

초음파 특성을 이용한 경년열화 평가

Aging Degradation Assessment of Materials by Ultrasonic Characterization

박은수*[†], 박익근**, 김덕희***, 안형근****

Un Su Park*[†], Ik Keun Park**, Duck Hee Kim*** and Hyung Keun Ahn****

초 록 실제 사용 온도 보다 높은 630℃에서 열처리 시간을 변수로 하여 최대 1000 시간 동안 등은 열처리를 통해 2.25Cr-1Mo 강의 경년열화재를 제작하고 열화에 따른 미세조직과 기계적 특성 변화에 대한 초음파비파괴평가법으로 표면 특성평가에 우수한 표면 SH파를 적용하였다. 열화에 따른 초음파의 감쇠와 전파시간 및 웨이블릿을 이용한 음속과 감쇠계수의 주파수 의존성평가를 수행한 결과 열화가 진행됨에 따라서 탄화물은 점차 조대화되고 경도는 감소하였다. 감쇠계수는 열화시간이 증가함에 따라서 증가하였고 전파시간 역시 열화의 초기단계에 급격히 증가했다. 초음파의 감쇠와 경도와는 좋은 상관관계를 나타내어 감쇠계수는 경년열화 평가에 중요한 파라미터임을 알 수 있었다.

주요용어 : 표면SH파, 경년열화, 웨이블릿 변환, 음속, 감쇠계수

Abstract An attempt was made to evaluate the changes of microstructures and mechanical properties with increasing aging time in 2.25Cr-1Mo steel. In this study, it was verified the feasibility of the evaluation for degraded 2.25Cr-1Mo steel by isothermal heat treatment at 630 °C up to 1,000 hours using surface SH wave and investigated the change of attenuation coefficient and propagation time. Attenuation coefficient had a tendency to increase according to degradation and propagation time drastically in the beginning of deterioration. A good correlation between ultrasonic attenuation coefficient and hardness was found, which made sure that attenuation coefficient is an potential parameter for evaluation of aging degradation. In addition, it has verified experimentally the frequency dependence of ultrasonic group velocity and attenuation coefficient using wavelet transform.

Keywords : surface SH wave, aging degradation, wavelet transform, velocity, attenuation coefficient

1. 서 론

화력발전설비나 석유화학설비와 같은 에너지변환설비에는 CrMo강, CrMoV강, 스테인레스강과 같이 고온에서 우수한 기계적 성질을 갖는 내열강이 널리 사용되고 있다. 그러나 이들 재료는 고온, 고압하에서 장시간 사용되는 동안에 고용원소의 석출 등으로 인하여 초기의 우수한 기계적 특성이 저하되는 경년열화가 발생하는 것으로 알려져

있다[1,2]. 이는 수명을 단축시키고 대형사고의 가능성을 내포하고 있으므로, 구조물의 안전성 및 건전성을 확보한다는 측면에서 경년열화도의 평가기법에 대한 연구의 필요성이 매우 중요하다[3].

경년열화는 구조물로부터 시료를 채취하여 평가하는 것이 가장 정확하다. 그러나, 현장에서 가동중인 구조물에 손상을 입히지 않고 시험편을 채취한다는 것은 사실상 어렵고 시간적, 경제적으로 많은 어려움이 있기 때문에 파손

(접수: 2002. 2. 4) *[†]교신저자: 서울산업대학교 재료공학과 (Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Technology) uspark@snut.ac.kr, ** 서울산업대학교 기계공학과, *** 서울산업대학교 대학원, **** 세안기술(주) 기술연구소

시킴이 않고 손상 정도를 In-situ 모니터링할 수 있는 비파괴평가기법의 확립이 필요하다[4]. 비파괴적 열화도 평가법으로 초음파법, 전기저항법, 바크하우젠노이즈법, 전기화학분극법 등의 방법을 적용하고자 하는 연구가 시도되어 왔다.

초음파법에 의한 열화도평가는 초음파 파형이 가지고 있는 특징량을 추출하여 이들과 재료의 열화정도와의 상관관계를 도출하는 방법으로 측정의 간편성, 높은 측정감도, 결과 해석의 신속성 등의 장점을 갖는다.

본 연구에서는 2.25Cr-1Mo 인공열화재를 등온열처리 모의 열화시험편을 제작하고, 고온설비에서 발생되는 미세 조직의 변화와 표면 SH파의 전파특성과의 상관관계를 규명하여 초음파 비파괴평가에 의한 경년열화도 평가의 유용성 유무를 실험적으로 검증하고자 한다.

2. SH파의 특징

일반적으로 횡파는 진동모드의 차로부터 SV파와 SH파로 나누어지며, SH파는 횡파진동자를 이용하여 음파의 진동방향이 탐촉자의 폭 방향, 탐상면과 평행한 방향으로 진동하며 전파되는 특징을 가지고 있다. 탐촉자에서 횡파가 가진되어 재료내부로 초음파가 입사되므로 입사 시 높은 전단력을 발생시킬 수 있는 점성을 가진 접촉매질을 사용하게 되며, SV파에 비해 S/N비가 높은 특징을 가지고 있다. 음파의 진동방향이 탐상면과 평행하기 때문에 표면상황의 영향을 적게 받으며, 거리에 따른 감쇠도 적어 다른 모드의 초음파에 비해 재료의 특성파악에 좋은 효율을 가지고 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 시험편 준비 및 미세조직관찰

본 연구에 사용한 2.25Cr-1Mo강의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 현장(540°C)에서 장시간 사용되어 열화된 재료를 구하는 것은 현실적으로 매우 어렵기 때문에 인공 열화 조건으로 가속화시켜 제작하여 열화도를 평가하고자 하였다.

Adbel-Latif 등[5]은 인공 열화재와 실제 사용재의 미세 조직을 비교함으로써 가속화된 인공 열화 열처리 조건에 대해 보고한 바 있다. 본 연구에서도 이를 바탕으로 하여

시험편을 950°C에서 1시간 동안 용체화 처리후 퀀칭을 하고, 650°C에서 1시간 동안 템퍼링하여 건전재를 제작하였다. 또한 열화에 의한 미세 조직의 변화를 위해서 각 시험편을 일반사용온도(540°C) 이상인 630°C에서 50, 200, 1,000시간 동안 등온열처리를 수행하였다.

Table 1 Chemical composition of 2.25Cr-1Mo steel

(wt. %)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0.12	0.24	0.45	0.024	0.008	2.15	0.97	Bal.

3.2. 초음파 계측

본 연구에서 사용한 실험장치의 구성도는 Fig. 1과 같다. 펄서/리시버는 KrautKramer USD15, 디지털스토리지 오실로스코프는 Lecroy 9374M을 사용하고, 탐촉자는 표면 SH 탐촉자(5C10×10A90-SH)를 사용하였다. 접촉매질은 횡파 전용 접촉매질(소니코트 SHN-40, 점도 1400Pa·s)을 사용하고 접촉매질의 두께, 표면거칠기와 전달효율의 관계를 고려하여 2탐촉자를 이용한 pitch-catch법을 적용하였다. 각 시험편에 대하여 오실로스코프 상에서 1000회 time averaging된 RF signal data를 수집하였다. 수집한 data들을 동일한 시간축 상에 출력하여 속도지연과 감쇠의 변화를 확인하고, 초음파의 음속과 감쇠계수를 구하였다. 또한 웨이블릿 변환을 통하여 음속과 감쇠계수의 주파수 의존성을 평가하였다.

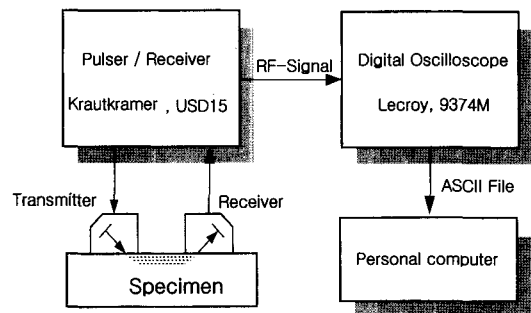


Fig. 1 Schematic diagram of surface SH wave measurement system

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 열화에 따른 미세조직 및 경도변화

Fig. 2는 열화시간에 따른 미세조직을 광학현미경을 통해 관찰한 것이다. 초기시험편의 미세조직은 템퍼드 마르텐사이트 조직으로 평행한 래스(lath)상으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 열화시간이 증가함에 따라 초기 세멘타이트(cementite)의 구상화를 관찰할 수 있으며 석출상이 점차 조대화 되었다.

Fig. 3은 열화시간에 따른 경도변화를 나타내었으며 열화시간의 증가에 따른 경도의 변화를 확인할 수 있다. 초기에는 급격한 감소 경향을 나타내고 열화가 진행됨에 따라 완만한 감소 경향을 나타내었다. 이는 고용강화된 합금 원소가 결정립계로의 확산에 따른 석출과정에 의해 기지 내 합금원소의 고갈로 인한 격자변형에너지의 감소에 의한 것으로 판단되어진다.

4.2. 열화도에 따른 초음파특성의 변화

Fig. 4는 pitch-catch법을 이용하여 열화시간에 따른 각 시편에서의 RF signal의 변화를 나타내고 있으며 속도 지연으로 인한 시간축상의 변화와 음압의 변화를 확인할 수 있다. Fig. 5는 열화시간이 증가함에 따라서 표면 SH파의 전파시간을 나타낸 것이다. 열화 초기에 재료 내 초음파의

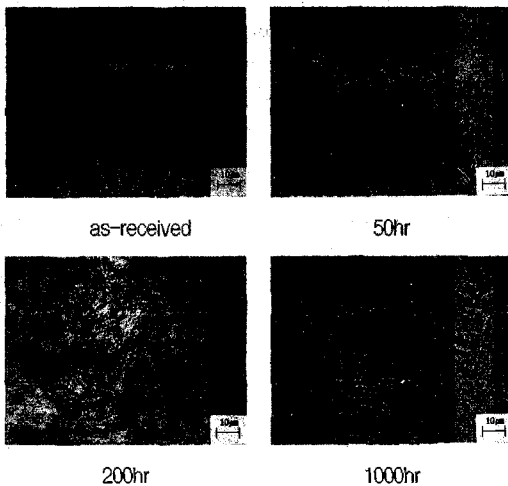


Fig 2 Optical microstructure of 2.25Cr-1Mo steel with the aging time

전파시간이 급격히 증가하고 열화가 진행됨에 따라 완만한 전파시간의 변화를 확인할 수 있다. Fig. 6은 각각의 열화제에 대해 나타낸 주파수 스펙트럼으로, 제1저면 반사파를 나타낸 것이다. 열화가 진행됨에 따라서 진폭이 감소하였다.

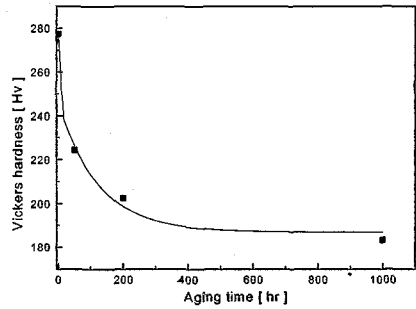


Fig. 3 The change of Vickers hardness with aging time

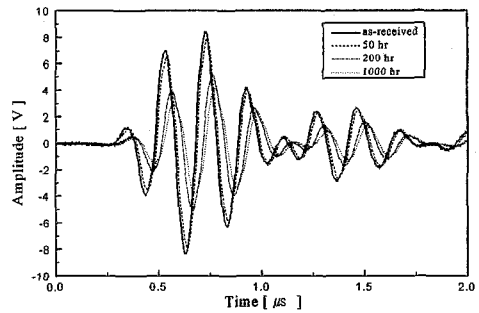


Fig. 4 RF-signal waveform with aging time

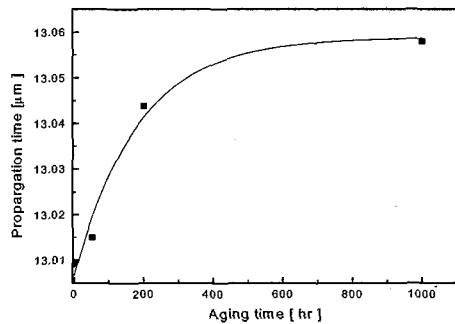


Fig. 5 The change of propagation time according to aging time

Fig. 7은 주파수스펙트럼으로부터 얻은 진폭의 변화와 열화시간에 따른 경도의 변화를 함께 나타낸 것으로 열화 시간이 증가함에 따라서 진폭의 변화와 경도의 변화가 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다. 스펙트럼상의 진폭의 변화와 경도의 변화간의 상관관계를 Fig. 8에 나타내었다. 상관관계수가 0.99로 매우 좋은 선형의 상관성을 나타내고있다. Fig. 9는 열화시간에 따른 감쇠계수의 변화를 나타낸 것이다. 열화 초기에 감쇠계수의 급격한 증가경향을 알

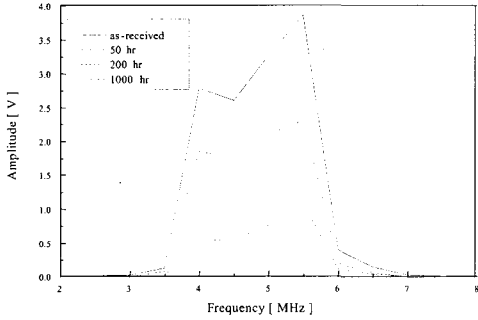


Fig. 6 The variations of frequency spectra according to aging time

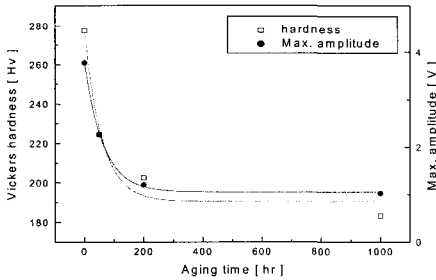


Fig. 7 Vickers hardness and Max. amplitude on the frequency spectra with aging time

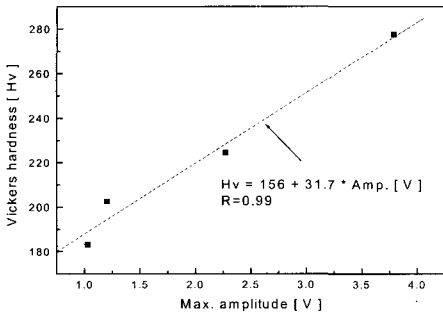


Fig. 8 Relationship between Max. amplitude and Vickers hardness with aging time

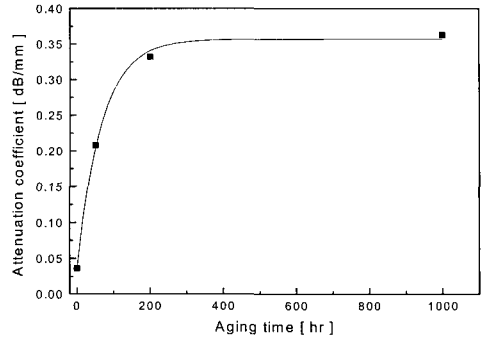


Fig. 9 The change of attenuation coefficient with aging time

수 있고, 지속적인 열화에 따라 감쇠계수가 포화되는 경향을 보이고 있다. 초음파의 흡수는 음파가 재료 내부를 전파할 때 각각의 입자들을 진동시키고, 입자들의 운동에너지가 열에너지로 변화하여 초음파에너지를 잃게된다. 초음파의 산란은 결정의 무질서한 배향, 산란체의 비등방적 특성, 산란체의 크기 등에 크게 의존하고, 초음파 감쇠는 흡수와 산란에 의한 손실로서 다음 식으로 표현된다.

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

여기서 $\alpha_a(f)$ 는 흡수감쇠계수이며, $\alpha_s(f)$ 는 산란감쇠계수이다. 하지만, 금속재료 내를 전파하는 초음파 감쇠의 가장 주요한 원인은 산란으로 알려져 있으며[6] 산란은 밀도와 탄성계수의 차이에서 일어나는 불일치(mismatch)인 곳에서 서로다른 음향특성을 갖는 도메인(domain) 사이의 경계부근에서 일어나게 된다. 이러한 산란 손실양과 주파수 의존성은 산란체의 음향이방성, 산란체의 크기와 개수, 사용주파수 등에 따라 결정되며, Roney[7,8] 등은 초음파의 파장과 입자직경의 비 (λ/\bar{D})의 의존도를 무차원 파라미터 $\mu (= \frac{\pi\bar{D}}{\lambda})$ 를 도입하여 일반화된 초음파 산란이론식을 초음파의 파장이 산란체의 직경보다 클 때 산란에 의한 손실을 다음과 같이 표현하였다.

$$\alpha_s \bar{D} = \frac{8}{9} \left[\frac{\Delta K}{K} \right]^2 \mu^4 \quad (2)$$

균일 매개체에서 산란체를 구라고 가정할 경우 $(\Delta K/K)^2$ 는 상수로 알려져 있으며, 다결정체의 경우는 그 값이 평균적으로 다음 식으로 표현된다.

$$\left[\left(\frac{\Delta K}{K} \right)^2 \right]_{av} = \left[\frac{C_{11} - (C_{11})_{av}}{(C_{11})_{av}} \right]_{av}^2 \quad (3)$$

즉, 산란에 의한 감쇠는 주파수 (f) 그리고 산란체 크기 (\bar{D}) 등은 산란양을 지배하는 중요한 인자가 된다. 미세조직적으로 결정립, 제2상, 공공 등이 유효산란체가 될 수 있고 산란체의 크기 (\bar{D})는 구형의 산란체를 가정했을 때의 직경이 된다. 따라서 열화 시간의 증가에 따른 탄화물의 조대화는 산란체의 크기가 증가되는 효과를 나타내어 산란에 의한 초음파의 산란손실을 증가시키고 이러한 현상으로 인해 감쇠계수가 증가되는 것으로 사료된다.

Fig. 10은 열화시간에 따른 경도와 감쇠계수의 변화를 나타내고 있으며 경도의 변화에 대해서 감쇠는 반비례를 하고 있음을 알 수 있다. 이로부터 Fig. 11은 경도와 감쇠계수와의 상관관계를 나타낸 것으로 상관계수는 0.99로 매우 좋은 선형의 상관성을 나타내고 있다. 다음 식은 경도와 감쇠계수를 선형회기분석하여 얻은 실험식이다.

$$Hv = 285.7 - 271.4 * a \text{ [dB/mm]} \quad (R=0.99) \quad (4)$$

4.3. 음속 및 감쇠계수의 주파수의존성 평가

Fig. 12(a)는 중심주파수 4.8 MHz의 표면SH파 탐촉자를 이용하여 시험편의 단면부 방향으로 전파시켰을 때의 에코파형이다. Fig. 12(b)는 웨이브렛 변환에 의한 시간축과 주파수축에 대한 등고선(contour)이고, Fig. 12(c)는 웨이브렛 변환 결과를 시간-주파수-진폭의 축으로 나타낸 3차원 그래프이다. 이상의 웨이브렛 변환을 통해 얻은 시간-진폭-주파수의 3차원 데이터를 이용하여, 제1저면 반사파와 제2저면 반사파간의 초음파 전달시간차 및 진폭차를 각 주파수에 대해 나타냄으로서, 초음파 전파속도와 감쇠

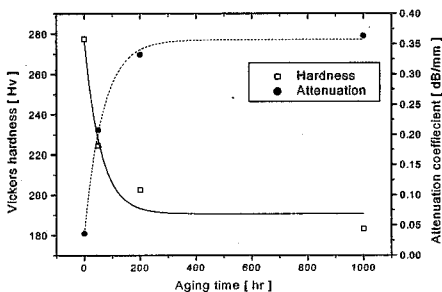


Fig. 10 Dependence of Vickers hardness and attenuation coefficient on the aging time

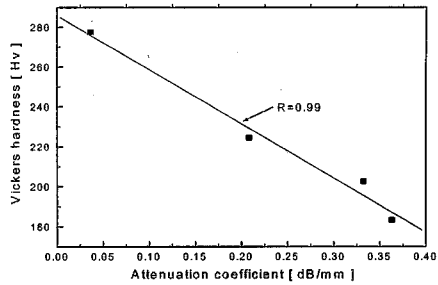
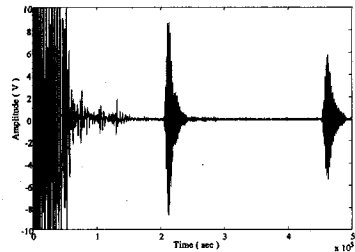
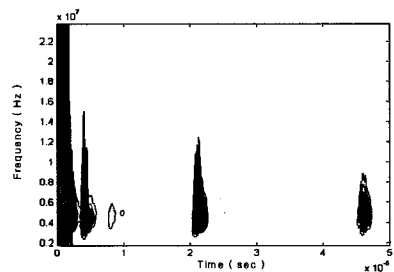


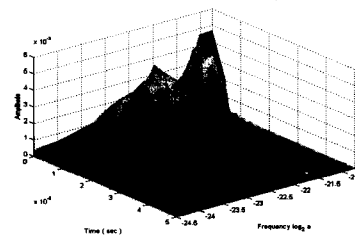
Fig. 11 Relationship between attenuation coefficient and Vickers hardness



(a)



(b)



(c)

Fig. 12 The wavelet transform in the as-received specimen (a) Ultrasonic echo waveform, (b) contour plot and (c) wavelet transform

계수의 주파수존속성을 평가할 수 있다. Fig. 13은 웨이브 이브렛 변환에 의한 제 1에코와 제 2에코에 대응하는 피크의 발생시간으로부터 군속도의 측정 결과를 나타내고 있다. 초음파의 군속도(group velocity)는 주파수에 거의 의존하지 않음을 알 수 있다. Fig. 14는 감쇠계수의 변화를 나타내고 있으며, 열화재가 건전재에 비해 주파수가 증가함에 따라 감쇠계수 값이 커짐을 알 수 있다.

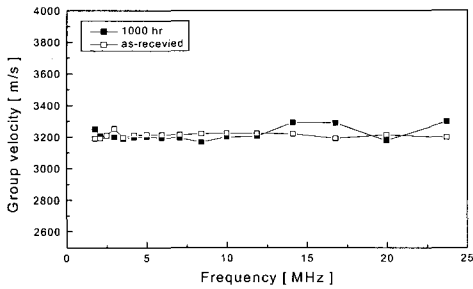


Fig. 13 The change of group velocity analysed by the wavelet transform

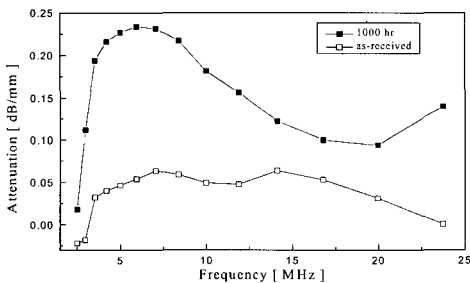


Fig. 14 The change of attenuation coefficient analysed by the wavelet transform

5. 결 론

인공열화된 2.25Cr-1Mo강의 경년열화에 대한 미세 조직의 변화와 표면 SH파의 진파 특성 변화를 이용한 열화도 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열화시간이 증가함에 따라서 정도는 열화의 초기에 급격히 감소하고 이후에도 점차 감소하였다.
- (2) 초음파 감쇠계수는 열화가 진행됨에 따라서 증가하는 경향을 나타내었으며, 열화의 초기단계에서 초음파 감쇠계수가 급격히 증가하였고 이후에도 완만히 증가하였다.
- (3) 열화에 의한 탄화물의 조대화로 인해 초음파 감쇠계수는 열화가 진행됨에 따라서 증가하는 경향을 나타내었

으며, 열화의 초기단계에서 초음파 감쇠계수가 급격히 증가하였고 이후에도 완만히 증가하였다.

후 기

본 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] S. K. Hur, K. T. Hong and J. M. Do, "The measurement of Degradation in Creep-Ruptured Cr-Mo-V steels by NDE Methods," Proc. of the 2nd Conference on Mechanical Behaviors of Materials, Seoul, Korea, pp. 17-24, (1988)
- [2] Mitsuo Yamashita, U. K. Viswanathan, Isamu Yamamoto and Toshiro Kobayashi, "Service induced Changes in the Microstructure and Mechanical Properties of a Cr-Mo-Ni-V Turbin Steel," I.S.I.J International, Vol. 37, No. 11, pp. 1133-1138, (1997)
- [3] R. Viswanathan and S. M. Brummer, "In-Service Degradation of Toughness of Steam Turbine Rotors," Transactions of the ASME, Vol. 107, pp. 316-324, (1985)
- [4] 정희돈, "고온설비의 경년열화와 측정법", 대한기계학회지, 제 31권, 제 3호, pp. 251-260, (1991)
- [5] Abdel-Latif, A. M., Cobett, J. M., Sidey, D. and Taplin, D.M.R.M, "Effects of Microstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2.25Cr-1Mo Steel," Proc. of 5th Int. Conf. on Fracture (ICF5), Cannes, France, Vol. 4, pp. 1613-1620, (1981)
- [6] Sayers, C. "Scattering of Ultrasound by minority Phasers in Polycrystalline Metals," Wave Motion. Vol. 7, pp. 95-104, (1985)
- [7] Roney, R. "The Influence of Metal Grain Structure on the Attenuation of and Ultrasoni Acoustic Wave," PhD thesis. Pasadena, California Institute of Technology, (1950)
- [8] Papadakis, E. "Ultrasonic Diffraction from Single Apertures with Applicatikon to Pulse Measurements and Crystal Physics," Physical Acoustics - Principles and methods, Vol. 11, pp. 152-211, (1975)