

로터용 내열강의 구조 건전성 모니터링을 위한 미세 조직 평가

Microstructural Characterization for Structural Health Monitoring of Heat-Resisting Rotor Steels

김정석*, 변재원**, 박익근***†

C. S. Kim*, Jae Won Byeon** and Ik-Keun Park***†

초 록 고온-고압의 장시간 사용으로 나타나게 되는 재료열화현상을 이해하고 구조건전성 모니터링을 위한 기초연구로 사용하고자 대표적인 로터용 내열강인 2.25CrMo 강과 9CrMo 강 그리고 12CrW 강을 연구하였다. 재료열화를 모니터링하기 위해 2.25CrMo 강은 등온열화 시험을 9CrMo 강은 크리프-피로 시험을 그리고 12CrW 강은 크리프 시험을 각 단계별로 수행하였다. 이들 각 손상제에 대한 초음파전파특성, 비저항측정 그리고 보자력측정을 통하여 미세조직 의존성을 고찰하였고 이들 파라미터는 특정 미세조직의 변화에 상당히 민감하게 작용하였다.

주요용어: 내열강, 구조 건전성 모니터링, 등온열화, 크리프-피로, 크리프

Abstract The typical heat-resisting rotor steels such as 2.25CrMo, 9CrMo and 12CrW steel were experimentally studied in order to understand their materials degradation under high temperature and pressure during the long-term service, and then use the basic studies for the structural health monitoring. In order to monitor the materials degradation, it was conducted by the isothermal aging for 2.25CrMo steel, creep-fatigue for 9CrMo steel and creep for 12Cr steel with the incremental step test. The ultrasonic wave properties, electrical resistivity and coercivity were interpreted in relation to microstructural changes at each material and showed strong sensitivity to the specific microstructural evolution.

Keywords: Heat-Resisting Steel, Structural Health Monitoring, Isothermal Aging, Creep-Fatigue, Creep

1. 서 론

발전소용 로터용 소재들은 일반적으로 고온과 고압에서 장시간 사용되며 사용 중 불가피한 기동과 정지 등의 복잡한 사용이력을 갖게 된다. 따라서 소재의 설계단계에서 고려한 안정적인 정적 혹은 동적인 손상현상과는 많은 차이가 있으며 이로 인해 발전설비의 유지 및 보수와 수명예측에 큰 어려움이 있다고 하겠다. 하지만 설비소재는 사용시간

이 지나면 결국 사용이력에 따라서 어떤 특정한 기계적, 화학적, 물리적 물성이 저하되는 것이 필연적으로 나타나게 된다. 그리고 이러한 특정 물성값은 물리적으로 소재자체의 미세조직의 변화로부터 시작된다는 것이다. 따라서 미세조직의 변화에 주목할만 하며 특히, 비파괴적으로 이런 미세조직의 변화를 정성적 및 정량적으로 신뢰도 높게 평가할 수 있다면 설비소재의 건전성모니터링에 혁신적인 변화를 가져올 것으로 기대된다.

이러한 이유로 발전설비의 손상진단에 관한 기존의 많은 비파괴 평가기법 연구들이 활발하게 보고되고 있다[1-9]. 특히, 초음파평가법은 그 어떤 비파괴 평가법보다도 오랫동안 다양하고 깊이 있는 연구가 진행되어 왔고 사용 환경에 적합하게 응용될 수 있는 수많은 계측시스템들도 개발되어 왔다. 그리고 피로, 크리프 등 재료열화에 따른 미세조직적인 변화에 의한 초음파의 전파특성에 관한 많은 보고들도 선행되어져 왔고 초음파의 전파에 민감하게 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[1-3]. 또한, 미세조직적 영향을 크게 받는 것으로 잘 알려진 자기적특성을 이용한 비파괴평가법을 들 수 있다. 강자성체에 있어서 미세조직은 자벽 고착이나 자벽 이동에 중요한 역할을 함으로서 자기적 성질에 큰 영향을 미치는 것으로 잘 알려져 있다. 이러한 자기적 특성 중 보자력 및 바크하우젠 노이즈는 미소한 미세조직의 변화에도 매우 민감하게 변화하므로 재료의 특성평가 연구에 다양하게 적용되고 있다[4-6]. 그리고 기초적 재료연구 분야에서 전기비저항이 널리 쓰여져 왔다[7-8]. 특히, 타 비파괴평가법과는 달리 미소한 원자단위의 결함에 민감하게 작용하므로 미소균열의 생성이전 단계를 모니터링하는데 유용할 것으로 생각되어진다. 하지만 이 모든

비파괴평가법들이 아직은 실제 발전설비의 구조적 건전성 모니터링에 적용하기에는 많은 어려움이 있다고 하겠다. 무엇보다 설비재료의 열화에 대한 고찰과 초음파전파특성, 전기적특성 및 자기적특성과의 상관성, 특정한 미세조직 특성을 기반으로 한 측정의 정밀성향상 등에 많은 문제점을 안고 있기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 로터소재로 현재 사용되고 있는 2.25CrMo 강과 9CrMo 강 그리고 앞으로 초초임계압 발전설비에 쓰여질 내열소재인 12CrW 강에 대해 등온열화, 크리프-피로 그리고 크리프 실험을 단계적으로 행하여 재료열화과정을 이해하고 이들 각 손상재에 대한 초음파전파특성, 비저항 측정 그리고 보자력측정을 통하여 미세조직 의존성을 고찰하고자 하고자 한다. 따라서 재료열화현상에 대해 이해하고 구조건전성 모니터링을 위한 기초연구로 사용하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 터빈 로터 재료

실험에 사용된 시험편 재료는 터빈로터용 소재로

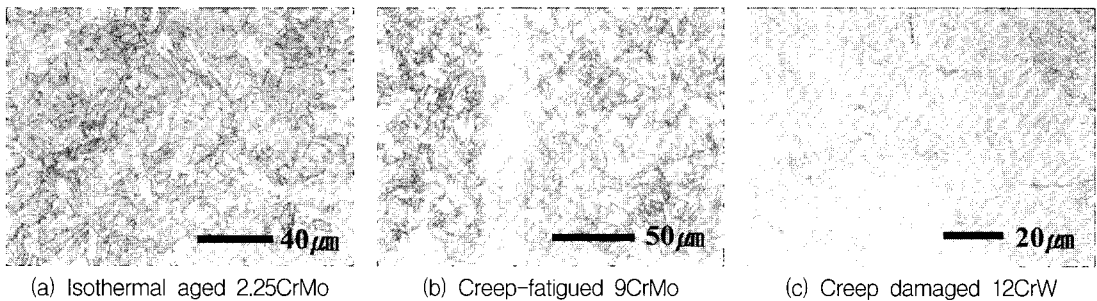


Fig. 1 Optical micrographs showing the surface morphology and grain boundaries after normalizing and tempering at each specimen: (a) 2.25CrMo steel, (b) 9CrMo steel, (c) 12CrW steel

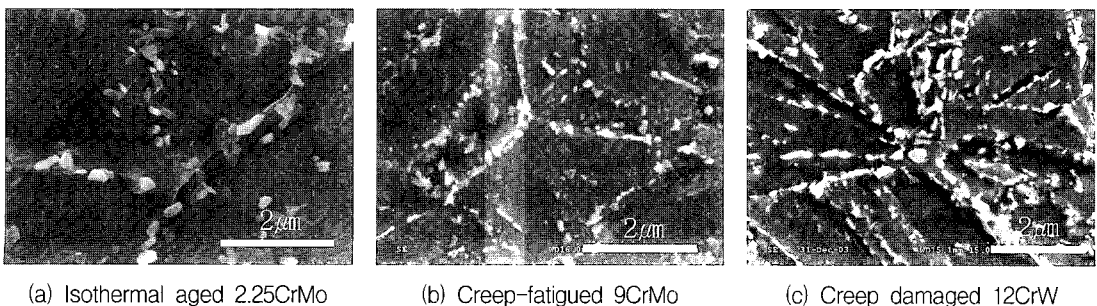


Fig. 2 Scanning electron micrographs showing the grain boundary and carbides after normalizing and tempering at each specimen: (a) 2.25CrMo steel, (b) 9CrMo steel, (c) 12CrW steel

널리 사용되는 2.25CrMo, 9CrMo, 그리고 12CrW의 단조강을 사용하였다. 우선 2.25CrMo 강은 900℃에서 균질화 처리 후 720℃에서 뜨임 처리하였다. 9CrMo 강은 1050℃에서 균질화처리 후 760℃에서 뜨임 처리하였다. 12CrW 강은 1100℃에서 균질화 처리 후 700℃에서 뜨임처리하여 사용하였다. Table 1은 이들 로터재료의 화학적 조성을 나타낸 것이다.

2.25CrMo 강은 등은 가속열화를 630℃에서 등은 열처리 시간을 변수로 하여 가속화된 인공 열화 시편을 제작하였다. 9CrMo 강은 크리프-파로 시험을 위하여 550℃에서 인장하중 187 MPa에서 유지시간을 600초로 하여 파단시간을 기준으로 단계별 크리프-파로 시험을 수행하였다. 크리프-파로 시험편은 수명소비율 (N/N_f) 변수가 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 그리고 0.8이 되도록 시험편을 준비하였다. 12CrW 강은 크리프 시험으로 700℃에서 60 MPa의 일정응력으로 대기 분위기에서 수행하였으며 단계별 크리프 손상제를 제작하기 위해 일정 크리프 시간에서 중단하였다. Fig. 1은 각각 열화시험전 표면조직을 광학현미경으로 관찰한 사진을 나타내었다. 2.25CrMo 강은 베이나이트조직을 나타내었고 9CrMo 강과 12CrW 강은 마르텐사이트조직을 나타내었다.

시험편의 결정립 크기는 각각 약 45, 18, 90 μm 을 나타내었다. 주사전자현미경을 이용하여 균질화와 뜨임처리후 석출된 석출물과 결정립 등을 관찰하고 대표적인 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구자[3,5,6,8]와 기존연구자[10-12]의 보고와 같이 열처리후 2.25CrMo 강에서는 M_3C , Mo_2C , M_6C , $M_{23}C_6$ 등의 석출물이 존재하였고, 9CrMo 강과 12CrW 강에선 MX, $M_{23}C_6$ 의 석출물이 존재하고 있음을 보고하였다.

2.2. 구조적 건전성 모니터링

구조적 건전성 모니터링을 위해 주위 깊게 시험편을 준비하였고 측정을 위한 모든 시험편은 와이

어커팅으로 두께 오차를 1 μm 이내로 정밀 가공하였다. 따라서 비파괴 측정시 시험편의 형상 (두께, 평행)으로 인한 오차를 최소화 하고자 하였다. 2.25CrMo 강은 단순 기계연마를 통하여 표면거칠기를 0.1 μm 로 최종시험편을 준비하였다. 하지만 9CrMo 강과 12CrW 강은 최종 진동연마를 통해 표면거칠기를 0.01 μm 이내로 하였다. 또한 가공으로 인한 시험편 표면경화와 잔류응력의 제거를 위해서 초음파 및 전기비저항 측정용 시험편은 전해연마를 수행하였다. 보자력시험편의 경우 시편가공에 따른 재료 표면의 변형을 피할 수 없고 형상문제로 인해 연마 과정 (기계적, 진동, 전해연마)을 통해 변형 층을 제거하기가 어려움으로 9CrMo 강과 12CrW 강의 보자력시험편의 경우 30% H_2O_2 + 20% 옥살산에서 15분간 유지하므로 최종 준비를 하였다. 이상과 같이 주의 깊게 시험편을 준비하여 비파괴 시험시 시험편의 형상과 표면상태에서 오는 오차를 최소화하고 재현성있는 데이터를 얻고자 하였다.

정밀한 초음파측정을 위해 시험편의 표면에서 산란효과를 극소화할 수 있는 수침법을 이용하여 펄스-에코법을 이용하여 측정하였다. 종파 초음파의 송신과 수신은 중심주파수가 23 MHz인 수침형 광대역 탐촉자를 사용하였다. 계측시스템으로는 35 MHz의 광대역 송수신용 초음파장치 (Panametrics, PR5800)를 사용하였으며, 1 GHz 오실로스코프 (LeCroy, 9374M)의 디지털 스토리지 장치를 사용하였다. 수신신호의 정밀한 시간 간격을 측정하기 위해서 힐버트변환 (Hilbert transform)을 수행하고 수신신호에 대한 인벨럽 (envelop)을 하여 최대 피이크 (peak)를 선정하여 그 피이크간의 시간차를 전파시간으로 정하였다.

전기비저항의 변화는 2.25CrMo 강의 경우 4단자 전위차법으로 측정하였다. 이때 직류 전류원 (Keithley 203)을 이용하여 ± 0.5 A 범위에서 전류를 시험편에 공급하였으며, 전압은 나노 볼트 미터 (Keithley 224)를 사용하여 측정하였다. 9CrMo 강과 12CrW 강은 2단자전위차법으로 측정하였고 전

Table 1 Chemical composition of the rotor steels (weight percent)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	B	N(ppm)	Co	P	Al	Fe
2.25CrMo	0.138	0.142	0.46	0.17	2.27	0.97	-	-	-	-	-	-	0.014	0.007	bal.
9CrMo	0.09	0.23	0.38	0.065	8.66	0.9	-	0.21	0.07	-	350	-	0.015	0.01	bal.
12CrW	0.19	0.06	0.13	0.52	11.01	0.09	3.45	0.21	0.06	0.01	332	2.97	-	0.004	bal.

류원 (Keithley 2602)을 이용하여 1 Hz, ±0.5 A의 사인파 전류를 시험편에 공급하였다. 전류를 가하는 단자는 일정전류를 시험편에 균일하게 가하기 위해서 시험편에 충격용접 (shock welding)을 하여 사용하였다. 또한 전기비저항 값이 시편과 접촉하는 측정 단자의 압력에 큰 영향을 받기 때문에 일정한 하중을 가해 시편에 접촉시켜 줄 수 있고 대기의 흐름을 방지하며 시험편의 위치제어를 할 수 있는 측정장치를 제작하였다.

보자력은 진동시료자속계를 이용하여 측정하였다. 시험편은 형상에 의한 형상 자기이방성을 최소화 하기 위해 직경 2.5 mm, 길이 7.0 mm의 원기둥 모양으로 가공을 하였다. 이상과 같이 제한적이고 주의 깊은 시험편의 준비와 제어된 비파괴 시험을 통하여 측정 결과의 오차를 크게 줄일 수 있다. 비파괴측정시 전체적으로 초음파속도는 약 ±0.1%, 감쇠 ±3%, 비저항 ±1% , 그리고 보자력 ±0.1%로 정밀도 높게 측정하였다. 하지만 기계연마만을 하여 준비한 2.25CrMo 강의 경우 최종 측정오차는 자동과 전해연마과정을 거친 9CrMo 강과 12CrW 강보다도 약 2.5배의 큰 오차를 보였다. 또한, 보자력측정시 시편 표면 상태에서 오는 오차는 더욱 크게 나타나 약 10배 큰 오차를 나타내었다.

각각의 서로 다른 로터용 내열강의 상이한 손상 기구에 따라서 나타나는 비파괴평가 결과를 고찰하고자 열화시험전의 측정값 (V_o , α_o , ρ_o , Hc_o)으로 열화 후의 모든 결과값 (V , α , ρ , Hc)을 정규화하였다. 그리고 V , α , ρ 그리고 Hc는 각각 초음파속도, 감쇠계수, 비저항 그리고 보자력이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 각 내열강의 열화 시험시간에 따른 초음파의 속도를 열화시험 전 초기 값으로 정규화한 변화를 나타내었다. 2.25CrMo 강의 경우 시험시간에 따라서 초음파속도 변화를 관찰할 수 없었다. 하지만 9CrMo 강과 12CrW 강의 경우 피로 시험시간과 크리프 시험시간의 증가에 따라서 초음파속도가 증가하였다. 이상의 결과는 열화과정에 따른 전위밀도의 변화와 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다.

격자결함인 전위는 전위주위의 기지격자변형을 초래하게 되고 기지격자의 연속성을 저해하므로 재

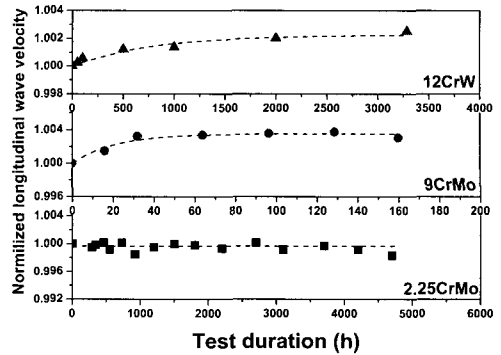


Fig. 3 Normalized longitudinal wave velocity (V/V_o) as a function of test duration at each heat-resisting steel

료의 탄성특성을 저하시킬 수 있는 원인이 될 수 있다[13,14]. 초음파속도는 물리적으로 탄성계수와 밀도에 크게 의존하게 되며 열화과정시 기존의 연구[5,6]에서와 같이 캐비티가 관찰되지 않았으며 밀도측정결과 밀도의 변화를 관찰할 수가 없었다. 따라서 초음파속도의 변화는 탄성특성과 관련 있는 것으로 판단되어 지며 열화에 따른 전위밀도의 감소는 격자변형을 회복시키게 되고 이로 인해 재료의 탄성특성을 증가시키므로 초음파속도가 다소 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 각 내열강의 열화 시험시간에 따른 초음파의 감쇠를 초기 값으로 정규화한 변화를 나타내었다. 2.25CrMo 강의 감쇠계수는 열화시간에 따라서 점차 완만히 증가하였다. 9CrMo 강은 피로 시험시간의 증가에 따라서 초음파감쇠는 감소하였다. 그리고 12CrW 강의 경우 초기 감쇠가 증가하다 1,000시간 이후 감소를 하였다. 2.25CrMo 강은 기존연구[11]에서와 같이 등온열화 과정 중 전위밀도의 변화는 미비하고 결정립크기의 변화는 없는 것으로 보고하였듯이 초음파의 감쇠는 석출물에 의한 산란이 지배적이라고 할 수 있다. 일반적으로 고체 탄성매질 내를 전파하는 초음파 감쇠계수는 산란체의 개수와 산란체 크기의 4승에 비례하므로 산란체의 크기가 산란체적을 지배하는 가장 중요한 인자가 된다[15]. 따라서 등온열화 시간의 증가에 따른 탄화물의 조대화는 산란체의 크기가 증가되는 효과를 나타내어 산란체적을 증가시키고 이러한 현상으로 인해 감쇠계수가 증가되는 것으로 생각된다. 하지만 측정탐촉자의 중심주파수가 23 MHz이고 산란체인 석출물의 평균반경이 수 nm~수백 nm

정도이므로 주파수와 산란체의 크기에 관한 보다 폭넓은 고찰이 필요할 것으로 생각된다. 9CrMo 강은 피로초기 거의 미비한 변화를 보였다. 크리프-피로 변형으로 인한 피로초기 전위밀도의 감소를 보였으나 감쇠계수의 변화에는 그 효과가 크지 않은 것으로 나타났다. 그리고 이후의 큰 감소를 보였다.

이는 마르텐사이트 구조의 특징 중 다른 구조와는 다르게 많은 입계들이 존재한다는 사실에 주목할 수 있다. 이 단계에서 9CrMo 강은 피로과정은 전위밀도의 변화보다는 래스 폭이 증가하고 래스내 전위회복 현상이 현저하게 나타나는 단계로써 래스 경계에 의한 초음파의 산란을 생각할 수 있다. 이는 또한 전위자체의 산란보다는 래스경계에 집적된 전위 엉킴 현상과 래스경계에 석출된 많은 석출물들이 그 효과를 증가시킬 것으로 판단되어진다. 12CrW 강은 크리프 파단 후 감쇠계수는 감소하였지만 크리프 초기에 감쇠계수의 증가를 나타내었다. 기존의 연구보고[9]에서와 같이 12CrW 강은 크리프초기 전위밀도의 감소를 나타내었지만 새로운 석출물의 생성으로 석출물의 분율 증가를 나타내었다. 이러한 전위 및 석출물로 인한 감쇠에 대한 기여는 상호 보완적이지만 본 연구의 크리프초기에는 새로운 석출물 생성으로 인한 석출물의 분율 증가와 조대화가 더 지배적인 것으로 나타났다.

Fig. 5는 각 열화시험편에서 측정된 전기비저항의 변화를 나타내었다. 각각의 열화조건에 따라서 세 로터재료는 모두 열화시간에 따라서 감소를 하였다. 특히, 2.25CrMo 강에서는 열화 시험시작과 함께 급격한 감소이후 미소한 변화를 나타내었다. 9CrMo 강에서도 피로초기에 급격한 비저항의 감소 후 큰 변화를 보이지 않았다. 하지만 12CrW 강에서는 크리프 시간에 따라서 지속적인 감소를 보였다. 기존 연구보고[8]와 같이 2.25CrMo 강은 열화시 미소한 Mo_2C 가 소멸되면서 보다 안정한 M_6C 로 최종 변태하는 것으로 보고되고 있다. 기존의 내열강 연구에서 석출물들은 균질화와 뜨임처리 후 석출을 거의 완료하게 되며 이후의 열처리로 인해 석출물의 평균크기가 시간에 의존해서 확산에 의해 성장하는 오스트왈드 성장기구가 지배적이라고 알려져 있다. 이때에 고용원소의 변화는 미비한 것으로 보고되고 있다. 하지만 열화 과정 중 변태 혹은 새로운 석출물의 생성 등으로 석출물의 체적분율이 변하게 되면 기지 내 고용원소의 변화

가 나타나게 되므로 이로 인한 전기비저항의 변화를 생각할 수 있을 것이다.

2.25CrMo 강은 열화초기에 미세한 정형석출물인 Mo_2C 의 재고용 혹은 변태과정으로 M_6C 의 분율 증가로 기지 내 분순물 원소인 Mo의 감소현상이 나타나고 이로 인한 전기비저항의 현저한 변화가 나타난 것으로 판단되어 진다. 9CrMo 강은 피로초기 단계에서 전위의 급격한 회복이 일어나게 되고 이로 인한 전도전자의 산란효과가 감소하여 비저항이 감소한 것을 생각된다. 또한 석출물의 변태는 관찰할 수 없고 조대화만 나타난 것으로 보아 석출에 의한 기지 내 고용원소의 변화는 없는 것으로 판단된다. 이에 반해 12CrW 강은 크리프 초기 전위밀도의 급격한 감소가 나타나게 되고 새로운 석출물인 라베스 (Laves)상이 생성되므로 기지 내 W원소의 현저한 고갈현상이 비저항을 지속적으로 감소시키는 주요한 원인이라 할 수 있다.

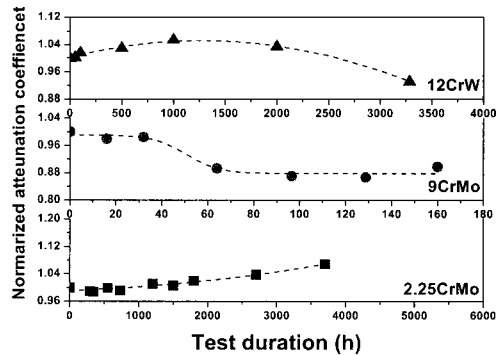


Fig. 4 Normalized attenuation coefficient (α/α_0) as a function of test duration at each heat-resisting steel

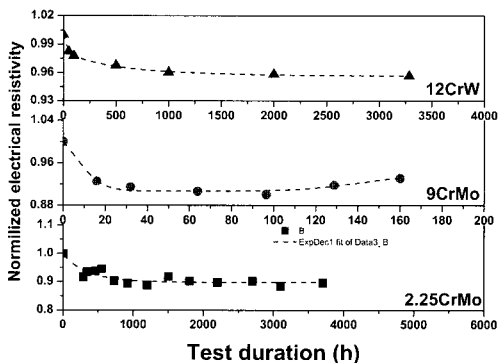


Fig. 5 Normalized electrical resistivity (ρ/ρ_0) as a function of test duration at each heat-resisting steel

Fig. 6은 각 열화시험편에 시험시간에 대한 정규화 보자력을 나타내었다. 모든 시험조건에서 보자력은 감소를 하였다. 2.25CrMo 강은 열화 시간이 증가함에 따라 데이터의 변동 폭이 크지만 전체적으로 완만한 감소를 나타내었다. 9CrMo 강은 미소한 감소를 나타내었고 기존의 연구보고에서와 같이 피로후반에 생성되어진 마이크로 캐비티에 의해 재 증가현상이 나타났다. 하지만 전위의 변화 및 석출물의 변화가 비하므로 보자력의 변화가 크지 않은 것으로 생각된다. 12CrW 강은 크리프 파단 시까지 지속적인 감소를 나타내었다. 이는 전위 회복과 함께 석출물의 조대화현상이 현저하게 나타났기 때문이다.

2.25CrMo 강은 열화 초기 급격한 보자력의 감소는 미세한 정합석출물의 소멸과 밀접한 관련이 있을 것으로 생각된다. 즉, 열화 시간이 증가함에 따라 미세한 다수의 정합탄화물이 소멸되고 이는 자구를 고착시킬 사이트를 줄이는 역할을 함으로써 보자력이 급격히 감소되는 것으로 생각된다. 12CrW 강에 대한 기존의 연구 결과에서 전위밀도는 크리프 초기 급격하게 감소하였다. 그리고 보자력은 개재물의 체적분율에 비례하는 것으로 보고하고 있다. 하지만 새로이 생성된 라베스상도 크리프 초기 모든 생성을 완료하고 조대화하는 것으로 관찰되었다. 12CrW 강에서의 급격한 석출물의 조대화에 따라서 석출물에 의한 자벽의 고착효과는 미비할 것으로 생각되어진다. 그러므로 크리프 초기 이후의 보자력의 변화는 전위와 석출물 외에 다른 요인이 작용할 수 있을거라 판단된다. 래스경계는 크리프 손상에 따라서 그 변화가 현저하게 나타났다. 기존의 연구에서 결정립을 따라서 자기모우멘트의 편향이 생기므로 자벽의 이동에 영향을 미치

게 되고 일반적으로 결정립 크기의 역수에 보자력은 비례하는 것으로 알려져 있다[16,17]. 따라서 래스폭의 증가에 따라서 보자력이 지속적으로 감소한 것으로 생각되어진다. 하지만 마르텐사이트 래스가 자벽 이동에 대한 역할이 결정립과 유사할 지에 관한 연구는 아직 미진한 실정이다. 따라서 이에 대한 보다 많은 연구가 체계적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

특히, 석출물은 기지의 자벽 두께와 상대적인 크기에 따라서 보자력에 미치는 영향이 상이하고 기지의 자벽두께와 유사한 크기 석출물의 영향이 가장 현저하다. 그러므로 이런 점에서 볼 때 9CrMo 강과 12CrW 강에서 보자력에 큰 영향을 미칠 수 있는 석출물은 미세한 MX석출물이라 할 수 있다. 하지만 이들은 너무나 안정하므로 변태나 재 용해 또는 조대화가 거의 일어나지 않으므로 보자력에는 영향을 줄 수 있지만 열화에 따른 보자력의 변화에는 그 영향이 거의 무시할 정도라 할 수 있다. 따라서 2.25CrMo 강의 정합석출물인 Mo_2C 석출물에 의한 보자력의 변화가 이들 중 가장 크게 나타날 수 있고 Fig. 6의 결과에서처럼 가장 큰 보자력의 변화가 나타난 것으로 생각된다.

4. 결론

각 내열강의 열화 시험시간에 따라 초기 값으로 정규화한 초음파의 속도 및 감쇠 변화에서 2.25CrMo 강의 경우 속도변화 없이 석출물에 의한 산란감쇠가 지배적으로 나타났고 9CrMo 강과 12CrW 강의 초음파전파특성은 열화과정에 따른 전위밀도의 변화와 밀접한 관련이 있는 것으로 고찰하였다. 전기비저항은 각각의 열화조건에 따라서 세 로터재료는 모두 열화시간에 따라서 감소를 하였다. 보자력은 기지의 자벽두께와 유사한 크기 석출물의 영향이 현저하게 나타나게 되며 이런 점에서 볼 때 안정한 9CrMo 강과 12CrW 강의 미세석출물 보다도 상전이를 하는 2.25CrMo 강의 미세석출물에 의해 더 큰 보자력의 변화를 나타낸 것이라 하겠다. 이상의 실험결과와 고찰에서와 같이 로터소재의 열화로 인한 미세조직 변화는 비파괴측정결과와 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 각기 다른 로터소재에 대한 서로 다른 열화기구를 하나의 비파괴평가 파라미터로 평가하기는 어렵지만 본연구의 결과를 토대로 전체적인 열화정도에 대한 비파

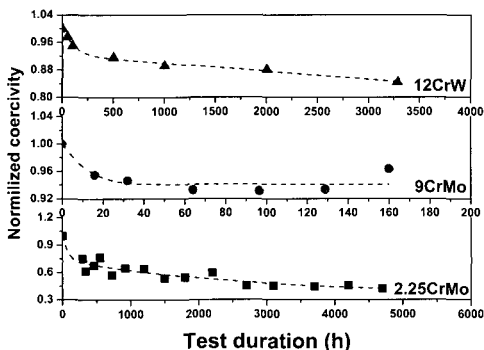


Fig. 6 Normalized coercivity (H_c/H_{c0}) as a function of test duration at each heat-resisting steel

괴평가 파라미터를 측정오차와 변화정도를 고려할 때 보자력은 로터소재의 열화정도에 따라 약 15% (2.25CrMo 강의 경우 50%) 변화에 측정오차가 0.1% 이내로 타 평가법과는 달리 10배 이상의 정밀성을 갖은 것으로 나타났다. 또한 이들의 비파괴 평가법을 실제 발전설비에 적용하기위해선 앞으로 특정한 미세조직 특성을 기반으로한 측정의 정밀성 향상에 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

참고문헌

- [1] S. Gupta, A. Ray and E. Keller, "Online fatigue damage monitoring by ultrasonic measurements: A symbolic dynamics approach," *Inter. J. Fatigue*, Vol. 29, No. 6, pp. 1100-1114, (2007)
- [2] S. H. Tang, J. W. Hao and H. L. Pan, "Material microstructure effects on ultrasonic waves under simple shear and pure shear," *NDT & E International*, Vol. 40, No. 6, pp. 486 - 495, (2007)
- [3] 김정석, 권숙인, 박익근, "페라이트기 9Cr 내열강의 크리프-피로손상에 따른 미세조직 및 초음파 비파괴평가", *한국재료학회지*, Vol. 17, No. 8, pp. 425-432, (2007)
- [4] A. Mitra, J. N. Mohapatra, J. Swaminathan, M. Ghosh, A. K. Panda and R. N. Ghosh, "Magnetic evaluation of creep in modified 9Cr - 1Mo steel," *Scripta Mater.*, Vol. 57, No. 9, pp. 813 - 816, (2007)
- [5] 김정석, 권숙인, 박익근, "크리프-피로 손상된 페라이트기 9Cr 내열강의 미세조직 발달과 자기적 특성", *비파괴검사학회지*, Vol. 27, No. 5, pp. 374-382, (2007)
- [6] C. S. Kim and S. I. Kwun, "Influence of Precipitate and Martensite Lath on the Magnetic Properties in Creep Damaged 11Cr-3.45W Steel," *Mater. Trans.*, Vol. 48, No. 11, pp. 3028-3030, (2007)
- [7] B. Sun and Y. Guo, "High-cycle fatigue damage measurement based on electrical resistance change considering variable electrical resistivity and uneven damage," *Inter. J. Fatigue*, Vol. 26, No. 5, pp. 457 - 462, (2004)
- [8] 변재원, 권숙인, "전기비저항을 이용한 2.25Cr-1Mo 강의 열화도 평가 - 미세조직적 접근", *비파괴검사학회지*, Vol. 22, No. 1, pp. 65-73, (2002)
- [9] 남승훈, 유광민, 류제천, "전기비저항을 이용한 금속합금 열화도 평가기술", *비파괴검사학회지*, Vol. 21, No. 5, pp. 532-541, (2001)
- [10] 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, No. 2, pp. 315-326, (1993)
- [11] 박은수, 박익근, 김정석, 김현묵, 권숙인, 변재원 "2.25Cr-1Mo강 인공열화재의 초음파 특성에 관한 연구", *비파괴검사학회지*, Vol. 21, No. 4 pp. 439-445, (2001)
- [12] C. S. Kim, S. I. Kwun, B. Y. Ann, S. S. Lee and S. H. Nham, "Microstructural characterization of creep damaged 11Cr-3.5W-3Co Steel," *Sol. State Pheno.*, Vol. 118, pp. 475-478, (2006)
- [13] J. E. Lee, Y. C. Kim, J. P. Ahn and H. S. Kim, "Enhanced plasticity in a bulk amorphous matrix composite: macroscopic and microscopic viewpoint studies," *Acta Mater.*, Vol. 53, No. 1, pp. 129-139, (2005)
- [13] I. Tkalcec, C. Azcoitia, S. Crevoiserat and D. Mari, "Tempering effects on a martensitic high carbon steel," *Mater. Sci. Eng.*, A387 - 389, pp. 352 - 356, (2004)
- [14] R. Truell, C. Elbaum and B. B. Chick, *Ultrasonic Methods in Solid State Physics*, Academic Press, New York, pp. 159-179, (1969)
- [15] S. Takahashi, J. Echigoya and Z. Motoki, "Magnetization curves of plastically deformed Fe metals and alloys," *J. Appl. Phys.*, Vol. 87, No. 2, pp. 805-813, (2000)
- [16] J. Degauque, B. Astie, J. L. Porteseil and R. Vergne, "Influence of the grain size on the magnetic and magnetomechanical properties of high-purity iron," *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 26, No. 1-3, pp. 261-263, (1982)