

초음파 감쇠 및 전기저항 측정법에 의한 발전소 고온배관의 크리프손상 평가

이인철* · 길두송* · 정계조* · 조용상* · 이상국**
(99년 7월 19일 접수)

Nondestructive Creep Damage Evaluation of High-Temperature Pipelines
by Ultrasonic Attenuation Measurement and Electric Resistance Methods

In-Cheol Lee · Du-Song Kil · Gye-Jo Gung · Yong-Sang Cho · Sang-Guk Lee

Key Words : Creep Damage(크리프 손상), Attenuation(감쇠), Electric Resistance(전기 저항), Degradation(열화), Creep Life Fraction(크리프 손상율)

Abstract

Due to the high temperature and pressure, the materials of pipeline in power plant are degraded by creep damage. So far, many conventional measurement techniques such as replica method, electric resistance method, and hardness test method for creep damage have been used. Among them, the replica method has mainly been used for the inspection of components. But this technique is restricted to the applications at the surface of the objects and cannot be used to material inside. In this paper, the measuring methods of evaluation by using ultrasonic attenuation and electric resistance for the creep detection of creep damage in the form of cavities on grain boundaries or intergranular microcracks were carried out. Absolute measuring method of quantitative ultrasonic attenuation technique for 1Cr0.5Mo material degradation was analyzed for determining the creep degradation steps using life prediction formula. As a result of measurement for creep specimens, we founded that the coefficient of ultrasonic attenuation was increased as the increase of creep life fraction(ϕ_c) and the decreasing rate of electric resistance was also increased.

1. 서 론

최근 산업이 고도로 발달하고 설비가 대형화,

현대화 되어감에 따라 가혹한 환경에서 사용되는 설비들이 증가하고 있다. 특히, 국내 화력발전설비는 수명이 장주기에 들어서고 있어, 대부분의

* 한국전력공사 전력연구원

** 정회원, 한국전력공사 전력연구원

화력발전설비들이 노후화 됨에 따라 설비를 진단하여 안전성을 평가하는 것은 발전설비를 원만하게 운용하고, 설비의 적절한 수명예측으로 야기되는 경제적 이익을 차지하더라도, 적절한 대응조치를 취함으로써 대형사고를 미연에 방지하고 인명은 물론 안정적인 전력공급이라는 중차대한 목표와 관련된 문제로 대두되고 있는 실정이다. 이러한 환경하에서 안전성 보장과 신뢰성 향상을 위해 사용수명과 구조물의 잔존수명을 정확히 예측하고자 하는 요구가 증대되고 있으며, 특히 구조물에 축적된 손상정도를 평가하는 비파괴적방법의 조기달성이 시급히 요구되어지는 환경에서 초음파기술에 의한 크리프손상 평가 연구가 필요하게 되었다.

초음파는 음파 물성론에 기초하여 음파와 결합과의 상호작용 및 미세조직과의 상호작용을 수학적으로 모델링하여, 음파의 산란현상 및 흡수현상의 기본적인 메카니즘을 통하여 결합, 미세조직의 기하학적인 형상, 크기와 그 분산을 해석적, 수치적으로 구함으로써, 명료하게 그 재료의 상태를 알아낼 수가 있어 다른 비파괴방법에 비해 기술적 신뢰도면에서 우수한 방법이라는 장점 때문에 내부손상을 탐지하는데 보다 효과적이며 검사범위가 넓으며 물리적 특성(탄성 계수, 밀도, 프와송비) 변화에 아주 민감하다. 또한 음의 전파특성의 변화를 적절히 평가할 수 있다면 초음파기술은 많은 미세 크랙 및 결합검출에 적용할 수 있다^{1~2)}.

크리프손상의 특징은 재료의 사용수명을 소비하는 운전시간에 따라 지속적으로 축적되며, 재료전체에 걸쳐서 발생되기 때문에 부분적 보수가 불가능하기에 정확한 잔여수명예측이 요구되므로 크리프손상이 축적되고 있는 고온고압설비 재료의 건전성 및 잔여수명을 정량적으로 평가, 보증하기 위해서는, 결합의 종류나 재료의 크리프 손상정도를 조사하기 위한 정량적인 비파괴평가기술이 필요하다. 또한, 언제나 표면에서만 발생하지 않으며, 다양한 형태를 취하는 복잡한 현상이기에 크리프변형, void나 cavity와 같은 미세한 결합 및 크랙의 발생, 그리고 σ 상 등의 석출에 의한 금속학적 구조상의 열화(degradation) 등으로 분류될 수 있으나, 실제로는 재질, 온도, 응력, 시간 등의 상태에 따른 다양한 조합에 의해 발생하게 된다^{7~8)}.

정량적 비파괴평가의 궁극적 목적은, 재료 및 구조체의 안전성이나 잔여수명에 대한 신뢰성이 있는 정보를 얻어서 파괴조건이나 사용조건을 판정가능하게 하는 것이다. 초음파측정기술의 결과를 검증하기 위해 현재까지 크리프손상 측정에 이용되고 있는 주요 경년열화 측정법 중에 전기저항법에 의한 방법과 초음파의 감쇠를 비교분석하여, 이들 방법의 상관관계를 확보하여 초음파측정기술의 적용성을 검토하여 현장측정기술로 제시하고자 한다.

2. 크리프 실험방법

2.1 시험편

크리프손상 상태에 따른 초음파 신호측정을 위한 크리프 열화재의 시편확보 목적으로 크리프 인공열화 실험을 수행하였으며, 실기부재에서 사용기간, 사용재료, 대상부위 및 운전조건에 따라 각각 상이한 시험편을 채취하여 초음파측정실험을 수행해야 하나, 현실적으로 불가능하므로 화력발전소의 주증기관, 헤드 및 스팀드럼 재료와 동일한 재료를 입수하여, 실제 보일러에 부착된 개소의 정상 운전 조건하에 있는 내부압력에 의한 응력과 가열온도를 기초로 하여 결정된 실험조건으로 크리프 손상을 인공으로 부여하였다.

본 연구에 사용된 재료는 화력발전소 보일러용 주증기관, 헤드 및 스팀드럼의 강재인 저합금강 1Cr0.5Mo이다. Fig. 1은 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

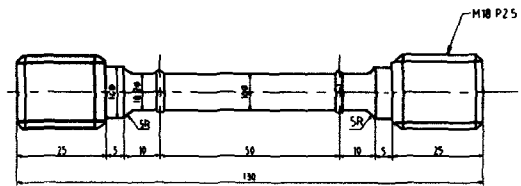


Fig. 1 Shape and dimension of creep test specimen (ASME E139-83)

2.2 실험방법

크리프시험기 노내 온도측정은 K형 열전대를

사용하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않은 무부하 상태에서 설정온도까지 10°C/min으로 가열하였다. 그리고 부하 전에 노의 온도 분포가 균일하게 유지되도록 설정온도에서 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켜 시험중 온도를 일정 온도에서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위 이내로 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 크리프시험중 발생하는 연신을 측정하기 위하여 표점거리 50mm되는 양단의 플랜지를 기준으로 하였고 LVDT(linear variable displacement transformer)로써 측정하였으며, 제어반에 부착된 레코더로 기록하여 이들로부터 크리프곡선을 작성하였고, 초기연신률(initial strain)은 하중을 가한 후 1분 경과 후의 연신을 측정하는 것으로 통일하였다. 그리고 크리프손상 정도에 따른 초음파실험용 크리프열화시편 확보를 위한 크리프 중단실험은 크리프 파단실험의 결과를 기초로 하여 크리프 파단수명의 1/4, 1/2, 3/4의 시점에서 각각 실험을 중단시켰다.

3. 초음파 감쇠 및 전기저항 측정장비 및 측정방법

3.1 측정장비

초음파측정에 사용된 초음파장비는 RITEC사의 저잡음으로 30kHz~80MHz대역의 데이터의 획득이 가능한 최대 5kW 출력의 하이파워 초음파분석시스템(RAM 5000 non-linear system), 오실로스코프는 sampling rate 최대 1GSa/s, 윈도우 환경 구동의 HP사의 infinium oscilloscope를 사용하였으며, 주파수분석을 위한 장비로 1GHz의 HP사 power spectrum 분석기 및 초음파장비 작동제어와 데이터처리용 PC등으로 구성하였다. 송신신호의 파형은 톤 버스트(ton burst)를 이용하였으며, 수신에는 5, 10 및 15MHz의 광대역 탐촉자(0.25inch)를 사용하였다. 또한 초음파장비의 RF burst 최대출력은 5kW로 실험에 맞는 송신출력을 제공하기 위하여 송신신호의 출력을 적절히 가감할 수 있도록 감쇠기(attenuator)가 연결되어 있으며, low/high pass filter를 이용하여 원하는 주파수대역을 선택할 수 있도록 하였고, signal sampler를 통하여 수신신호를 주어진 채널로 수신되도록 되어 있다. 실험에 사

용된 초음파 실험장치 구성도를 Fig. 2에 나타낸다

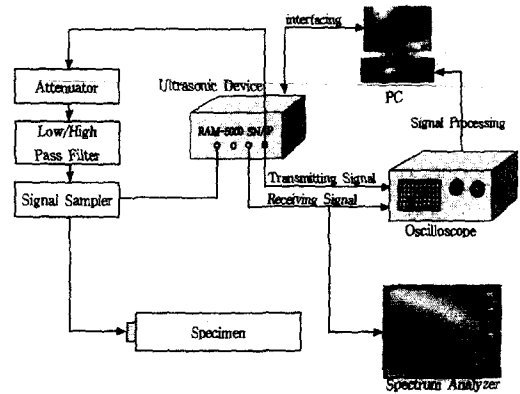


Fig. 2 The diagram of ultrasonic measurement system

전기저항 측정장치는 직류전류를 이용한 4단자 전위차법으로 전기비저항을 측정할 수 있도록 실험장치를 구성하였다. probe station은 Napson RT-8A-8(일본제품) 측정시스템을 이용하였으며, 저항 측정장치를 Fig. 3과 같이 정전류원과 전압측정 시스템으로 구성하여 실험을 수행하였다.

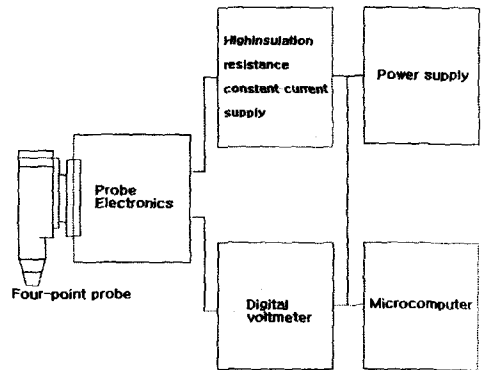


Fig. 3 The diagram of electric resistance measurement system

- (1) 정전류원: 독일 Burster 6426
-범위: 110mA~1μA, 분해능: 1 nA
-정확도: 0.1%
- (2) 전압계: 미국 Datron 1281
-범위: 1,000V~100mV, 분해능: 10nV

-정확도(100mV): 0.001%

(3) 스위치망: dual/single configuration 전환 및 전류/전압 probe 접촉저항 측정용으로 구성

전류입력선과 전압측정선으로 직경 1.0mm의 구리선을 사용하였으며, silver paste를 사용하여 시험편에 부착시켰다.

3.2 초음파 감쇠 측정

재료의 열화는 전위밀도, 결정립의 형상이나 2차상의 석출에 관한 금속조직적 변화에 대응하고 있을 때, 초음파의 감쇠율에 변화를 주게 된다. 또한 재료내부의 미소결합은 초음파 산란의 원인이 되어 감쇠율에 영향을 미친다. 이와 같이 감쇠율의 변화로부터 열화손상량을 측정하는 것이 감쇠측정법이다.

원리적으로는 x_1, x_2 에서의 펄스의 높이 hx_1 과 hx_2 를 측정하고, 아래의 식(1)로 구한다.

$$\alpha = \frac{20 \log_{10}(hx_1/hx_2)}{x_2 - x_1} \quad (1)$$

실제적으로는 많은 x_i 에 대해서 hx_i 를 측정하고 평균적으로 α 를 구하면 된다. 제 1회의 밀면 에코 우 높이만에 의해서 또는 다중반사에 의해서도 구할 수 있다.

감쇠계수를 측정하기 위해서는 신호진폭값과 이들의 변화값이 먼저 계산되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 선택(게이트처리)된 신호(제1 저면에코 및 제2 저면에코)에 대한 두 신호의 위상각에 대한 적분값인 Intergrator No.1과 Intergrator No.2의 진폭성분 식(2)와 두 신호간의 진폭변화를 대수비(logarithmic ratio)로 나타내는 연산 식(3)을 통하여 산출하였다.

$$Amplitude = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} \quad (2)$$

$$\Delta Attenuation = \frac{10}{(N_2 - N_1)} \log \left(\frac{A_1(0)A_2(t)}{A_2(0)A_1(t)} \right) \quad (3)$$

dB per transit

여기서, $N_1, N_2 =$ 에코순번

$A_1(0), A_2(0) =$ 시간 영점에서 두신호 진폭

$A_1(t), A_2(t) =$ 시간 t에서의 두신호 진폭

따라서, 감쇠계수는 식(4)를 이용하여 계산하였다.

$$\alpha = \frac{\Delta Attenuation}{T} \quad [dB/mm] \quad (4)$$

여기서, T는 시험편 두께(mm)이다.

3.3 전기저항 측정

시험에 사용된 시험편 재료는 초음파실험에 사용된 동일 시험편인 1Cr0.5Mo강의 크리프 및 열피로손상재이며, 직경 10mm, 길이 10mm의 환봉형 시험편을 사용하였다. 시험편의 양 끝단에서 전류를 공급하여 전압을 측정하였으며 전기비저항 측정값은 다음 식으로 구하였다.

$$\rho(\text{비저항}) = RS(\text{면저항}) \times t(\text{시험편 두께}) / \ell(\text{시험편 길이})$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 크리프손상과 초음파감쇠와의 관계검토

다결정 금속내에서의 초음파 감쇠는 흡수와 산란이나, MHz의 주파수 영역에서는 히스테리시스 손실을 동반한 산란손실이다. 지금까지 많은 연구에 의해 평균입경 d와 초음파 감쇠와의 관계에 대하여 검토되어, 재질검사 등에 이용되고 있다. 초음파 감쇠계수 α 와 주파수 f와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

파장 λ 가 평균입경 \bar{d} 에 비례하여 대단히 큰 $\lambda > d$, rayleigh 산란영역에서는 :

$$\alpha_r = C_r \bar{d}^3 f^4 \quad (\text{Np/cm}) \quad (5)$$

$\lambda = d$ 의 확률산란영역에서는 :

$$\alpha_s = C_s \bar{d} f^2 \quad (\text{Np/cm}) \quad (6)$$

$\lambda < d$ 의 확산산란영역에서는 :

$$\alpha_d = C_d \sqrt{d} \quad (\text{Np/cm}) \quad (7)$$

여기서, C_r , C_s , C_d 는 정수로 탄성계수, 종파, 횡파의 음속 등에 의존한다.

음의 경로(sound path) x 에 따른 초음파 pulse의 증폭 A 는 아래의 식으로 주어진다.

$$A = A_0 \exp(-\alpha_x) \cdot D(x) \quad (8)$$

여기서, A : 초기진폭

α : 감쇠계수

$D(x)$: 음장(sound field)확산에 대한 보정계수

다결정 재료에 있어서 전체감쇠는 아래의 식과 같이 산란기여와 흡수기여로 이루어져 있다.

$$x = \alpha_A + \alpha_S \quad (9)$$

여기서, α_S : 산란계수(scattering coefficient)

α_A : 흡수계수(absorption coefficient)

다결정 재료의 단상(single phase)에 있어서, 초음파 산란은 입계(grain boundaries)에서 일어나는 음향임피던스의 불일치에 의하여 일어난다.

산란이론으로부터 $d_g/\lambda \ll 1$ (Rayleigh Scattering)의 범위에서 초음파 산란계수를 계산할 수 있다.

$$\alpha_S^G = S_G \cdot d_G^3 \cdot f^4 \quad (10)$$

여기서, f : 초음파의 주파수

S : 파형(wave mode)과 재료에 의존하는 산란 파라미터

G : 입자산란(grain scattering) 표시

등방성물질에 있어서 기공에 대한 산란계수 α_S^P 는 비슷한 수식으로 표현된다.

또한 $d_g/\lambda \ll 1$ 라고 가정하면 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$\alpha_S^P = c_P \cdot S_P \cdot d_p^3 \cdot f^4 \quad (11)$$

여기서, 첨자 P 는 기공의 산란을 나타낸다. 비록 다결정 matrix에 있어서 기공에 대한 무산란이론이 현재까지 유용하다, 기공의 산란과 입자의 산란 사이의 비율은 작은 기공의 밀도(concentrations)에 대하여 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\frac{\alpha_S^P}{\alpha_S^G} \approx c_P \cdot \frac{S_P}{S_G} \left(\frac{d_P}{d_G} \right)^3 \quad (12)$$

입자크기가 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 인 페라이트 고온강에 있어서 전형적인 크리프손상과 관련하여, 탐지되는 크리프기공(creep void)의 크기는 체적밀도 1%이하에서 약 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 이다. 이러한 조건하에서 입자산란이 대부분 기공산란을 좌우하게 된다³⁻⁴⁾.

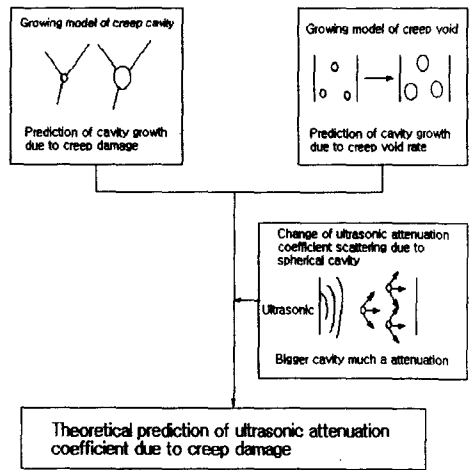


Fig. 4 Theoretical relationship model of ultrasonic attenuation and creep damage

4.2 전기저항 측정결과

크리프 손상단계별 전기비저항값의 변화를 보면 접점의 온도변화에 따른 열기전력의 영향에 의해 약간의 편차를 갖고 있으나, 전체적으로 크리프손상이 증가할수록 일정하게 감소하는 경향을 Fig. 5와 Fig. 6에서 알 수 있었다.

크리프손상에 따른 전기저항 측정결과와 초음파

측정결과를 비교하기 위해서 직류법에 의해 전기 저항 측정을 수행하여 측정된 전기 비저항값의 크리프손상에 따른 변화양상과 초음파 측정결과와의 상관관계를 비교분석하여 현장적용을 위한 실용화를 검토하였다.

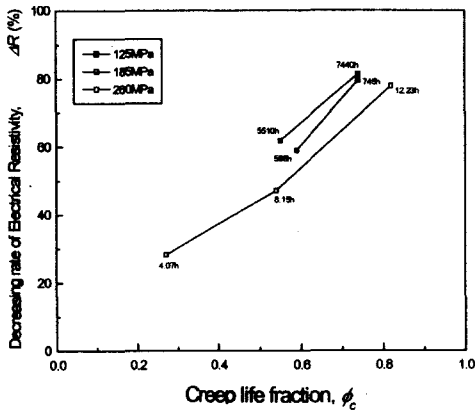


Fig. 5 Relationship between electric resistance decreasing rate and creep damage of 1Cr0.5Mo steel (550°C)

를 나타낸다.

크리프 온도 및 응력에 관계없이 모두 크리프손상이 증가함에 따라 일정한 크기로 감쇠가 증가하는 경향을 나타내며 크리프손상율 $\phi_c=0.75$ 부근 이하의 범위에서 탐촉자 주파수가 높을수록 감쇠증가 정도가 커짐을 알 수 있었다.

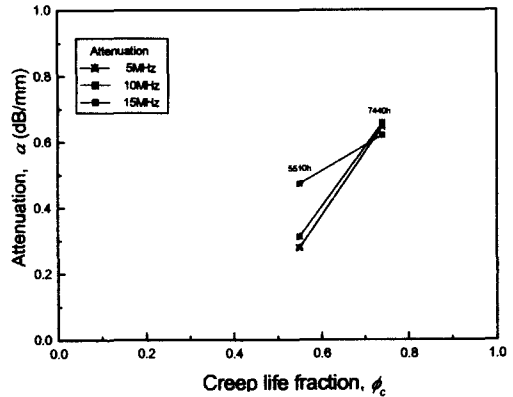


Fig. 7 Relationship between attenuation and creep damage of 1Cr0.5Mo steel (550°C, 125MPa)

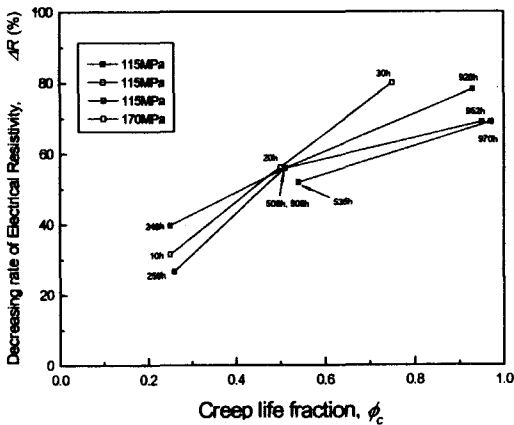


Fig. 6 Relationship between electric resistance decreasing rate and creep damage of 1Cr0.5Mo steel (600°C)

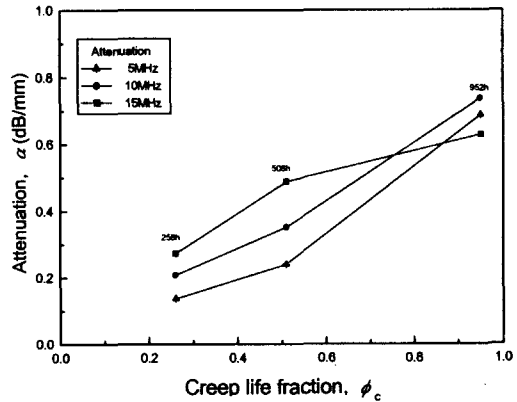


Fig. 8 Relationship between attenuation and creep damage of 1Cr0.5Mo steel (600°C, 115MPa)

4.3 크리프손상과 감쇠측정결과

Fig. 7과 Fig. 8은 1Cr0.5Mo강에 대하여 크리프 시험결과와 각 크리프 손상재에 대한 초음파 감쇠 측정결과로, 크리프손상율과 초음파 감쇠와의 관계

4.4 크리프손상에 따른 초음파 감쇠와 전기저항 감쇠율과의 관계검토

Fig. 9, Fig. 10는 1Cr0.5Mo강에 대하여 크리프 손상에 따른 초음파 감쇠측정결과와 전기저항 감쇠율과의 관계를 나타낸다.

중파 탐촉자 5, 10, 15MHz를 이용하여 크리프손상에 따른 감쇠를 측정된 결과, 크리프 온도 및 응력에 관계없이 모두 크리프손상이 증가함에 따라 일정한 크기로 증가하는 경향을 나타내며 크리프손상을 $\phi_c=0.75$ 부근 이하의 범위에서 탐촉자 주파수가 높을수록 감쇠증가 정도가 커짐을 알 수 있다. 또한, 전기저항 감소율은 시험온도, 응력에 관계없이 열피로손상이 증가함에 따라 전기저항 감소량은 거의 일정하게 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 고온 및 고응력의 부하과정에 따른 크리프손상에 의해 재료내부에 발생하는 캐비티(cavity)의 형성 및 크리프 미세변형(microstrain)에 의해 증가하는 것으로 해석된다. 감쇠증가 원인은 재료내부에 발생한 캐비티에 의해 재료의 불균질화 및 캐비티 경계면에서의 음향임피던스(acoustic impedance)차이로 기인한 산란(scattering)현상으로 수신탐촉자에 수신되는 초음파 빔의 강도(beam intensity)가 송신 빔의 강도보다 크게 약화되어 생긴 현상으로 생각할 수 있다. 또한 주파수가 높아짐에 따라 초음파 빔의 파장(wavelength)이 짧아짐에 따라 결함 탐지능력이 커짐으로 인하여 고주파수 탐촉자실험에서 감쇠정도가 크게 나타나는 것으로 추정할 수 있다.⁽⁵⁻⁸⁾ 따라서 높은 주파수대역의 탐촉자를 사용할수록 감쇠측정의 탐지능력은 향상되므로 이러한 특징을 이용할 필요가 있다.

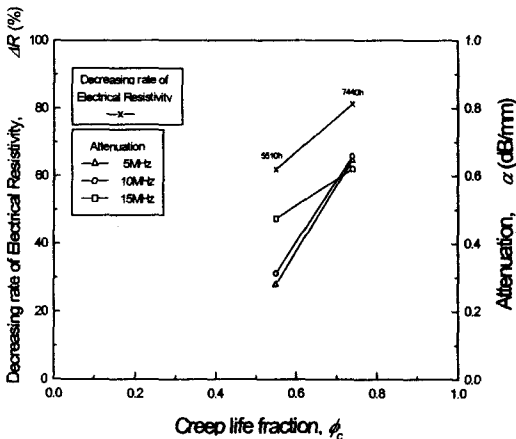


Fig. 9 Relationship between attenuation and electric resistance decreasing rate of 1Cr0.5Mo steel (550°C, 125MPa)

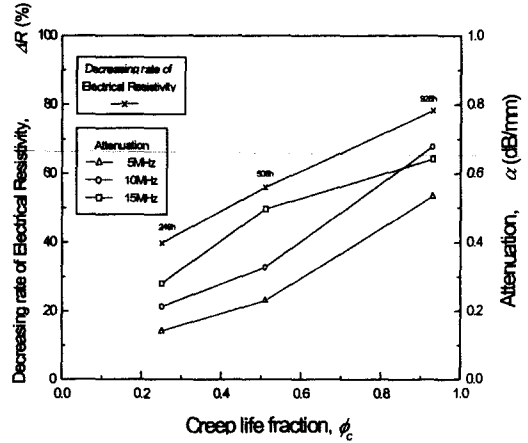


Fig. 10 Relationship between attenuation and electric resistance decreasing rate of 1Cr0.5Mo steel (600°C, 115MPa)

5. 결 론

화력발전소 주요 고온 후속배관인 주증기관, 과열기 헤더 및 스팀드럼을 대상으로, 이들 설비에서 발생하는 크리프의 열화손상상태를 전기저항법에 의한 방법과 초음파 감쇠측정에 의한 검출 방법으로 측정 후 비교분석을 수행하고 평가하기 위하여, 대상설비 재료인 1Cr0.5Mo강을 대상으로 초음파 감쇠 및 전기저항 측정연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 크리프 온도 및 응력에 관계없이 모두 크리프손상이 증가함에 따라 초음파 감쇠는 일정한 크기로 증가하며, 크리프손상을 $\phi_c = 0.75$ 부근 이하의 범위에서 탐촉자 주파수가 높을수록 감쇠증가 정도가 커짐을 확인하였다.
- 2) 전기저항은 시험온도, 응력에 관계없이 크리프손상이 증가함에 따라 거의 일정하게 감소하는 경향을 나타내었다. 이들 결과를 이용하면, 전기저항 감소량과 크리프의 관계로부터 크리프손상량을 추정할 수 있다.

참고문헌

- 1) Matsubara, M. and A. Nitta, "Theoretical

- Study on Creep Damage Detection by Ultrasonic Wave Measurement”, CRIEPI Report, T88014, pp.4-6, 1988
- 2) Matsubara, M. and A. Nitta, “Study on Application of Ultrasonic Wave Measurement to Creep-fatigue Damage Detection”, CRIEPI Re- port, T87046, pp.6-7, 1988
 - 3) Matsumoto, M. et al., J. of JSNDI, Vol.35, No.2, pp.140, 1985
 - 4) Nakashrio, M. et al., TETSU-TO-HAGANE, Vol.73, No.13, pp.147, 1987
 - 5) McSkimin, H. J., In Physical Acoustics, Vol.IA, W. P. Manson ed. (Academic Press, New Yor -k), pp.27, 1964
 - 6) McSkimin, H. J. & P. Andreatch, J. Acoust. Soc. Am., 34, pp.609, 1962
 - 7) Ya, S. et al., “高温クリープ・疲労条件下におけるSUS304鋼の損傷と余寿命評價に 關する非破壊的研究”, 日本材料學會學術 講演會前刷, pp.247, 1986
 - 8) Nakashrio, M. et al., “超音波特性によるク リープ損傷評價”, 日本材料學會學術講演會 前刷, pp.277, 1988