

경년열화 열처리된 2.25CrMo 강에서의 탄화물 특성 및 자기적 성질의 변화

변재원 · 권속인*

고려대학교 공학기술연구소
*고려대학교 재료금속공학부

Changes of Carbide Characteristics and Magnetic Properties in Artificially Aging Heat Treated 2.25CrMo Steel

Jai Won Byeon and S. I. Kwun*

Research Institute of Engineering and Technology, Korea University, Seoul, 136-701
*Division of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul, 136-701

Abstract Artificial aging was performed to simulate the microstructural degradation in 2.25CrMo steel arising from long time exposure at 540°C. The carbide morphologies were classified as acicular, pipe and globular type, and the number of carbides per unit area was measured for each type of carbides. The fine acicular carbides were found to diminish drastically in the initial stage of aging. An attempt was made to evaluate the microstructural degradation in artificially aging heat treated 2.25CrMo steel by the magnetic property measurements such as saturation magnetization, coercivity and remanence. The saturation magnetization showed no distinct trend with aging time. However, the coercivity and remanence were observed to decrease rapidly in initial 920 hours of aging time and then decrease slowly afterwards.

(Received October 4, 2001)

key words: Magnetic property, Coercivity, Remanence, Nondestructive evaluation, Degradation, 2.25CrMo steel

1. 서 론

발전설비, 화학 플랜트 등의 가혹한 환경에서 사용되는 구조물은 사용 년 수의 증가에 따른 노후화로 파괴 인성 등의 기계적 성질이 저하되는 경년열화(aging degradation) 현상이 일어난다. 경년열화는 설비의 수명을 단축시키고 갑작스런 파손으로 인한 대형사고를 초래할 수 있기 때문에 정기적으로 안전성을 진단하고, 현재의 설비를 계속 사용할 것인가? 또는 교체하여야 할 것인가? 그대로 사용한다면 취약부위는 어디이며 언제 보수하여야 하는가? 또 교체한다면 시기는 언제인가? 등에 대한 예측이 필요하다. 즉, 구조물의 안전성 확보 측면에서 열화도 평가의 필요성이 크다.

특히 2.25CrMo 강, CrMoV 강 등의 CrMo계 저합금강들은 고온강도, 내산화성, 내수소취성 등이 우수하다는 장점 때문에 석유화학설비, 화력발전용 증기터빈로터, 보일러 튜브 등의 소재로 매우 광범위하게 사용되어져 왔다[1]. 그러나 이들 저합금강은 300°C~540°C의

온도 범위에서 장시간 사용할 경우 템퍼취성, 탄화물유기취화, 기지의 연화 등의 열화 현상이 발생하는 것으로 알려져 있다[1~4]. 2.25CrMo 강에서 일어나는 미세조직 열화 현상을 규명하기 위해 탄화물의 형상[5] 및 조성[6,7] 변화를 분석하는 연구가 보고되고 있으며 또한 몇몇 연구자들은 540°C에서 20년 정도 사용된 재료의 미세조직 변화를 모사하기 위해 630°C에서 가속화된 인공 열화 열처리를 행하기도 하였다[8,9]. 재질 열화도의 평가는 대상 구조물에서 시험편을 채취하여 충격시험, 인장시험, 파괴인성 시험 등과 같은 파괴적인 방법으로 평가하는 것이 가장 정확하다. 그러나 실제적으로 가동중인 구조물에 손상을 입히지 않고 시험편을 채취한다는 것은 사실상 불가능하고, 시간적 제약과 경제적으로 많은 어려움이 있다. 따라서 구조물을 파손시키지 않고 손상 정도를 in-situ 모니터링 할 수 있는 비파괴평가 기법의 확립이 필요하다[10~16]. 이를 위해 자기적 방법[10~13], 초음파법[14], 전기비저항법[15], 바크하우젠노이즈법[16] 등의 평가법에 대한 연구가 진

행되어 왔다.

본 연구에서는 강자성체인 철강재에서의 탄화물 변화와 관련된 연구에서 사용이 보고되고 있는 자기적 성질 평가법을 적용하였으며 열화에 따른 미세조직 변화와의 상관관계를 살펴보았다. 이를 위해 열화 시간에 따른 탄화물의 변화를 형상 및 조성의 관점에서 고찰하였으며 자기적성질의(보자력, 잔류자화, 포화자화)변화를 평가하였다. 이를 바탕으로 경년열화된 2.25CrMo 강의 미세조직 변화에 대한 비파괴적 평가 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 인공 열화 시편 제작

본 연구에 사용된 2.25CrMo 강은 포항제철에서 제조되었으며, 900°C에서 1시간 노말라이징 처리 후 720°C에서 1시간 템퍼링 처리된 두께 15 mm의 후판을 공급받아 사용하였다. 이상의 열처리 조건은 실제 화력 발전소에 사용되는 터빈로터 강에 대한 열처리 조건과 동일한 것이다. 2.25CrMo 강의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다.

현장 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. 2.25CrMo 강의 미세조직 열화도를 평가하고자 하는 기존의 연구들[8,9]에서는, 가속화된 인공 열화재와 실제 사용재의 탄화물을 비교함으로써 이들이 유사한 조직을 갖고 있음을 보고하였다. 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.

2.2. 미세조직 관찰 및 탄화물 정량화

탄화물은 2% 나이탈 용액으로 에칭 후 HITACHI사의 FESEM(field emission scanning electron micro-

Table 2. Artificial aging heat treatment conditions

Artificial aging time at 630°C Hours (Days)	Simulated serviced time at 538°C 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)

scope)으로 관찰하였으며, 각 시편에서 약 500개~1000개의 탄화물에 대해 이미지분석기를 사용하여 단위 면적 당 개수를 측정하였다. 또한 서브마이크론 크기의 미세한 입계 탄화물의 성분 분석을 위해 AES (Auger electron spectroscopy)를 이용하였으며 열처리 조건별로 12~30개의 탄화물에 대해 분석을 행하였다.

2.3. 자기적 성질 평가

Fig. 1의 모식도에 나타난 것과 같은 진동시료자속계(vibrating sample magnetometer, Lakeshore사 모델 7300)를 이용하여보자력, 잔류자화, 포화자화 값을 구하였다. 진동장치(vibrator) 시험편을 일정한 주파수와 진폭을 갖는 정현파 함수로 진동을 시키는 장치로 정현파 발진기(function generator), 전력 증폭기(amplifier), 진동자 등으로 구성되어 있다. 발진된 신호는 전력증폭기에 의해 증폭된 후 진동자로 공급되며 시료를 자기장에 수직인 방향으로 진동시킨다. 자기측정부는 시험편의 진동자장에 의해 유도된 교류기전력을 탐지하는 탐지코일(pick-up coil)과 미소한 기전력을 측정 가능한 값으로 바꾸어주는 록-인 증폭기(lock-in amplifier)로 구성

Table 1. Chemical composition of the 2.25CrMo steel(ASM 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

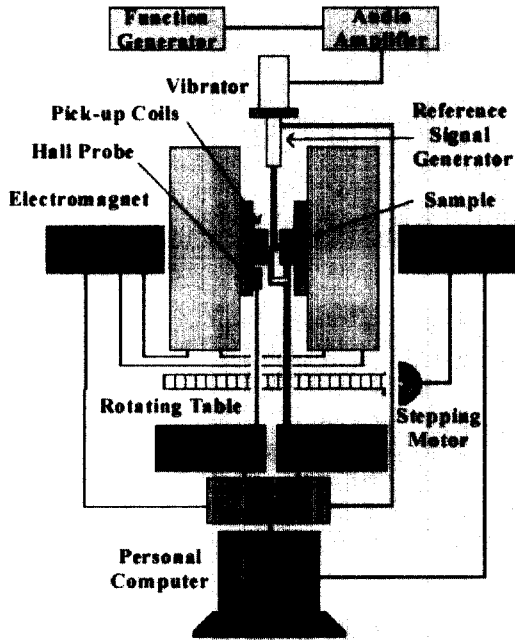


Fig. 1. Schematic diagram of vibrating sample magnetometer

되어 있다. 이때 측정 시편에서 발생된 유도기전력을 기준시편(순 니켈)에 의해 유도되는 유도기전력과 비교함으로써 그 차이를 계산할 수 있고 기준시편의 자기모멘트를 알고 있기 때문에 측정하고자하는 시편의 자기모멘트를 구할 수 있게된다. 또한 자기장의 생성을 위해 전자석을 이용하였으며, 인가자장의 측정을 위해 가우스미터를 사용하였다. 측정은 연속모드(continuous mode)로 +11kOe에서 -11kOe까지 자기장을 변화시켜가면서 이때의 자화값(magnetization)을 기록하였다. 시편은 형상에 의한 이방성을 줄이기 위해 3.50x 7.0 mm의 원기둥 모양으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

2.25CrMo 강은 적절한 기계적 성질을 부여하기 위해 노말라이징 후 템퍼링 열처리를 하여 사용한다. 본 연구에서 사용된 재료도 동일한 열처리를 한 것이며 페라이트 기지에 베이나이트가 혼재하는 조직을 갖고 있다. 또한 결정립 크기를 측정한 결과 약 20 μm 이었으며, 열화 시간이 증가하더라도 결정립 성장은 일어나지 않고 있음을 확인하였다. 2.25CrMo 강에 존재하는 탄화



Fig. 2. Classification of carbide morphologies in as-received 2.25CrMo steel (FESEM image).

물 분석을 위해 형상[5] 또는 조성[6,7]을 분석하는 두 가지의 연구 방법이 사용되어져 왔으며 이들 연구에서 탄화물의 형상과 조성에 따라 탄화물의 종류가 결정된다고 하였다. 아래에서는 열화에 따른 탄화물의 변화양상을 형상과 조성의 관점에서 고찰하였다.

3.1. 탄화물의 형상 분석(morphological approach)

Fig. 2는 as-received 시편을 FESEM(field emission scanning electron microscope)으로 관찰한 사진으로, 형태별로 볼 때 구형(globular), 막대형(rod), 침상(acicular)의 세 가지 형태의 탄화물을 관찰 할 수 있었다. 구형 탄화물과 유사한 형태로 타원형(ellipsoid)과 블록(block)형태도 일부에서 관찰되나 실제적으로 그 구분을 명확히 할 수 없기 때문에 모두 구형의 탄화물로 간주하였다. 막대형은 형상의 구분이 비교적 명확하였다. 또한 구형이나 막대형보다 미세한 침상 탄화물이 기지에 매우 많이 분포하고 있었다. 침상 탄화물은 크기가 막대형(타원형을 가정한 평균등가크기[17] : 0.13 μm)이나 구형 탄화물(평균등가크기 : 0.11 μm)에 비해 훨씬 작기 때문에 동일한 배율(2만 배)에서 각 형상의 탄화물을 동시에 관찰하기는 어려웠다. 침상의 탄화물(평균 등가크기 : 0.03 μm, 평균길이 : 0.08 μm)을 분석하기 위해서 10만 배로 관찰을 하였으며, 그 형상은 막대형과 유사하였다. Fig. 3은 열화 시간에 따른 탄화물의 형상을 보여주는 FESEM 사진이다. 기존의 연구[5,18]에서 공통적으로 M₂C 탄화물로 보고되고 있는 매우 미세한 다수의 침상 탄화물은 열처리 시간이 증가함에 따라 급격히 소멸되어 갔으며 920 시간 이후에는 거의 보이지 않아 측정을 하지 않았다. 한편 입계 탄화물은

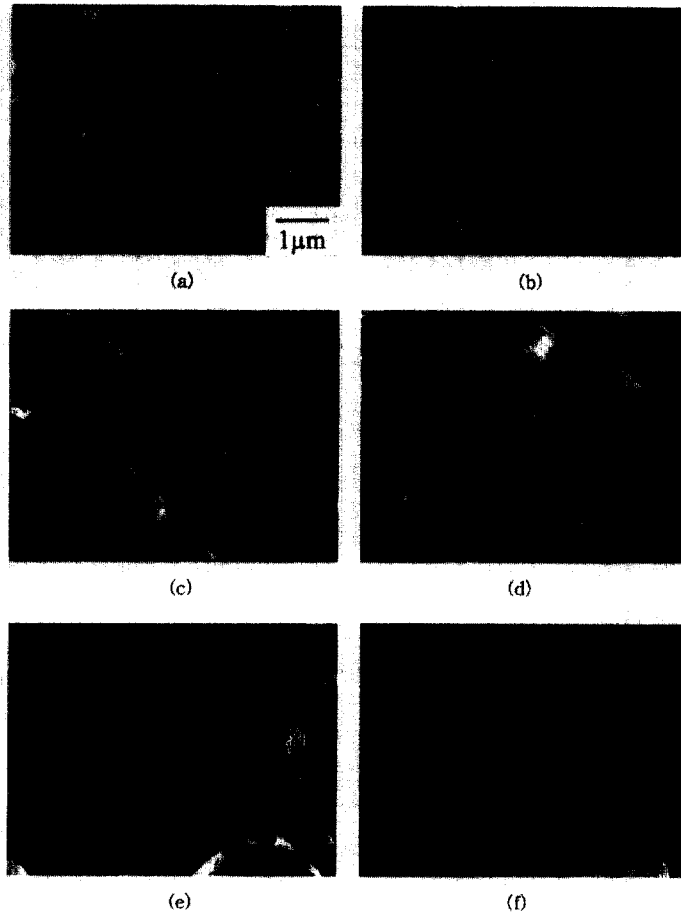
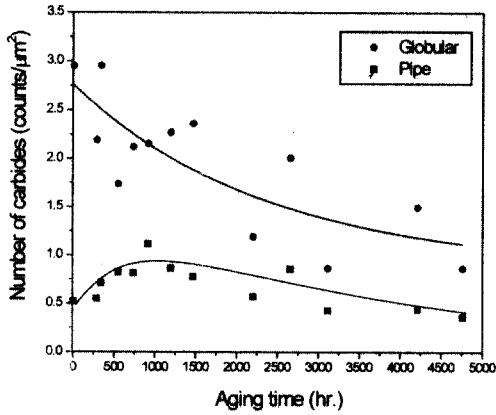


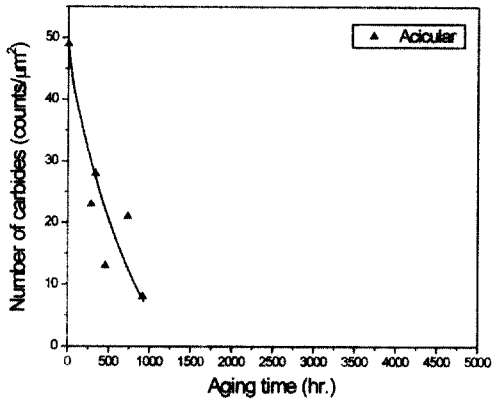
Fig. 3. FESEM images showing morphology of carbides after various aging time; (a) as-received, (b) 290 hr, (c) 340 hr, (d) 1200 hr, (e) 2700 hr and (f) 3700 hr.

조대화가 되며 점차 합체가 되어가고 있었다. 탄화물의 변화 경향을 보기 위해 단위 면적당 개수를 정량화하여 Fig. 4에 나타내었다. 침상 탄화물은 구형이나 파이프상 탄화물보다 그 수가 훨씬 많으며 열화 초기에 급격히 소멸되는 경향을 보인다. 파이프 형상의 탄화물은 920 시간까지는 약간 감소하는 경향을 보였으나 그 변화량은 크지 않았으며, 구상의 탄화물은 지속적인 개수의 감소가 일어나고 있다. Gope 등[5]은 탄화물의 회절 패턴 분석 결과와 탄화물의 형상을 비교한 결과, Table 3에 나타낸 것처럼 종류($M_{23}C_6$, M_6C , M_2C , M_3C)에 따라 특정 형상을 갖고 있음을 보고한 바 있다. 즉, 비손상재에 존재하는 구형의 탄화물은 M_3C 이며, 극미세의 짧은 판상(short plate) 형태는 M_2C 탄화물, 그리고 막대형(rectangular parallelepiped) 형태는 $M_{23}C_6$ 탄화

물이다. 또한 입계 탄화물은 $M_{23}C_6$ 탄화물로 분류하였으며 열화가 진행되면서 생성된 M_6C 도 구형을 갖는다고 보고하였다. 특히 극미세의 침상 탄화물은 기존의 많은 보고[5,18]에서 공통적으로 M_2C 탄화물로 알려져 있다. 이러한 기존의 결과를 참고해보면 형태상에 따른 분류를 할 경우 M_2C 탄화물과 $M_{23}C_6$ 탄화물은 구분이 비교적 명확해 보인다. M_6C 와 M_3C 탄화물의 경우는 그 형태가 유사하기 때문에 형태만으로는 탄화물의 종류를 완전히 구분하기에는 어려운 점이 있으나 M_3C 의 경우는 비손상재에서만 발견되었다는 기존 연구 결과[5]를 고려하면 열화재에서의 구형 탄화물은 M_6C 일 가능성이 높을 것으로 판단된다. 형태상의 분류 기준을 따른다면 열화가 진행됨에 따라 침상의 M_2C 탄화물은 급격히 소멸한다고 볼 수 있으며 이러한 경향은



(a) Globular and pipe type



(b) Acicular type

Fig. 4. Change of number of carbides per unit area with aging time.

Murphy 등[18]의 결과와 일치하는 것이다. $M_{23}C_6$ 는 열화에 따른 변화가 비교적 적었으며, Gope 등[5]도 540°C에서 약 18,000 시간 동안 열화된 경우에도 특별한 변화를 관찰 할 수 없다고 보고하였다. 또한 Hong 등[19]은 조성분석법을 통해 분석한 결과 $M_{23}C_6$ 탄화물에서는 큰 변화를 관찰할 수 없었다고 보고한 바 있다.

3.2. 탄화물의 조성 분석(Compositional approach)

열화된 2.25CrMo 강에서 탄화물의 회절패턴 분석 결과와 조성을 비교한 결과 탄화물의 종류에 따라 Fe,

Table 4. Classification of carbides according to composition in aged 2.25CrMo steel in the literature⁷⁾

Type	Composition
M_3C	Fe > Cr > Mo
M_2C	Mo > Cr > Fe
$M_{23}C_6$	Fe > Cr > Mo
M_6C	Fe > Mo > Cr
M_7C_3	Cr > Fe > Mo, Cr > Mo > Fe

Cr, Mo의 성분비가 달라짐이 보고된 바 있다[6,7]. 이들의 연구 결과[6,7]를 Table 4에 요약하여 나타내었다. 본 연구자들의 이전 연구[20]에서의 입계 탄화물에 대한 EPMA line 분석 결과, as-received 시편에서는 상대적으로 Cr의 양이 많았고 열화된 시편에서는 Mo가 많이 분포하고 있음을 보고한 바 있다. Williams 등[21]은 2.25CrMo 강의 열화가 진행됨에 따라 탄화물의 조성이 변화되며 이에 따라 탄화물이 점차 안정한 탄화물로 변태해 가는 것으로 보고하였다. Lee[7]에 의하면 2.25CrMo 강에 존재하는 탄화물은 그 조성 범위에 따라 종류가 결정된다고 하였으며, 이 연구에서는 Fe > Cr > Mo의 조성 분포를 갖고 있는 탄화물을 $M_{23}C_6$ 로 그리고 Fe > Mo > Cr의 분포를 갖는 탄화물을 M_6C 로 분류하였다. 입계 탄화물에 대한 Auger 전자분광법을 이용한 성분 분석 결과 as-received 시편에서는 분석된 탄화물이 모두 Fe > Cr > Mo의 조성 분포를 갖고 있었으며, 열처리 시간이 증가함에 따라 Fe > Mo > Cr의 조성 분포를 갖는 탄화물(M_6C)의 수가 점차 증가하였다. 본 연구에서도 Lee의 조성에 따른 탄화물 분류 기준[7]에 따라 Fe > Mo > Cr의 조성 분포를 갖는 탄화물을 M_6C 로 판단하였으며, 분석된 탄화물 중의 M_6C 의 개수 분율을 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 열화 초반부(약 920 시간)에는 M_6C 탄화물의 개수 분율이 급격히 증가하며 이후에는 완만하게 증가하는 경향을 보인다. Mo를 많이 함유한 M_6C 탄화물이 증가하기 위해서는 Mo의 공급이 필요하다. 기존 연구[1]에서 열화가 진행됨에 따라 기지내에 고용되어 있던 Mo가 고갈되어 간다고 보고된 바 있으며 기지에 고용되어 있던 Mo가 M_6C 탄화물 증가에 필요한 Mo의 공급원이 될 수 있

Table 3. Classification of carbide morphologies in aged 2.25CrMo steel by N. Gope et al.⁵⁾

Type of carbides	M_3C	M_2C	$M_{23}C_6$	M_6C
Morphology	Globular (as-received)	Fine platelet	Rectangular parallelepiped	Globular (aged)

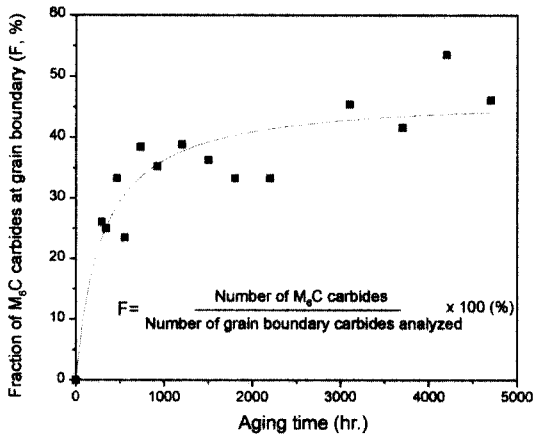


Fig. 5. Fraction of M_6C carbides at grain boundary with aging time.

을 것으로 생각된다. 또한 M_6C 의 증가는 Mo를 많이 함유한 침상의 M_2C 탄화물의 소멸로 생성된 잉여의 Mo를 공급받음으로써 M_6C 탄화물이 증가될 수 있을 것으로 생각된다.

3.3. 자기적 성질을 이용한 비파괴적 평가

Fig. 6은 열화 시간에 따른 포화자화의 변화를 단위 무게로 규격화하여 나타내었다. 포화자화는 열화 시간에 관계없이 거의 일정한 값을 갖었으며 특별한 변화 경향을 관찰할 수 없었다. 따라서 열화에 따른 미세조직 변화에 민감한 파라미터가 아닌 것으로 판단된다. Fig. 7은 열화 시간에 따른 보자력의 변화 경향을 보여주고 있다. As-received 시편의 보자력은 11.7Oe이었으며 4800시간 동안 열화된 시편에서는 5.1Oe로 감소하였다. 특히 열화 시간이 증가함에 따라 920 시간까지는 급격히 감소한 후 점차 완만히 감소하는 경향을 보였다. 석출물, 산화물, 황화물과 같은 제2상은 자구를 고착시켜 자벽의 이동을 방해함으로써 보자력을 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다[22]. 이런 점에서 볼 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 감소되는 것으로 생각된다. 그러나 920 시간 이후의 완만한 감소는 주로 구상 탄화물의 조대화에 따른 개수의 감소에 따라 약간의 보자력 감소가 나타나는 것으로 판단된다.

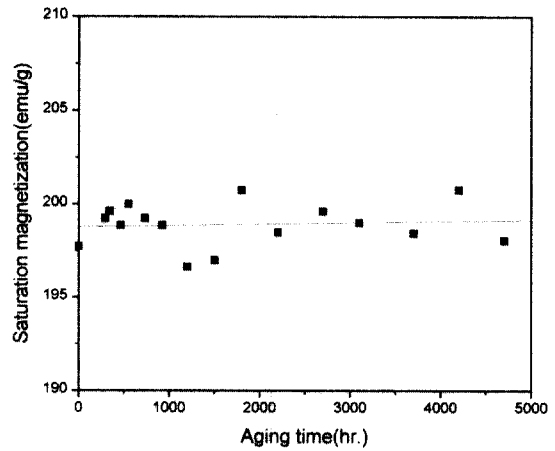


Fig. 6. Change of saturation magnetization with aging time.

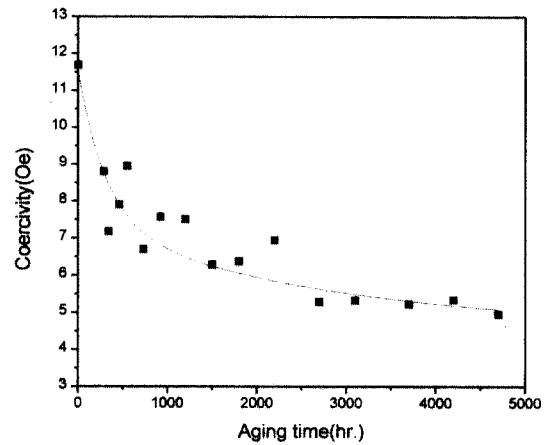


Fig. 7. Change of magnetic coercivity with aging time.

Fig. 8은 열화 시간에 따른 잔류자화의 변화 경향을 보여주고 있다. As-received 시편은 0.30 emu/g 이었으며 4800시간 동안 열화된 시편에서는 0.13 emu/g로 감소하였다. 열화 시간에 따른 변화 경향은 보자력의 변화 경향과 동일하게 약 920 시간까지는 급격히 감소 후 점차 완만히 감소되는 경향을 보였다. 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 되돌아오지 못하게 되기 때문에 생기는 것이다. 이러한 잔류자화를 제거하기 위해 추가적으로 가해 주어어야 하는 자기장이 보자력이며 이들은 개념적으로 비례하는 관계

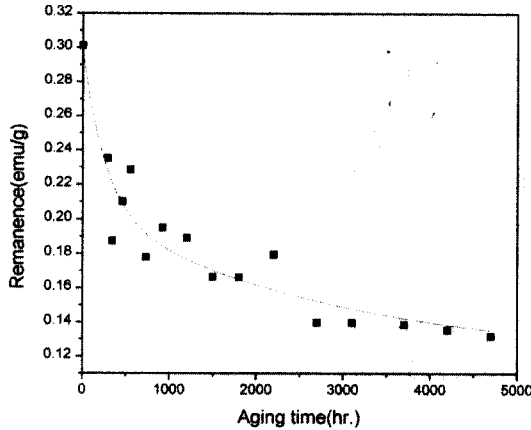


Fig. 8. Change of magnetic remanence with aging time.

에 있기 때문에 보자력과 동일한 변화 경향을 갖는다고 할 수 있다. 결과적으로 보자력과 잔류자화의 변화는 미세조직적으로 볼 때 열화 초반부의 미세한 침상 탄화물의 급격한 소멸과 열화 후반부의 구상 탄화물의 소멸 현상을 반영하는 것으로 생각되며, 2.25CrMo 강의 열화도를 평가할 수 있는 하나의 비파괴평가 파라미터가 될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

자기적 성질을 측정하여 인공 열화된 2.25CrMo 강의 미세조직 열화도의 비파괴적 평가 가능성을 확인하고자 하는 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열화 시간의 증가에 따라 탄화물이 조대화되었으며, 미세한 침상의 탄화물은 약 920 시간까지 급격히 소멸되어 갔다.
2. 열화 시간이 증가함에 따라 입계에 존재하는 M_6C 탄화물의 개수 분율이 증가하였다.
3. 포화자화는 2.25CrMo 강의 열화 열처리에 따른 미세조직 변화에 민감하지 않았다.
4. 보자력 및 잔류자화는 공통적으로 열화 시간이 증가함에 따라 급격히 감소한 후 점차 완만히 감소되는 경향을 보였으며 2.25CrMo 강의 열화 열처리에 따른 미세조직 변화에 민감한 파라미터인 것으로 판단된다. 또한 열화 초반부의 급격한 감소는 다수의 미세한 침상 탄화물의 소멸에 기인한 것으로 생각된다. 이를 바탕으로 2.25CrMo 강의 열화도를 보자력과 잔류자화를 측정함으로써 비파괴적으로 평가할 수 있는 가능성을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

1. N. S. Chuvu, Metall. Trans., 20A (1989) 87.
2. Z. Ku and K. H. Kuo, Metall. Trans., 12A (1981) 1333.
3. Y. Nishizaka, Y. Hara, A. Hori, T. Tsukahara, K. Miyano, T. Wada and T. B. Cox, ASME Proc. Pressure Vessel Piping Conf., (1985) 1215.
4. L. H. Toft and R. A. Marsden, JISI & JIM Proc. Int. Conf. on Structural Process in Creep, (1963) 276.
5. N. Gope and D. S. Sarma, Metall. Trans., 24A (1993) 315.
6. A. Afrouz, H. J. Collins and R. Pilkington, Metals Technology, 10 (1983) 461.
7. Y. J. Lee, Ph. D. Thesis, Monash University, (1989).
8. A. M. Adbel-Latif, J. M. Corbett and D. M. Talpin, Met. Sci., 16 (1982) 90.
9. Y. Watanabe and T. Shoji, Metall. Trans., 22A (1991) 2097.
10. D. C. Jiles, J. Appl. Phys. 21 (1988) 1196.
11. K. S. Ryu, S. H. Nahm, Y. I. Kim, K. M. Yu and D. R. Son, J. of the Kor. Soc. for Nondestr. Test., 19 (1999) 288.
12. K. S. Ryu, S. H. Nahm, Y. I. Kim, K. M. Yu and D. R. Son, J. Mat. Sci. Letters, 19 (2000) 1759.
13. J. W. Byeon, Ph. D. Thesis, Korea University, (2001).
14. S. T. Hong, W. O. Choo, B. Y. Ahn and S. I. Kwun, ASNT Fall Conference and Quality Testing, (1998) 205.
15. S. H. Nahm, K. M. Yu and A. Kim, J. of the Kor. Soc. for Nondestr. Test., 18 (1998) 10.
16. D. G. Park, C. G. Kim, H. C. Kim, J. H. Hong and I. S. Kim, J. Appl. Phys., 81 (1996) 486.
17. K. M. Vedula and R. W. Heckel, Metall Trans., 1 (1970) 9.
18. J. Murpy, A. Ahou and S. R. Macewen, Acta Mater., 44 (1996) 587.
19. K. T. Hong, J. M. Do, S. K. Hur and K. Y. Kim, 3rd Conference on Fossil Plant Inspection, (1991) 13.
20. J. W. Byeon, S. I. Kwun, U. S. Park and I. K. Park, J. of the Kor. Soc. for Heat Treatment, 14 (2001) 110.
21. K. R. Willams and B. Whilshire, Mater. Sci. Eng., 47 (1981) 151.
22. B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Material, (1972) 417.