

초음파 계측에 의한 2.25Cr-1Mo강의 열화도 평가에 관한 연구

박은수*, 박익근**, 김정석***

A Study on the Evaluation of Material Degradation for 2.25Cr-1Mo Steel by Ultrasonic Measurements

Un Su Park*, Ik Keun Park**, Chung Seok Kim***

Abstract

The remaining life estimation for the aged component is very important because mechanical properties of the components are degraded with time of service exposure in high temperature etc. The destructive method is widely used for the estimation of material degradation, but it has a great difficulty in preparing specimens from in-service industrial facilities. In order to evaluate the feasibility of ultrasonic evaluation method for properties degradation of high temperature materials, 2.25Cr-1Mo steel specimens which were prepared by the isothermal aging heat treatment at 630°C were evaluated by ultrasonic measurements investigating the change of velocities and attenuation coefficient. In this results, attenuation coefficient was found to be sensitive to material degradation mainly attributed to the change of grain size and the precipitation of impurities in grain boundaries, but velocity was not for all specimens.

Key Words : ultrasonic wave(초음파), degradation(열화), grain size(결정립 크기), velocity(음속), attenuation coefficient(감쇠계수)

1. 서론

파괴의 초기 단계에 재료 강도의 열화나 미소 크랙을 검출하는 것에 대한 중요성이 점점 커지고 있다. 고온·고압의 환경에서 사용되는 플랜트 설비에는 Cr-Mo강, Cr-Mo-V강, 스테인레스강 등과 같이 고온에서 우수한 기계적 성질을 갖는 내열강이 널리 사용되고 있다. 이러한 환경에 사용되는 구조물은 사용 년 수가 증가함에 따라 점

차 노후화 되고 있으며, 재료의 기계적 성질이 약화되는 경년 열화(aging degradation)가 발생한다. 또한 이들 재료는 장시간 사용되는 동안에 탄화물이나 금속간 화합물의 입내 및 입계석출, 수소취화 등으로 인하여 금속학적 미세조직의 변화를 일으키고 초기의 우수한 특성이 저하되는 재료 열화를 일으키는 것으로 알려져 있다.^[1,2] 이러한 경년 열화는 설비의 수명을 단축시키고 대형사고의 가능성을 내포하고 있으므로, 경년 열화의 기구 및 평가 기법에

* 서울산업대학교 재료공학과(uspark@duck.snut.ac.kr)

** 서울산업대학교 기계공학과

*** 서울산업대학교 산업대학원

대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.⁽³⁴⁾

재질 열화도의 평가는 현장실기로부터 재료를 채취하여 충격시험, 크리프시험, 인장시험, 파괴인성 시험 등과 같은 파괴적인 방법으로 평가하는 것이 가장 정확하다. 하지만, 가동중인 현장 실기에서 구조물에 손상을 입히지 않고 시험편을 채취한다는 것은 사실상 불가능하고, 시간적 제약과 경제적으로 많은 문제점을 내포하고 있다. 즉 재료의 전체적 시험이 불가능하고 결과 도출에 많은 공정이 필요할 뿐 아니라 측정변수의 해석이 어렵고 신뢰도가 낮아 현장 적용의 어려움이 수반된다. 따라서 구조물을 파손시키지 않고 손상 정도를 정량적으로 in-situ 모니터링 할 수 있는 고감도, 고정밀도의 재료특성 평가 방법으로 경도측정법, 전기저항법^(6,6), 레프리카(replica)법, Barkhausen noise법⁽⁷⁾, 전기화학적방법^(6,9), 초음파법^(10,11), 압입법⁽¹²⁾, 소형 펀치(small punch; SP)법⁽¹³⁾ 등이 있다.

이 중 초음파에 의한 재료특성 평가 기법은 측정의 간편성, 높은 측정감도, 측정결과 해석의 신속성 및 신뢰성 확보에 우수한 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁴⁾ 초음파 측정에 의한 열화도 평가에는 초음파 파형이 가지고 있는 각종 특징량의 파라미터를 추출하여 이들이 갖는 강한 특징량(strong feature) 파라미터와 재료의 열화·손상 등 물성 변화와의 상관성을 도출하고 수치화하여 열화도를 평가한다.

본 연구에서는 2.25Cr-1Mo강에 대하여 장시간 등온열처리로 모의 열화 시험편을 제작하여 탄화물의 석출 및 조대화, 불순물의 입계편석 등 금속학적 미세조직을 관찰하고, 미세조직의 변화와 초음파의 전파특성과의 상관관계를 규명함으로써 재료의 열화도를 고찰하고자 한다.

2. 이론

다결정체내에서 결정입계에는 서로 다른 결정방위에 따른 탄성이방성이 나타나며, 초음파의 전파속도는 탄성계수, 밀도, 푸아송비(Poisson's ratio), 온도 등에 의존하며, 탄성파의 전파속도는 일정 거리진행에 따른 위상변화를 시간의 함수로 표현한 위상속도와, 에너지가 전파되는 군속도가 있다. 초음파의 대표적인 종파 V_L 의 전파속도는 다음 식으로 주어지고, 주로 탄성계수에 의존하는 파라미터임을 알 수 있다.

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

여기서, E 는 영률(Young's modulus), ρ 는 밀도, ν 는 푸아송비이다.

재료특성에 관계하는 초음파 파라미터로 초음파에너지의 감쇠는 열탄성 효과, 전위에 의한 댄핑, 자성재료 자기탄성 등의 이력손실에 의한 흡수와 미세조직 및 결정입계에 의한 산란에 기인한다. 초음파의 에너지 손실은 음파가 재료 내부를 전파할 때 입자들을 진동시키고, 이 탄성 진동을 열에너지로 변환시키는 흡수손실과 결정의 무질서한 배향, 결정입계의 비등방적 특성, 결정입의 크기 등 다양한 산란 메커니즘에 동반된 산란손실로 구분할 수 있으며 다음 식으로 표현된다.⁽¹⁵⁾

$$a(f) = a_a(f) + a_s(f) \\ = a_a(f) + K_2 \cdot (\bar{D})^3 \cdot (f)^4 \quad (\lambda)2\pi\bar{D} \quad (2)$$

여기서 $a_a(f)$ 는 흡수감쇠계수이며, $a_s(f)$ 는 산란감쇠계수이다. 초음파의 산란은 결정입의 평균직경(\bar{D})과 초음파 파장(λ)의 비에 따라 다음 3가지의 산란영역으로 구분된다. 즉, 식 (2)와 같이 초음파의 파장이 결정입의 평균직경보다 매우 큰 Rayleigh 영역, 파장이 결정입의 평균직경과 비슷한 Stochastic 영역, 파장이 결정입의 평균직경보다 작은 Diffusion 영역이 그것이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 모의 열화재 제작

실험에 사용된 재료는 2.25Cr-1Mo강으로 이 소재의 화학조성은 Table 1과 같다. 실제 고온부재로 오랜 기간 사용된 재료와 유사한 미세 조직을 시뮬레이션하기 위해 다음 식 (3)의 철의 자기확산식(self diffusion equation)을 이용하여 일반 사용온도(538℃)보다 높은 630℃의 온도에서 고온 가속 열처리를 수행하였다.

$$t_2 = t_1 \exp\left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (3)$$

여기서, R 은 일반기체상수로 8.314J/mol/K이고, Q 는 철의 자기활성화 에너지로서 272kJ/mol이며, T_1, T_2 는 열화 온도, t_1, t_2 는 열화시간을 나타낸다. Table 2에 538℃에서 장시간 사용한 것과 같은 동일한 열화조직을 얻기 위하여 630℃에서 필요한 열화시간을 나타내었다.

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.

Table 2 Equivalent service time at 538℃ and aging time at 630℃

Time served at 538℃(hr)	as-received	3,000	12,000	60,000
Aging time at 630℃(hr)	0	50	200	1,000

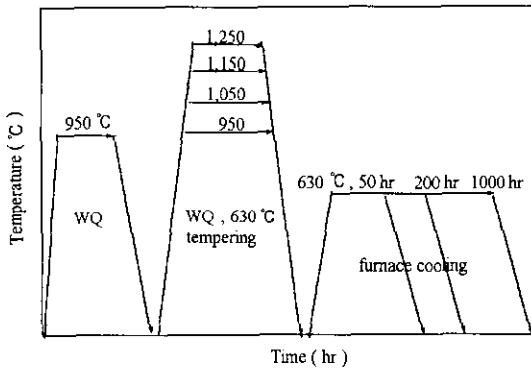


Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment

Fig. 1에서 열처리과정을 도식적으로 표시한 것처럼 시험편을 950℃에서 1시간 동안 균질화 처리하였으며, 시험편의 초기 오스테나이트 결정입의 크기를 변화시키기 위해서 950℃, 1,050℃, 1,150℃, 1,250℃에서 1시간 동안 오스테나이트 처리 후 5℃의 물에 헹치 후 650℃에서 1시간 동안 템퍼링하여 건전재(as-received)를 제작하였다. 또한 2.25Cr-1Mo강의 모의 열화에 의한 미세 조직의 변화를 위해서 각 시험편을 일반사용온도인 538℃ 이상인 630℃에서 50, 200, 1,000시간 동안 등온열처리를 한 후 노냉하였다.

3.2 실험장치 및 방법

3.2.1 미세 조직의 관찰

열화도에 따른 석출 탄화물과 금속학적 미세조직의 변화를 관찰하기 위해 2.25Cr-1Mo강의 건전재와 각 단계 별 모의열화재를 #80-#4000 수지연마지로 연마 후, 6μ

m, 1μm 다이아몬드 연마제로 경면 제작하였으며, 시험편을 3% 나이탈 부식액을 사용하여 상온에서 약 30~40초 정도 부식하고, 광학현미경(optical microscope)의 배율을 200배, 1,000배로 열화의 진행에 따른 미세 조직의 변화를 관찰하였다.

3.2.2 경도시험

열화도에 따른 경도변화를 측정하기 위해 균질화 처리한 후 모의 열화한 각각의 열화재의 경도를 측정하였다. 시험편의 경도측정은 일본 Future-Tech사의 마이크로비커스 경도계를 사용하였으며, 하중을 50g으로 하여 각각 5회 측정하였고 최고, 최저값을 제외한 평균값을 취하였다.

3.2.3 초음파 계측

본 연구에 사용한 실험장치의 구성도는 Fig. 2와 같이 수침법을 이용한 펄스에코법(pulse-echo method)으로 측정하였다. 초음파 탐촉자는 파나메트릭(Panametrics)사 제품의 광대역 수침형으로 중심주파수가 5MHz, 10MHz, 15MHz, 20MHz, 25MHz인 탐촉자를 사용하였다. 탐상의 시험편과 수침형 탐촉자의 거리는 25mm를 유지하여 초음파의 원거리음장역이 적용될 수 있도록 하였다. 음속은 시험체의 온도에 의존하기 때문에 시료를 물 속에 넣고 수온을 20±0.02℃로 제어하였다.

초음파의 감쇠계수는 시험편으로부터 반사에 의해 반복되는 초음파 펄스의 제 N번째 에코의 진폭강도가 최대가 되는 피크의 수신진폭강도 I_N (N=1, 2, 3, ...)로서 다음 식 (4)에 의해 감쇠계수를 계산하였고, 실험장비로는 초음파 탐상기 USD 15(Krautkramer; 35MHz), 디지털스토리지

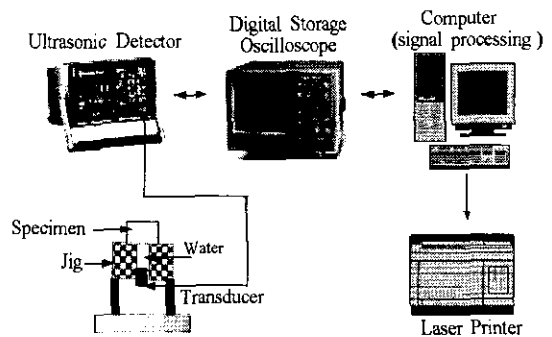


Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic experimental apparatus

오실로스코프(LeCroy 9374M, 샘플링 주파수;1GHz)를 사용하였다.

$$a = \frac{1}{k} \cdot \sum_{N=1}^k \frac{\log(I_{N+1}/I_N)}{T_{N+1} - T_N} \quad (4)$$

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 열화도에 따른 미세조직 및 경도변화

Fig. 3은 열화시간에 따른 미세조직을 광학현미경(×1000)을 통해 관찰한 것이다. 초기시험편의 미세조직은 템퍼드 마르텐사이트 조직으로 평행한 래스(lath)상으로 이루어져 있다. 모의 열화처리 시간이 증가함에 따라 초기 세멘타이트(cementite)의 구상화를 관찰할 수 있으며 석출상이 입내, 입계, 템퍼드 마르텐사이트의 패킷(packet)계면에 석출되었음을 관찰할 수 있다. 이와 같은 입계석출은 입계강도를 저하시킴으로써 재료의 기계적 성질을 저하시키는 원인으로 사료된다.

Fig. 4는 균질화 처리한 시험편을 각각 950℃, 1,250℃로 열처리한 결정입의 미세구조 변화를 보여주고 있다. Fig. 5는 오스테나이징 온도가 증가함에 따라 결정입의 크기가 증가함을 보여주고 있다.

Fig. 6은 등온열화 시간에 따른 경도변화를 나타내었으며 열화시간이 증가함에 따라서 경도값은 감소되었다. 이는 고용강화된 합금원소가 결정입계로의 확산에 따른 석출과정에 의해 결정입내의 합금원소의 감소로 인한 격자

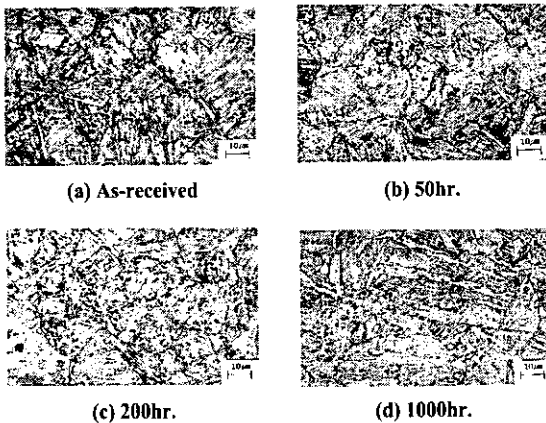


Fig. 3 Effect of degradation on the microstructure of 2.25Cr-1Mo steel

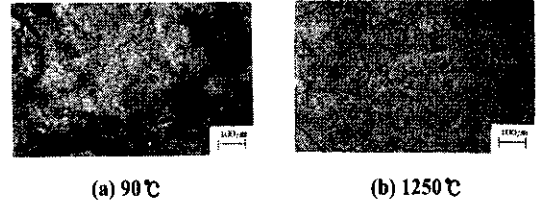


Fig. 4 Microstructure of austenite grain size as a function of austenitizing temperature

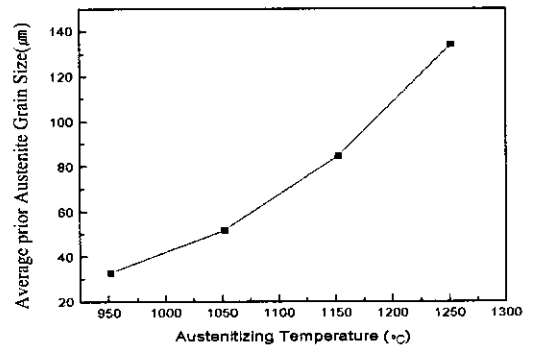


Fig. 5 Relation between average prior austenite grain size and austenitizing temperature

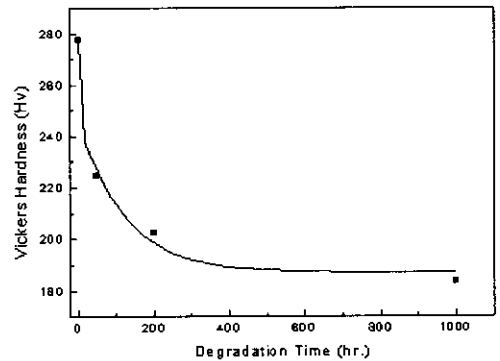


Fig. 6 Effect of degradation on Vickers Hardness

변형에너지의 감소와 전위밀도의 감소에 의한 것으로 판단되어진다.

4.2 열화도에 따른 초음파특성의 변화

Fig. 7은 건전체와 1,000시간 등온열처리에 의한 모의

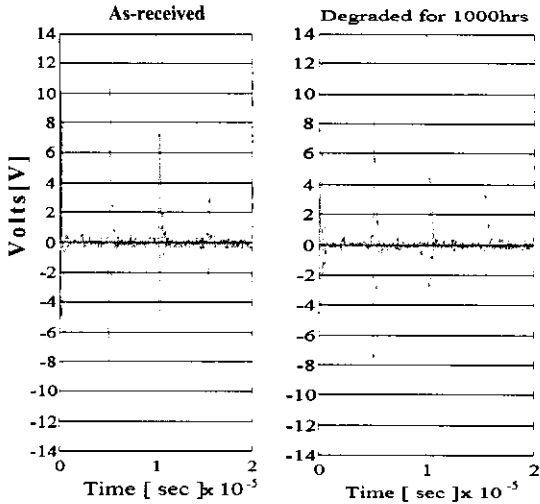


Fig. 7 Ultrasonic pulse echo waveform of As-received and 1000hr. degraded specimen

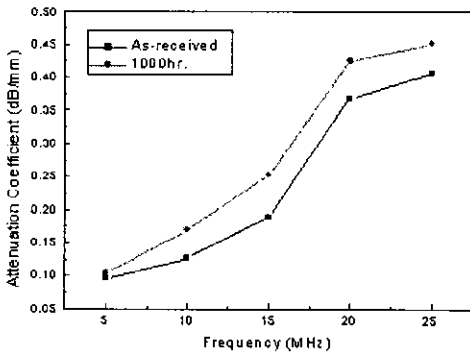


Fig. 8 Frequency dependence of attenuation on aging time

열화시킨 시험편에서 초음파의 후면 반사에코의 오실로스코프상에 나타난 RF-signal 변화를 나타내었다. 탄성이 방성이 큰 다결정체 내에서는 초음파의 결정 입계에 의한 산란감쇠와 내부마찰에 의한 미세조직의 흡수감쇠로 대별되며 본 실험에서는 모두 단일상의 템퍼드 마르텐사이트조직으로 흡수감쇠에 미치는 영향은 극히 작기 때문에 무시하였다. 또한 마르텐사이트는 전단변태, 무확산 변태임으로 조성의 변화는 없고 내부 조직의 방위차만 발생함으로 이들 방위가 감쇠에 미치는 영향 역시 무시하였다.

Fig. 8은 건전재와 열화된 시험편과의 감쇠계수의 주파

수의존성을 나타내고 있다. 두 시험편 모두 15MHz 이상에서 감쇠계수는 급격히 커지는 것을 알 수 있어 열화에 따른 결정입의 크기나 결정입계에서 석출상 등의 미세 조직 변화에는 15MHz 이상의 고주파수 초음파를 적용하는 것이 유리함을 알 수 있다. Fig. 9는 결정입의 크기와 감쇠계수와와의 상관관계를 나타내고 있다. 오스테나이트 온도가 증가함에 따라서 결정입의 크기가 증가하고 초음파 감쇠계수가 커짐을 알 수 있다. 이는 결정입이 초음파의 산란체로 작용을 하고 식 (2)와 같이 감쇠계수는 결정입의 직경에 지수함수적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 동일한 결정입의 크기에서 열화재가 건전재보다 초음파 감쇠계수가 큰 것은 감쇠의 주원인으로 결정입계에서의 탄화물의 성장과 증가 등의 미세 조직 변화가 초음파의 산란체로 작용하여 건전재보다 열화재가 큰 감쇠를 나타내었다고 생각한다. 즉 입내 및 입계에 석출되는 탄

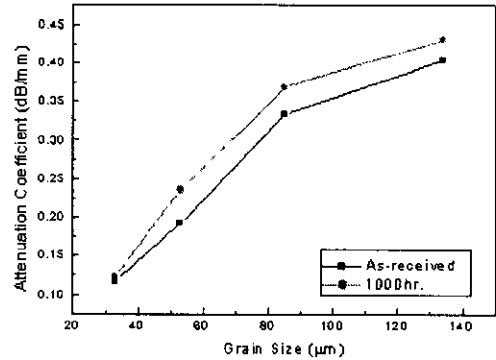


Fig. 9 Effect of degradation on the grain size of 2.25Cr-1Mo steel

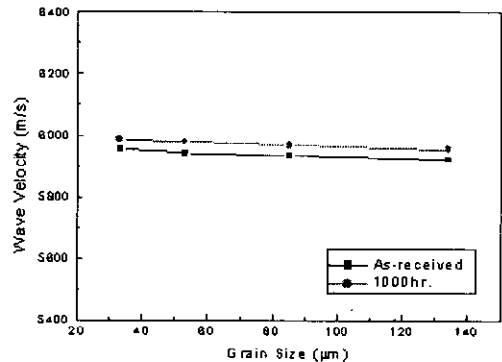


Fig. 10 Variation of ultrasonic velocity of 2.25Cr-1Mo steel

화물과 이에 수반되는 결정입의 조대화는 2.25Cr-1Mo강에 있어서 템퍼취성(temper embrittlement)의 원인이 되며, 이러한 석출상이 초음파의 특성 파라미터인 감쇠계수와 음속에 영향을 주는 인자로 작용하는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 결정입자의 크기와 초음파 속도와의 상관관계를 나타내고 있다. 열화 시간이 증가함에 의한 결정입의 크기가 커짐에 따라 초음파속도의 변화는 거의 관찰되지 않았다. 본 실험에서 2.25Cr-1Mo강의 열화 조건은 초음파 속도의 변화에 영향을 주지 않은 것으로 유추된다.

5. 결 론

본 연구에서는 2.25Cr-1Mo강의 재질열화 단계별 미세조직의 변화와 초음파의 전파 특성 변화를 이용한 열화도 평가의 유용성 유무를 실험적으로 검증한 결과는 다음과 같다.

- (1) 재질 열화에 의한 결정입의 크기 변화, 탄화물의 입내 및 입계 석출과 구상화로 인한 초음파 감쇠계수의 제약을 이용하여 열화도 평가가 가능함을 알 수 있었다.
- (2) 열화된 재료의 초음파 감쇠계수는 주파수가 증가함에 따라 커지는 주파수의존성이 있음을 확인할 수 있었다. 주파수 15MHz 이상에서 감쇠계수는 급격히 커지는 것을 알 수 있어 열화에 따른 결정입의 크기나 결정입계에서 석출상 등의 미세 조직 변화에는 15MHz 이상의 고주파수 초음파를 적용하는 것이 유리함을 알 수 있었다.
- (3) 열화된 재료에서 열화 시간의 증가에 의한 초음파 속도의 변화는 미소하여 거의 관찰되지 않았다. 따라서 초음파 음속의 변화를 열화도 평가 기준으로 사용하는 데는 다소 제한적이었기 때문에 추후 다양한 열화조건에 의한 시험체를 확보하여 지속적인 실험적 검토가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2001년 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) W. L. Morris, O. Buck, and R. v. Inman, "Acoustic Harmonic Generation due to Fatigue damage in High-strength Aluminum", *J. Appl. Phys.*, 50(11), pp. 6737~6741, 1979.
- (2) R.L. Smith, W.N. Reynolds, H.N.G. Wadley, "Ultrasonic attenuation and microstructure in low-carbon steels", *Met. Sci.*, 15, 1981.
- (3) 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 Turbine Steel", *ISIJ International*, Vol.37, NO. 11, pp. 1133~1138, 1997.
- (4) 김수영, 김문진, "STS316L의 고온피로균열에 미치는 인장유지시간의 효과 및 결정입 크기에 따른 크리프 거동에 관한 연구", 한국공작기계학회 2000년도 춘계학술대회 논문집, pp. 373~378, 2000.
- (5) 남승훈, 김용일, 유광민, "Cr-Mo-V강에서의 전기비저항에 미치는 기계적 응력의 영향", 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제1호, pp. 99~106, 1999.
- (6) 석창성, 김동중, 배봉국, "전기비저항법을 이용한 재료열화 평가", 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제12호, pp. 2995~3002, 2000.
- (7) R. Ranjan and P. B. Thompson, "A study on the effect of dislocation on the magnetic NDE methods", *Journal of Applied physics*, 61(8), pp. 3196~3198, 1987.
- (8) 유효선, 송문상, 송기욱, 류대영, "전기화학적 양극분극시험에 의한 고온 설비부재의 열화손상 평가", 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제6호, pp. 1398~1407, 2000.
- (9) 齋藤 喜久, 壓子 哲雄, 波邊 農, "電氣化學的手法によるステンレスステツシス鋼の材料劣化現位置 評價技術の開発", *日本機械學會論文集(A編)*, Vol. 57, No, 538, pp. 1442~1448, 1991.
- (10) H. Willems, K. Hoebbels, "Characterization of microstructure by back scattered ultrasonic waves", *Met. Sci.*, 15, 1981.

- (11) 박 은수, 박 익근, 김 정석, 김 현목 “초음파를 이용한 재질열화의 비파괴적 평가” 한국공작기계학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp. 369~374, 2000.
- (12) 김 정표, 안 하늘, 석 창성 “압입법을 이용한 재료 열화의 평가에 관한 연구” 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 171~176, 2000.
- (13) 정세희, “소형편치시험법에 의한 발전용증기관의 경년재질열화 평가에 관한 연구”, 대한기계학회논문집, 제15권, 제5호, pp. 1665~1673, 1991.
- (14) 유효신, 정세희, “고온부재의 열화도 평가를 위한 초음파 특성에 관한 연구”, 제 6회 경년열화 및 수명평가 심포지움 논문집, pp. 27~43, 1996.
- (15) J. Kraurkramer and H. Krautkramer, “Ultrasonic Testing of Materials”, 4th ed, Springer-Verlag, 1990.