

## 초음파법을 이용한 Cr-Mo강 고온배관재료의 크리프손상 평가

### Creep Damage Evaluation of Cr-Mo Steel High-Temperature Pipeline Material for Fossil Power Plant Using Ultrasonic Test Method

이 상 국\*  
 Sang-Guk Lee\*

**초 록** 화력발전소 보일러 고온배관인 주증기관, 헤드 및 증기드럼 등의 설비들은 장시간동안 고온고압의 가혹한 조건으로 운전됨에 따라 크리프손상에 의해 열화되고 있다. 이들 설비의 크리프손상측정에 적용되는 종래의 비파괴기법인 레프리카법, 전기저항법 및 경도법 등은 복잡한 측정절차 및 접근성, 검사결과와 신뢰도 및 측정정도 등 여러가지면에서 단점이 많다. 따라서 본 논문에서는 화력발전소 주요 고온배관에서 발생하는 경년열화인 크리프손상에 대한 초음파 측정연구를 수행한 결과로서, 고온배관재료인 Cr-Mo강의 크리프 인공열화제를 대상으로 이들에 대한 크리프손상 상태별 초음파 음속(sound velocity) 및 감쇠(attenuation)의 초음파 신호특성을 평가하였다.

**주요용어** : 크리프, 크리프손상율, 초음파법, 화력발전소, 고온배관, 초음파음속, 초음파감쇠

**Abstract** Boiler high-temperature pipelines such as main steam pipe, header and steam drum in fossil power plants are degraded by creep damage due to severe operating conditions such as high temperature and high pressure for an extended period time. Conventional measurement techniques(replica method, electric resistance method, and hardness test method) for measuring creep damage have such disadvantages as complex preparation and measurement procedures, too many control parameters. And also these techniques have low practicality and applied only to component surfaces with good accessibility. In this paper, artificial creep degradation test and ultrasonic measurement for their creep degraded specimens(Cr-Mo alloy steels) were carried out for the purpose of evaluation for creep damage. Absolute measuring method of quantitative ultrasonic measurement for material degradation was established, and long term creep degradation tests using life prediction formula were carried out. As a result of ultrasonic tests for crept specimens, we conformed that both the sound velocity decreased and attenuation coefficient linearly increased in proportion to the increase of creep life fraction( $\phi$ c).

**Keywords**: creep, creep life fraction, ultrasonic test, fossil power plant, sound velocity, attenuation

#### 1. 서 론

크리프손상이 축적되고 있는 고온고압설비 재료의 건전성 및 잔여수명을 정량적으로 평가, 보증하기 위해서는, 결합의 종류나 재료의 크리프 손상정도를 조사하기 위한 정량적인 비파괴평가기술이 필요하다. 이러한

정량적 비파괴평가의 궁극적 목적은, 재료 및 구조체의 안전성이나 잔여수명에 대한 신뢰성이 있는 정보를 얻는 것이다. 재료나 구조물의 안전성과 잔여수명평가의 신뢰성은 그들의 파괴조건이나 사용조건을 판정가능하고, 재질이나 결합에 관한 정보가 정량적인지에 크게 의존한다. 그러한 정량성에 있어서, 각종의 비파괴검사

법 중에서 초음파법이 정보량이 풍부하고 정량성 및 분해능이라는 점에서 현재로서는 가장 잠재력이 높다(1, 2).

또한, 초음파는 음파물성론에 기초하여 음파와 결합파의 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 알아 낼 수가 있어 다른 비파괴방법에 비해 기술적 신뢰도면에서 우수한 방법이다(3-6).

이러한 점에서, 본 논문에서는 크리프손상 평가를 위한 초음파 측정기술의 기술적 신뢰도를 확보하여 현장 설비에 실용할 수 있는 방법으로서의 접근성을 향상시키고 적용분야를 확대시키기 위한 목적으로 크리프손상 평가를 위한 초음파 측정기술의 이론적 해석과 신호평가 방법 등에 대해 검토하였다. 본 논문에서는 화력발전소 주요 고온배관인 주증기관, 헤더류 및 스팀드럼에서 발생하는 경년열화인 크리프 손상에 대한 초음파 측정을 수행한 결과로서, 고온배관재료인 2.25Cr1Mo강의 인공열화재를 대상으로 이들에 대한 크리프 손상상태별 초음파 신호분류를 목적으로 초음파 음속 (sound velocity) 및 감쇠(attenuation)의 초음파 신호특성을 평가하였다.

2. 크리프 실험방법

2.1. 시험편

크리프손상 상태에 따른 초음파 신호측정을 위한 크리프 열화재의 시편 확보 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 운전조건하에 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 2.25Cr1Mo이다. 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고 기계적성질은 Table 2와 같으며, Fig. 1은 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of material(wt. %)

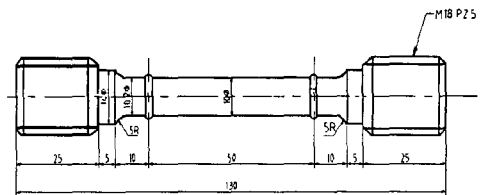
Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
2.25Cr1Mo	0.12	0.2	0.46	0.02	0.014	-	2.19	0.98	-

Table 2 Mechanical properties of material

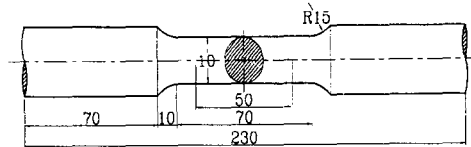
Material	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Elongation $\psi$ (%)	Hardness ( $H_B$ )	Heat treat.
2.25Cr1Mo	650	535	24	197	*N

$\sigma_t$  : Tensile strength,  $\sigma_y$  : Yield strength,

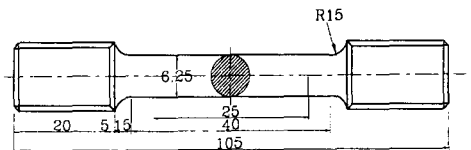
$\psi$  : Elongation,  $H_B$  : Brinell Hardness



(a) Creep test specimen (ASTM E139-83)



(b) Tension test specimen (KS B 0801 No.10 or ASTM 8-86)



(c) High temperature tension test specimen (ASTM E21-79)

Fig. 1 Shape and dimension of test specimen

2.2. 실험방법

크리프시험기 노내 온도측정은 K형 열전대를 사용하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않은 무부하 상태에서 설정온도까지 10℃/min으로 가열하였다. 그리고 부하 전에 노의 온도분포가 균일하게 유지되도록 설정온도에서 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켜 실험중 온도를 일정온도에서 ±1℃ 범위 이내로 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 크리프시험중 발생하는 연신을 측정하기 위하여 표점거리 50mm되는 양단의 플랜지를 기준으로 하였고 선형가변차동변압기

(linear variable displacement transformer: LVDT)로써 측정하였으며, 제어반에 부착된 레코더로 기록하여 이로부터 크리프곡선을 작성하였고, 초기 연신률(initial strain)은 하중을 가한 후 1분 경과 후의 연신을 측정한 것으로 통일하였다. 그리고 크리프 손상 정도에 따른 초음파실험용 크리프표화시편 확보를 위한 크리프 중단실험은 크리프 파단실험의 결과를 기초로 하여 크리프파단수명의 1/4, 1/2, 3/4의 시점에서 각각 실험을 중단시켰다.

### 3. 초음파 측정방법 및 시험편

#### 3.1. 초음파 측정 시험편

Fig. 2는 초음파 측정과 크리프 손상 특성을 해석하기 위한 시험편 형상을 나타낸다.

크리프 중단 및 파단 실험 결과로 준비된 시편에 대하여 초음파 측정면이 되는 평행부를 탐촉자 접촉이 가능하도록 표면을 평면으로 가공하기 위하여 아래와 같이 평행부의 양단면이 평행하고 응력축에 대해 수직이 되도록 평행 연삭가공후 랩핑(lapping) 또는 전해연마로 다듬질하되 가공경화가 되지 않게 한다. 즉, 시편의 표면다듬질, 치수의 정확도 및 평행도에 주의를 기울여 가공하였다. 그리고 모든 초음파 측정은 시험편 평행부의 두께방향으로 검사되었다.

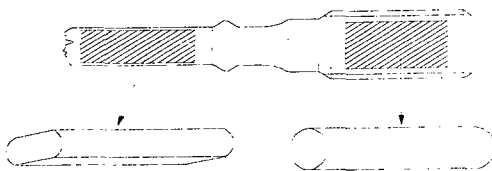


Fig. 2 Shape of ultrasonic test specimen

#### 3.2. 초음파 측정장비

초음파 측정에 사용된 초음파장비는 RITEC사의 저잡음으로 30KHz~80MHz대역의 데이터의 획득이 가능한 최대 5kW 출력의 하이파워 초음파분석시스템(RAM 5000 non-linear System), 오실로스코프는 샘플링율(sampling rate) 최대 1GHz, 윈도우 환경 구동의 HP사의 Infinium Oscilloscope를 사용하였으며, 주파수분석을 위한 장비로 1GHz의 HP사

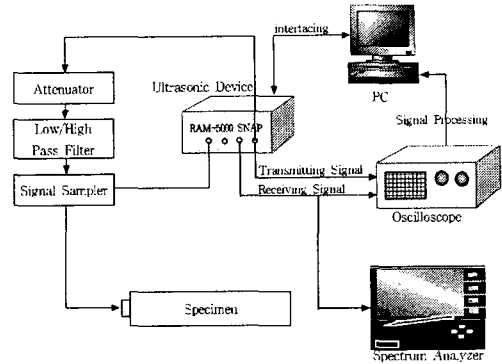


Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic test device

power spectrum 분석기 및 초음파장비 작동제어와 데이터처리를 PC 등으로 구성하였다. 송신신호의 파형은 톤 버스트(tone 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 하였다. 실험에 사용된 초음파 실험장치 구성도를 Fig. 3에 나타낸다.

#### 3.3. 초음파 측정방법

##### 3.3.1. 음속 측정

음속 측정은 수신된 RF 버스트 신호의 첫 번째 신호(제1저면에코)와 두 번째 신호(제2저면에코)간의 위상각(phase angle) 및 위상(phase)으로부터 계산된 절대시간 측정(absolute time measurement) 기능을 이용하여 측정하였다.

초음파 실험에 사용된 RAM 시스템은 위상 및 위상각도 탐지(quadrature phase sensitive detection)와 게이트 신호 적분(gated analog integrators)의 신호처리 기능을 가진 두 개의 수신회로는 진폭과 위상각으로부터 계산할 수 있는 신호의 두 가지 직각 벡터 성분을 만들어낸다. 또한 이러한 종류의 탐지는 신호가 작을 때도 최대의 직선성을 유지하는 이점이 있으며, 신호 평균화 기법은 노이즈로부터 신호를

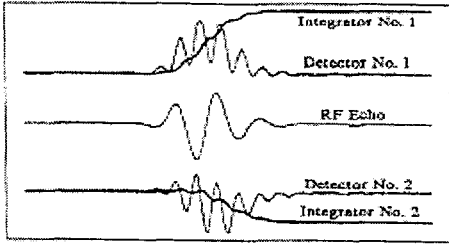


Fig. 4 Receiving and intergrating process versus phase angle of RF signal

회복하는데 있다. 따라서 측정하고자 하는 초음파신호의 각각은 Fig. 4에서와 같이 주어진 수신된 RF신호에 대하여 위상각 0° 및 90°의 방향으로 분리 측정하게 되며, 이들 신호의 위상에 대한 주파수와의 기울기 (slope)로부터 시간 영점에서 버스트 신호 수신시간 T<sub>0</sub>, 초음파 전파시간(acoustic time of flight) T<sub>1</sub> 및 지연시간(delay time)를 포함한 총 도달시간(acoustic transit time)을 ΔT를 다음의 식 (1)로부터 계산되었다[7-9].

$$\Delta T = T_1 - T_0 = \frac{\Delta\Phi_r}{2\pi\Delta F} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, ΔΦ<sub>r</sub> = 위상 변화량(radians)  
 ΔF = 주파수 변화량(MHz)

정확한 신호진폭과 위상정보를 얻기 위하여, 수신된 신호의 위상은 아날로그 적분회로(analog integration circuits)에서 프로세싱(processing)된다. 이 방법은 게이트(gate) 위치를 잡아주고 RF 성분을 제거하여 신호대 잡음비 (signal-to-noise ratio)를 개선해 주게 된다. 수신신호 적분회로에서의 시간측정은 적분 게이트 회로(integrator gate circuits)에 의하여 조정되고, 적분 전압(integrator rate), r<sub>1</sub>은 컴퓨터에서 제어하게 된다. 신호에 대한 게이트(gating)는 신호 앞, 뒤 부분에 위치하게 한다. 적분 결과들은 식 (2) 및 식 (3)으로 처리된다. 또한 수신된 신호의 위상각은 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$I_1 = r_1 \int_{t_1}^{t_2} D_1 dt \dots\dots\dots (2)$$

$$I_2 = r_1 \int_{t_1}^{t_2} D_2 dt \dots\dots\dots (3)$$

여기서, I<sub>1</sub>과 I<sub>2</sub> = 제 1, 2 저면에코의 적분결과

t<sub>1</sub>과 t<sub>2</sub> = 적분게이트(integrator gate)의 시작점과 끝점 시간(sec)

D<sub>1</sub>과 D<sub>2</sub> = 제1, 2 저면에코의 위상 (radians)

r<sub>1</sub> = 적분 전압(integrator rate)(V/V · ms)

$$\Phi_r = \tan^{-1} \left[ \frac{I_1}{I_2} \right] \dots\dots\dots (4)$$

두 개의 신호를 측정할 때, 도달시간을 정확하게 측정하기 위해서는 선택된 신호(제1 저면에코 및 제2 저면에코)에 대한 두 신호의 위상각에 대한 적분성분인 Intergrator No.1과 Intergrator No.2의 시간차를 정밀하게 측정해야 한다. 따라서 속도측정의 정밀성을 향상시키기 위해 두 개의 신호(echo)간의 시간적으로 변화하는 위상성분과 주파수성분을 적분(Integrating)기능을 이용하여 측정하였다. 수신된 신호의 위상각은 Fig. 5와 같이 제1 저면에코 및 제2 저면에코 각각 0° 및 90°로 화면에 표시되며, 총 도달시간(acoustic transit time) 측정결과는 Fig. 6과 같다. 따라서 음속(v)은 다음 식으로 계산하였다.

$$v = \frac{B}{\Delta T} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, ΔT = 두 신호간의 전파시간(absolute time of flight)

B = 시험편 두께 (Specimen thickness)

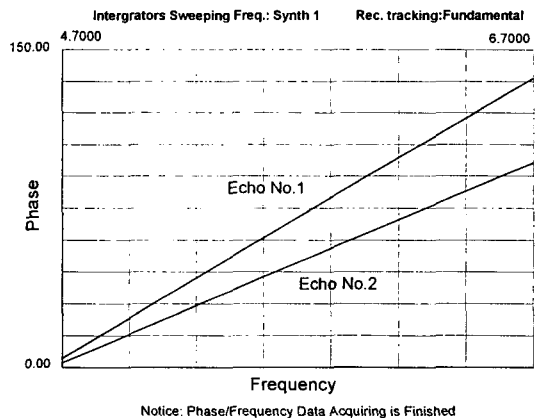


Fig. 5 Intergrating of phase and frequency component for two echo

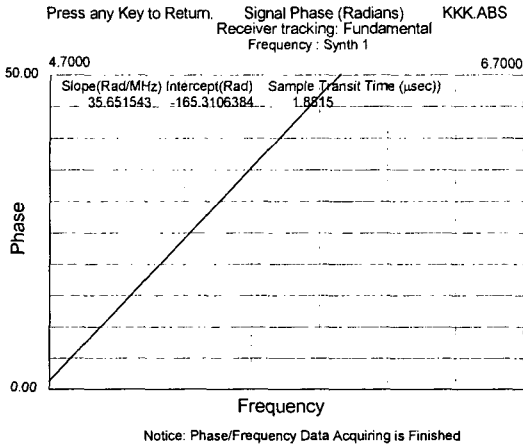


Fig. 6 Total acoustic transit time test results

3.3.2. 감쇠측정

감쇠계수를 측정하기 위해서는 신호진폭값과 이들의 변화값이 먼저 계산되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 선택(게이트처리)된 신호(제1 저면에코 및 제2 저면에코)에 대한 두 신호의 위상각에 대한 적분값인 Intergrator No.1과 Intergrator No.2의 진폭성분식 (7)과 두 신호간의 진폭변화를 대수비(logarithmic ratio)로 나타내는 연산식인 식 (8) 및 식 (9)를 통하여 산출하였다.

$$Amplitude = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} \dots\dots\dots (7)$$

$\Delta$  Attenuation

$$= \frac{10}{(N_2 - N_1)} \log \left( \frac{A_1(0) A_2(t)}{A_2(0) A_1(t)} \right) \text{ dB per transit} \dots (8)$$

여기서,  $N_1, N_2 =$  에코순번

$A_1(0), A_2(0) =$  시간 영점에서의 두신호 진폭

$A_1(t), A_2(t) =$  시간 t에서의 두신호 진폭

따라서, 감쇠계수는 식 (9)를 이용하여 계산하였다.

$$\alpha = \frac{\Delta \text{ Attenuation}}{B} \text{ [dB/mm]} \dots\dots\dots (9)$$

여기서, B는 시험편 두께(mm)이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 크리프중단 및 파단실험결과

일정온도 600℃하에서 응력을 변화시켰을 때 실험적으로 구한 2.25Cr1Mo강의 대표적인 장기 크리프(크리프수명  $10^3, 10^4$ h) 곡선을 Fig. 7에 초기연신률(initial strain, IS)과 함께 나타내었다. 그림에서 초기연신률의 증감은 응력, 파단수명 및 온도에 영향을 주며, 여러 크리프 특성파도 상관성이 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8은 2.25Cr1Mo강의 크리프 열화상태별 초음파 측정시험편 확보를 위하여 크리프 온도 및 응력조건을 변화시켜 파단시간  $10^3, 10^4$ 시간 이내의 장기 크리프실험을 완료하고, 각 조건에 따른 파단시간의 1/4, 1/2, 3/4이 되는 점에서 각각 실험을 중단시키는 중단

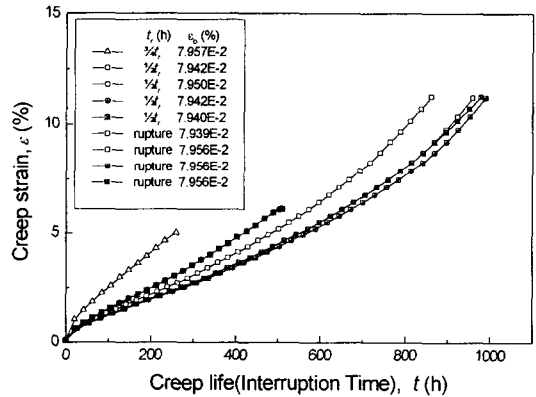


Fig. 7 Creep rupture curves (600℃, 105MPa)

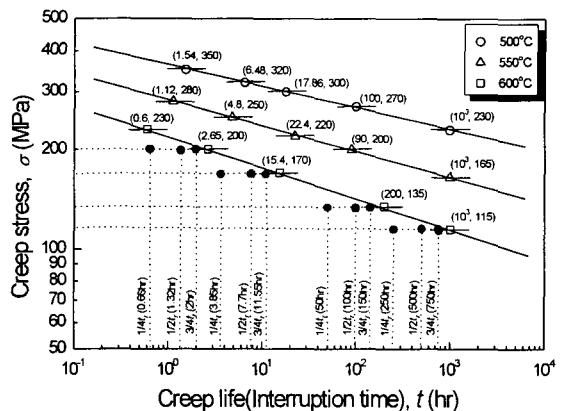


Fig. 8 Creep interruption curve

실험 결과를 나타낸다.

4. 2. 음속측정결과

크리프 손상의 진행에 따라 초음파 종파를 측정하였으며, 종파음속에 영향을 주는 밀도변화를 알아내기 위하여 밀도측정을 수행하여 크리프손상율에 따른 밀도 및 음속변화 양자를 측정하여 비교분석하였다.

4.2.1 밀도측정결과

재료의 열화진전에 따른 초음파 음속변화는 재료내부의 밀도변화가 직접적으로 영향을 주기 때문에 음속 변화 원인을 뒷받침해 주는 물리량이 될 수 있다[10]. 따라서 크리프상태별 음속변화를 정밀하게 평가하기 위하여 밀도측정을 수행하여 밀도변화량에 대한 음속과의 상관관계를 규명하기 위해 밀도측정을 수행한 결과, 2.25Cr1Mo강 모두 크리프손상이 진행됨에 따라 일정한 상태로 감소하였으며, 이러한 밀도감소는 크리프손상진행에 따른 재료내부에 발생한 캐비티, 미세균열 등의 조직의 불균형에 기인하는 것으로 조직관찰로부터 확인하였다.

4.2.2. 크리프손상에 따른 초음파 음속측정결과

Fig. 9와 Fig. 10은 2.25Cr1Mo강에 대하여 크리프시험결과와 각 크리프 손상상태에 대한 초음파 음속 측

정결과를 자기 다른 탐촉자, 실험온도 및 응력에 대하여 나타낸 것으로, 크리프 손상율과 초음파 음속과의 관계를 밀도변화와 함께 나타낸다.

Fig. 9는 초음파 광대역 종파 탐촉자 5, 10, 15MHz를 이용하여 크리프 실험온도 550℃, 크리프 응력 220MPa의 조건으로 크리프 중단 및 파단실험을 수행한 후, 이들 크리프 중단 및 파단 손상재를 대상으로 크리프 손상에 따른 음속을 측정 한 결과를 각각 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보면, 크리프 온도 및 응력, 탐촉자 주파수에 관계없이 크리프손상이 증가함에 따라 일정한 크기로 감소함을 알 수 있다. 크리프손상에 따른 밀도변화는 10<sup>-1</sup>의 범위이며, 이 범위 이상에서 음속감소가 발생하였으며, 음속은 크리프 전체 단계를 통하여 약 11.8%이내의 범위에서 변화하였다. 이러한 음속변화는 초음파 종파의 경우 재료의 탄성계수(modulus of elasticity)와 밀도변화에 의해 변화하며, 그리고 횡파는 재료의 강성계수(modulus of rigidity)와 밀도변화 등으로 인하여 재료 중에 전파되는 초음파의 음속이 변화하는 특성으로부터 밀도변화를 고려하면 음속측정에 의해 크리프 손상상태 평가가 가능함을 알 수 있다[11-13].

Fig. 10은 초음파 광대역 종파 탐촉자 5, 10, 15MHz를 이용하여 크리프 실험온도 600℃, 크리프 응력 105MPa의 조건으로 크리프 중단 및 파단실험을 수행한 후, 크리프 손상재를 대상으로 크리프 손상에 따른 음속을 측정 한 결과를 각각 나타낸 것이다. Fig. 10에서 보면, 크리프 온도 및 응력, 탐촉자 주파수에

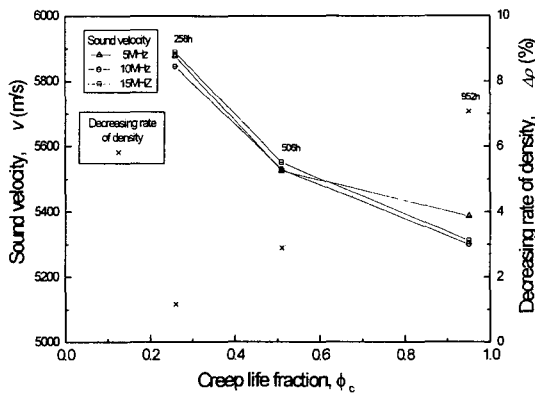


Fig. 9 Relationship of sound velocity and density vs. creep life fraction (creep condition: 550℃, 220MPa, virgin material sound velocity v: 5,944m/s)

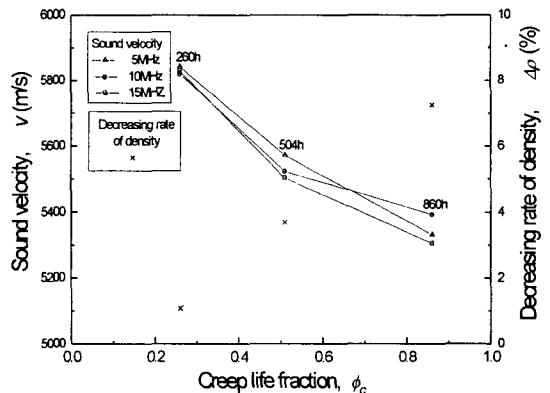


Fig. 10 Relationship of sound velocity and density vs. creep life fraction(creep test condition: 600℃, 105MPa, virgin material sound velocity v: 5,944m/s)

관계없이 크리프손상이 증가함에 따라 일정한 크기로 감소함을 알 수 있다. 크리프손상에 따른 밀도변화는  $10^{-1}$ 의 범위이며, 이 범위 이상에서 음속감소가 발생하였으며, 음속은 크리프 전체 단계를 통하여 약 11.8% 이내의 범위에서 변화하였다. Fig. 10으로부터 밀도변화를 고려하면 음속측정에 의해 크리프 손상상태 평가가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이, 크리프손상의 증가에 따른 음속감소 현상은 크리프 중단 및 파단재의 조직관찰로부터 크리프 손상을  $\phi_c=0.5$ 미만인 경우 주로 고온크리프에서 가장 특징적인 조직변화인 결정립내의 부결정립(subgrain) 및 이들 입계의 다수 형성(14,15)에 의해, 그리고 크리프 손상을  $\phi_c=0.5$  이상에서는 크리프손상 증가에 의한 캐비티 발생으로 재료의 밀도가 감소하고, 이와함께 종파의 속도변화에 영향을 주는 탄성계수(youngs modulus of elasticity)가 감소하여 생긴 결과로 해석된다.

4.3. 감쇠측정결과

4.3.1. 크리프손상에 따른 초음파 감쇠측정결과

Fig. 11과 Fig. 12는 2.25Cr1Mo강에 대하여 크리프시험결과와 각 크리프 손상재에 대한 초음파 감쇠측정결과를 각기 다른 탐촉자, 실험온도 및 응력에 대하여 나타낸 것으로, 크리프손상의 진행 즉, 크리프 손상

율과 초음파 감쇠와의 관계를 나타낸다.

Fig. 11은 종파 탐촉자 5, 10, 15MHz를 이용하여 크리프 실험온도 550℃, 크리프 응력 220MPa의 조건으로 크리프 중단 및 파단실험을 수행한 후, 크리프 중단 및 파단 손상재를 대상으로 크리프 손상에 따른 감쇠를 측정된 결과를 각각 나타낸 것이다.

Fig. 11에서 보면, 온도 및 응력에 관계없이 모두 크리프손상이 증가함에 따라 일정한 크기로 증가하는 경향을 나타내며 크리프손상을  $\phi_c=0.75$ 이하의 범위에서 탐촉자 주파수가 높을수록 감쇠증가 정도가 커짐을 알 수 있다. 감쇠는 크리프 전체 단계를 통하여 약 92%이내의 범위에서 변화하였다. 따라서 Fig. 11로부터 감쇠계수 측정에 의해 크리프 손상상태 평가가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 12는 종파 탐촉자 5, 10, 15MHz를 이용하여 크리프 실험온도 600℃, 크리프 응력 105MPa의 조건으로 크리프 중단 및 파단실험을 수행한 후, 크리프 중단 및 파단 손상재를 대상으로 크리프 손상에 따른 감쇠를 측정된 결과를 각각 나타낸 것이다. Fig. 12에서 보면, 온도 및 응력에 관계없이 모두 크리프손상이 증가함에 따라 일정한 크기로 증가하는 경향을 나타내며 크리프손상을  $\phi_c=0.75$ 이하의 범위에서 탐촉자 주파수가 높을수록 감쇠증가 정도가 커짐을 알 수 있다. 감쇠는 크리프 전체 단계를 통하여 약 92%이내의 범위에서 변화하였다. 따라서 Fig. 12로부터 감쇠계수 측정에 의해 크리프 손상상태 평가가 가능함을 알 수 있다.

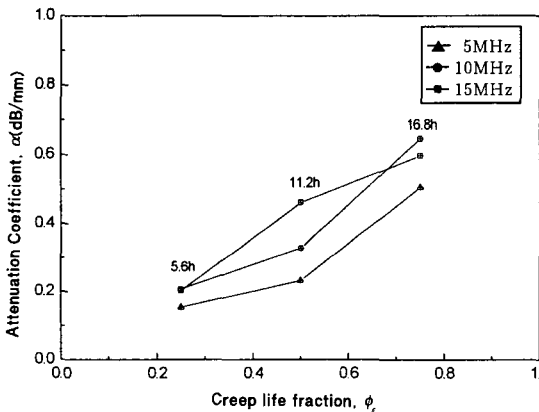


Fig. 11 Relationship of attenuation coefficient Vs. creep life fraction(creep test condition: 550℃, 220MPa, virgine material attenuation coefficient  $\alpha$ : 0. 1015 dB/mm)

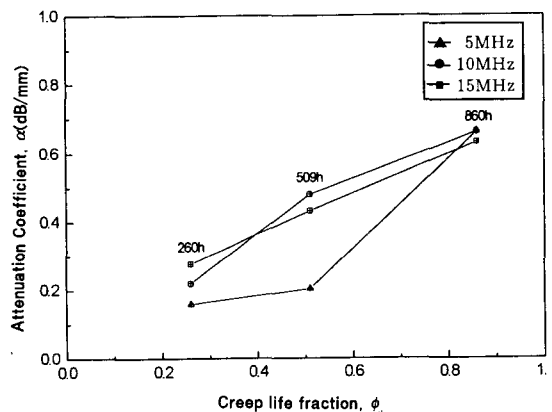


Fig. 12 Relationship of attenuation coefficient Vs. creep life fraction(creep test condition: 600℃, 105MPa, virgine material attenuation coefficient  $\alpha$ : 0. 1015 dB/mm)

Fig. 11과 Fig. 12에서 알 수 있는 바와 같이, 크리프손상 증가에 따른 감쇠증가 현상은 고온 및 고응력의 부하과정에 따른 크리프손상에 의해 재료내부에 발생하는 캐비티(cavity)의 형성, 크리프 미세변형(microstrain)에 의해 증가하는 것으로 해석된다. 또한 재료내부에 발생한 캐비티에 의해 재료의 불균질화 및 캐비티 경계면에서의 음향임피던스(acoustic impedance)차이로 기인한 산란현상으로 수신탐촉자에 수신되는 초음파 빔의 강도(beam intensity)가 송신 빔의 강도보다 크게 약화되어 생긴 현상[15-17]으로 생각할 수 있다.

그리고 주파수가 높고 초음파 빔의 파장(wave length)이 짧아짐에 따라 결합 탐지능력이 커짐을 알 수 있으며, 이로 인하여 고주파수 탐촉자실험에서 감쇠 정도를 크게 분리해 낼 수 있다. 따라서 높은 주파수대역의 탐촉자를 사용할수록 감쇠측정의 탐지능력은 향상되므로 이러한 특징을 이용할 필요가 있다.

## 5. 결 론

화력발전소 고온 후유배관인 주증기관, 파열기 헤더 및 스팀드럼 설비에서 발생하는 크리프 손상상태를 초음파측정에 의해 검출 및 평가하기 위하여, 이들 대상 설비 재료인 2.25Cr1Mo강을 대상으로 크리프인공열화실험과 초음파 신호평가 및 해석방법의 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 화력발전소 고온 배관재료와 동일한 재료를 발전소 보일러 운전조건을 모의한 크리프 인공열화실험을 수행하여 크리프파단 곡선을 도출할 수 있었으며, 이들 실험결과에 의해 크리프상태별 초음파신호 특성변화를 측정, 평가하기 위한 중단 및 파단 크리프 인공열화재 제작기술을 확보하였다.
- 2) 초음파 음속은 크리프 온도 및 응력, 탐촉자 주파수에 관계없이 크리프 손상이 증가함에 따라 일정한 크기로 밀도감소와 함께 감소한다. 크리프손상에 따른 밀도변화는  $10^{-1}$ 의 범위이며, 이 범위 이상에서 음속감소가 발생하였다. 밀도변화를 고려하면 음속측정에 의해 크리프 손상상태 평가가 가능함을 확인하였다.
- 3) 초음파 감쇠는 온도 및 응력에 관계없이 모두 크리프손상이 증가함에 따라 일정한 크기로 증가하는 경향을 나타내며, 크리프손상을  $\phi_c=0.75$ 이하의 범위

에서 탐촉자 주파수가 높을수록 감쇠증가 정도가 커짐을 알 수 있다. 감쇠계수 측정에 의해 크리프 손상상태 평가가 가능함을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] M. Matsubara and A. Nitta, "Theoretical study on creep damage detection by ultrasonic wave measurement", CRIEPI Report, T88014, pp. 4-6, (1988)
- [2] M. Matsubara and A. Nitta, "Study on application of ultrasonic wave measurement to creep-fatigue damage detection", CRIEPI Report, T87046, pp. 6-7, (1988)
- [3] M. Matsumoto et al., J. of JSNDI, Vol. 35, No. 2, pp. 140, (1985)
- [4] M. Nakashrio et al., TETSU-TO-HAGANE, Vol. 71, No. 13, pp. 237, (1985)
- [5] M. Nakashrio et al., TETSU-TO-HAGANE, Vol. 73, No. 13, pp. 147, (1987)
- [6] K. Kyo, 配管技術, pp. 134, (1987)
- [7] H. J. McSkimin, In Physical Acoustics, Vol. IA, W. P. Manson ed. (Academic Press, New York), pp. 27, (1964)
- [8] H. J. McSkimin & P. Andreatch, J. Acoust. Soc. Am., 34, pp. 609, (1962)
- [9] C. M. Fortunko, G. L. Peterson, "Absolute measurement of elastic-wave phase and group velocities in lossy materials", Rev. Sci. Instrum. 63(6), pp. 3481, (1992)
- [10] S. Ya 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関する非破壊的研究", 日本材料學會學術講演會前刷, pp. 247, (1986)
- [11] M. Okazaki, "超音波法を用いた高温構造材料の経年劣化損傷の非破壊的検出の試み", 日本機械學會講演論文集, No. 880-2, pp. 245, (1988)
- [12] M. Nakashrio 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)



- [13] Willems, H., "Characterization of creep damage by means of ultrasonic techniques", Int. Conf. Life Assessment and Extension Proc. Sess. 2, pp. 86, (1987)
- [14] A. B. Bhatia, Ultrasonic Absorption, Oxford, Clarendon Press, (1967)
- [15] S. Hirsekorn, J. Acoust. Soc. Am. 72, pp. 1021-1031, (1982)
- [16] S. Matsubara, Y. Yokono and T. Imanaka, "Diagnosis of material degradation by ultrasonic wave", J. of JSNDI, Vol. 46, No. 3, pp. 186-187, (1997)
- [17] H. Fukuhara, N. Shinya and J. Kyono, "detection of creep damage by ultrasonic wave", J. of JSNDI, Vol. 40, No. 7, pp. 452, (1991)