

보자력 및 잔류자화를 이용한 2.25Cr-1Mo강의 경년열화도 평가 - 미세조직적 접근

Evaluation of Aging Degradation in 2.25Cr-1Mo Steel by Coercivity and Remanence Measurements - Microstructural Approach

변재원*[†], 권숙인**

Jai Won Byeon*[†] and Sook In Kwun**

초 록 2.25Cr-1Mo 강이 540°C에서 장시간 노출되었을 때 일어나는 미세조직 변화를 모사하기위해 인공 열화를 실시하였으며 이에 대해 미세조직(탄화물의 평균등가크기 및 단위면적당 개수), 기계적 성질(인장강도 및 경도), 자기적 성질(보자력 및 잔류자화)을 측정하였다. 이들 결과를 비교함으로써 열화에 따른 자기적 성질의 변화와 미세조직 사이의 상관관계를 규명하였다. 탄화물을 그 형상에 따라 막대상, 구상, 침상으로 분류하였으며 침상의 탄화물은 열화 초반부에 급격히 소멸되는 경향을 보였다. 또한보자력과 잔류자화는 열화 초반부에 급격히 감소한 후 점차 완만히 감소하는 경향을 보였다. 기계적 성질과보자력 및 잔류자화 사이에는 선형적 상관관계가 존재하였다.

주요용어: 자기적 성질,보자력, 잔류자화, 열화, 미세조직, 탄화물

Abstract Artificial aging was performed to simulate the microstructural degradation in 2.25Cr-1Mo steel arising from long time exposure at 540°C. Microstructural analysis (mean equivalent size, number of carbides per unit area) and measurement of mechanical properties(UTS, Vickers hardness) and magnetic properties(coercivity, remanence) were performed. By comparing these results, the relationship between magnetic properties and microstructural changes with artificial aging was clarified. The carbides were classified as rod, globular and acicular type in terms of morphology. The fine acicular carbides were found to diminish drastically in the initial stage of aging. The magnetic coercivity and remanence were observed to decrease rapidly in the initial about 920 hours of aging time and then decrease slowly afterwards. Linear correlations between the mechanical properties and magnetic properties such as coercivity and remanence were found.

Keywords: magnetic property, coercivity, remanence, degradation, microstructure, carbide

1. 서 론

2.25Cr-1Mo 강, 1Cr-1Mo-1V 강과 같은 Cr-Mo계 저합금강들은 고온 강도, 내산화성, 내수소취성 등이 우수하기 때문에 발전 설비, 석유 화학 설비 등과 같은 고온용 구조 재료로 광범위하게 사용되어 왔다. 이 강종들은

화력발전용 증기 터빈 로터, 보일러 튜브, 실린더, 노즐 챔버, 등의 부품 소재로 약 300°C~540°C에서 사용된다 [1]. 저합금강을 고온에서 장시간 사용할 경우 템퍼취성, 탄화물 유기취화, 기지의 연화 등으로 인해 파괴인성 등의 기계적 성질이 저하되는 경년열화(aging degradation), 현상이 발생하는 것으로 알려져 있다[1-5]. P, Sn, As,

Sb 등과 같은 불순물 원소들의 입계 편석은 가역적인 템퍼취성을 일으키며, 탄화물 조대화 및 안정한 탄화물의 석출과 같은 미세조직 변화는 비가역적인 취성을 초래한다[3]. 열화도 평가를 위해 약 20년 정도 사용된 2.25Cr-1Mo 강, 1Cr-1Mo 강 및 1Cr-1Mo-1V 강의 미세조직 변화를 평가하기 위한 연구[1-5]가 많이 진행되어 왔으며, Qu 등은[3] 현장에서 사용된 2.25Cr-1Mo 강에서 탄화물의 석출과 형상 변화로 취성이 유발된다고 하였다. 또한 기존의 연구자들은[4-7, 10-13] 540°C에서 20년 정도 사용된 재료의 미세조직을 모사하기 위해 630°C에서 가속화된 인공 열화 열처리를 행하기도 하였다.

한편 열화도 평가를 위한 목적으로 사용중인 구조물에서 분석을 위한 시편을 채취하는 것은 현실적으로 거의 불가능하므로, 구조물을 파손시키지 않고 손상 정도를 in-situ 모니터링 할 수 있는 비파괴적 평가법을 적용하고자 하는 연구가 이루어져 왔다[6-13]. 현재 구조물의 비파괴적 평가를 위한 방법으로서 초음파법[6-10], 자기적 방법[11,12], 전기저항법[13] 등이 사용되고 있다. 특히 보자력 등의 자기적 성질을 이용하는 방법은 재료 내부의 결함이 자구의 이동을 방해한다는 원리를 이용하고 있으며, 탄화물 등과 같은 미세조직 변화를 검출할 수 있는 장점이 있다. 그러나 많은 연구들[10-13]이 계측 장비의 구성 및 열화정도와 비파괴평가 파라미터와의 경험적 상관관계와 관련된 것들로서 아직까지 열화에 따른 미세조직 변화와 비파괴평가 파라미터 사이의 상관관계에 대한 규명과 파괴적 시험 방법으로서의 검증은 부족하다. 자기적 성질과 미세조직과의 상관관계에 대한 규명 부족으로 인해 정량화된 비파괴평가에의 한계성이 있으며 또한 신뢰성 있는 비파괴평가를 위한 기초적 이해로서 미세조직에 대한 이해가 선행되어야 할 필요성이 크다.

따라서 본 연구에서는 인공열화된 2.25Cr-1Mo강에 대해 미세조직(탄화물 크기 및 개수) 및 기계적 성질(경도 및 인장강도)분석, 그리고 자기적 특성값(보자력, 잔류자화)을 측정하였으며 이들의 결과를 비교, 고찰하였다. 이를 바탕으로 열화에 따른 미세조직 변화와 자기적 성질과의 상관관계를 규명하고 자기적 성질과 기계적 성질과의 상관관계를 구하고자 하였다.

Table 1 Chemical composition of the 2.25Cr-1Mo steel (ASTM A387-22-CL2)

Component	Fe	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	Ni
wt%	bal.	0.138	0.142	0.46	0.014	0.004	0.007	2.27	0.97	0.17

2. 실험 방법

2.1. 재료 및 인공 열화 시편 제작

본 연구에서는 900°C에서 1시간 노말라이징 처리 후 720°C에서 1시간 템퍼링 처리된 두께 15mm의 후판을 포항제철로부터 공급받아 사용하였으며 2.25Cr-1Mo 강의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 실기 열화재를 사용 시간별로 입수하는 것은 현실적으로 매우 어렵기 때문에 현장에서 장시간 사용되어 열화된 재료와 유사한 미세조직을 갖는 인공 열화 시편을 가속화시켜 제작하여 열화도를 평가하고자 하였다. 2.25Cr-1Mo 강의 미세조직 열화도를 평가하고자 하는 기존의 연구[4]에서는 가속화된 인공 열화재와 실제 사용재의 탄화물을 비교함으로써 이들이 유사한 조직을 갖고 있음을 보고하였으며 이후의 많은 연구들[5-7, 10-13]에서도 유사한 인공 열화 시편을 제작하였다. 본 연구에서도 이를 바탕으로 하였으며, 터빈 로터강의 대표적 사용 온도인 540°C에서 30년 정도 사용된 재료와 유사한 탄화물 분포를 갖는 시편을 제작하고자 하였다. 이를 위해 630°C에서 290~4,800 시간 범위에서 등온 열처리 시간을 변수로 하였으며 가속 열처리 조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Artificial aging heat treatment conditions

Artificial aging time at 630°C	Simulated serviced time at 538°C
Hours(Days)	Hours(Years)
290(12)	15,000(1.7)
340(15)	20,000(2.3)
460(19)	25,000(2.9)
550(23)	30,000(3.5)
730(30)	40,000(4.6)
920(38)	50,000(5.8)
1,200(49)	65,000(7.5)
1,500(61)	80,000(9.3)
1,800(76)	100,000(11.6)
2,200(91)	120,000(13.9)
2,700(111)	145,000(16.8)
3,100(129)	170,000(19.7)
3,700(152)	200,000(23.1)
4,200(175)	230,000(26.6)
4,800(199)	260,000(30.1)

2.2. 미세조직 관찰 및 탄화물 정량화

탄화물을 관찰하기 위해 HITACHI 사의 FESEM (field emission scanning electron microscope)을 이용하였으며 구상 및 막대상 탄화물은 20,000배로 그리고 미세한 침상의 탄화물은 100,000배로 관찰하였다. 이때 가속전압은 20kV이었으며 방출전류(emission current)는 8000nA이었다. 또한 각 시편에서 약 500개 ~ 1000개의 탄화물에 대해 이미지분석기(Visus image analyzer 2.0)를 사용하여 단위면적당 개수, 평균등가크기를 측정하였다. 탄화물 입자의 크기는 타원형을 가정하여 장축과 단축의 길이를 측정한 후 아래 식에 따라 등가 크기, d_E (equivalent size)로 환산하였으며, 이때 막대상 및 침상의 탄화물은 타원형을 가정하였기 때문에 그 크기가 조금 과소평가 될 수 있다.

$$d_E = \frac{2a+b}{6} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, a 는 탄화물 입자의 장축의 길이를, b 는 단축의 길이를 나타낸다.

2.3. 기계적 성질 및 자기적 성질 평가

미소경도 측정은 Shimadzu사의 마이크로비커스 경도계(HMV2000)를 사용하였다. 이때 시험하중은 1000g으로 하였으며 하중 부과 시간은 15초로 하였다. 인장시험은 인스트론 사의 만능시험기(Instron 1350)를 사용하여 공칭변형률속도를 1×10^{-3} /sec로 상온에서 행하였으며 ASTM E8에 규정된 subsize 크기의 시험편을 사용하였다. Lake Shore사의 모델7300 진동시료자속계(vibrating sample magnetometer)를 이용하여 자기이력곡선(M-H 곡선)을 얻었으며 이로부터 보자력, 잔류자화를 구하였다. 이때 함수 발생기에 의해 일정 주파수와 진폭을 갖는 정현파 함수로 발전된 신호가 전력 증폭기에 의해 증폭된 후 진동자(vibrator)로 공급되어 시료를 자기장에 수직한 방향으로 진동시킨다. 시험편의 진동 자장에 의해 유도된 교류기전력은 탐지코일과 락-인 증폭기(lock-in amplifier)를 거쳐 측정하였다. 자기장의 생성을 위해서는 전자석이 이용되며 인가자장은 가우스미터를 사용하여 측정하였다. 시편은 3.5Ø × 7.0mm의 원기둥 모양으로 하였다.

3. 결 과

3.1. 열화에 따른 미세조직 변화

열화에 따른 2.25Cr-1Mo 강의 미세조직 변화를 탄화물 중심의 결과 위주로 기술하며 급속학적 고찰은 본 논문의 범위에서 제외하기로 한다. 본 연구에 사용된 2.25Cr-1Mo 강은 노말라이징 후 템퍼링 열처리를 한 것으로 페라이트 기지에 배이나이트가 혼재하는 조직을 갖고 있다. 또한 변 등[6,7]은 동일 재료에 대한 이전 연구에서, 결정립 크기는 열화 시간에 관계없이 약 20µm로 일정하며 입계 편석은 존재하지 않음을 보고한 바 있다.

Fig. 1은 as-received 시편을 FESEM으로 관찰한 사진으로, 형태별로 볼 때 막대형(rod), 구형(globular), 침상(acicular)의 세 가지 형태의 탄화물을 관찰 할 수 있었다. 구형이나 막대형보다 미세한 침상 탄화물이 기지에 매우 많이 분포하고 있었으며 그 형상은 막대형과 유사하였다.



Fig. 1 Classification of carbide morphologies in the as-received 2.25Cr-1Mo steel

Fig. 2는 열화 시간에 따른 탄화물의 형상을 20,000배로 보여주는 FESEM 사진이다. 열화 시간에 따른 탄화물의 변화 경향을 보기 위해 평균등가크기와 단위 면적당 개수를 정량화하여 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 탄화물은 형상에 따라 크기가 분포하는 범위가 다를 수 있다. 침상 탄화물은 평균등가크기가 0.03µm에서 920시간 열화된 경우에는 0.07µm로 성장했다. 그러나 개수는 920시간까지 급격히 감소되어 갔다. 또한 미세하게 분산된 침상의 탄화물은 기존의 연구[14]에서 Mo를 많이 함유한 M₂₃C₆ 탄화물로 보고되고 있으며 특히 전위이동을 억제하는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 막대형상의 탄화물은

920시간까지 조대화가 일어나고 이후에는 거의 변화가 없었으며, 개수는 열화 시간에 관계없이 큰 변화를 보이지 않았다. 구상의 탄화물은 920시간까지는 빠른 속도로 조대화 일어났으며 이 후에도 완만하지만 지속적인 조대화가 진행되고 있다. 또한 개수는 지속적인 감소를 보이고 있다.

3.2. 열화에 따른 기계적 성질의 변화

Fig. 5와 Fig. 6은 열처리 시간에 따른 미소경도 및 상온 인장강도의 변화 경향을 보여주고 있다. 경도와 인장강도의 변화 경향은 유사하게 920시간까지는 비교적 급격하게 감소하다 그 이후에는 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 920시간까지의 급격한 강도 저하는 M_7C_3 탄화물의 소멸, 탄화물의 조대화, 고용강화원소의 고갈 등에 의한 것이며[1,5,6] 특히 전위 이동에 매우 효과적인 장애물로 알려진[5] 침상 탄화물의 소멸이 가장 직접적인 영향을 미친다. 그리고 후반부의 완만한 감소는 주로 구상 탄화물의 합체에 의한 조대화 때문인 것으로 생각된다.

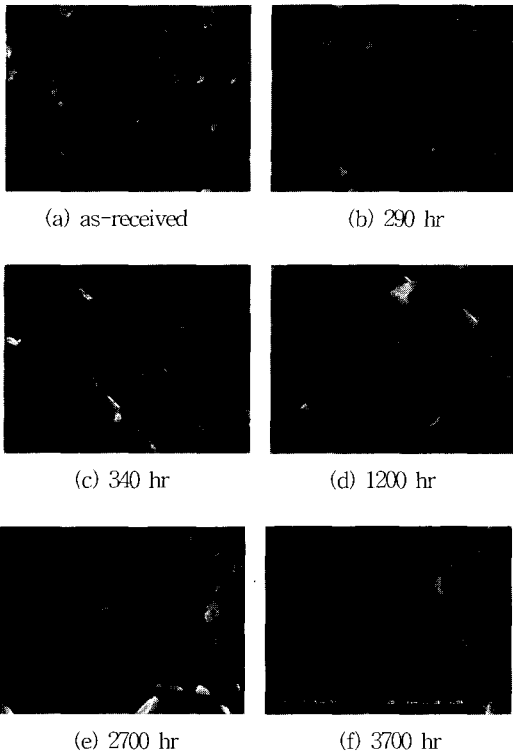
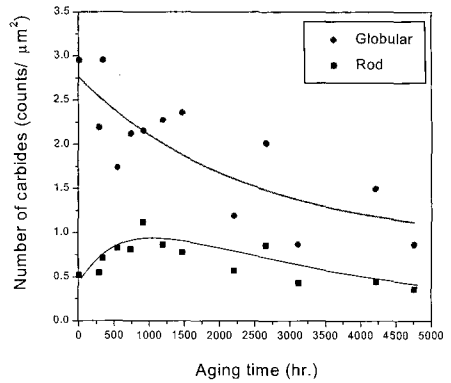
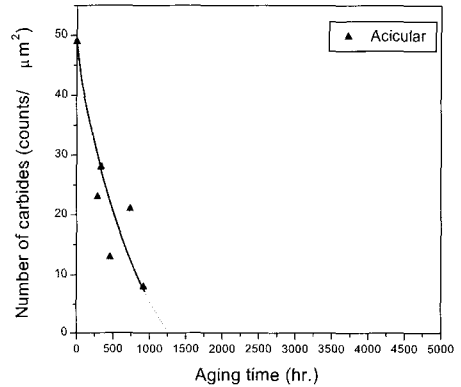


Fig. 2 FESEM micrographs showing the morphology of carbides with aging time



(a) Globular and Rod type



(b) Acicular type

Fig. 3 Change of number of carbides per unit area with aging time

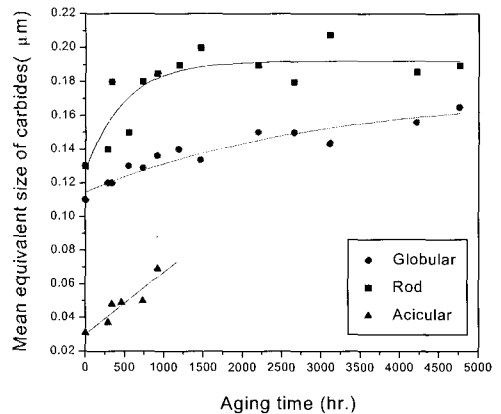


Fig. 4 Change of mean equivalent size of carbides with aging time

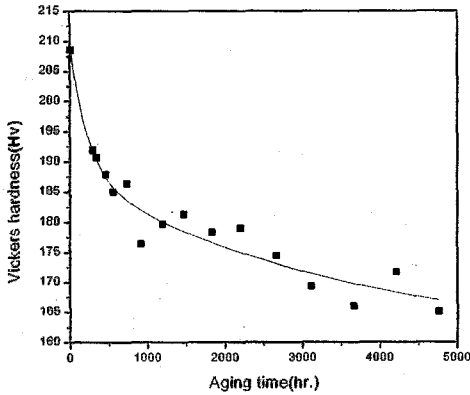


Fig. 5 Change of Vickers hardness with aging time

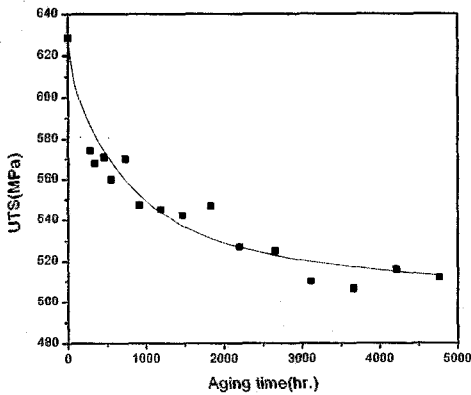


Fig. 6 Change of UTS with aging time

을 보였다.

개재물, 석출물, 산화물, 황화물과 같은 제2상 입자는 자구를 고착시켜 이동을 방해함으로써 보자력을 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다[15]. 이런 점에서 불 때 열화 초반부의 급격한 보자력의 감소는 미세한 침상 탄화물의 소멸과 밀접한 관련이 있을 것으로 생각된다. 즉, 열처리 시간이 증가함에 따라 미세한 다수의 침상 탄화물이 소멸되고 이는 자구를 고착시킬 사이트를 줄이는 역할을 함으로써 보자력이 급격히 감소되는 것으로 생각된다. 920시간 이후의 완만한 감소는 주로 구상 탄화물의 개수 감소에 따라 완만한 보자력 감소가 나타나는 것으로 판단된다.

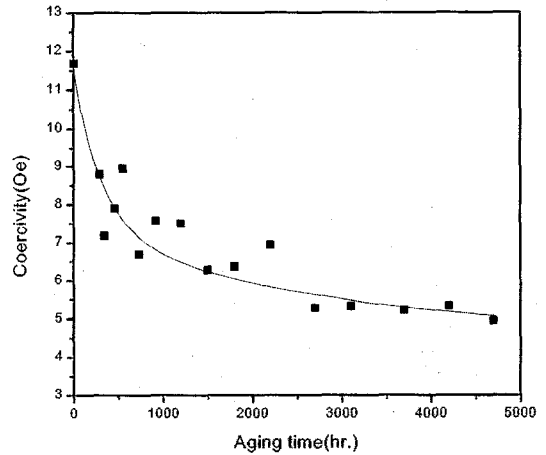


Fig. 7 Change of magnetic coercivity with aging time

3.3. 열화에 따른 보자력 및 잔류자화의 변화

Fig. 7은 열화 시간에 따른 보자력의 변화 경향을 보여 주고 있다. As-received 시편의 보자력은 11.7Oe(Oersted)이었으며 4800시간 동안 열화된 시편에서는 5.1 Oe로 감소하였다. 특히 열화 시간이 증가함에 따라 920시간까지는 급격히 감소한 후 점차 완만한 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 유 등[11,12]이 보고한 1Cr-1Mo-0.25V 강 인공 시효개에서의 보자력의 변화 경향과 유사한 결과이다. Fig. 8은 열화 시간에 따른 잔류자화의 변화 경향을 보여주고 있다. As-received 시편은 0.30emu/g이었으며 4800시간 동안 열화된 시편에서는 0.13emu/g로 감소하였다. 열화 시간에 따른 변화 경향은 보자력의 변화 경향과 동일하게 약 920시간까지는 급격히 감소 후 점차 완만한 감소되는 경향

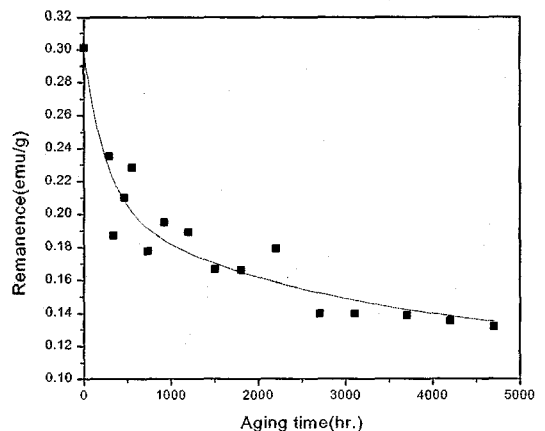


Fig. 8 Change of magnetic remanence with aging time

4. 고찰

4.1. 미세조직과 자기적성질의 상관관계

강자성체의 자화는 자벽이동(movement)과 자구회전(rotation)에 의해 일어난다. 특히 자화곡선의 무릎(knee)까지는 자벽의 이동이 주된 과정이며, 물리적으로는 자벽의 이동을 방해받는 정도에 따라서 보자력의 크기가 결정된다고 할 수 있다. 재료 내에 존재하는 미세조직적 결함은 자벽의 이동을 방해할 수 있으며 이에 따라 자구의 고착 현상을 초래한다. 재료 내에 존재하는 결함 중에서 탄화물과 같은 제2상 입자 또한 자구를 고착시킬 수 있는데, 그 고착 기구는 2상 입자의 크기에 따라 다르게 작용한다[14]. 즉, 큰 입자(철의 경우 1 μm 이상)는 자벽에 달라붙어 있는 보조자구(스파이크 자구) 때문에 고착 효과가 나타나며, 작은 입자의 경우는 2상 입자가 자벽내에 존재함으로써 자벽의 에너지를 감소시키기 때문에 고착 효과가 나타난다. 철과 같은 금속에서 입자의 직경이 수 μm 이상일 경우에 정자기에너지를 줄이기 위해 제2상 입자에 스파이크 자구를 형성한다. 자벽의 이동은 입자에 부착된 스파이크 자구와의 상호작용에 의해 방해를 받게됨으로써 고착현상이 일어난다. 그러나 이것보다 작은 입자는 스파이크자구 없이 그대로 존재한다. 작은 입자가 자벽내에 존재하면 자벽의 에너지를 감소시킴으로써 자벽을 고착시키게된다. 구형의 입자가 자벽내에 존재할 때 자벽의 면적을 줄임으로써 자벽에너지를 감소시키며 입자의 직경이 자벽의 두께와 거의 같을 때 입자의 단위 부피 당 가장 효율적이다. 철의 경우에 자벽의 두께를 고려해보면 다음과 같다[15].

$$\delta = \sqrt{\frac{0.3kT_c\pi^2}{4Ka}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, δ는 자벽 두께, T_c는 큐리 온도, K는 이방성 상수, k는 볼쯔만 상수, a는 최인접 원자간 거리이다. 철의 경우에 T_c는 1043 K, K는 4.8x10⁵ erg/cm³, a는 2.48 Å, k는 1.38x10⁻¹⁶ erg/K이다. 이러한 계산에 따르면 δ=300 Å (0.03 μm) 이다. 이상의 계산에서 포함된 많은 가정들과 실제 값들의 차이를 고려하여 일반적으로 자벽의 두께는 수백 Å 정도로 알려져 있다[15].

본 재료에서 침상 탄화물은 평균등가크기가 0.03 μm (as-received)이며, 구상은 0.11 μm, 그리고 막대상탄화물은 0.13 μm이다. 열화에 따라 탄화물의 성장이 일어나기는 하지만 형상에 관계없이 모두 서브마이크론 크기이며 따라서 스파이크 자구의 형성보다는 자벽의 에너지를 줄임

으로써 자구를 고착시키는 기구가 지배적인 크기이다. 특히 침상의 탄화물은 개수 측면에서 볼 때 구상이나 막대상에 비해 10배 이상 많으며, 크기 측면에서 볼 때는 이론적인 자구벽 두께와 가장 유사한 탄화물이다. 이런 점에서 볼 때 침상의 탄화물은 자벽의 에너지를 가장 효과적으로 감소시킬 것으로 생각된다. 즉, 침상 탄화물은 자구를 고착시키는 효과적인 장애물로 작용하며 이러한 침상 탄화물의 소멸은 자구 이동에 대한 장애물이 사라지는 효과를 나타냄으로써 보자력을 감소시키게 된다.

잔류자화는 외부 인가 자기장을 제거하였을 때도 시편 내에 남아 있는 자화이다. 이는 자구가 재료 내부의 결함에 의해 고착되어 이동(movement)을 방해받음으로써, 외부 자기장이 제거되었음에도 불구하고 자구가 원래의 위치로 되돌아 오지 못하게 되기 때문에 생기는 것이며 이러한 잔류자화를 제거하기 위해 추가적으로 가해 주어야하는 자기장이 보자력이다. 열화 초반부의 보자력과 잔류자화의 급격한 감소는 미세조직적으로 볼 때 주로 미세한 침상 탄화물의 급격한 소멸을 반영하는 것이며 구상 탄화물의 개수 감소에 의한 효과도 일부 포함되어 있을 것으로 생각된다. 열화 후반부의 보자력의 완만한 감소는 막대상 탄화물의 개수 변화가 거의 없다는 점을 고려해 볼 때 주로 구상 탄화물의 지속적인 개수 감소에 의한 것으로 볼 수 있다. 이에 따라 보자력과 잔류자화는 2.25Cr-1Mo 강의 미세조직 열화도를 평가할 수 있는 하나의 비파괴평가 파라미터가 될 수 있을 것으로 판단된다.

4.2. 기계적 성질과 자기적 성질의 상관관계

미세조직적 접근을 통해 기계적 성질과 비파괴평가 파라미터와의 상관관계를 얻을 수 있으며 이러한 접근 방법의 모식도를 Fig. 9에 나타내었다.

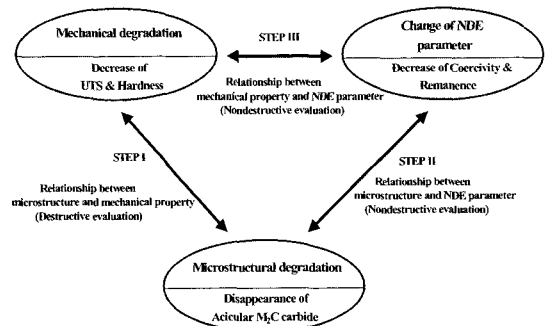


Fig. 9 Interrelationship between the mechanical degradation, microstructural degradation and the NDE parameter

STEP I : 미세조직과 기계적성질의 상관관계(파괴적 평가법)

미세한 침상의 M_2C 탄화물은 전위의 이동에 효과적인 장애물로 작용하는 것으로 알려져 있다[5]. 따라서 이의 소멸은 전위의 이동을 방해하는 장애물이 줄어드는 효과를 냄으로써 인장강도 및 경도의 저하를 초래한다.

STEP II : 미세조직과 비파괴평가 파라미터의 상관관계(비파괴적 평가법)

자극의 이동을 효과적으로 방해하는 침상의 M_2C 탄화물 소멸로 인해 보자력 및 잔류자화가 감소된다.

STEP III : 기계적 성질과 비파괴평가 파라미터의 상관관계(비파괴적 평가법)

STEP I과 STEP II의 결과를 미세조직 인자인 M_2C 탄화물의 소멸을 공통 인자로 하여 연결시킴으로써 기계적 성질과 비파괴평가 파라미터의 상관관계를 구할 수 있다. 또한 비파괴평가 파라미터(보자력, 잔류자화)는 기계적 성질(인장강도, 경도)을 직접적으로 좌우하는 미세조직 인자(침상의 M_2C 탄화물)의 변화를 선택적으로 검출한 결과이므로 기계적 성질과 좋은 상관관계를 나타낼 수 있게 된다.

Fig. 10과 Fig. 11은 보자력과 인장강도 및 경도와의 상관관계를 나타내고 있으며 Fig. 12와 Fig. 13은 잔류자화와 인장강도 및 경도와의 상관관계로 선형적 상관관계가 있는 것을 알 수 있다. 선형회귀분석 결과 이들 사이에는 다음과 같은 상관관계가 나타났다.

$$UTS = a_1(H_c) + b_1 \dots\dots\dots (3)$$

$$Hv = a_2(H_c) + b_2 \dots\dots\dots (4)$$

$$UTS = a_3(M_r) + b_3 \dots\dots\dots (5)$$

$$Hv = a_4(M_r) + b_4 \dots\dots\dots (6)$$

여기서, UTS는 인장강도로 단위는 MPa이며 Hv는 미소경도 값이다. H_c 는 보자력으로 단위는 Oe이며, M_r 은 잔류자화로 단위는 emu/g 이다. 또한 $a_1=432.3$, $b_1=16.4$, $a_2=141.2$, $b_2=5.6$, $a_3=428.4$, $b_3=648.5$, $a_4=139.9$, $b_4=223.7$ 이다. 이상의 미세조직적 접근을 바탕으로 기계적 성질 열화도를 보자력과 잔류자화를 측정함으로써 효과적으로 평가할 수 있을 것으로 생각된다.

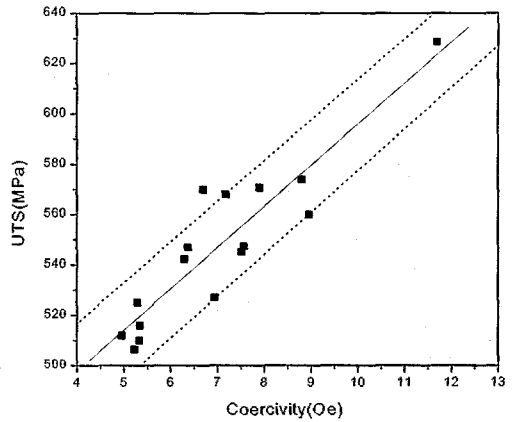


Fig. 10 Correlation between magnetic coercivity and UTS

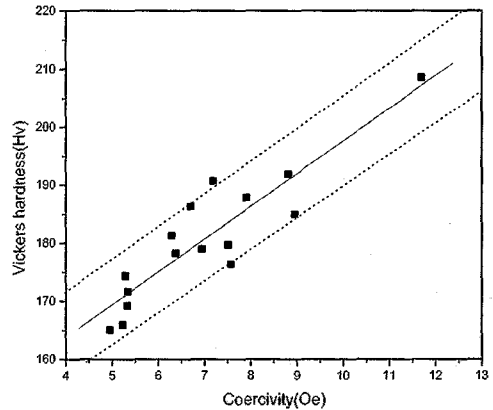


Fig. 11 Correlation between magnetic coercivity and Vickers hardness

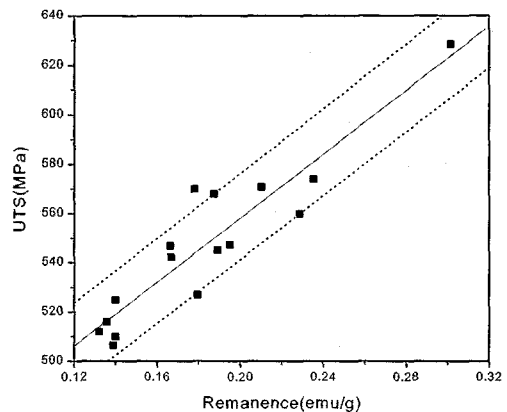


Fig. 12 Correlation between magnetic remanence and UTS

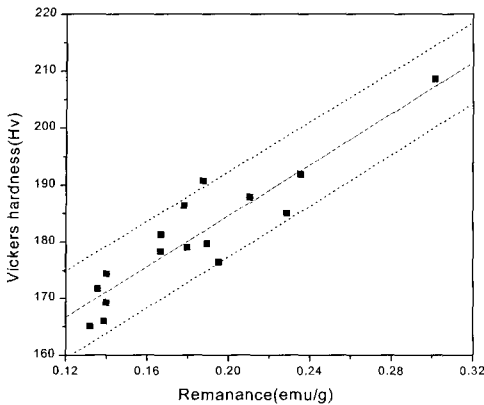


Fig. 13 Correlation between magnetic remanance and Vickers hardness

5. 결 론

자기적 성질을 측정하여 인공 열화된 2.25Cr-1Mo 강의 미세조직 및 기계적 성질 열화도를 평가하고자하는 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열화 시간의 증가에 따라 탄화물이 조대화 되었으며, 미세한 침상의 탄화물은 약 920 시간까지 급격히 소멸되어 갔다. 또한 인장강도와 경도는 열화 초반부에 급격히 감소 후 점차 완만히 감소되는 경향을 보였다.
- (2) 보자력 및 잔류자화는 공통적으로 열화 시간이 증가함에 따라 급격히 감소한 후 점차 완만히 감소되는 경향을 보였으며 2.25Cr-1Mo 강의 경년 열화에 따른 미세조직 변화에 민감한 파라미터인 것으로 판단된다. 또한 열화 초반부의 급격한 보자력의 감소는 주로 자구벽의 두께와 비슷한 크기(0.03 μm) 다수의 침상 탄화물이 소멸됨에 따라, 자벽에너지 감소에 의한 자구 고착 효과가 줄어들었기 때문이며 열화 후반부의 완만한 감소는 주로 구상 탄화물의 조대화에 따른 개수 감소 현상에 의한 것이다.
- (3) 열화에 따른 기계적 성질의 변화는 보자력 및 잔류자화의 변화와 선형적 상관관계가 있었다. 또한 2.25Cr-1Mo 강의 기계적 성질 열화도를 보자력과 잔류자화를 측정함으로써 평가할 수 있었으며, 이는 자기적 성질(보자력, 잔류자화) 평가법이 기계적 성질(인장강도, 경도)에 직접적으로 영향을 미치는 미세조직 인자(침상의 M_6C 탄화물)의 변화를 선택적으로 검출해 냈기 때문이다.
- (4) 열화 시간에 따른 자기적 성질의 변화를 탄화물의 변

화와 관련지어 해석하였으며, 미세조직적 접근을 바탕으로하여 자기적 성질 변화를 측정함으로써 기계적 성질 열화도를 효과적으로 평가할 수 있었다.

후 기

본 연구는 1999년도 한국과학재단의 특정기초연구비 지원(과제번호:1999-2-301-009-3)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] N. S. Cheruvu, "Degradation of Mechanical Properties of Cr-Mo-V and 2.25Cr-1Mo Steel Components After Long-Term Service at Elevated Temperatures" Metall. Trans., Vol. 20A, pp. 87-97, (1989)
- [2] Z. Qu and K. H. Kuo, 1981, "Embrittlement of 2.25CrMoV Steel Bolts After Long Exposure at 540°C," Metall. Trans., Vol. 12A, pp. 1333-1337, (1981)
- [3] J. C. Murza and C. J. McMahon, "The Effects of Composition and Microstructure on Temper Embrittlement in 2.25Cr-1Mo steel," J. Eng. Mater. Technol. Vol. 102, pp. 369-375, (1980)
- [4] A. M. Adbel-Latif, J. M. Corbett and D. M. R. Taplin, "Analysis of Carbides Formed During Accelerated Aging of 2.25Cr-1Mo Steel," Met. Sci., Vol. 16, pp. 90-96, (1982)
- [5] Y. Watanabe and T. Shoji, "The Evaluation on In-Service Materials Degradation of Low-Alloy Steels by the Electrochemical Method", Metall. Trans., Vol. 22A, pp. 2097-2106, (1991)
- [6] 변재원, "고온 열화 손상된 니켈기 초내열합금과 2.25Cr-1Mo 강의 미세조직 및 기계적 성질에 대한 비파괴평가", 고려대학교 박사학위논문, (2001)
- [7] 변재원, 권숙인, 박은수, 박익근, "인공 열화 열처리된 2.25Cr-1Mo 강의 미세조직 변화에 대한 초음파 비파괴평가", 한국열처리공학회지, Vol. 14, No. 2, pp. 110-117, (2001)
- [8] 김준수, 변재원, 권숙인, 박은수, "초음파법에 의한 중탄소강에서의 시멘타이트 구상화율 평가", 대한금속.재료학회지, Vol. 39, No. 5, pp. 493-502, (2001)

- [9] 남영현, “초음파에 의한 압력용기의 연취성천이온도 평가”, 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 5, pp. 373-380, (2000)
- [10] 정현조, 남승훈, 장경영, 남영현, “비선형 음향효과에 의한 고온 재료의 파괴인성 열화도 평가”, 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 5, pp. 424-430, (2000)
- [11] 유권상, 남승훈, 김용일, 유광민, 손대락, “보자력을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강 인공시 효계의 열화도 평가”, 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 4, pp. 288-293, (1999)
- [12] 유권상, 김용일, 남승훈, 유광민, 조육, 손대락, “가역 투자를 측정에 의한 1Cr-1Mo-0.25V강의 열화도 평가”, 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 5, pp. 445-450, (1999)
- [13] 남승훈, 유광민, 김엄기, “전기비저항을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 인성열화도 평가”, 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 1, pp. 10-16, (1998)
- [14] N. Gope, A. Chatterjee, T. Mukherjee and D. S. Sarma, “Influence of Long-Term Aging and Superimposed Creep Stress on the Microstructure of 2.25Cr-1Mo Steel,” Metall. Trans., Vol. 24A, pp. 315-326, (1993)
- [15] B. D. Cullity, “Introduction to Magnetic Material,” (1972)