

전자기법을 이용한 3Cr-1Mo-0.25V 강의 물성 평가

남영현[†], 안봉영^{*}, 이승석^{*}

(2002년 3월 6일 접수, 2002년 12월 16일 심사완료)

Evaluation on Material Properties of 3Cr-1Mo-0.25V Steel by Electromagnetic Methods

Young Hyun Nam, Bongyoung Ahn and Seung Seok Lee

Key Words : EMAT (Electromagnetic-Acoustic Transducer, 전자기음향탐촉자), Electric Resistivity (전기비저항), Magnetism (자기), Hysteresis Loop (자기이력곡선)

Abstract

It is advantageous to use NDE methods to assess the mechanical properties of materials since the conventional method is time-consuming and sometimes requires cutting of sample from the component. The NDE parameters such as ultrasonic velocity and attenuation, electric resistivity, and magnetic coercive force and remanance have been utilized to evaluate changes of material properties due to heat treatment condition. It has been found that changes of materials properties under quenched and tempered/PWHT treatments could not be detected using EMAT and Electrical resistivity methods. However, vickers hardness and magnetic hysteresis loop decreased with heat treatment procedures. These results were obtained using 3Cr-1Mo-0.25V steel. The magnetic parameters were found to be most sensitive to changes of material properties.

1. 서 론

기계적 물성을 평가하기 위하여 가장 보편적으로 사용되고 있는 인장시험, 파괴시험, 충격시험, 크리프 시험은 변형 및 파괴 거동에 대한 많은 정보를 제공하지만 시험 준비과정이 복잡하며, 접합부와 같은 특정 취약부분의 평가에 어려움이 있다는 단점이 있다. 이에 반해 비파괴 평가기술은 시험 채취가 필요 없이 현장의 구조물을 대상으로 물성의 변화를 평가할 수 있기 때문에 최근에는 재료의 열처리 효과, 결정립도, 잔류응력, 변형, 석출물 존재 등에 의한 물성 변화를 비파괴적으로 평가하기 위한 연구가 많이 이루어지고 있다.

재료 물성 평가에 이용되는 비파괴적 특성인자로는 초음파 속도 및 감쇠, 전기비저항, 그리고 보자력과 잔류자속밀도 등이 있으며, 각 특성인자는 서로 다른 물성변화와의 연관성을 보인다.

초음파의 속도는 재료의 탄성특성, 초음파 감쇠는 재료내의 산란 특성에 의해 각각 결정되므로 미세구조의 변화를 평가하기 위한 특성인자로 많이 이용되고 있다. 일반적으로 재료의 물성변화에 따른 초음파 속도와 감쇠의 변화는 크지 않기 때문에 접촉매질의 영향 등을 배제한 정밀 초음파 속도 및 감쇠의 측정에는 접촉식 초음파 센서 보다는 비접촉식 초음파 센서를 이용하는 것이 좋다. 비접촉으로 초음파를 송수신하기 위한 여러 가지 센서들이 개발되어 있지만 아직까지는 EMAT (Electromagnetic-Acoustic Transducer)가 가장 일반적인 비접촉식 초음파 센서로 알려져 있다.⁽¹⁻⁶⁾

전기비저항법은 재료내 탄화물의 석출, 기지(matrix)내 고용원소의 감소, 전위밀도의 변화 등과 같은 미세적 변화에서부터 기공(Void) 및 균열전파 등과 같은 거시적 양상에 이르기까지 많은 요인에 의해 변화하기 때문에 물성변화 평가를 위한 비파괴적 기술로 이용되고 있다. 사단자법 등 전기비저항의 측정 기술은 재료의 비저항 측정, 표면결함 깊이측정 등을 위해 이미 오래전부터 이용되어 오고 있는 기술이며, 최근들어 재료물성 평가를 위한 비파괴적 특성인자로도 이용되고 있다.

[†] 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원

E-mail : namyh@kriss.re.kr

TEL : (042)868-5339 FAX : (042)868-5639

^{*} 한국표준과학연구원

Table 1 Chemical compositions and tensile properties of the test material

(Wt. %)								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.1	0.1	0.4	0.007	0.003	0.1	2.95	0.97	0.29

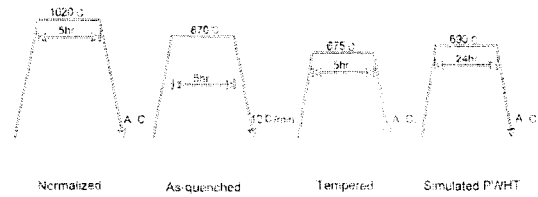
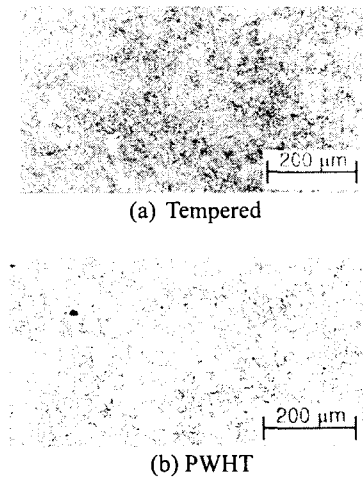
0.2% Yield stress	Tensile stress	Elongation	Reduction Area	Hardness
(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(HB)
500	630	28	78	197

강자성 재료의 자기적 특성은 자구의 운동에 따라 결정되며, 자구의 운동은 재료의 결정립도, 응력, 소성변형, 석출물 등에 영향을 받는다. 비파괴적 평가에 이용되는 특성 인자로는 잔류자속밀도(B: remanence), 보자력(H: coercivity), 자기에너지 손실(W: hysteresis loss), 투자율(μ : permeability) 등이 있다. 자기적 특성의 측정은 채취된 시험편을 이용하여 자기이력곡선을 측정한 후 특성 인자를 분석하는 방법이 가장 정확하지만 비파괴적인 방법이 아니므로 실제 구조물에 적용하기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 중질유 분해(Heavy Oil Refining) 및 탈황용(Hydro-desulphurization) 압력용기 소재로 널리 사용되고 있는 3Cr-1Mo-0.25V 강을 대상으로 각각의 열처리(담금질, 템퍼링, PWHT)가 재료의 물성에 미치는 영향을 비파괴적으로 평가하고자 하였다. 비파괴적 평가에는 EMAT 를 이용하여 측정된 초음파 속도와 감쇠, 전기비저항, 보자력과 잔류자속밀도 측정 결과가 이용되었으며, 측정된 특성인자 중에서 열처리의 효과를 가장 잘 평가할 수 있는 특성인자를 도출하고자 하였다.

2. 시편준비

본 연구에 사용된 소재는 압력용기 소재인 CrMoV 강으로서 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1 과 같다. Fig. 1 은 실험에 사용한 시편을 준비하기 위하여 실시한 열처리 순서를 보여주고 있으며, 담금질한 후 냉각속도는 12 °C/min 로 하였다. Fig. 2 는 실험에 이용된 시험편의 표면조직사진이며, 템퍼링과 PWHT 한 시편의 결정립 크기는 각각 19.6, 21.8 μ m 로 거의 비슷하였다. 담금질한 시편은 탄화물이 석출되지 않아 결정립도를 측정할 수 없었다. 평균적인 결정립의 크기는 ASTM-E112-88 에 의해 측정하였다. Table 2 는 열처리 조건에 따른 항복강도와 인장강도를 나타낸 것으로 열처리가 진행됨에 따라 강도는 저하되고 있음을

**Fig. 1** Heat treatment procedures for various of mechanical properties**Fig. 2** Photomicrographs of the tempered specimen**Table 2** Heat treatment condition and mechanical properties (MPa)

Quenched		Tempered		Simulated PWHT	
TS	YS	TS	YS	TS	YS
1137	715	698	600	578	442

알 수 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 초음파 속도 및 감쇠측정

초음파 속도는 시편내를 왕복하는 초음파의 시간 간격을 측정하는 방법이 가장 일반적이지만 본 연구에서는 측정 정밀도의 향상을 위하여 공진법을 적용하였다. 즉, 송신용 초음파의 주파수를 연속적으로 변화시키면 시험편내에 발생된 초음파의 파장이 연속적으로 변하게 되며, 시험편 두께가 파장의 정수배가 되는 조건에서 공진이 일어난다. 이때 공진주파수와 초음파 속도 사이에는 식 (1)의 관계가 있으므로 초음파의 속도를 측정한다.⁽¹⁾

$$f_n = \frac{nV}{2d} \quad (1)$$

식에서 f_n : n 번째 공진주파수, V : 초음파속도, d : 시편의 두께이다.

감쇠계수는 공진법으로 측정된 공진주파수의 tone-burst 신호로 EMAT 센서를 여기 시킨 후, 나타나는 잔여진동의 기울기를 측정하여 정하였다.⁽¹⁾

본 실험에 사용한 장치는 Fig. 3 과 같으며, 초음파 송수신에는 미국 RITEC 사의 Ram10000 을 이용하였다. 감쇠는 2.34MHz 에 가까운 공진주파수에서 측정되었다. 시편의 크기는 40×38×5mm 이다.

3.2 전기비저항 측정

Fig. 4 는 전기비저항을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 직류전류를 이용한 4 탐침법(Four-Point Probe method)으로 전기비저항을 측정할 수 있도록 실험장치를 구성하였다. 외부의 두 탐침 사이에 정전류를 공급하고 내부의 탐침 사이에서 전압을 측정한다.⁽⁷⁾ 공급한 정전류와 측정 전압, 그리고 시험편의 형상 사이에는 식 (2)의 관계가 있다.

$$\rho = R_s \times t \quad (2)$$

$$R_s = K_a \cdot R_a$$

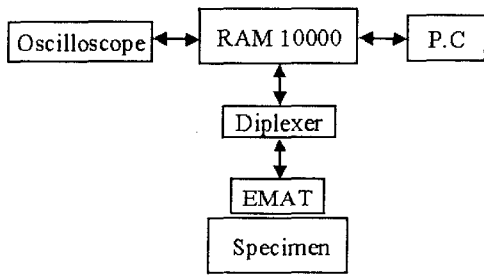


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental set-up for EMAT

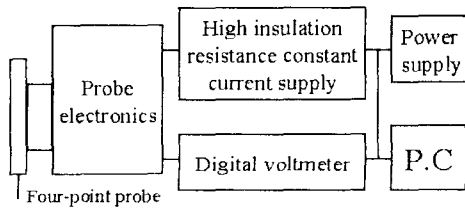


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental set-up for electrical resistivity

식에서 ρ 는 전기비저항, t 는 시편두께, R_s 는 면저항, K_a 는 기하학적 보정인자, R_a 는 두전압 단자사이에서 측정된 저항이다. 한편 측정에 사용된 시험편의 크기는 40×5×5mm 이다.

3.3 자기적 특성인자 측정

자기이력곡선의 측정에는 독일 Hysteresisgraph 시스템 (Magnet-Physik)이 사용되었으며, Fig. 5 는 실험장치의 개략도이다. 자속밀도 측정용 코일(N_2)은 112 회를 권선하였으며, 자기장 인가용 코일(N_1)은 109 회 권선하여 사용하였다. Ring 시편의 크기는 외경 32 mm, 내경 27 mm, 두께 5 mm 이고, 단면적은 12.5 cm² 이다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 6 은 EMAT 로 측정된 평균 종파 속도와 열처리 조건과의 상관관계를 나타내고 있다. 담금질한 시편의 경우 종파의 속도는 5900m/s, 템퍼링/PWHT 한 시편의 종파속도는 5940m/s 이다.

Fig. 7 은 열처리 조건에 따른 평균 횡파 속도의 변화를 나타내고 있다. 담금질한 시편의 경우 횡파속도는 3351m/s, 템퍼링/PWHT 한 시편의 횡파속도는 3359m/s 이다. 담금질한 시편의 음속이 템퍼링/PWHT 한 시편의 음속보다 작게 나타나고 있는데, 이는 담금질한 시편이 템퍼링/PWHT 한 시편의 경우에 비해 결정립계(grain boundary)에 점결함(point defect), 전위(dislocation), 평면결함(plane defect), 석출물(precipitation) 등이 많이 존재하고, 결정립이 조대하므로 재료 내를 전파하는 초음파가 강한 산란과 빔(beam) 분산으로 나타나는 현상으로 생각된다.^(4,5)

Fig. 8 은 횡파의 평균 감쇠계수와 열처리 조건과의 상관관계를 나타내고 있다. 담금질한 시편의

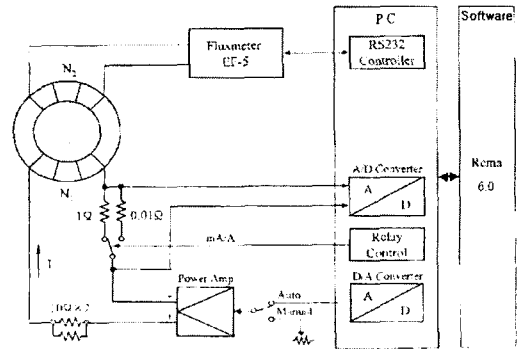


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental set-up for hysteresis loop

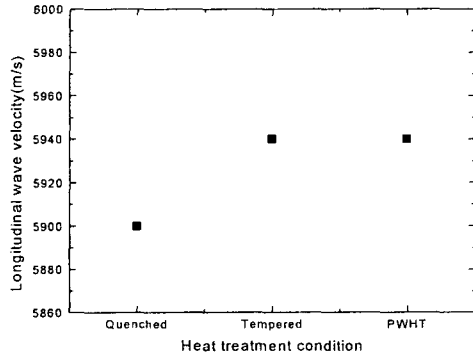


Fig. 6 Relation between longitudinal wave velocity and heat treatment condition (EMAT)

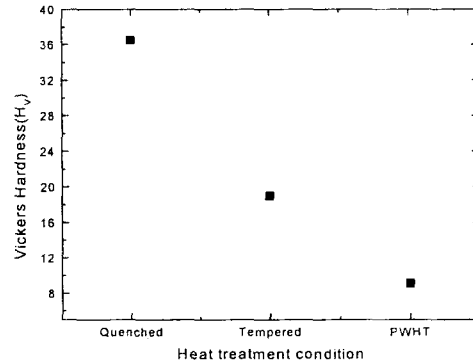


Fig. 9 Hardness variation with heat treatment condition

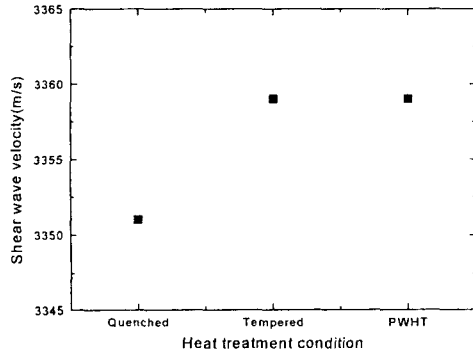


Fig. 7 Relation between shear wave velocity and heat treatment condition (EMAT)

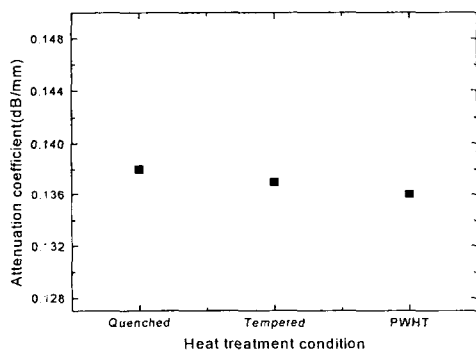


Fig. 8 Attenuations measured at 2.34MHz using EMAT

감쇠계수는 0.138 dB/mm, 템퍼링한 시편은 0.137 dB/mm, PWHT 한 시편은 0.136 dB/mm 로 열처리 조건에 따른 횡파의 감쇠계수는 거의 동일한 값으 측정되었다. 초음파의 감쇠는 주로 결정립에 의한

산란에 의해 결정되는데 각 시험편들 사이의 결정립 크기(grain size) 차이가 크지 않기 때문에 감쇠는 큰 차이를 보이지 않는다. 앞의 2 장에서 담금질한 시험편의 결정립 크기를 측정하지 못하였다고 언급하였으나, 감쇠 측정 결과로부터 담금질한 시험편의 결정립 크기도 템퍼링/PWHT 한 시험편의 크기와 크게 차이가 나지 않을 것으로 판단할 수 있다. 이상의 초음파 속도 및 감쇠 측정결과는 열처리의 진행에 따라 결정입계에 점결함, 전위, 석출물등이 존재하여 시험편의 탄성특성의 변화를 초래하지만 석출물들의 크기가 초음파 파장에 비하여 매우 작기 때문에 산란에는 기여하지 못한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 는 열처리에 따른 평균 경도값의 변화를 나타낸 것이다. 담금질한 시편의 경도값(Hv)은 36 이고, 템퍼링과 PWHT 한 시편의 경도값은 각각 19, 9.1 이었다. 이와 같은 경도치의 변화는 열처리가 진행됨에 따라 결정 입계에 석출물의 양이 증가하고 있음을 의미한다. 이는 확산작용에 의한 물질의 이동 상태를 나타내는 것으로 열처리에 따른 경도값 감소의 직접적인 원인이 된다고 생각된다. 또한, 주사전자현미경을 사용하여 결정 입계 주위에서 발견되는 석출물의 화학성분을 분석하면 주로 Mo, Cr, Mn 등 이며, 이와 같은 성분들은 CrMoV 강에서 일반적으로 나타나는 성분과 같다.(7-10)

Fig. 10 은 초음파 속도와 경도값을 비교한 것으로 경도가 증가함에 따라 초음파 속도는 떨어지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 11 은 열처리에 따른 전기비저항의 변화를 나타낸 것이다. 담금질한 시편의 경우 전기비저항 값은 31.8 $\mu\Omega$ cm, 템퍼링과 PWHT 한 시편의 경우는 각각 27.5 $\mu\Omega$ cm, 26.9 $\mu\Omega$ cm 로, EMAT 를

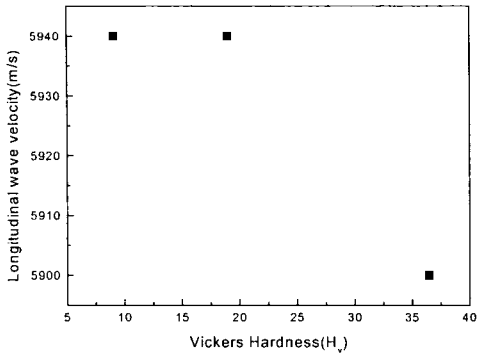


Fig. 10 Relation between longitudinal wave velocity and Vickers hardness

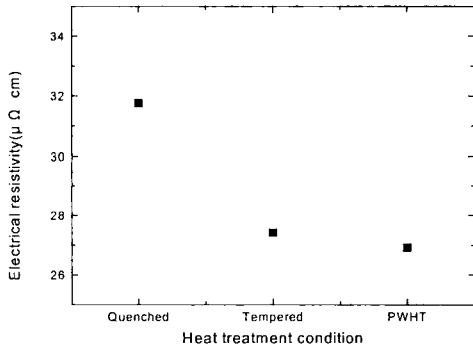
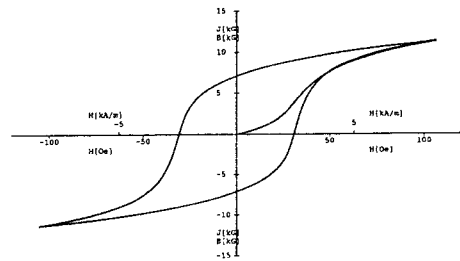


Fig. 11 Electrical resistivity with heat treatment condition

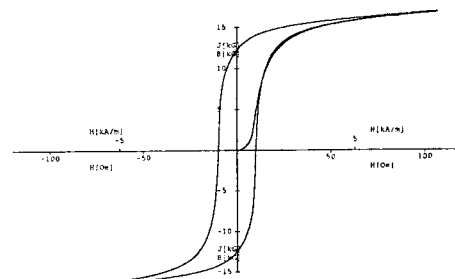
이용하여 구한 초음파의 속도와 같이 큰 차이를 보이지 않는다.

Fig. 12(a), (b), (c)는 담금질, 템퍼링, PWHT 한 시험편에서 측정된 자기이력곡선을 나타내고 있다. 열처리가 진행됨에 따라 자기이력곡선이 반시계 방향으로 회전하고 있음을 알 수 있다. 담금질한 시험편의 경우, Ring 시험을 자화(magnetization) 시키는데 큰 자장(magnetic field)이 필요하므로 자기적으로 경하다고(magnetically hard) 말할 수 있으나, PWHT 한 시험편은 작은 자장이 필요하므로 자기적으로 연하다고(magnetically soft) 할 수 있다.

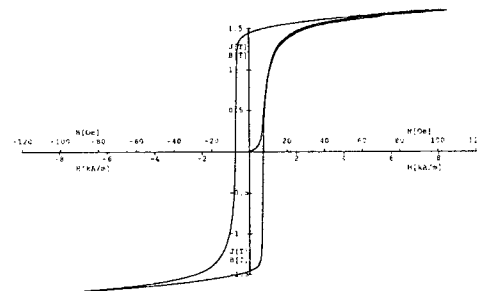
자기이력곡선으로부터는 보자력, 잔류자속밀도를 측정하였으며, Fig. 13 에 열처리 조건과의 상관 관계를 나타내었다. 보자력의 경우, 담금질한 시험편은 30.8 Oe, 템퍼링한 시험편은 10.1 Oe, PWHT 한 시험편은 7.5 Oe 이다. 잔류자속밀도는 각각 7.1 kG, 12.33 kG, 14.53 kG 이다. 보자력은 열처리가 진행됨에 따라 담금질한 시험편에 비해 -67%, -76%



(a) Quenched



(b) Tempered

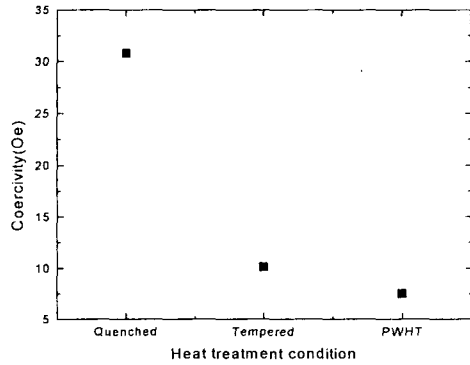


(c) PWHT

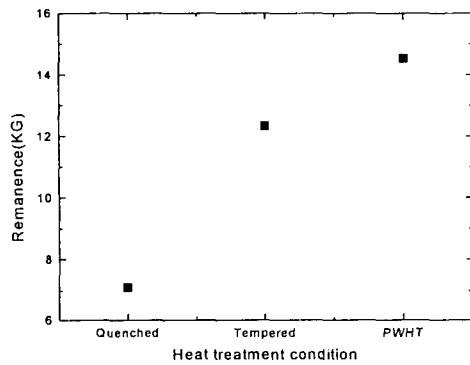
Fig. 12 Hysteresis loops with heat treatment condition

감소하였고, 잔류자속밀도는 각각 174%, 205 % 증가 하였다.

Fig. 13(a)의 담금질한 시험편에서 얻은 보자력이 템퍼링/PWHT 한 시험편에서 얻은 보자력보다 높게 나타나는 이유는 담금질한 시험편의 조직이 템퍼링/PWHT 한 시험편의 조직에 비해 거칠고, 결함, 탄화물 등이 많이 존재하므로, 이들이 자구의 이동을 강하게 방해하기 때문이라고 생각된다. 그러나, 열처리가 진행됨에 따라 결함, 탄화물 등이 소멸되고, 이에 따른 기지와 계면의 감소는 자구를 고착 시킬 장소를 줄이는 역할을 함으로 보자력이 감소한다고 생각된다. 이와 같은 자기적 성질 변화는 결함, 탄화물 등이 자구벽(magnetic domain wall)의 운동을 방해함으로써 나타나는 현상으로 자구벽 이론에 의하면 자구벽의 운동을 방해하기 위해서는 자구벽의 크기와 비슷한 정도의



(a) Coercivity



(b) Remanence

Fig. 13 Dependence of magnetic properties on heat treatment condition

크기를 가진 개재물이 가장 효과적이라고 한다. 이는 자벽의 이동은 이동하는 개재물 자체와의 상호작용보다는 개재물에 부착된 스파이크 자구와의 상호작용에 의해 더 큰 방해받기 때문이다.⁽¹¹⁾

재료의 기계적 성질 변화는 일반적으로 결함, 석출물, 탄화물 등이 전위(dislocation)의 운동을 방해함으로써 일어난다고 알려져 있다. 열처리가 진행됨에 따라 재료에서 탄화물을 형성하기 쉬운 원소들이 결정립계에 석출되어 안정한 탄화물 뿐만 아니라, 큰 안정한 탄화물을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 탄화물 가운데 큰 안정한 탄화물은 사용시간이 길어짐에 따라 안정한 탄화물로 변태하게 된다. 그리고 입계 주위에서의 탄화물의 증가는 공유 결합의 탄화물로 이루어진 입계와 금속결합으로 이루어진 결정립과의 이중 결합으로 인한 결정립과 결정립계와의 결합력을 감소시키는 원인이 되므로,

열처리가 진행됨에 따라 CrMoV 강의 기계적 및 물리적 성질이 저하된다고 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 초음파 속도와 감쇠, 경도, 전기비저항, 보자력과 잔류자속밀도 등을 이용하여 열처리에 따른 3Cr-1Mo-0.25V 강의 미소한 물성변화를 평가하고자 하였다.

담금질, 템퍼링, PWHT 한 3 종류 시편들에서의 초음파 속도와 감쇠, 전기비저항은 담금질한 시험편과 템퍼링/PWHT 한 시편에서는 커다란 물성의 차이를 확인할 수 있었으나, 템퍼링한 시험편과 PWHT 한 시험편 사이에서는 그 차이를 확인할 수 없었다. 그러나, 경도값과 자기이력곡선을 이용하여 구한 보자력, 잔류자속밀도에서는 그 차이를 명백히 구분할 수 있었다.

따라서, 자기적 특성을 이용한 물성변화 측정은 기존의 비파괴평가기술로는 측정되지 않는 미소한 물성의 변화를 측정하는데 매우 유용할 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Ahn, B., Lee, S. S., Hong, S. T., Kim, H. C. and Kang, S. J., 1999, "Application of the Acoustic Resonance Method to Evaluate the Grain Size of Low Carbon Steels," *NDT & E International*, Vol. 32, pp. 85~89.
- (2) Hirao, M., Fukuoka, H., Fujisawa, K. and Murayama, R., 1989, "Characterization of Formability in Cold-Rolled Steel Sheets Using Electromagnetic Acoustic Transducer," *Metall. Trans*, Vol. 20, pp. 2385~2390.
- (3) Ahn, B. and Lee, S. S., 2000, "Effect of Microstructure of Low Carbon Steels on Ultrasonic Attenuation," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 47, pp. 620~629.
- (4) Jeong, H., Nahm, S. H., Jhang, K. Y. and Nam, Y. H., 2001, "Nonlinear Acoustic Effects and Material Strength Degradation due to High Temperature Exposure," *QND*, Vol 20, pp. 1276~1282.
- (5) Jeong, H., Nahm, S. H., Jhang, K. Y. and Nam, Y. H., 2002, "Evaluation of Fracture Toughness Degradation of CrMoV Rotor Steels Based on Ultrasonic Nonlinearity Measurements," *KSME International Journal*, Vol. 16, pp. 147~154.
- (6) Lee, J. M., Nam, Y. H., Ahn, B., Nahm, S. H., Lee, S. S. and Lee, O.S., 2002, "Evaluation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel Degradation using Magnetic Barkhausen Noise," *KSME Journal*, Vol. 26, pp. 1262~1269.

- (7) Ryu, K. S., Nahm, S. H., Kim, T. I., Yu, K. M. and Son, D., 1999, "Toughness Degradation Evaluation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel by Electrical Resistivity," *Journal of Material Science Letters*, Vol. 18, pp. 1175~1176.
- (8) Ryu, K. S., Nahm, S. H., Kim, T. I., Yu, K. M. and Son, D., 2000, "Dependence of Magnetic Properties on Isothermal Heat Treatment Time for 1Cr-1Mo-0.25V Steel," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 222, pp. 128~132.
- (9) Ryu, K. S., Nahm, S. H., Kim, T. I., Yu, K. M. and Son, D., 2001, "Nondestructive Evaluation of Aged 1Cr-1Mo-0.25V Steel by Harmonic Analysis of Induced Voltage," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 231, pp. 294~298.
- (10) Park Duck-Gun, 1998, "A Study on the Irradiation Effect of Reactor Materials Using Micromagnetic Technique," Ph. D. Thesis, KAIST, Taejeon.
- (11) Cullity, B. D., 1972, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-wesley, pp. 287~356.