

## 초음파에 의한 압력용기의 연취성전이온도 평가

### Evaluation of Fracture Appearance Transition Temperature to Pressure Vessel by Ultrasonics

남영현\*

Young-Hyun Nam\*

**초 록** 파괴적인 방법으로 재료나 설비의 기계적 성질을 평가하기 위해서는 많은 경비와 시간이 소요되므로 비파괴적인 방법을 이용한 재료의 기계적 성질 평가가 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 초음파 특성을 이용하여 열처리 온도와 조건에 따른 기계적 성질 변화를 평가하였다. 초음파의 감쇠계수는 열처리 온도가 높을수록 결정립의 크기가 커지므로 증가하였다. 초음파의 감쇠계수는 열처리(담금질, 템퍼링, 용접후열처리)가 진행됨에 따라 감소하였다. 초음파 속도는 담금질과 템퍼링/PWHT한 시편에서 40 m/s의 차이를 보이고 있었다. 감쇠계수와 인성과의 상관성은 매우 좋으며 이러한 상관관계는 단조한 압력용기의 비파괴 평가에 이용할 수 있으며, 더욱이 현장 적용에 효율적으로 응용할 수 있을 것이다.

**주요용어:** 인장강도, 열처리, 초음파, 압력용기, 연취성전이온도

**Abstract** It is useful to use NDE methods to assess the mechanical properties of materials since destructive methods are time-consuming and usually require cutting of sample from the material/component. In the present research, ultrasonic characteristics have been utilized to evaluate changes of mechanical properties due to heat treatment temperature and condition. The attenuation coefficient of ultrasonic wave increased as the heat treatment temperature because the grain size increased in size as the temperature. The attenuation coefficient decreased as the heat treatment has been progressed (quenched, tempered, PWHT). In the case of ultrasonic velocity measurement, velocity difference between quenched and tempered/PWHT was 40 m/s. There was a good relationship between the attenuation coefficient and the toughness. The relationship can be used for the nondestructive evaluation of the forged reactor vessels. Moreover, the method may be effectively used in the field application.

**Keywords:** Tensile strength, Heat treatment, Ultrasonic, Pressure vessel, Fracture Appearance Transition Temperature(FATT)

#### 1. 서 론

1960년대 이후 급속한 경제발전으로 건설된 압력기기는 오랜 시간동안 사용으로 인하여 설비가 노후화 되고 있으며, 이러한 노후설비의 사용수명 연장에 대한 요구가 증대됨에 따라 현재 압력기기의 사용 및 보수 등을 평가하는 수명예측에 관한 연구에 관심이 고조되고 있다. 어

떤 설비든지 장시간 사용하면 소재는 경년 열화가 진행되어 소재의 성질은 점차 변하게 된다. 설비노후의 가장 큰 원인은 재질열화(material degradation) 이고, 그 발생 원인은 오랜 사용시간, 고온환경, 부하조건, 부식환경 등이며 대개는 복합적으로 작용하여 열화가 진행된다. 그러므로 사용중인 압력기기의 수명을 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 제조 당시의 소재물성 데이터가 아니라 열화

된 재료의 물성 및 인성을 사용해야 한다. 그러나, 파괴 인성을 측정하기 위하여 사용중인 설비에 손상을 주지 않고 시험편을 채취한다는 것은 어려울 뿐만 아니라, 많은 경비와 시간이 소요되므로 파괴적인 방법에 의한 인성 평가는 사실상 적용이 불가능하다. 따라서 비파괴적인 방법을 이용하여 소재의 기계적 성질과 인성을 평가하는 기술 개발은 매우 중요하다고 생각된다.

비파괴기술은 일반적으로 재료 내/외부에 존재하는 피로균열 또는 용접결함 등을 검출하는데 주로 적용하여 왔으며 최근에는 재료의 결정립도, 잔류응력, 변형, 열처리 효과 및 석출물 존재 등의 재료 고유의 물성을 평가하는데도 응용하고 있다. 재료가 갖는 고유물성은 기계적 성질에 영향을 미치고, 재료의 열화 정도는 기계적 성질의 측정으로 결정될 수 있으므로 비파괴기술을 이용하여 고유물성을 평가함으로써 재료의 열화 정도 결정이 가능하게 된다. 재료의 물성을 평가하는데 응용되고 있는 비파괴기술은 경도 측정 기술, 재료 내부에서의 초음파 전파속도와 감쇠를 이용하는 기술, 재료의 전기적, 자기적 특성을 이용하는 기술이 있다.

경도측정법은 재료를 완전히 파괴시키지 않고 기계적 성질을 간단하게 평가하는 방법으로 파괴시험과 비파괴시험의 중간에 해당하며, 보통 indenter를 시편 표면에 놓고 하중을 가한후 시편표면에 남은 자국의 크기와 재료의 응력, 항복강도 등으로 연관 시킨다. 최근 경도 측정 기술 및 측정 장비의 발달로 경도 측정값을 재료의 항복강도 및 응력-변형 곡선, 가공 경화지수, 탄성계수 및 국부적인 파괴 인성치 등의 기계적 성질로 환산이 가능하게 되었다.

초음파시험은 구조물, 배관재 및 압력용기 등에 존재하는 미세한 결함을 탐지하거나, 구조물의 경년 열화 평가, 탄성계수 등의 재료의 기계적 성질을 측정하는데 널리 사용되는 비파괴시험 기술이다. 초음파는 탄성파이므로 매질을 통과할 때 재료의 물성 및 결정립도, 전위, 석출물과 같은 조직학적 특성에 따라 전파속도와 감쇠현상, 에너지 손실을 가져오므로 재료의 물성을 평가할 수 있다[1-10].

전기 비저항법은 재료내 석출물, 전위 및 기공(void)의 양에 의존하므로 미세조직 변화를 측정할 수 있으며, 재료의 기계적 성질을 나타내는 항복강도 및 연취성전이온도와의 상관관계에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다[11].

와전류시험은 재료의 전기적, 자기적 성질에 근거하고 있으며, 전자기 코일을 이용하여 코일의 임피던스를 측정

하고 와전류와 재료의 상호작용을 감지한다. 이 기술은 재료의 전기 비저항과 투자율에 의존하므로 시험결과에 영향을 주는 인자가 많다.

자기측정법은 재료의 자기적 특성을 나타내는 B-H곡선을 측정하여 재료의 물성변화를 평가하는 비파괴방법으로, 한번의 측정으로 물성을 나타내는 몇 개의 변수들을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 재료의 고유 물성을 판단할 수 있는 자기적 변수로써 일반적으로 4가지의 자기 특성이 있다. 즉, 잔류 자속밀도(B: remanence), 보자력(H: coercivity), 자기에너지 손실(W: hysteresis loss), 투자율( $\mu$ : permeability)은 재료의 결정립도, 응력, 소성변형, 제2상과 같은 석출물 존재와 밀접한 관계가 있으므로 물성변화 평가가 가능하다. 자기 특성을 이용한 또 다른 비파괴 기술로 Magnetic Acoustic Emission(MAE)와 Magnetic Barkhausen Noise(MBE) 기술이 있으며 두 방법은 서로 유사하다. 강자성체(ferro-magnetic material)는 자벽으로 나누어진 자구(magnetic domain)로 구성되어 있으며, 강자성체에 자장(magnetic field)을 가하면 재료의 자속 밀도(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 가까이에 코일을 놓으면 미시적인 자속변화에 따른 필스상의 노이즈(noise) 변화가 유도되어 검출되는데 이를 자기 MBE라고 한다. 자기 MAE는 자기 MBE와 그 발생기구가 다르며 주로 180° 자벽의 이동/회전에 따라 일어나는 자왜(magnetostriction)와 관계되는 탄성파로 AE신호 검출과 동일한 압전소자 센서를 이용하여 검출할 수 있다. MBE는 자화과정에서 자벽의 발생과 그 이동이 이력곡선이 급격히 상승하는 자화중기의 보자력을 가하는 자계(B=0) 부근에서 높은 출력을 나타내고, MAE는 자벽의 회전/소멸이 발생하는 자화 포화기(saturation)에 주로 발생한다[12].

본 연구에서는 초음파를 이용하여 중질유 분해(Heavy Oil Refining) 및 탈황용(Hydro-desulphurization) 압력용기 소재인 3Cr-1Mo강을 사용하여 결정립의 크기, 열처리 온도 및 조건(담금질, 템퍼링, PWHT)에 따른 초음파의 감쇠 및 속도특성을 조사하였다. 또한, 충격시험을 통하여 얻은 연취성전이온도(Fracture Appearance Transition Temperature: FATT)와 감쇠계수와의 상관관계를 구하였다.

2. 초음파의 산란이론

초음파의 감쇠는 흡수에 의한 에너지 감쇠( $\alpha_a$ ), 탐촉자로부터 입사된 초음파의 기하학적인 빔 분산( $\alpha_b$ ), 산란( $\alpha_s$ )으로 크게 구분할 수 있으며, 식(1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\alpha_{total} = \alpha_a + \alpha_b + \alpha_s \quad (1)$$

$\alpha_a$ 는 주파수의 함수이므로 여러개의 주파수를 사용하거나, 다른 한정적인 변수(온도, magnetic field)를 변화시키므로 계산해서 제거 시킬 수 있다.  $\alpha_b$ 는 시편의 이방성에 의존하므로 macroscopic한 시편의 이방성을 이는 즉시  $\alpha_{total}$ 에서 제거할 수 있다. 따라서 초음파의 감쇠 측정으로부터 산란에 의한 감쇠만을 뽑아낼 수 있다. 입자 산란에 의한 초음파의 감쇠(s)는 주파수(f), 결정립의 크기(D), 입자내의 다른 조직( $\mu$ ), 결정립의 분포(GD), 결정립의 크기와 초음파 파장과의 비(D/ $\lambda$ )의 함수이다.

따라서,

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

라고 표시할 수 있다[13].

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

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

A와 B는 비례상수

다결정체 내에서 제 1항의 영향은 매우 작기 때문에 근사적으로 무시할 수 있으며, 식(3)은 식(4)과 같이 표시할 수 있다.

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

즉, 산란 감쇠계수는 금속의 산란인자 H에 비례하고, 결정립 또는 조직의 직경 D의 3승에 비례하며, 주파수 f의 4승에 비례한다. 산란인자 H는 금속에 따라 다르며 Al, Mg에서는 작고 Fe, Cu에서는 크다. 또한, 강에서는 조직에 의해 H가 변하며 황과석이 종파보다 크다[14].

3. 실험방법

3.1. 시편준비

Table 1 Chemical compositions 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( $\mu\text{m}$ )
N	1868° F	
Q1	N → 1600° F	
Q2	N → 1652° F	
Q3	N → 1715° F	
Q4	N → 1778° F	
Q5	N → 1832° F	
T1	Q1	19.6
T2	Q2	26.0
T3	Q3	36.5
T4	Q4	59.5
T5	Q5	75.8
P1	T1	21.8
P2	T2	24.2
P3	T3	32.6
P4	T4	54.0
P5	T5	76.0

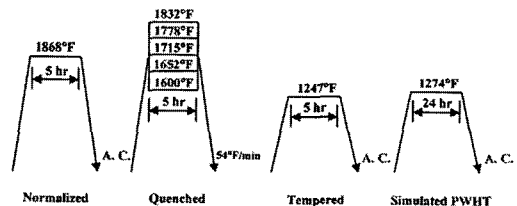


Fig. 1 Heat treatment procedures for various of mechanical properties

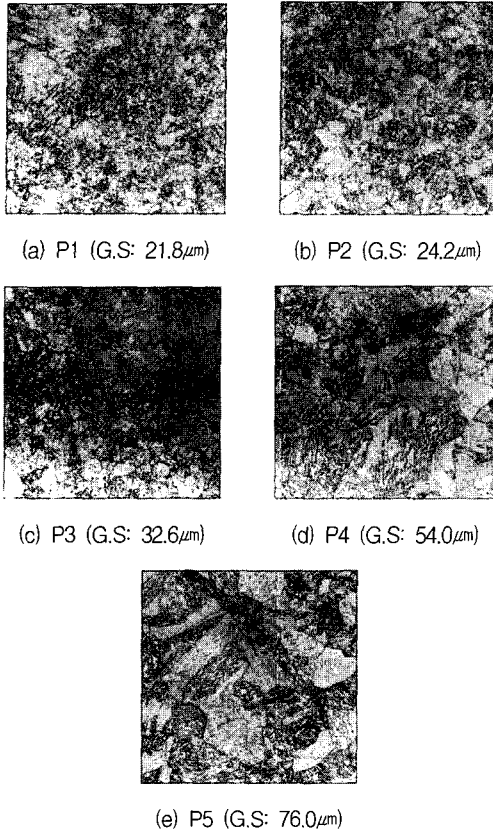


Fig. 2 Photomicrographs of the tempered specimen

본 연구에서 사용된 소재는 석유화학설비의 중질유 분해 (Heavy Oil Refining) 및 탈황용(Hydro-desulphurization) 압력용기 소재인 3Cr-1Mo강으로서 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1에 나타난 바와 같다. 다양한 결정립도를 가진 시편을 얻기 위하여 Fig. 1와 같이 시편들의 담금질 온도를 1600~1832° F 까지 변화 시키면서 열처리를 실시하였고, 열처리 후 냉각속도는 54° F/min로 일정하게 하였다. Fig. 2는 시편 P1, P2, P3, P4, P5의 조직사진이며 결정립도는 각각 21.8, 24.2, 32.6, 54.0, 76.0 μm이다. Table 2는 시편들의 열처리 조건과 결정립의 크기를 정리한 것이다. 실험에 사용한 시편은 한 면의 길이가 45mm인 정육면체이고, 시편표면의 평균 거칠기는 4 μm 이하이다. 담금질한 시편에서는 탄화물이 석출되지 않아 결정립도를 측정할 수 없었으며, 평균적인 결정립의 크기는 ASTM-E112-88[15]에 의해 측정하였고 템퍼링과 PWHT한 시편의 결정립 크기는 거의 비슷하였다. Table 3은 열처리 조건과 항복강도 및 인장강도를 나타낸 것으로 열처리가 진행됨에 따라 강도는 저하되고 있다.

Table 3 Heat treatment condition and mechanical properties

Austenitizing Temperature (° F)	Quenched		Tempered		Simulated PWHT	
	TS (MPa)	YS (MPa)	TS	YS	TS	YS
1600	1137	715	698	600	578	442
1652	1147	745	757	661	616	488
1715	1147	745	770	671	632	507
1778	1147	755	764	667	622	486
1832	1156	735	764	666	629	507

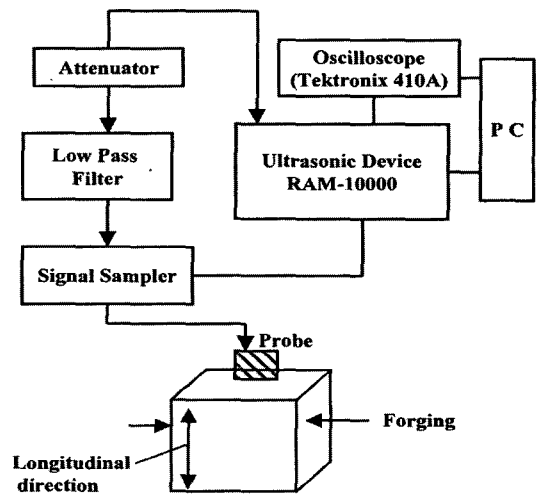


Fig. 3 Experimental set-up for ultrasonic method

### 3.2. 충격시험

열처리 온도 및 열처리 조건에 따른 연취성전이온도의 변화를 구하기 위하여 Charpy V-notch 충격전이곡선은 ASTM A370에 의해 얻었고, 시편의 크기는 101055mm이다.

### 3.3. 초음파 측정시스템 및 측정방법

#### 3.3.1. 측정시스템

Fig. 3은 본 연구에서 이용한 초음파 측정시스템을 보여주고 있다. 이 시스템은 고효율로 저잡음의 데이터 수집이 가능한 RAM-10000(RITEC사)를 기초로 구성되어 있으며, 수신된 신호는 디지털 오실로스코프

(Tektronix 410A)로 관찰하였다. 송신신호의 파형은 톤 버스트(tone burst)를 이용하였으며, 수신에는 10MHz의 광대역 탐촉자(0.5 inch)를 사용하였다. 또한, 초음파 장비의 RF burst 출력은 실험조건에 맞는 송신출력을 제공하기 위하여 감쇠기(Attenuator)가 연결되어 있으며, Low/High pass filter를 이용하여 원하는 주파수 대역을 선택하였다. Signal sampler는 반사신호를 원하는 채널로 수신하도록 하는 기능을 가지고 있다.

초음파의 입사방향은 Fig. 3와 같이 압력용기의 단조방향에 대해서 수직방향(longitudinal direction)으로 입사시켰으며, 미소한 시험편의 두께 차이가 초음파의 속도에 큰 영향을 미치므로 시험편의 두께는 연삭가공을 통해 정확히 45mm가 되도록 가공하였다. 초음파의 감쇠계수와 속도 측정은 시험편 전체의 평균치를 구할 목적으로 20회씩 측정 한 후, 그 평균치를 대표 값으로 하였다.

3.3.2. 감쇠측정

감쇠계수를 측정하기 위해서 신호 진폭값과 이들의 변화값이 계산되어야 하는데, 본 연구에서는 선택(gate 설정)된 신호(첫 번째 신호와 두 번째 신호)에 대한 두 신호의 위상각에 대한 적분값인 Intergrator I<sub>1</sub>과 Intergrator I<sub>2</sub>의 진폭성분과 두 신호간의 진폭변화를 대수비(logarithmic ratio)로 나타내는 식 (5)를 이용하여 측정하였다.

$$\alpha = \frac{20}{2(N_2 - N_1)} \text{Log} \frac{G_1 A_1(0)}{G_2 A_2(0)} \quad (5)$$

G<sub>1</sub>과 G<sub>2</sub>: 상수, N<sub>1</sub>과 N<sub>2</sub>: 반사신호 순서, A<sub>1</sub>(0)과 A<sub>2</sub>(0): 반사신호의 진폭

3.3.3. 음속측정

음속 측정은 수신된 RF 신호의 첫 번째 신호와 두 번째 신호간의 위상(Phase) 및 위상각(Phase angle)으로부터 계산된 절대시간(absolute time)을 측정하였다. 음속 측정에 사용한 측정시스템은 위상 및 위상각도와 선택된 신호를 적분할 수 있는 기능을 가진 2개의 수신회로를 가지고 있으며, 측정하고자 하는 초음파 신호는 수신된 RF신호에 대하여 위상각 0 및 90 방향으로 분리 측정하게 된다. 두 신호간의 전파시간(ΔT)은 식 (6)와 같이 표시할 수 있다.

$$\Delta T = T_1 - T_0 = \frac{\Delta \Phi}{2\pi \Delta F} \quad (6)$$

r: 위상 변화량, ΔF: 주파수 변화량

음속(V)은 식 (7)을 이용하여 계산하였으며, B는 시편의 두께이다.

$$V = \frac{B}{\Delta T} \quad (7)$$

4. 시험결과 및 고찰

4.1. 충격시험 결과

Fig. 4는 담금질한 온도와 열처리 진행에 따른 인장강도의 변화를 나타낸 것 이다. 인장강도는 담금질, 템퍼링, PWHT순으로 낮게 나타나고 있으며, Austenitizing 온도의 변화에는 큰 차이를 나타내고 있지 않았다. 이는 템퍼링 및 PWHT가 진행될수록 재료 내에 존재하는 내부응력(열응력, 변태응력), 전위, 기공 등이 제거되고, 석출된 탄화물들이 안정상태로 회복되며, 전위가 입계로 이동하여 소멸되므로 강도를 저하시키는 원인이 되기 때문이다.

Fig. 5는 담금질 온도가 1600/5h, 템퍼링 온도가 1247°F/5h, PWHT 온도가 1274°F/24h인 열처리 시편을 이용하여 구한 연취성전이온도로 각각 286, 48.2, -20.2°F로 열처리가 진행됨에 따라 재료의 인성은 향상되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 담금질 온도가 1832°F/5h, 템퍼링 온도가 1247°F/5h, PWHT 온도가 1274°F/24h인 열처리 시편의 연취성전이온도로 각각 337, 176, 33°F 이다.

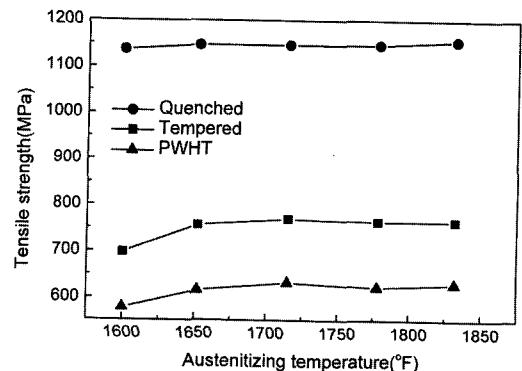


Fig. 4 Variation of tensile strength with heat treatment condition

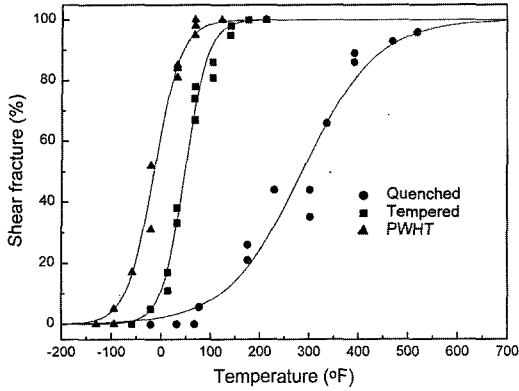


Fig. 5 FATT change with heat treatment condition(1600 °F)

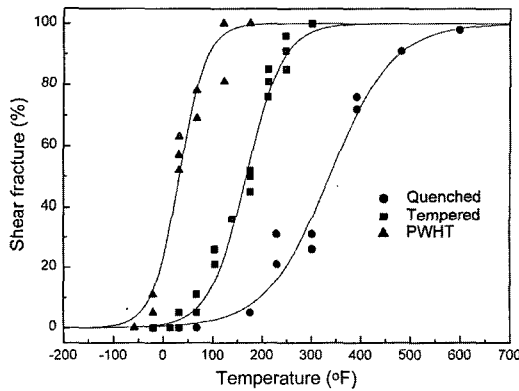


Fig. 6 FATT change with heat treatment condition(1832 °F)

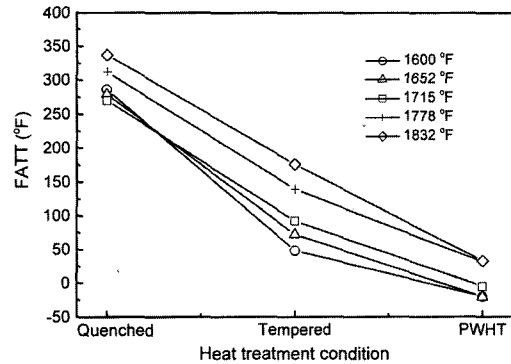


Fig. 7 Relationship between FATT and heat treatment condition

Fig. 7은 열처리 조건에 대한 연취성천이온도의 변화를 나타낸 것으로 담금질(Quenched)조건이 1832° F/5h(Q5)인 경우는 FATT가 제일 높고, 1600° F/5h(Q1)인 경우의 FATT가 제일 낮았다. 템퍼링 및 PWHT한 열처리 조건에서도 이와 유사한 경향을 보이고 있으며, 열처리가 진행됨에 따라 연취성천이온도는 크게 감소하는 경향을 나타내고 있다.

4.2. 초음파시험 결과

Fig. 8은 담금질한 시편의 열처리 온도와 초음파 감쇠계수와와의 상관관계를 나타내고 있다. 열처리 온도가 높은 시험편일 수록 초음파의 감쇠계수가 크게 나타나고 있는데, 이는 열처리 온도가 높을수록 재료의 결정립의 크기가 증가하기 때문이다.

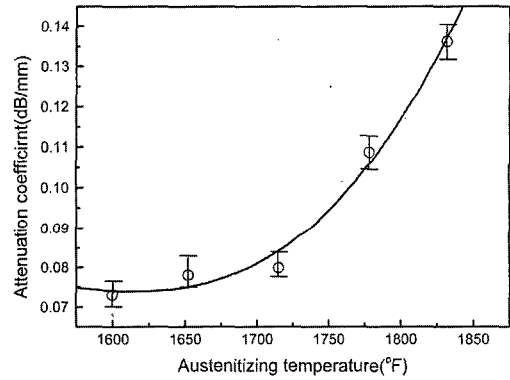


Fig. 8 Relationship between attenuation coefficient and austenizing temperature

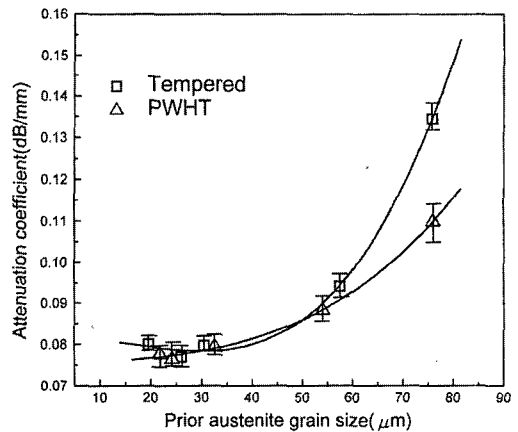


Fig. 9 Relationship between attenuation coefficient and prior austenite grain size

Fig. 9는 오스테나이트의 결정입도와 초음파의 감쇠계수와의 상관관계를 나타낸 것이다. 결정립이 작은 영역에서는 감쇠계수가 크게 변하지 않으나, 결정입도가 증가함에 따라 초음파의 감쇠계수는 급격히 증가하고 있는데, 이와 같은 경향은 초음파 감쇠는 결정입도의 3승에 비례하고 주파수의 4승에 비례한다는 산란 이론과 잘 일치하고 있다. 여기서, 실선은 3차 다항식을 이용하여 최소승법으로 곡선맞춤(curve fitting)을 한 것이다.

Fig. 10은 초음파의 감쇠와 열처리 조건과의 상관관계를 나타낸 것이다. 담금질 온도가 1778, 1832°F인 경우, 초음파의 감쇠계수는 열처리가 진행됨에 따라 크게 감소하고 있으며 실험 데이터의 편차(scattering)도 작아지고 있다. 이는 열처리가 진행됨에 따라 재료의 미세구조가 탄성적으로 균질화 되기 때문에 초음파의 감쇠가 작아진다고 사료된다. 그러나, 담금질 온도가 1600, 1652, 1715°F인 경우는 열처리 진행에 따른 감쇠계수 변화를 관찰할 수 없었다.

Fig. 11은 열처리 조건에 따른 종파의 속도를 나타낸 것이다. 담금질한 시편의 종파속도는 5896~5903m/s, 템퍼링/PWHT한 시편의 종파속도는 5941~5945m/s 이었다. 담금질한 시편의 음속이 템퍼링/PWHT한 시편의 음속보다 작게 나타나고 있는 데, 이는 결정립에 점 결함(Point defect), 평면 결함(Plane defect), 전위(Dislocation), 석출물 등이 많이 존재하고, 결정립이 조대하므로 시편 내를 전파하는 초음파가 강한 산란과 빔(beam) 분산의 영향으로 나타나는 현상으로 생각된다.

Fig. 12는 초음파의 감쇠계수와 연취성천이온도와의 상관관계를 나타낸 것으로 선형적으로 비례하고 있음을 알 수 있다. 담금질한 시험편의 연취성천이온도는 286~337°F, 템퍼링 및 PWHT한 시편의 연취성천이온도는 각각 48~176°F와 20~32°F로 열처리가 진행됨에 따라 재료의 인성이 좋아지고 있음을 알 수 있다. 다음 식은 열처리 조건에 따른 연취성천이온도와 감쇠계수와의 근사식을 나타낸 것이다.

$$(dB/mm) = 0.00094 \times FATT(^{\circ}F) - 0.18 \text{ [Quenched]} \quad (8)$$

$$(dB/mm) = 0.00045 \times FATT(^{\circ}F) + 0.04 \text{ [Tempered]} \quad (9)$$

$$(dB/mm) = 0.00044 \times FATT(^{\circ}F) + 0.09 \text{ [PWHT]} \quad (10)$$

초음파법을 이용하여 석유화학 압력용기 강의 연취성천이온도를 예측하기 위해서는 감쇠계수를 측정 한 후, 이전에 구축해 놓은 위와 같은 근사식을 사용하면 이를 추측할 수 있을 것이다.

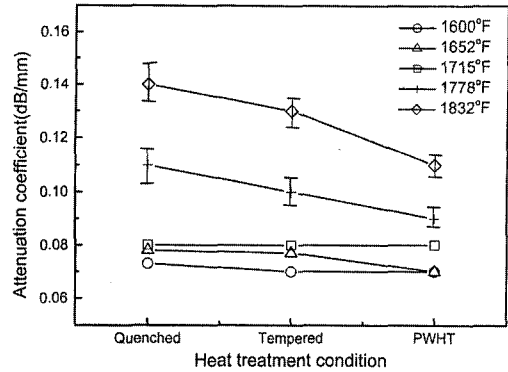


Fig. 10 Relationship between attenuation coefficient and heat treatment condition

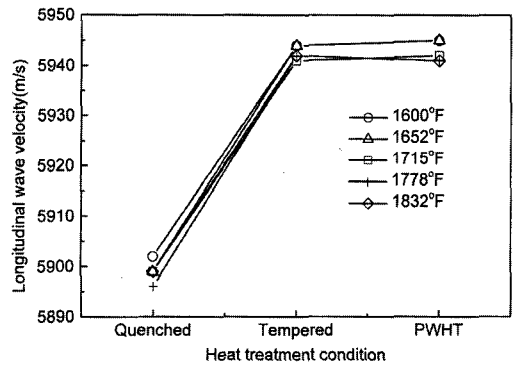


Fig. 11 Relationship between longitudinal wave velocity and heat treatment condition

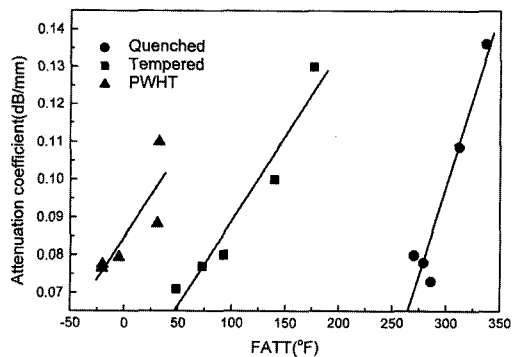


Fig. 12 Relationship between attenuation coefficient and FATT

### 5. 결 론

본 연구에서는 압력용기 강을 대상으로 결정립도, 열처리 조건이 초음파의 특성에 미치는 영향을 조사한 결과,

다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 재료의 인장강도와 항복강도는 열처리(담금질, 템퍼링, PWHT)가 진행됨에 따라 감소하였다.
- (2) 연취성천이온도는 담금질 온도가 높을수록 높았으며, 열처리가 진행됨에 따라 크게 떨어졌다.
- (3) 초음파의 감쇠계수는 담금질 온도가 높을수록 증가하였으며, 열처리가 진행됨에 따라 저하되었다.
- (4) 종파속도는 담금질과 템퍼링/PWHT한 시편에서 40 m/s의 차이를 보였으며, 초음파의 감쇠계수는 연취성천이온도와 좋은 비례관계가 성립되었다.

### 참고문헌

- [1] E. P. Papadakis, ultrasonic velocity and attenuation measurement methods with scientific and industrial applications, *Physical Acoustics*, pp. 277-375, (1976)
- [2] A. Vary, Correlation between ultrasonic and fracture toughness factors in metallic materials *Fracture Mechanics*, pp. 563-578, (1979)
- [3] R. Klinman, G. R. Webster, F. J. Marsh, E.T. Stephenson, Ultrasonic Prediction of grain size, Strength and Toughness in Plain Carbon Steel *Material Evaluation*, , Vol. 38, pp. 26-32, (1980)
- [4] R. Klinman, E. T. Stephenson, Ultrasonic prediction of grain size and mechanical properties in plain carbon steel *Material Evaluation*, Vol. 39, pp. 1116-1120, (1981)
- [5] J. Cech, Measurement the mechanical properties of cast irons by NDT methods *NDT International*, Vol. 23, pp. 93-102, (1990)
- [6] Shinji Konosu, Evaluation of temper embrittlement by ultrasonic attenuation *NDT International*, Vol. 26, pp. 299-302, (1993)
- [7] P. Palanichamy, A Joseph and T Jayakumar, Grain size measurements in austenitic stainless steel using ultrasonics *INSIGHT*, Vol. 36, pp. 874-877, (1994)
- [8] W. Orlowicz, Z. Opiekun, Ultrasonic detection of microstructure changes in cast iron, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 22, pp. 9-16, (1995)
- [9] R Ambardar, T Jayakumar, S D Pathak and O Prabhakar, Ultrasonic Velocity measurement to assess casting quality *INSIGHT*, Vol. 38, pp. 502-508, (1996)
- [10] B.Y. Ahan, Seung Seok Lee, Soon Taik Hong, Ho Chul Kim, Suk-Joong L. Kang, Application of the acoustic resonance method to evaluate the grain size of low carbon steels, *NDT International*, Vol. 32, pp. 85-89, (1999)
- [11] K.M. Yu Toughness degradation evaluation of 1Cr-1Mo-25V steel by electrical resistivity *Material Science letters*, Vol. 18, pp. 1175, (1999)
- [12] 김병철, 장기욱, 최순필, 이삼래, 중성자 조사에 따른 원자로 재료의 조사 손상 비파괴평가 기술 비파괴검사학회지, Vol.17, pp.31-40, (1997)
- [13] 이승석, 재료물성의 비파괴평가법, 한국표준과학연구원, (1995)
- [14] Report for basis and theory of ultrasonic non-destructive testing, *Japan Society for the Promotion of Science*, (1974)
- [15] Standard method for determining average grain size E112-88, *Annual book of ASTM Standards*, American Society for testing and Material, Philadelphia, pp. 294-319, (1992)