은 60J 미만이었으나, tempering 온도가 700°C로 증가하면서 충격흡수 에너지 값이 약 80J 이상 크게 증가함을 알 수 있다. 반면에 T92강은 750°C에서 tempering하였을 때 충격흡수에너지가 크게 증가하고 있었다. 이것은 tempering 온도가 증가함에 따라 나타나는 연성파괴로의 전이가 W를 첨가함에 따라 지연되고 있음을 보여주는 것이다. 이와 같이 특정 tempering 온도에서 충격에너지가 크게 증가하는 것은 전위의 회복과 함께 형성되는 cell과 같은 subgrain 형성으로 인한 결정립 미세화 효과 때문이다. 항복강도가 높은 T92강에서 전반적으로 낮은 충격흡수에너지를 나타내고 있었다.

4. 결론

액체금속로 전열관재료용 Mod9Cr-1Mo강과 W를 1.9 wt% 첨가한 T92강에 대한 tempering 온도에 따른 기계적특성 및 미세조직의 변화를 조사하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미세조직을 관찰한 결과, tempering시 나타나는 전위회복에 의해 형성되는 cell 구조는, Mod 9Cr-1Mo강의 경우 tempering 온도가 700°C인 반면, W를 첨가한 T92강의 경우는 750°C인 점으로부터 W 첨가에 의해 전위회복이 지연되었음을 알 수 있다.
2. 경도 시험 결과 T92강에서 tempering 온도증가에 따른 경도감소 정도가 작았다.
3. 고온 인장시험 결과 W를 첨가한 T92강은 Mod9Cr-1Mo강에 비해서 tempering 온도 전 영역에 걸쳐 높은 고온 인장강도와 항복강도를 나타내었으며, 이것은 W 첨가로 인한 미세구조의 안정화에 기인하는 것으로 보인다.
4. 상온 충격시험 결과 Mod9Cr-1Mo강이 T92강보다 높은 충격흡수에너지값을 가졌다.

후기

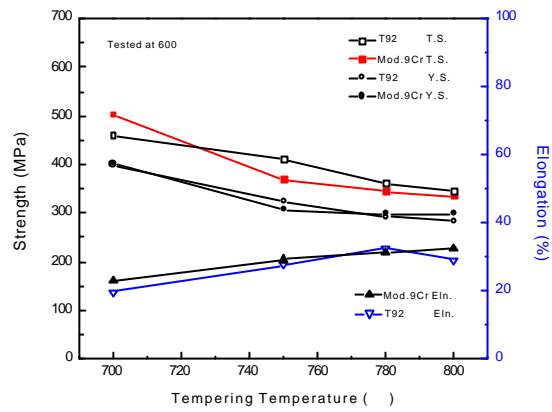
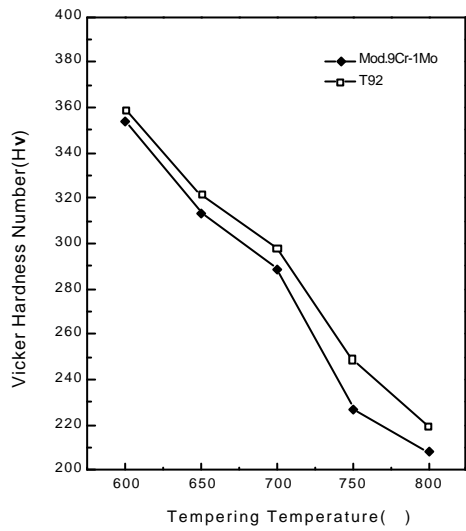
본 연구는 과기부에서 시행한 원자력중장기연구개발사업중 원자력재료기술개발/역체금속로재료평가 과제의 일부분으로 수행된 것입니다.

참고문헌

1. T. Fujita, ISIJ International, 32(2) (1992) 175
2. J. Orr and D. Burton, Ironmaking and Steelmaking, 20(5) (1993) 333
3. F. Abe and S. Nakazawa, Metallurgical Transactions A, 23A (1992) 3025
4. Mann Cho et al., Journal of the Korean Nuclear Society, 25(2) (1993) 300
5. J. Orr and L. Woollard, Microstructural Development and Stability in High Chromium Ferritic Power Plant Steels, Ed. by A. Strang & D.J. Gooch, The Institute of Materials, (1997) 53
6. G.C. Bodine et al., Pro. Inter. Conf. Ferritic Steels for Fast Reactor Steam Generator, BNES London, (1978) 160
7. J. Cermak et al., Kov. Mater., 18 (1980) 537
8. R.G. Baker and J. Nutting, JISI, 192 (1959) 257

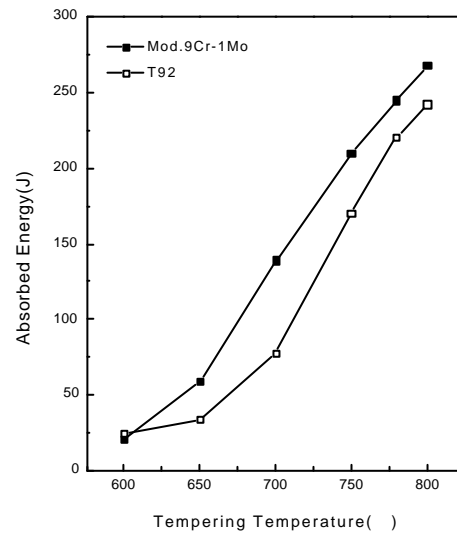
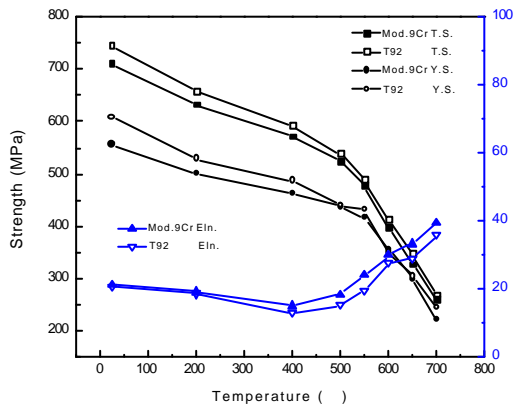
표 1 Mod,9Cr-1Mo강과 T92강의 화학조성

합금원소	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Nb	W
Mod,9Cr-1Mo	0,099	0,32	0,42	0,10	9,03	0,96	0,22	0,094	-
T92	0,096	0,06	0,44	0,19	8,95	0,48	0,204	0,055	1,9



3 Tempering

4 Tempering



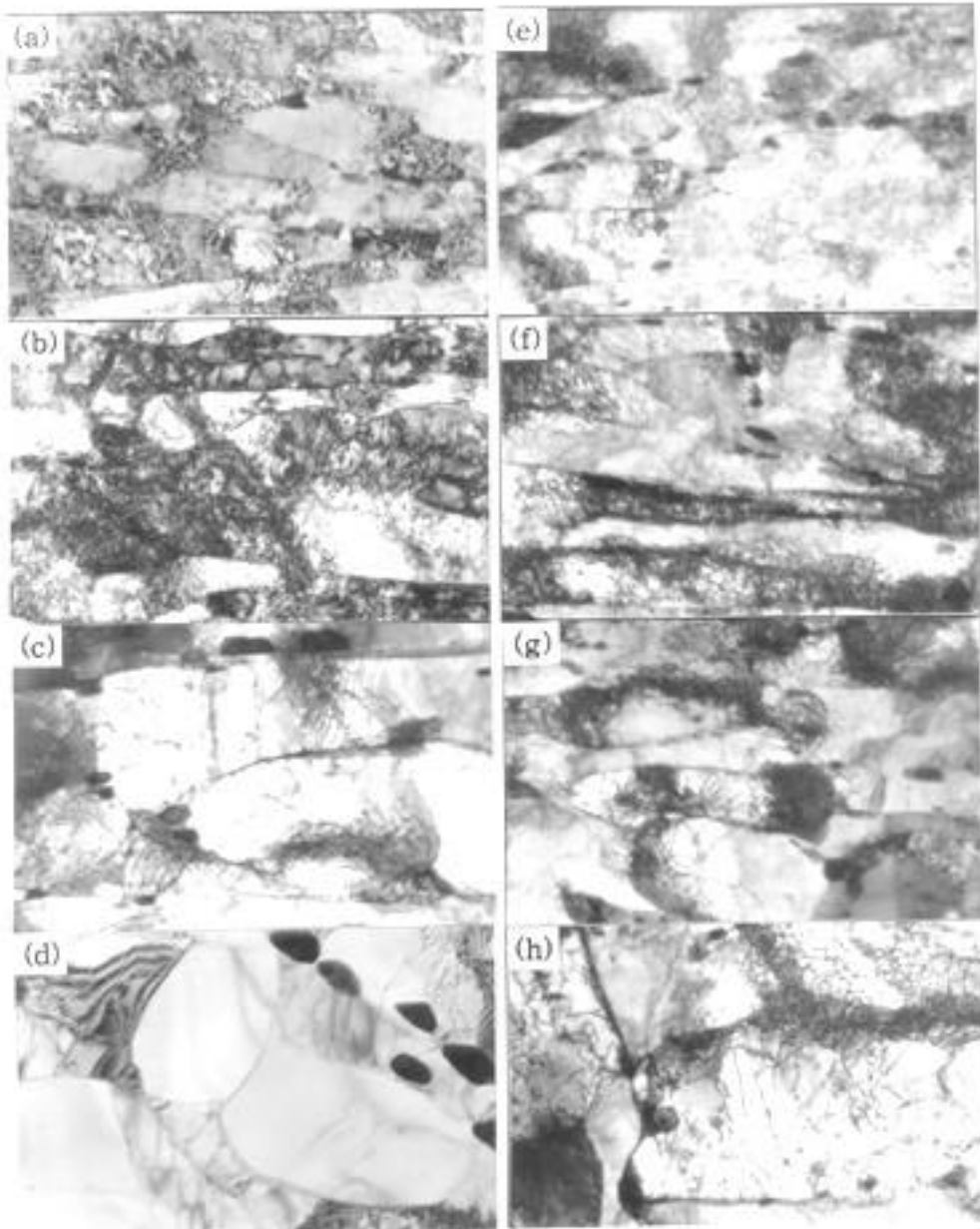


그림 1 Mod.9Cr-1Mo강 (a-d)과 T92강 (e-h)의 마르텐사이트 조직 : 템퍼링 온도 (a),(e) 650°C (b),(f) 700°C (c),(g) 750°C (d),(h) 800°C

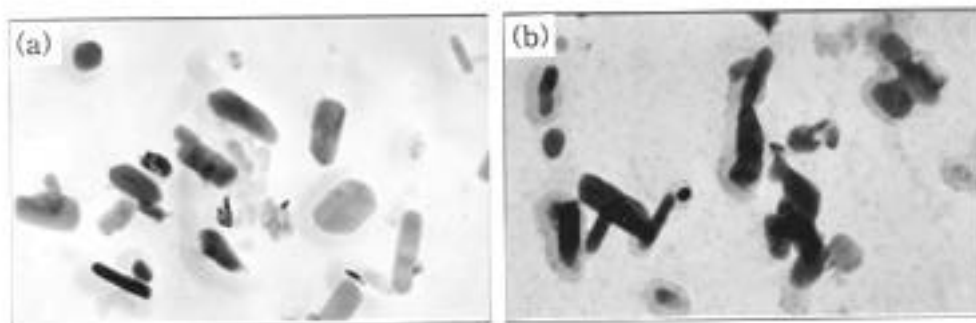


그림 2 750°C에서 tempering한 (a) Mod.9Cr-1Mo강과 (b) T92강의 탄화물 조직