가역투자율을 이용한 초초임계압 페라이트기 강의 고온 등온열화 평가

김정석*

펜실베이니아 주립대학교 Engineering Science and Mecahnics, University Park, PA 16802

유권상 · 남승훈 · 이승석

한국표준과학연구원, 대전시 유성구 유성우체국 사서함 102호, 305-600

박익근

서울산업대학교 기계공학과, 서울시 노원구 공릉2동 172, 139-743

(2009년 3월 30일 받음, 2009년 5월 5일 최종수정본 받음, 2009년 5월 6일 게재확정)

차세대 발전소재로 주목 받고 있는 초초임계압 페라이트기 강의 고온 등온열화손상을 평가하였다. 고온 등온열화에 따른 가역 투자율을 측정하여 미세조직 변화와의 상관성과 그 영향에 관하여 연구하였다. 고온 등온열화는 미세한 템퍼링 석출물(Cr_{23}C_6)을 성장시키고, 새로운 금속간 화합물(Fe_2W)을 생성시켰으며 급격한 조대화를 보였다. 또한, 래스 내부의 전위밀도를 크게 감소시켰다. 가역투자율로부터 측정된 동적 보자력은 등온열화 초기 약 500시간 이내에 급격하게 감소하고 이후 서서히 감소하였다. 이는 자벽에 대한 고착점의 개수감소와 밀접한 관련이 있으며, 미세한 석출물, 전위 및 마르텐사이트 래스와 관련된다.

주제어 : 가역투자율, 동적보자력, 초초임계압 강, 등온열화

I. 서 론

발전설비의 고효율화를 위해 고온·고압화의 실현이 필수적이며 사용조건에 따라서 발전설비 소재는 크리프 강도, 고온 내산화성 및 내식성 또는 내수소침식 등의 우수한 특성을 필요로 하지만 특히 고온에서의 강도 개선이 무엇보다 중요하다고 하겠다. 고온·고압화의 열효율 향상을 위해서 초초임계압(USC) 발전 설비의 보일러와 터빈 등의 기존소재로 널리 쓰이는 저 크롬 페라이트계 강보다도 높은 크리프 강도와 열적 안정성이 요구되고 있다. 따라서 고 크롬 페라이트계 강이 초초임계압 발전설비의 보일러와 증기 터빈 등에 널리 사용되고 있으며 크리프 강도 및 고온 안전성 향상을 위해 많은 활발한 연구가 진행되고 있다[1-3]. 이 강종들은 템퍼드 마르텐사이트 래스구조를 나타내며 Nb, V 등을 첨가함으로써 석출강화 효과를 향상시키고 Cr, Mo 그리고 W 등을 첨가함으로써 고용강화 효과를 향상한 강종이라 할 수 있다. Fujita는 W 첨가로 미세한 라베스(Fe_2W)상이 입계와 래스경계에 형성되어 입계에서 전위의 회복을 저지하며 전위의 싱크로 작용하고 Mo 보다 더 큰 격자불일치를 가지므로 고용강화 효과도 향상시킨다고 보고 하였다[4]. 하지만 많은 연구 중 Mo 및 W 첨가 합금은 장시간 고온 열화 및 크리프 시험에서 기존의 강화기구와는 다르게 미세한 $\text{Fe}_2(\text{Mo}, \text{W})$ 상을

형성한 후 급격한 조대화로 인해서 현저히 크리프강도가 감소한다는 많은 보고가 있다[5-7]. 이렇듯, 고온에서 장시간 사용할 경우 다양하고 복잡한 미세조직의 변화현상으로 인해 크리프강도 및 파괴인성 등의 기계적 성질이 저하되는 경년열화 현상이 발생하게 된다. 그러므로 발전 설비의 건전성과 안전성 향상을 위한 모니터링을 위해 무엇보다 미세조직에 대한 이해가 선행되어야 할 필요성이 크다. 게다가 발전설비의 손상진단에 관한 기존의 많은 비파괴평가기법 연구들이 보고되고 있다[8-12]. 특히, 강자성체에 있어서 입계, 석출물, 전위 등과 같은 미세조직은 자벽 고착이나 자벽 이동에 중요한 역할을 함으로서 자기적 성질에 큰 영향을 미치는 것으로 잘 알려져 있다. 이러한 자기적 특성 중 보자력 및 바크하우스젠 노이즈는 미소한 미세조직의 변화에도 매우 민감하게 변화하므로 재료의 특성평가 연구에 다양하게 적용되고 있다[13-18].

Shilling과 Soffa는 시효에 따른 미세 석출물의 증가현상으로 보자력이 증가되는 자기적 경화를 보고하였다 [13]. 또한, Yoshino 등은 페라이트만을 포함하고 있는 강에서 보자력은 입계크기의 역수에 비례함을 보고하였다[14]. Byeon 등은 실험적으로 베이나이트기 2.25Cr-1Mo 강의 등온열화과정을 바크하우스젠 노이즈기술을 이용하여 평가하였고[15], Jiles는 서로 다른 세 종류의 미세조직(페라이트/펄라이트, 페라이트/세이나이트, 템퍼드 마르텐사이트)을 갖는 고 Cr강의 소성변형을 연구하였다[16]. 특히, Ryu 등은 이미 터빈 로터용 합금의 기계적 물성변화와 1차 고조파에서 구한 보자력을 이용하여

*Tel: (1-814) 359-8598, E-mail: csk12@psu.edu

경도와의 상관성을 보고하였고, 자동차용 강판의 항복강도 및 인장강도의 변화를 가역투자율을 측정하여 실험적으로 강도 변화와 가역투자율의 경험적인 상관성을 보고한바 있다 [19,20]. 직류자기장에 교류의 섭동자기장을 인가해 주면 주자화 곡선은 부자화 곡선을 따라 변화게 되고 이때 자속밀도와 인가자기장의 미소변화비가 증분투자율($\Delta B/\Delta H$) 이다. 특히, $\Delta H = 0$ 일때가 가역투자율이 된다. 그리고 가역투자율의 최대 피크간의 간격은 동적보자력으로 가역투자율을 측정함으로써 보자력을 구하는 것이 가능하게 된다[19].

지금까지 비록 많은 연구가 들어 이론적 및 실험적으로 재료의 미세조직 변화를 자기적 평가법을 이용하여 연구를 했지만 대부분의 보고들과 기술들은 실제현장에 응용하기는 거의 불가능하다. 그러므로 높은 결합 검출특성을 나타내며 실제 응용이 가능한 비파괴평가기술의 개발이 절실한 실정이다. 본 연구의 목적은 비파괴적으로 시료의 표면부에서 가역투자율을 측정하고 이를 이용하여 재료의 미세조직변화에 민감한 보자력을 간접적으로 측정하는데 있다. 그리고 이를 이용하여 초초임계압 페라이트기 내열강의 고온특성에 따른 미세조직의 변화를 고찰함으로써 차세대 발전설비의 구조건전성모니터링에 응용하고자 한다.

II. 실험 방법

본 연구에 사용된 초내열강은 진공유도로(VIM) 공정을 통하여 제조하였다. 1100 °C에서 단조를 하고 4시간 노말라이징 처리 후 700 °C에서 10시간 템퍼링 처리를 하였다. 이렇게 제조된 12Cr 초내열강의 화학적 조성을 Table I에 나타내었다. 인공 열화를 가속화시켜 열화에 따른 미세조직의 변화를 평가하기 위해 700 °C에서 최대 4000시간까지 등온열화 열처리를 행하였다.

미세조직관찰과 석출물의 크기 및 분포를 결정하기 위해 Vilella 시약으로 에칭후 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. 특히, 후방산란전자(BSE) 이미지를 이용하여 $M_{23}C_6$

와 Fe_2W 상을 각각 구분하여 분석하였다. 석출물은 약 1000 여개의 석출물에 대해 이미지 분석기를 사용하여 단위면적당 개수와 평균크기를 통계적이고 정량적으로 분석하였다. 합금 내의 석출물은 정전위 양극분해법을 이용하였으며 전해추출 용액(100 ml 메탄올 + 10 ml 염산)속에서 3 V의 전압을 가해 24시간을 수행하였다. 기지만을 선택적으로 용해시킨 후 남은 잔사추출물을 X-선 회절(XRD) 분석을 통해 석출물의 구조분석을 행하였다. XRD 분석은 Cu Ka를 이용하여 40 kV, 30 mA로 30°~80°까지 분석하였다. 전위구조와 마르텐사이트 래스를 관찰하기 위해 투과전자현미경(TEM) 분석을 이용하였으며 분석을 위한 박판의 시험편은 지름 3 mm 디스크로 가공 후 25 %의 퍼크로릭 전해액으로 -15 °C, 60 V에서 전해 연마하여 준비하였다. 석출물의 조성과 구조분석을 위해서 탄소추출레플리카법을 수행하였다. 석출물의 조성은 TEM 에너지분산분석(EDS)을 이용하였고 구조분석은 제한시야회절도형(SAD) 분석을 수행하였다.

가역투자율 측정을 위해서 요크형의 페라이트를 이용하여 탐지코일, AC 섭동코일, 그리고 DC 자화코일을 권선하여 사용하였다. 시험편은 폭 5 mm, 길이 30 mm 두께 1 mm의 미소 판상형으로 가공하였다. 자화는 최대 자기장을 12 kA/m로 0.05 Hz의 사인파를 인가하고, 섭동자기장으로 80 A/m, 40 Hz를 부가하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1은 템퍼링후 초기 미세조직을 나타낸 것이다. 템퍼링 후 미세조직은 Fig. 1(a)와 같이 완전 템퍼드 마르텐사이트 조직을 나타내었고 결정립의 평균크기는 약 100 μm 이었다. 구오스테나이트(PAG) 경계와 패킷(packet) 경계 외에도 마르텐사이트 래스는 약 0.2 μm 폭을 나타내었다. Fig. 1(b)의 주사전자현미경의 이차전자이미지에서처럼 오스테나이트 경계의 다소 조대한 석출물과 입내의 래스가 배열된 방향으로 늘어선 석출물이 존재하였다. Fig. 1(c)는 탄소추출레플리카법을

Fig. 1. Micrographs of as-tempered 12Cr steel: (a) OM showing macro structure, (b) SEM micrograph showing PAGB and lath structure, (c) carbon replica TEM image showing MX and $M_{23}C_6$ precipitate.

이용하여 기지로부터 석출물만을 복제한 후 투과전자현미경으로 관찰한 것으로 입내에는 조대한 $M_{23}C_6$ 석출물과 미세한 구형의 MX가 존재함을 관찰하였다.

등온열화시간의 증가에 따라서 석출물들이 조대화되고 특히, PAG입계석출물의 조대화는 매우 빠르게 진행되고 있음을 Fig. 2의 결과에서 알 수 있다. 열화시간의 증가에 따라서 석출물의 크기가 성장하고 단위면적당 개수는 감소한다. 이러한 석출물의 조대화는 확산기구에 따라서 석출물과 기지와의 계면에너지가 줄이면서 성장하게 되는 오스트왈드 성장에 의해 일어난 것이며 석출강화와 고용강화 효과를 감소시키므로 충격에너지를 크게 감소시키는 원인으로 보고되고 있다[9]. Fig. 3은 등온열화시간에 따른 대표적인 BSE 이미지를 나타

낸 것이다. BSE 이미지의 밝기는 화합물의 평균원자량에 의해 결정된다. 본 연구에서 나타나는 미세한 석출물인 $(V,Nb)(N,C)$ 는 약 20 nm 정도로 너무나 작아서 관찰하기가 어렵다. 하지만 $M_{23}C_6$ 입자는 기지의 평균원자량보다 다소 높기 때문에 밝은 상으로 관찰되지 않는다. 결과적으로 큰 원자량을 갖는 라베스(Fe_2W)상만이 이미지 상으로 밝게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과는 주된 석출물인 $M_{23}C_6$ 와 페라이트 기지 그리고 Fe_2W 간의 원자번호 대비차에 의해 나타난 것이며 열화시간이 증가함에 따라서 PAGB의 $M_{23}C_6$ 사이와 주로 마르텐사이트 래스경계에 라베스상이 생성되었으며 점차 조대화되었다. Fig. 4는 전형적인 명시야상의 투과전자현미경 이미지

Fig. 2. SEM micrographs of thermally aged 12Cr steel showing coarsening of precipitates: (a) 250 h, (b) 500 h, and (c) 2000 h.

Fig. 3. SEM-BSE images of thermally aged 12Cr steel after various aging times: (a) 250 h, (b) 500 h, and (c) 2000 h.

Fig. 4. TEM micrographs showing dislocation substructure and selected area diffraction pattern of typical precipitates of thermally aged 12Cr steel; (a) as-tempered, MX phase, (b) 1000 h aged, $Cr_{23}C_6$ phase, and (c) 4000 h aged, Fe_2W phase.

를 나타낸 것이다. 각각 템퍼링 후, 1000시간과 4000시간 등온열화된 시편을 관찰한 것으로 이미지상의 전자회절패턴은 각 등온열화시간상에서의 대표적인 석출물을 나타낸 것이다. 즉, NbC($\langle 112 \rangle$ zone), Cr_{23}C_6 ($\langle 112 \rangle$ zone), 그리고 Fe_2W ($\langle 2\bar{1}\bar{1}3 \rangle$ zone). 템퍼링 후 초기 시편은 전위밀도가 현저히 높은 전형적인 래스구조의 템퍼드 마르텐사이트조직을 나타내었다. 래스의 내부에는 미세한 수 나노에서 수십 나노 크기의 NbC/VC 상과 래스경계 및 PAG경계에는 Cr_{23}C_6 이 고르게 분포하였다. 초기 미세한 Cr_{23}C_6 상은 열화가 진행됨에 따라서 조대화되며 래스주위에 새로운 금속간 화합물이 석출되었다. 이 석출물은 투과전자분석결과 Fig. 4(c)에 나타낸 대로 라베스상으로 알려졌고 특히, 이 라베스상은 열화에 따라서 급격한 조대화 속도를 나타내었다. 래스내부의 전위밀도 역시 열화가 진행됨에 따라서 급격하게 감소함을 관찰하였다.

Fig. 5(a)는 각각의 등온열화된 시편으로부터 측정되어진 인가자기장에 대한 가역투자율의 변화를 나타낸 것으로 전형적인 가역투자율 프로파일을 나타낸 것이다.

가역투자율의 최대 피이크는 강자성체의 자화과정에서 나

타나는 특성이며, 이 최대 피이크의 위치는 열화시간의 증가에 따라서 감소되고 있음을 알 수 있다. 이 최대 피이크의 위치로부터 구한 동적보자력의 변화를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 동적 보자력은 약 500시간 이내에서 급격하게 감소하고 이후에는 미소하지만 단조로운 감소를 나타내었다. 또한, 기계적 강도의 감소는 금속의 고온열화(등온템퍼링, 크리프, 피로) 등에서 나타나는 전형적인 물리적 현상이다. 본 연구에서도 고온열화시간에 따라서 경도 및 인장강도는 감소하였고 이러한 강도의 변화는 보자력의 변화 정도와 매우 밀접한 관계를 나타내었다. Fig. 5(b)의 결과 내에 나타낸 선형관계는 보자력과 경도변화를 나타낸 것으로 자기특성을 이용한 기계적 물성변화의 유추 가능성을 보여주고 있다. Table I은 페라이트기 12Cr 내열강의 고온등온열화에 따른 미세조직의 정량적인 변화와 기계적물성 및 동적보자력을 나타낸 것이다. 결과에서와 같이 열화과정에 따른 다양한 미세조직의 변화는 기계적물성과 동적보자력에 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다.

등온열화에 따른 동적보자력의 변화는 Fig. 5(b)에 나타낸 결과와 같이 열화시간의 증가에 따라서 감소를 하였다. 이렇

Fig. 5. Reversible permeability profiles and dynamic coercivity of thermally aged 12Cr steel; (a) reversible permeability versus magnetic field and (b) dynamic coercivity versus aging time.

Table I. Variation in microstructural features, mechanical strength, and peak position of μ_{rev} of thermally aged 12Cr steel; size of precipitate (d), number of precipitate (N), lath width (w), dislocation density (ρ).

Aging (h)	d (nm)	N (count/ μm^2)	w (μm)	ρ ($\times 10^{14}/\text{m}^2$)	UTS (MPa)	Hardness (Hv)	Dynamic coercivity (kA/m)
0	95	6.6	0.21	21.32	943	324	0.75
25	96	6.5	0.21	19.00	856	313	0.77
50	101	5.3	0.22	20.49	884	295	0.74
75	109	4.8	0.24	16.78	848	289	0.71
100	118	4.1	0.26	18.42	820	288	0.67
250	122	3.5	0.28	13.41	772	285	0.65
500	152	3.1	0.31	11.97	761	270	0.64
1000	191	2.1	0.36	10.86	741	271	0.63
2000	210	1.6	0.39	10.94	731	268	0.60
3000	221	1.4	0.41	10.77	715	257	0.59
4000	222	1.4	0.42	10.78	678	256	0.59

듯 보자력(H_c)은 물리적으로 강자성재료에 있어 자벽 이동에 대한 최대 저항력이며, 강자성재료에 있어 주요한 자벽의 이동에 대한 장애물로 비자성 개재물, 전위 그리고 결정립계를 들 수 있다[21]. 비자성 개재물은 자벽이 이동할 때 자벽에 고착되어 자벽에너지를 줄이거나 스핀이크 자구를 형성함으로써 자벽이동의 효과적인 방해물이 된다. 이러한 이유로 비자성 개재물(즉, 이차상 혹은 석출물)은 일반적으로 보자력의 관계에서 개재물의 체적분율에 비례하는 것으로 보고하고 있다. 개재물은 그 자벽의 두께와 상대적인 크기에 따라서 보자력에 미치는 영향이 상이하므로 크기에 따른 의존성을 고려할 필요가 있다. 하지만, 템퍼링 직후와 열화가 진행됨에 따라 대부분의 석출물은 자벽의 두께(철의 경우 약 30 nm) [19]보다 크므로 스핀이크 자구를 형성하여 자벽의 이동을 방해할 것으로 생각된다. 특히, 석출물은 자벽 두께와 유사한 크기 석출물의 영향이 가장 현저하다. 그러므로 이런 점에서 볼 때 12Cr 내열강에서 보자력에 큰 영향을 미칠 수 있는 석출물은 미세한 MX 석출물이라 할 수 있다. 하지만 이들은 너무나 안정하므로 변태나 재 용해 또는 조대화가 거의 일어나지 않으므로 보자력에는 영향을 줄 수 있지만 열화 정도에 따른 보자력의 변화에는 그 영향이 거의 무시할 정도라 할 수 있다. 석출물은 전위이동을 방해함으로써 강도에 크게 기여하는 것으로 잘 알려져 있다. 하지만 이는 석출물이 기지와 정합 관계를 갖고 정합변형을 형성하는 경우에 해당하고, 만일 부정합을 이룰 경우 이와 같은 석출경화 효과를 기대할 수가 없다. 더욱이, 석출물의 조대화가 일어나면 더 이상 전위가 이동할 때 석출물을 자르고 이동하는 기구가 작용하지 않고 Orowan과 Ashby[22]의 모델대로 입자루프 기구가 작용하여 석출물의 크기가 증가할수록 강도는 감소하게 된다.

따라서 석출물의 조대화는 기지와 정합성을 잃게 되고 결국 강도가 감소한 것으로 생각된다.

전위 역시 재료 내 국부적인 미소응력을 야기시키게 되고 변형장을 형성하므로 이 변형장에 의해 자벽 이동이 방해를 받게 된다. 이러한 전위밀도의 감소와 석출물의 조대화는 페라이트기 12Cr 초초임계압 내열강의 강한 강화기구인 래스구조의 회복현상을 야기시키게 된다. 래스 마르텐사이트는 구조상 복잡하고 다양한 경계(PAG, packet, block, lath)로 이루어져있다. 하지만 본 연구의 등온 열화과정 중 열화가 진행되어도 많은 경계들의 변화는 보이지는 않았지만 단지 래스 경계만이 크게 성장하였다. 이들 래스는 재료적으로 하부결정립이라 생각하여 강도에 기여하는 역할이 결정립과 유사한 것으로 해석하고 있고 물리적으로도 유사한 역할을 하고 있다고 하겠다. 이들 래스 경계는 기존의 결정립과 같이 입계에서 자기모우멘트의 편향이 생겨 자벽의 이동에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각된다[23]. 하지만 마르텐사이트 래스

가 자벽 이동에 대한 역할이 결정립과 유사할 지에 관한 연구는 아직 전무한 실정이다. 따라서 이에 대한 보다 깊은 연구가 체계적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 초초임계압 페라이트기 내열강의 고온 등온열화에 따른 미세조직적 변화를 가역투자율을 비파괴적으로 측정하므로써 평가하였다. 가역투자율을 비파괴적으로 측정하기 위해서 시편의 표면부에서 요크형의 프로브를 이용하여 성공적으로 측정하였으며 가역투자율로부터 동적보자력을 구할 수 있었다. 고온 등온열화로 인해서 초초임계압 페라이트기 내열강은 템퍼링 초기 미세한 석출물($Cr_{23}C_6$)이 성장하고 새로운 급속한 화합물(Fe_2W)이 생성되어 급격하게 조대화 현상을 나타내었다. 석출물의 조대화 및 전위밀도의 감소는 래스의 회복을 나타내어 인장강도 및 정도의 기계적 물성저하를 나타내었다. 이들에 대한 정량적인 변화를 측정하였다. 동적보자력은 석출물 개수의 감소, 전위밀도 및 래스폭의 증가와 밀접한 관련이 있음을 논의하였다. 결과적으로 가역투자율을 이용한 보자력의 비파괴적 측정은 페라이트기 초초임계압 내열강의 고온열화과정을 모니터링 하는데 유용하며 실제적인 응용성을 보여주었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2008-03516)

참고문헌

- [1] F. Abe, Curr. Opin. Solid State Mater. Sci., **8**, 305 (2004).
- [2] P. J. Szabó, Mater. Sci. Eng. A, **387-389**, 710 (2004).
- [3] M. Kimura, K. Yamaguchi, M. Hayakawa, K. Kobayashi, and K. Kanazawa, Int. J. Fatigue, **28**, 300 (2006).
- [4] Fujita, J. Iron Steel Inst. Jpn., **76**, 1053 (1990).
- [5] F. Abe, Mater. Sci. Eng. A, **387-389**, 565 (2004).
- [6] L. Korcakova, J. Hald, and M. Somers, Mater. Character., **47**, 111 (2001).
- [7] A. Orlová, J. Buršík, K. Kuchařová, and V. Sklenička, Mater. Sci. Eng. A, **245**, 39 (1998).
- [8] C. S. Kim, I. K. Park, and K. Y. Jhang, NDT & E Inter., **42**, 204 (2009).
- [9] S. Luxenburger and W. Arnold, Ultrasonics, **40**, 797 (2002).
- [10] G. Dobmann, M. Kroning, W. Theiner, H. Willems, and U. Fiedler, Nucl. Eng. Design, **157**, 137 (1995).
- [11] S. Gupta, A. Ray, and E. Keller, Inter. J. Fatigue, **29**, 1100 (2007).

- [12] C. S. Kim and S. I. Kwun, Mater. Trans., **48**, 3028 (2007).
- [13] J. W. Shilling and W. A. Soffa, Acta Metall., **26**, 413 (1978).
- [14] M. Yoshino, H. Tanabe, T. Sakamoto, N. Suzuki, and Y. Yaji, Mat. Sci. Forum, **210-213**, 45 (1996).
- [15] J. W. Byeon, C. S. Kim, and S. I. Kwun, Phys. Stat. Sol. (b), **241**, 1756 (2004).
- [16] D. C. Jiles, J. Phys. D-Appl. Phys., **21**, 1196 (1988).
- [17] 고재귀, 한국자기학회지, **17**, 232 (2007).
- [18] 이태규, 노태환, 한국자기학회지, **17**, 128 (2007).
- [19] K. S. Ryu, S. H. Nahm, J. S. Park, K. M. Yu, Y. B. Kim, and D. Son, J. Magn. Magn. Mater., **20**, 445 (2000).
- [20] 박수영, 유권상, 이재경, 박중서, 한국자기학회지, **16**, 211 (2006).
- [21] B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, 2nd Ed., (Addison-Wesley, New York, USA, 1972).
- [22] J. D. Verhoeven, Fundamentals of Physical Metallurgy, (John Wiley & Sons, New York, USA, 1975).
- [23] S. Takahashi, J. Echigoya, and Z. Motoki, J. Appl. Phys., **87**, 805 (2000).

Characterization of the High-temperature Isothermal Aging in USC Ferritic Steel Using Reversible Permeability

Chung Seok Kim*

Engineering Science and Mechanics, Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA

Kwon Sang Ryu, Seung Hoon Nahm, and Seung Seok Lee

Korea Research Institute of Standard and Science, Yuseong, Daejeon 305-600, Korea

Ik Keun Park

Mechanical Engineering, Seoul Nation University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 30 March 2009, Received in final form 5 May 2009, Accepted 6 May 2009)

The high-temperature isothermal aging is studied in ultra-supercritical steel, which is attractive to the next generation of power plants. The effects of microstructure on reversible permeability are discussed. Isothermal aging was observed to coarsen the tempered carbide (Cr_{23}C_6), generate the intermetallic (Fe_2W) phase and grow rapidly during aging. The dislocation density also decreases steeply within lath interior. The dynamic coercivity, measured from the peak position of the reversible permeability profile decreased drastically during the initial 500 h aging period, and was thereafter observed to decrease only slightly. The variation in dynamic coercivity is closely related to the decrease in the number of pinning sites, such as dislocations, fine precipitates and the martensite lath.

Keywords : reversible permeability, dynamic coercivity, ultra-super critical steel, isothermal aging