

초음파와 Barkhausen Noise에 의한 강의 연·취성전이온도 예측

남 영 현* · 성 운 학**
(1998년 12월 14일 접수)

Prediction of Fracture Appearance Transition Temperature(FATT) to Steel by Ultrasonic and Barkhausen Noise Method

Young Hyun Nam and Un Hak Seong

Key Words: Ultrasonic(초음파), Barkhausen Noise(BHN), Fracture Appearance Transition Temperature(FATT: 파면전이온도), Heat treatment(열처리), Grain(결정립)

Abstract

It is advantageous to use an NDE method to assess the mechanical properties of materials since the conventional method is time-consuming and sometimes requires cutting of sample from the material/component. This paper shows that the ultrasonic and the Barkhausen noise(BHN) methods can be used to accurately characterize forged reactor vessels. The attenuation coefficient of the ultrasonic wave was changed with heat treatment temperature and condition[as-quenched, tempered, PWHT]. The RMS[root mean square] voltage of Barkhausen noise depended on heat treatment temperature and conditions. The fracture appearance transition temperature(FATT) can be predicted using nondestructive evaluation methods.

1. 서론

1960년대 이후 국내의 급속한 경제 발전으로 건설된 석유화학설비는 오랜 시간 동안 사용으로 인하여 설비가 노후화 되고 있으며, 이러한 노후 설비의 사용수명 연장에 대한 요구가 증대됨에 따라 현재 설비의 사용/보수/교체/폐기 등을 평가하는 수명예측(Life Prediction)에 관한 연구가 주요 관심사가 되고 있다. 어떤 설비든지 장시간 사용하면 그 재료는 경년열화현상을 겪으며, 재료의 성질은 점차 변해간다. 따라서, 설비노후의 가장 큰 원인은 재질열화(material degradation)이고, 그 발생 원인은 오랜 사용시간, 고온환경, 부하조건, 부식환경 등이며, 대개는 복합적으로 작

용하여 열화가 진행된다. 그러므로 사용중인 석유화학설비의 수명을 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 제조 당시의 재료물성 데이터로부터 열화된 재료의 물성 및 인성을 사용해야 한다.

그러나 파괴인성 측정을 위하여 사용중인 설비에 손상을 주지 않고 시험편을 채취한다는 것은 기술적으로 어려울 뿐만 아니라, 많은 경비와 시간이 소요되므로 파괴적인 방법에 의한 인성평가는 사실상 적용이 불가능하다. 따라서 비파괴법을 이용한 재료의 기계적 성질 및 인성을 평가하는 기술개발이 시급하다. 그러나 현재까지의 연구 결과는 여러 가지 비파괴법을 이용하여 수명을 예측할 수 있는 가능성은 보이고 있으나, 산업현장의 실 제품에 적용하여 수명을 예측한 사례는 매우 드물다.⁽¹⁾ 또한, 재질열화에 미치는 각각의 인자(Creep, 뜨임취화, 수소침식, 경도·강도 저하)가 측정결과에 미치는 영향 및 상관관계에 대한 체계적인 연구는 거의 이루어지지 않고

* 회원, 한국중공업 기술연구원
** 한국중공업 기술연구원

있다.

재료의 결정립은 소재의 기계적 성질을 제어하는 가장 중요한 인자중의 하나이며, 결정립의 세립화는 재료의 강도와 인성을 개선시키고 있다. 단결정체에서 에너지 산란에 관해 Rayleigh 공식을 적용하며, 초음파의 감쇠에 대한 연구는 Mason에 의해 최초로 발표되었고 실험적인 연구는 Papadakis와 많은 연구자들에 의해 수행되었다.^(2,3) Vary는 maraging강과 티타늄(titanium)합금에서 초음파의 속도는 결정립 크기와 비례관계에 있다고 발표하였다.⁽⁴⁾ Grayeli는 AISI type 4140 강(0.4% carbon)을 전파하는 탄성파의 감쇠와 속도에 대해 미세구조와 구(Prior) 오스테나이트의 결정립 크기에 대해 연구하였는데 초음파의 속도는 Pearlite/ferrite 조직에서 가장 빨랐고 bainite, martensite순 이었다.⁽⁵⁾ Juva는 오스테나이트계 스테인리스강에서 초음파 전파시 이방성 효과에 대해 연구하였는데 초음파의 감쇠와 속도 변화는 종파보다 횡파 쪽이 민감하게 나타났다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 중질유 분해(Heavy Oil Refining) 및 탈황용(Hydrodesulphurization) 압력용기로 사용하고 있는 3Cr-1Mo-1/4V강을 사용하여 결정립의 크기 및 열처리 조건에 따른 초음파의 특성(감쇠, 속도) 변화와 Barkhausen Noise (BHN)의 실효치(root mean square: RMS) 전압 변화를 조사하였다. 또한, 충격시험 결과 얻을 수 있는 연·취성전이온도(Fracture Appearance Transition Temperature: FATT)와 초음파 및 BHN와의 상관관계를 조사하였다.

2. 초음파의 산란이론

초음파의 감쇠는 탐촉자로부터 입사된 초음파의 기하학적인 beam spreading (α_b), 흡수에 의한 에너지 감쇠 (α_a), 산란 (α_s)으로 크게 구분할 수 있으며, 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\alpha = \alpha_b + \alpha_a + \alpha_s \quad (1)$$

α_a 는 주파수의 함수이므로 여러 개의 주파수를 사용한다든지, 다른 한정적인 변수(온도, magnetic field)를 변화시킨다든지 또는 가장 간단하게 thermoelastic loss로써 계산해서 제거시킬 수 있다. 따라서 초음파의 감쇠 측정으로부터 산란에 의한 감쇠만을 뽑아낼 수 있다. 입자 산란에 의한 초음파의 감쇠 (α_s)는 주파수 (f), 결정립의 크기 (D), 입자내의 다른 조직 (μ), 결정립의 분포 (GD), 결정립의 크기와 초음파 파장과의 비(D/λ)의 함수이다. 따라서,

$$\alpha_s = \alpha(f, D, \mu, GD, \frac{D}{\lambda}) \quad (2)$$

라고 표시 할 수 있다.

금속, 특히 다결정체에 대한 초음파의 감쇠는 결정립 및 조직에 의한 산란 감쇠가 주(主)가 되며 내부마찰에 의한 감쇠는 매우 작다. Mason은 다결정체 금속의 감쇠에 대해 식 (3)과 같이 표시하였다.

$$\alpha = Af + B f^4 \quad (3)$$

여기서, A 와 B 는 비례상수이다.

다결정체 내에서 제1항의 영향은 매우 작기 때문에 근사적으로 무시할 수 있으며, 식 (3)은 식 (4)와 같이 표시하는 일이 가능하다.⁽⁷⁾

$$\alpha = \frac{H}{3} \cdot d^3 \cdot \left[\frac{\pi}{\lambda} \right]^4 = \frac{H}{3} \cdot d^3 \cdot \left[\frac{\pi f}{V} \right]^4 \quad (d \ll \frac{\lambda}{3}) \quad (4)$$

즉, 산란 감쇠계수는 금속의 산란인자 H에 비례하고, 결정립 또는 조직의 직경 d의 3승에 비례하며, 주파수 f의 4승에 비례한다. 산란인자 H의 식은 금속에 따라 다르며, Al, Mg에서는 작고, Fe, Cu에서는 크다. 강에서는 조직에 의해 H가 변하며, 횡파쪽이 종파보다 H가 크다.

3. Barkhausen Noise의 발생 원리

BHN를 이용한 재료평가의 원리를 이해하기 위해서는 자벽(magnetic wall)과정에 대한 미시적인 자화(magnetization)기구를 알 필요가 있다. 철강재료 등의 강자성체(ferro-magnetic material)는 Fig. 1과 같이 각각 자벽으로 나누어진 자구(magnetic domain)로 구성되어 있으며, 강자성체에 자장(magnetic field)을 가하면 시험체의 자속밀도(flux density)는 증가한다. 미시적으로는 외자계 방향과 평행한 자구가 성장하는 것과 같이 자벽이 이동·회전한다. 실제로는 강자성체 내부의 입계, 개재물, 탄화물, 각종결함(전위, 기공)들이 국부적으로 자기에너지의 불연속성의 영향을 받아, 자벽의 이동에 대한 방해가 불연속적으로 일어난다. 이 때문에 시편 가까이 코일을 놓으면 미시적인 자속변화에 따른 펄스(pulse)상의 노이즈(noise)변화가 유도되어 검출되는데 이를 자기BHN라고 부른다.^(8,9) 또한, 자화과정에서 자기AE(Magnetic Acoustic Emission: MAE)도 발생하는데 이는 BHN와 그 발생기구가 다르며, 주로 180° 자벽의 이동·회전에 따라 일어나는 자왜(magnetostriction)와 관계되는 탄성파이고 AE신호 검출과 동일한 압전소자 센서를 이용하여 검출한다. 이러한 2개의 자기난음신호(磁氣難音信號: BHN, MAE)는 강자성체의 조직 및 응력의 크기, 방향에 민감한 특징을 가지고 있으며, 그 발생 메카니즘으로 BHN는 자벽의 발생과 pinning이 원인이 되어 미세조직에 민감하고, MAE는 응력(변형)에 민감한 특징을 가지고 있다.^(10,11)

자기를 이용한 재료평가에서는 투자율(permeability, μ), 보자력(coercive force, H_c), 잔류자속밀도(remanence, B_r) 등의 변화를 관찰한 연구가 진행되고 있다. 투자율은 시편 전체의 자벽이동의 결과와 그 상태로부터 결정되고 있으나, BHN는 미시적 자벽의 불연속적 이동이라고 말하는 동적 특성에 관련하고 있다. 따라서, 양자의 측정결과에는 유사한 면도 있으나, 그 물리적 의미의 차이 때문에 본질적으로 다른 특징이 나타나는 경우도 있으므로 주의할 필요가 있다. 일반

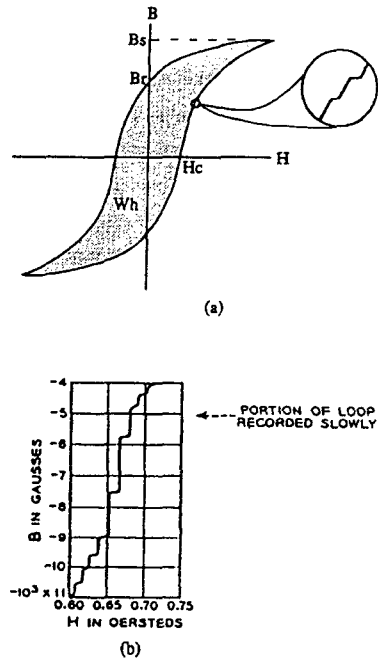


Fig. 1 (a) Hysteresis loop for magnetic material showing discontinuities that produce Barkhausen Noise, (b) large discontinuities in a specimen.

적으로 BHN는 자화과정에서 자벽의 발생과 그 이동이 심한 이력(hysteresis)곡선이 급격히 상승하는 자화중기의 보자력을 가하는 자계(자속밀도: $B=0$)부근에서 높은 출력을 나타내고, MAE는 자벽의 회전·소멸이 발생하는 자화 포화기(saturation)에 주로 발생하는 경향이 있다.

4. 실험 방법

4.1 시편준비

본 연구에 사용된 소재는 석유화학설비의 중질유 분해(Heavy Oil Refining) 및 탈황용(Hydrodesulphurization) 압력용기 소재인 3Cr-1Mo-1/4V으로서 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1에 나타난 바와 같다. 다양한 결정립 크기(grain size)를 가진 시편을 얻기 위하여 Table 2와 같이 시편들의 담금질 온도를 870°C~1,000°C까지 변화시키면서 열처리를 실시하였고, 열처리후 냉

Table 1 Chemical composition and tensile properties of the test material.

(wt. %)											
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Ti	B	
0.14	0.08	0.44	0.007	0.003	0.1	2.95	0.97	0.29	0.029	0.002	

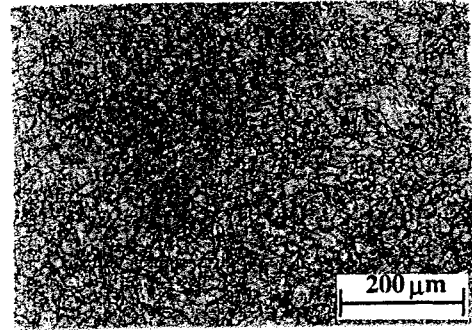
0.2 % Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)	Reduction Area (%)	Hardness (HB)
500	630	28	78	197

Table 2 Heat treatment conditions of the investigated specimens.

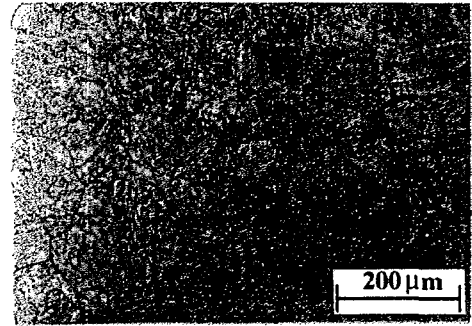
Specimen No	Heat treatment	Average austenite grain size (μm)
N	1020°C / 5h	
Q1 ¹⁾	N→870°C / 5h	-
Q2	N→900°C / 5h	-
Q3	N→935°C / 5h	-
Q4	N→970°C / 5h	-
Q5	N→1000°C / 5h	-
T1	Tempered 675 °C / 5h	19.6
T2		26.0
T3		36.5
T4		59.5
T5		75.8
P1	PWHT ²⁾ 690 °C / 24h	21.8
P2		24.2
P3		32.6
P4		54.0
P5		76.0

Note 1: Immersion in water

2: Simulated Post Weld Heat Treatment



(a) T2 (26 μm)



(b) T5 (75.8 μm)

Fig. 2 Photomicrographs of the tempered specimen.

4.2 충격시험

연·취성전이온도를 구하기 위하여 Charpy V-notch 충격전이곡선은 ASTM A370에 의해 얻었으며, 시편의 크기는 10×10×55mm이다.

4.3 초음파시험

Fig. 3은 측정시스템의 개략도를 나타내고 있으며, 펄스반사법의 종파를 사용하여 초음파의 감쇠계수와 속도를 측정하였다. 초음파는 압력용기의 단조방향에 대해 수직방향으로 입사시켰으며, 시험에 사용한 수직탐촉자의 중심주파수는 10MHz이다. 탐촉자와 시편 사이의 접촉매질은 글리세린을 사용하였다.

미소한 시편의 두께 차이가 초음파의 속도에 큰 영향을 미치므로 시편의 두께는 연삭가공을 통해 정확히 45mm로 하였다. 초음파의 감쇠계수와 속도 측정은 시편 전체의 평균치를 구할 목적

각속도는 10°C/min로 일정하게 유지하였다.

실험에 사용한 시편은 한 면의 길이가 45mm 인 정육면체이고, 시편표면의 평균조도는 4 μm 이하이다. 담금질한 시편에서는 탄화물이 석출되지 않아 결정립의 크기를 측정할 수 없었으며, 평균적인 결정립의 크기는 ASTM-E112-88에 의해 측정하였다.⁽¹²⁾ 템퍼링과 PWHT한 시편의 결정립 크기는 거의 비슷하였다.

Fig. 2는 시편 T2와 T5의 조직사진이고 결정립의 크기는 각각 26 μm 와 75.8 μm 이다.

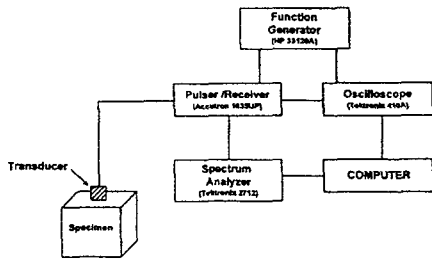


Fig. 3 Experimental set-up for ultrasonic method.

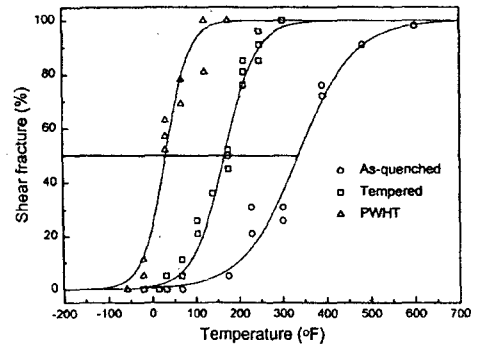


Fig. 5 FATT change with heat treatment condition.

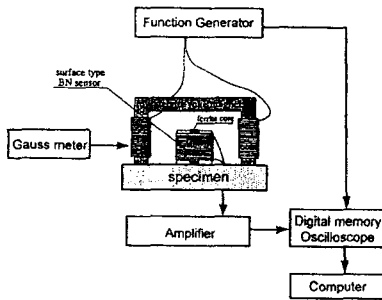


Fig. 4 Experimental set-up for measuring the magnetic Barkhausen Noise.

으로 20회씩 측정 한 후 평균치로 나타내었다. 이 정도의 측정회수는 현재의 연구에서 소재의 특성과 초음파의 상관관계를 도출하는데 충분하고, 측정결과가 모든 가능한 방향의 결정립을 포함한다고 사료된다.

4.4 Barkhausen noise시험

Fig. 4는 BHN 측정시스템의 개략도를 나타내고 있다. Function generator는 1Hz의 교류 파형 (sine 파형)을 증폭시킨 후, 자화 core에서 시험편을 자화시켜 자계를 만든다. 주파수 1Hz는 본 연구에 사용한 열처리 시험편의 표면을 자화시키는데 충분하고, BHN 펄스를 최상의 조건으로 신호 처리할 수 있다고 생각된다. 센서 내부에는 자화코일(전류: H)과 중앙부에 소형의 검출코일(전압: B)이 조합되어 있으며, 얻어진 신호는 컴퓨터에서 해석하였다. 자화과정에서 시험편의 자속 변화는 공진주파수가 10kHz인 surface type

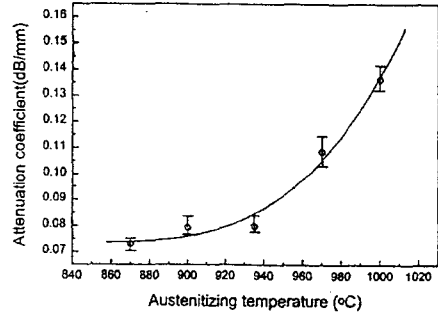


Fig. 6 Relation between ultrasonic attenuation and austenitizing temperature.

sensor를 통해 전압변화로 검출하였다. BHN는 평균화처리 후의 실효치 전압(RMS)을 사용하였으며, 측정회수는 60회이다.

5. 시험결과 및 고찰

5.1 충격시험 결과

Fig. 5는 담금질 온도가 1,000°C/5h, 템퍼링 온도가 675°C/5h, PWHT 온도가 690°C/24h인 열처리 시험편을 이용하여 구한 연·취성전이온도로 각각의 온도는 337 °F, 176 °F와 32.54 °F로 열처리가 진행됨에 따라 재료의 인성은 향상되고 있음을 알 수 있다.

5.2 초음파시험 결과

Fig. 6은 담금질한 시험편의 열처리 온도와 감쇠계수와 상관관계를 나타내고 있다. 열처리 온

도가 높은 시편일수록 초음파의 감쇠계수가 크게 나타나고 있는데, 이는 온도가 높을수록 소재의 결정립의 크기가 증가하기 때문이다.

Fig. 7은 오스테나이트의 결정 입도(grain size)와 초음파 감쇠계수와와의 관계를 나타내고 있다. 초음파의 감쇠는 식 (2)과 같이 결정입도(D)의 3승에 비례하고, 주파수(f)의 4승에 비례하므로 실험 데이터를 3차 함수로 정리하였다. 결정립이 작은 영역에서는 감쇠계수가 크게 변하지 않으나, 결정립 크기가 증가함에 따라 초음파의 감쇠는 급격히 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이와 같은 경향은 이론과도 잘 일치하고 있다.

Fig. 8은 초음파의 감쇠와 열처리 조건과의 관계를 나타내고 있다. 초음파의 감쇠는 열처리가 진행됨에 따라 감소하고 있었으며, 특히 970°C와 1,000°C의 감쇠계수의 편차는 작아지는 경향을

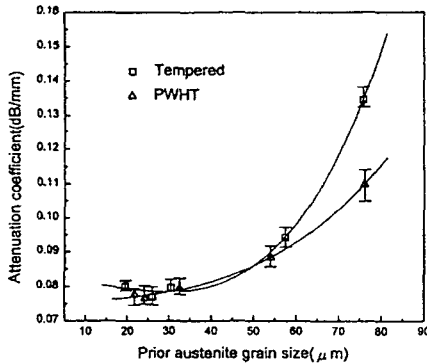


Fig. 7 Relation between ultrasonic attenuation and grain size.

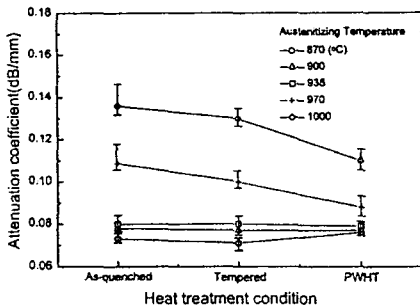


Fig. 8 Relation between ultrasonic attenuation and heat treatment condition.

보이고 있다. 이러한 경향은 재료의 미세구조가 탄성적으로 등방성(等方性)화되고, 균질화되기 때문이라고 사료된다.

Fig. 9는 열처리 조건에 따른 종파의 속도변화를 나타내고 있다. 담금질한 시편의 경우 종파의 속도는 5,896m/s~5,901m/s 이고, 템퍼링한 시편의 종파속도는 5,941m/s~5,945m/s 이며, PWHT한 시편의 경우 종파속도는 5,941m/s~5,945m/s 이다. 이러한 원인은 담금질한 시편의 경우가 템퍼링과 PWHT한 시편보다 결정립에 점결함(point defect), 전위(dislocation), 평면결함(plane defect)등이 많이 존재하므로, 재료 내를 전파하는 초음파가 강하게 산란되기 때문이라고 사료된다. 이론에 의하면 종파의 속도와 재료의 탄성계수(Young's modulus)가 비례관계에 있으므로, 담금질과 템퍼링/PWHT한 시편의 탄성계수는 변했을 거라고 예상된다. 따라서 응력-변형곡선(stress-strain curve, 0.2%)을 이용하여 탄성계수를 구하고자 시도하였으나, 곡선상의 기준점에 따라 기울기(탄성계수)가 변하므로 객관적이고, 정확한 탄성계수를 측정할 수가 없었다.

5.3 Barkhausen noise 시험 결과

Fig. 10은 오스테나이트의 결정입도와 BHN의 실효치 전압과의 관계를 나타내고 있다. 템퍼링과 PWHT한 시편의 BHN RMS 전압은 Fig. 7과 같이 결정립의 크기가 작은 영역에서는 큰 차이를 보이지 않았지만, 결정립의 크기가 증가함에 따라 크게 증가하고 있다.

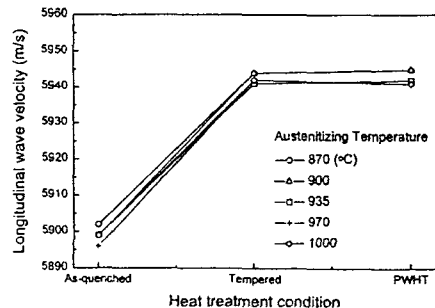


Fig. 9 Relation between longitudinal wave velocity and heat treatment condition.

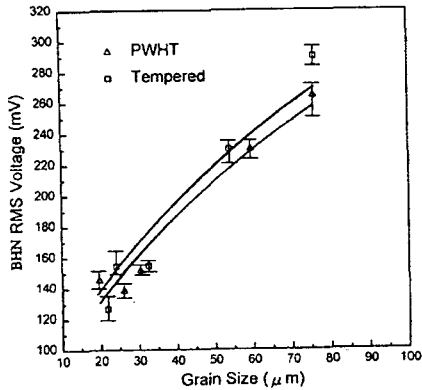


Fig. 10 Relation between BHN RMS voltage and grain size.

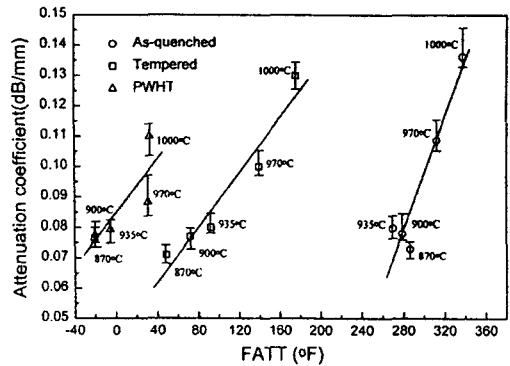


Fig. 12 Relation between FATT and ultrasonic attenuation.

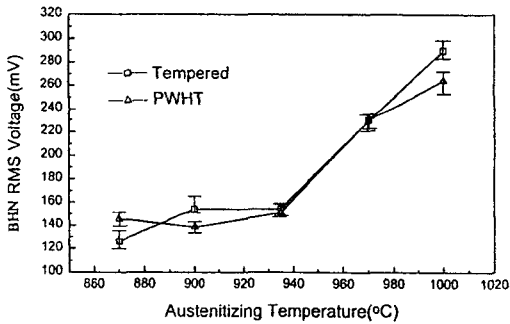


Fig. 11 Relation between BHN RMS voltage and austenitizing temperature.

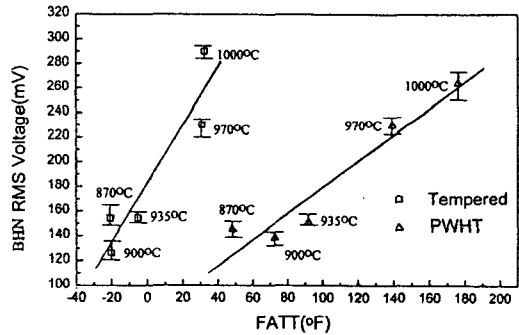


Fig. 13 Relation between FATT and BHN RMS voltage.

Fig. 11은 BHN RMS 전압과 열처리 조건과의 관계를 나타낸 것이다. BHN RMS 전압은 열처리 온도가 증가함에 따라 비례하는 경향을 보이고 있으며, 특히 970°C와 1,000°C의 경우는 초음파의 경우와 같이 크게 증가하고 있다.

6. 초음파법과 Barkhausen Noise법에 의한 FATT 예측

Fig. 12는 초음파의 감쇠계수와 FATT와의 상관관계를 나타낸 것으로 초음파의 감쇠계수는 FATT에 대해 선형적으로 비례하고 있다. Charpy V-notch 충격시험은 열처리 이력이 다른 각 시편에 대해 실시하였다. 담금질한 시편의

FATT는 286 °F~337 °F이고, 템퍼링한 시편의 FATT는 48 °F~176 °F, PWHT한 시편의 FATT는 -20 °F~32 °F임을 알 수 있다. 열처리가 진행됨에 따라 FATT는 감소하고 있었으나, 재료의 인성치는 증가함을 알 수 있다. 식 (5)은 PWHT한 시편의 FATT와 감쇠계수와의 상관관계를 표시한 것이다.

$$a \text{ (dB/mm)} = 0.000443 \times \text{FATT (°F)} + 0.0848 \quad (5)$$

Fig. 13은 BHN의 실효치 전압과 FATT와의 상관관계를 나타낸 것으로, BHN RMS 전압은 FATT에 대해 선형적으로 비례하고 있음을 알 수 있다. PWHT한 시편의 경우 그 상관관계는 식(6)과 같다.

$$\text{Voltage(mV)}=1.06653 \times \text{FATT}(\text{°F})+73.25 \quad (6)$$

석유화학 압력용기 소재인 3Cr-1Mo-1/4V강의 기계적 성질과 연·취성천이온도를 비파괴법을 이용하여 예측하기 위해서는 신뢰성 있는 데이터 베이스 구축이 필수적이며, 복수의 NDE 파라미터를 이용하므로 측정 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

그러나 이와 같은 비파괴법을 재료의 물성평가(탄성계수, 인장강도, 항복강도, 프와송 비) 및 발전/석유화학 설비의 수명평가(열화도 측정: Creep, 뜨임취화, 수소취식, 경도·강도 저하)에 적용하기 위해서는 현장의 계측환경, 데이터의 재현성과 신뢰성 문제 등을 해결하지 않으면 실제 제품의 수명평가에 큰 도움이 되지 않는다고 생각된다.

7. 결 론

본 연구에서는 3Cr-1Mo-1/4V강을 대상으로 결정립의 크기, 열처리 조건이 초음파의 감쇠계수 및 Barkhausen noise의 실효치 전압에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 또한, 이들 인자와 연·취성천이온도(FATT)와의 상관관계에 대해 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 초음파의 감쇠계수는 결정립의 크기 및 열처리온도 증가에 따라 증가하였다.

(2) 초음파의 감쇠계수와 그 편차는 열처리가 진행됨에 따라 감소하였으며, 종파의 속도는 As-quenched와 Tempered/PWHT한 시편 사이에 약 40m/s의 차이가 있었다.

(3) BHN의 전압은 결정립의 크기와 열처리온도가 증가함에 따라 비례하였다.

(4) 초음파의 감쇠계수 및 BHN의 실효치 전압은 FATT와 선형적인 상관관계가 있었다.

참고문헌

(1) 권재도, 문운배, 김상태, 1998, "열화평가에 전기화학적 방법의 응용에 관한 연구" 대한기계학회논문집, (Vol. 22-1), pp.44~51.

(2) W.P. Mason and H.J. McSkimin, 1947, "Attenuation and Scattering of High Frequency Sound Waves in Metals and Glasses", JASA, (Vol.19), pp.464-473.

(3) E.P. Papadakis, 1976, "Ultrasonic Velocity and Attenuation: Measurement Methods with Scientific and Industrial Applications", Physical Acoustics, (Vol VII), pp.277~375.

(4) A. Vary, 1979, "Correlation between Ultrasonic and Fracture Toughness Factors in Metallic Materials", Fracture Mechanics, pp.563~578.

(5) N. Grayali and J.C. Shynr, 1985, "Effect of Microstructure and Prior Austenite Grain Size on Acoustic Velocity and Attenuation in Steel", QNDE, pp.927~936.

(6) A. Juva and J. Lenkkeri, 1980, "The Effects of Anisotropy on the Propagation of Ultrasonic Waves in Austenitic Stainless Components", Brussels, pp.1~24.

(7) 1974, "Report for Basis and Theory of Ultrasonic Non-Destructive Testing", Japan Society for the Promotion of Science.

(8) C. Jagadish, L. Clapham and D. L. Atherton, 1989, "Effect of Bias Field and Stress on Barkhausen Noise in Pipeline Steels" NDT & E International, (Vol. 22), pp.297~301.

(9) Thomas W. Krause and D. L. Atherton, 1994, "High Resolution Magnetic Barkhausen Noise Measurements" NDT & E International, (Vol. 27), pp.201~207.

(10) R. Hill, R. S. Geng, A. Cowking and J. W. Mackersie, 1991, "The Effect of Nickel Hardness and Grain Size on Acoustic and Electromagnetic Barkhausen Emission" NDT & E International, (Vol. 24), pp.179~186.

(11) R. Langman, 1987, "Some Comparisons between the Measurement of Stress in Mild Steel by means of Barkhausen Noise and Rotation of Magnetization" NDT & E International, (Vol. 20), pp.93~99.

(12) 1992, "Standard method for determining average grain size", E112-88, Annual book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.294~319.