

## 초음파 음속 및 경도시험에 의한 발전소 고온배관재의 크리프 손상평가

허광범\* · 유근봉\* · 조용상\* · 이상국\*\*  
(99년 7월 19일 접수)

Creep Damage Evaluation of High-Temperature Pipeline in Power Plant  
by Using Ultrasonic Velocity Measurement and Hardness Test

Kwang-Beom Hur · Keun-Bong Yoo · Yong-Sang Cho · Sang-Guk Lee

**Key Words :** Creep(크리프), Creep Life Fraction(크리프 손상율), Ultrasonic Test(초음파시험), Hardness Test(경도시험), Sound Velocity(음속), High-Temperature Pipeline(고온배관)

### Abstract

High temperature and pressure materials in power plant are degraded by creep damage, if they are exposed to constant loads for long times, which occurs in load bearing structures of pressurized components operating at elevated temperatures. Many conventional measurement techniques such as replica method, electric resistance method, and hardness test method for measuring creep damage have been used. So far, the replica method is mainly used for the inspection of high temperature and pressure components. This technique is, however, restricted to applications at the surface of the testpieces and cannot be used to material inside. In this paper, ultrasonic evaluation for the detection of creep damage in the form of cavities on grain boundaries or intergranular microcracks were carried out. And the absolute measuring method of quantitative ultrasonic velocity technique for Cr-Mo material degradation was analyzed. As a result of ultrasonic tests for crept specimens, we founded that the sound velocity was decreased as increase of creep life fraction( $\phi_c$ ) and also, confirmed that hardness was decreased as increase of creep life fraction( $\phi_c$ ).

### 1. 서 론

발전소와 화학공장 같은 플랜트들은 진보된 기

술에 의한 확장과 기능상의 향상에 보조를 같이하기 위해서는 고온 고압설비 재료에 보다 긴 설계 수명을 요구하고 있다. 1960년대 이후 고경계성장

\* 한국전력공사 전력연구원  
\*\* 정회원, 한국전력공사 전력연구원

시대에 건설된 많은 발전소들은 100,000시간, 심지어 200,000시간까지 운전되어 왔으며, 최근에는 일일기동정지로 thermal cycle수가 증가되어 운전모드가 기저부하에서 중간부하로 변환되었기 때문에 과거 어느때보다 가혹한 상태로 운전되고 있다. 따라서, 이런 조건하에서 안전성 보장과 신뢰성 향상을 위해 사용수명과 구조물의 잔존수명을 정확히 예측하고자 하는 요구가 증대되고 있으며, 특히 구조물에 축적된 손상정도를 평가하는 비파괴적방법의 조기달성이 시급히 요구되고 있다. 이러한 배경에 따라, 본 연구에서는 초음파기술에 의한 비파괴적 크리프(creep) 손상평가 연구program을 개시하게 되었다. 크리프 손상의 특징은 재료의 사용수명을 소비하는 운전시간에 따라 지속적으로 축적되는 것이다. 크리프손상은 일반적으로 재료전체에 걸쳐서 발생되기 때문에 부분적 보수가 불가능하다. 이러한 배경에서 정확한 잔여수명예측이 요구된다<sup>1,2)</sup>.

또, 다른 난점은 피로손상과는 달리 크리프 손상은 언제나 표면에서만 발생하지 않으며, 또한 다양한 형태를 취하는 복잡한 현상이다<sup>3,4)</sup>. 그리고 크리프손상은 크리프변형, void나 cavity와 같은 미세한 결함 및 crack의 발생, 그리고  $\sigma$ 相 등의 석출에 의한 금속학적 구조상의 열화(degradation) 등으로 분류될 수 있으나, 실제로는 재질, 온도, 응력 및 시간 등의 상태에 따른 다양한 조합에 의해 발생하게 된다.

초음파 검사 기술은 내부손상을 탐지하는데 보다 효과적이며 검사범위가 넓으며 물리적 특성(탄성계수, 밀도, 프와송비) 변화에 아주 민감하기 때문에 적용성이 넓다. 게다가 기존의 기술들은 미세한 크랙이나 결함을 검출할 수 없었지만 음의 전파 특성의 변화를 적절히 평가할 수 있다면 초음파기술은 많은 미세크랙 및 결함검출에 적용할 수 있다. 크리프손상이 축적되고 있는 고온고압설비 재료의 건전성 및 잔여수명을 정량적으로 평가, 보증하기 위해서는, 결함의 종류나 재료의 크리프 손상정도를 조사하기 위한 정량적인 비파괴평가기술이 필요하다. 이러한 정량적 비파괴평가의 궁극적 목적은 재료 및 구조체의 안전성이나 잔여수명에 대

한 신뢰성이 있는 정보를 얻는 것이다. 재료나 구조물의 안전성과 잔여수명평가의 신뢰성은 그들의 파괴조건이나 사용조건에 판정이 가능하고, 재질이나 결함에 관한 정보가 정량적인지에 크게 의존한다. 그러한 정량성에 있어서, 각종의 비파괴검사법 중에서 초음파법이 정보량이 풍부하고 정량성 및 분해능이라는 점에서 현재로서는 가장 잠재력이 높다<sup>5)</sup>.

또한, 초음파는 음파물성론에 기초하여 음파와 결함과의 상호작용 및 미세조직과의 상호작용을 수학적으로 모델링하여, 음파의 산란현상 및 흡수현상의 기본적인 메카니즘을 통하여 결함, 미세조직의 기하학적인 형상, 크기와 그 분산을 해석적, 수치적으로 구함으로써, 명료하게 그 재료의 상태를 알아 낼 수가 있어 다른 비파괴방법에 비해 기술적 신뢰도면에서 우수한 방법이다<sup>3-6)</sup>.

고온·고압환경중에 사용되는 화력발전설비 재료에 적용되는 각종 비파괴 또는 준비파괴적 크리프 및 열피로손상 측정기술들은 각종 방법들이 적용되고 있으나 수명예측기술과 관련하여 명확히 제시할만한 방법이 없어 각종 측정기술들은 상호 보완하여 해석 및 평가하고 있는 실정이다. 그리고 현재까지 적용되는 방법들은 측정시간, 기술적문제, 경제성 등의 면에서 신뢰성이 낮기 때문에 이들 단점을 보완할 수 있는 신기술이 도입되어야 한다. 따라서 이러한 배경에서 수행한 초음파측정기술의 결과를 검증하기 위해 현재까지 크리프 손상 측정에 이용되고 있는 주요 경년열화 측정법중 기술적 신뢰도면에서 우수하며 실용화 가능성이 높지만 측정 및 해석이 어려운 경도법에 의한 방법과 비교분석하여 이들 방법과의 상관관계를 확보하고자 하였다.

## 2. 크리프 실험방법

### 2.1 시험편

크리프손상 상태에 따른 초음파 신호측정을 위한 크리프 열화재의 시편확보 목적으로 크리프 인공열화 실험을 수행하였으며, 실기부재에서 사용기



들 초음파 및 경도측정 데이터를 비교분석하여 크리프 손상상태를 비파괴적으로 평가하였다.

음속측정은 수신된 RF burst신호의 첫 번째 신호(제1저면에코)와 두 번째 신호(제2저면에코)간의 위상각(phase angle) 및 위상(phase)으로부터 계산된 절대시간측정(absolute time measurement) 기능을 이용하여 측정하였다. 그리고 모든 초음파 측정은 시험편 평행부의 두께방향으로 검사되었다.

초음파실험에 사용된 RAM 시스템은 위상 및 위상각도 탐지(quadrature phase sensitive detection)와 게이트신호 적분(gated analog integrators)의 신호처리 기능을 가진 두 개의 수신회로는 진폭과 위상각으로부터 계산할 수 있는 신호의 두가지 직각 벡터 성분을 만들어낸다. 또한 이러한 종류의 탐지는 신호가 작을 때 최대의 직선성을 유지하는 이점이 있으며, 신호 평균화 기법은 노이즈로부터 신호를 회복하는데 있다. 따라서 측정하고자 하는 초음파신호의 각각은 Fig. 3에서와 같이 주어진 수신된 RF신호에 대하여 위상각 0° 및 90°의 방향으로 분리 측정하게 되며, 이들 신호의 위상에 대한 주파수와의 기울기(slope)로부터 초음파 전파시간(acoustic time of flight) 및 지연시간(delay time)을 포함한 총 도달시간(acoustic transit time)이 다음의 (1)식으로부터 계산되었다<sup>7-9)</sup>

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

여기서,  $\Delta \phi_r$  = 위상 변화량(radians)  
 $\Delta F$  = 주파수 변화량(MHz)

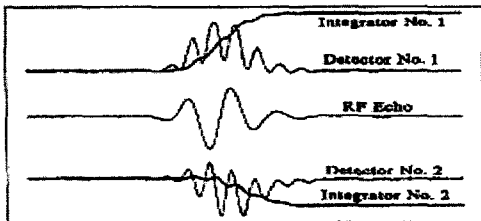


Fig. 3 Receiving and intergrating process versus phase angle of RF signal

따라서, 음속(v)은 다음 식으로 계산하였다.

$$v = \frac{B}{\Delta T} \quad (2)$$

여기서,  $\Delta T$  = 두 신호간의 전파시간  
 (absolute time of flight)  
 $B$  = 시험편 두께

경도측정은 비커스 경도계를 사용하였으며 시험편 1개에 대한 경도값은 10개의 값을 평균화한 것으로 취하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 크리프손상과 초음파 속도와의 관계검토

일반적으로 재료에서는 격자결합이 반드시 존재하기 때문에 속도분산이 있으며, 그것에 의해 음속이 주파수에 의해 변화하기 때문에 전파거리가 길어짐과 함께 펄스폭이 넓어지고 형상이 쇠퇴해져 간다. 이와같은 경우에는 위상속도를 이용할 필요가 있다. 재료가 열화한 경우, 기공(void)의 발생이나 석출, 편석 등에 의해 재료의 미세조직에 불균일성이 생겨, 음속의 주파수의존성이 커지게 된다. 따라서, 재료평가에는 음속의 위상속도에 대한 주파수 의존성에 착안하는 것이 중요하다.

관측된 어떤 펄스반사파를  $b_1(t)$ 라 하면, 다음의 펄스반사파  $b_2(t)$ 는 다음의 식으로 표시된다.

$$b_2(t) = e^{-ax} b_1(t-t_0) \quad (3)$$

여기서,  $x$ 는 전파거리,  $a$ 는 감쇠계수이다.  $b_2(t)$ 는 Fourier변환,  $B_2(\omega)$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$B_2(\omega) = e^{-ax} \cdot e^{-j\omega t_0} \cdot B_1(\omega) \quad (4)$$

여기서, 전파시간  $t_0$ 에 있어서 주파수영역으로의 표시는 다음식으로 주어지고, 전파시간은 주파수영역에서 두 번째 반사파의 위상차에 대응하고 있는 것으로 된다.

$$t_0 = \frac{\arg[H(\omega)]}{\omega} \quad (5)$$

위의 식으로부터 위상속도가 계산된다. 또한 일반적으로 감쇠계수도 주파수의존성이 있어, 위의 식의  $H(\omega)$ 를 이용하여 다음식으로 주어진다.

$$\alpha(\omega) = -\frac{20}{x} \log [H(\omega)] \quad (6)$$

그리고 초음파 속도에 대한 기공의 영향을 살펴 보면, 초음파 산란이론을 이용하여 여러명의 연구자들에 의하여 취급되어 왔다. 등방성모체 (isotropic matrix)에 구형기공이 있다고 가정하면 다음과 같은 선형관계식을 얻을 수 있다.

$d_p/\lambda \ll 1$ 이고 기공밀도  $C_p$ (pore concentration: volume fraction)가  $c_p \leq 5\%$ 인 범위에서,  $V_L$ 과  $V_T$ 는 아래의 식으로 주어진다.

$$V_L = V_L^0(1 - K_L \cdot c_p) \quad (7)$$

$$V_T = V_T^0(1 - K_T \cdot c_p) \quad (8)$$

여기서,  $d_p$ 는 기공의 직경,  $\lambda$ 는 초음파의 파장이다.

$V_L, V_T$  및  $V_L^0, V_T^0$ 는 각각 기공을 가질 때와 가지고 있지 않을 때의 초음파의 속도,  $K_L, K_T$ 는  $V_L^0 / V_T^0$ 의 비에 의존하는 상수이다. 그리고 일반적으로 강(steel)에 있어서는  $V_L^0 / V_T^0 = 1.84, K_T = 0.44, K_L = 0.655$ 이다.

그리고 (정적)탄성계수와 밀도에 관한 기공의 영향을 포함한 다음 식을 사용함으로써 위의 식(7), (8)과 유사한 값을 계산할 수 있다.

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (9)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (10)$$

$$\rho = \rho_0(1 - c_p) \quad (11)$$

여기서, G: 전단계수  
E: 탄성계수  
 $\rho$ : 밀도  
 $\mu$ : 프와송비

Fig. 4는 크리프 손상의 진행에 따른 초음파 음속 변화를 이론적으로 예측할 수 있는 크리프 기공의 성장과 탄성계수 변화에 대한 이론적 모델을 나타내었다.

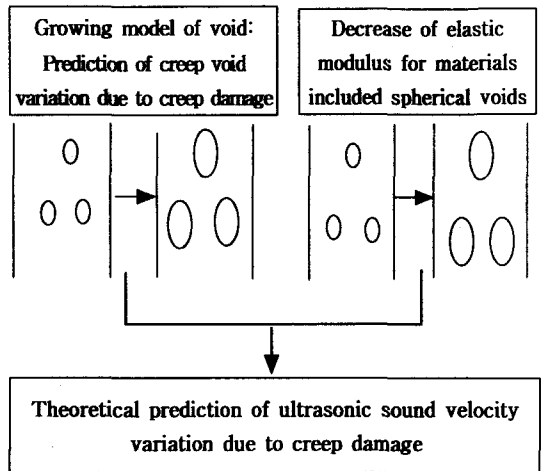


Fig. 4 Relationship between ultrasonic sound velocity and creep damage

#### 4.2 음속측정결과

##### 4.2.1 크리프손상에 따른 초음파 음속측정결과

Fig. 5와 Fig. 6은 2.25Cr1Mo강에 대하여 크리프 시험결과와 각 크리프 손상재에 대한 초음파 음속 측정결과를 자기 다른 탐촉자, 실험온도 및 응력에 대하여 나타낸 것으로, 크리프 손상율과 초음파 음속과의 관계를 밀도변화와 함께 나타낸다.

크리프 손상재의 초음파 속도변화는 재료의 밀도변화에 크게 영향을 받기 때문에 이의 관계를 측정하였고 이러한 밀도변화는 재료열화에 따른 캐비티, 미세균열등의 조직 변화임이 조직관찰로 확인되었다.

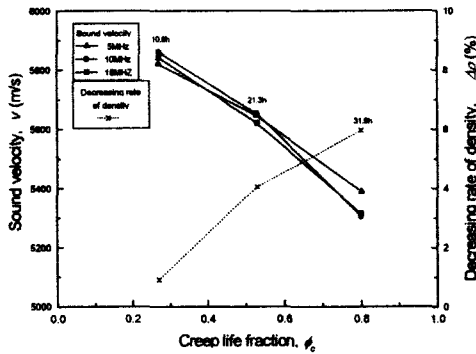


Fig. 5 Relationship of sound and density vs. creep life fraction(creep condition:500°C, 340MPa, virgin material sound velocity  $v = 5,944\text{m/s}$ )

Fig. 5는 초음파 광대역 종파 탐촉자 5, 10, 15MHz를 이용하여 크리프 실험온도 500°C, 크리프 응력 340MPa의 조건으로 크리프 중단 및 파단실험을 수행한 후, 이들 크리프 중단 및 파단 손상재를 대상으로 크리프 손상에 따른 음속을 측정된 결과를 각각 나타낸 것이다. Fig. 5에서보면, 크리프 온도 및 응력, 탐촉자 주파수에 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. 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<sup>10-13</sup>.

Fig. 6은 초음파 광대역 종파 탐촉자 5, 10, 15MHz를 이용하여 크리프 실험온도 600°C, 크리프 응력 105MPa의 조건으로 크리프 중단 및 파단실험을 수행한 후, 크리프 손상재를 대상으로 크리프 손상에 따른 음속을 측정된 결과를 각각 나타낸 것이다. Fig. 5에서와 같이, 크리프온도 및 응력, 탐촉자 주파수에 관계없이 크리프손상이 증가함에 따라 일

정한 크기로 감소함을 알 수 있다. 크리프손상에 따른 밀도변화는  $10^{-1}$ 의 범위이며, 이 범위 이상에서 음속감소가 발생하였으며, 음속은 크리프 전체 단계를 통하여 약 11.7%이내의 범위에서 변화하였다. Fig.6으로부터 밀도변화를 고려하면 음속측정에 의해 크리프 손상상태 평가가 가능함을 알 수 있다.

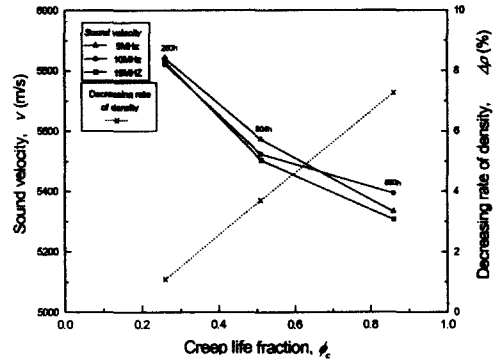


Fig. 6 Relationship of sound velocity and density vs. creep life fraction(creep test condition: 600°C, 105MPa, virgin material sound velocity  $v = 5,944\text{m/s}$ )

Fig. 5와 Fig. 6에서 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<sup>14,15</sup>에 의해, 그리고 크리프 손상을  $\phi_c=0.5$  이상에서는 크리프손상 증가에 의한 캐비티 발생으로 재료의 밀도가 감소하고, 이와함께 종파의 속도변화에 영향을 주는 탄성계수(modulus of elasticity)가 감소하여 생긴 결과로 해석된다.

#### 4.2.2 크리프 손상상태별 경도측정 결과

Fig. 7은 2.25Cr1Mo강 크리프손상재를 대상으로 비커스(Vickers) 경도기를 이용하여 측정된 경도(경도감소량) 측정결과와 크리프손상율과의 관계를 비교분석한 것으로, 각각 서로 다른 크리프 온도 및 응력에 따라 실험한 결과를 나타낸다. 그림에서

와 같이, 경도감소율  $\Delta V$ 는 크리프손상율의 증가에 따라 직선적으로 증가하는 좋은 상관관계를 나타낸다.

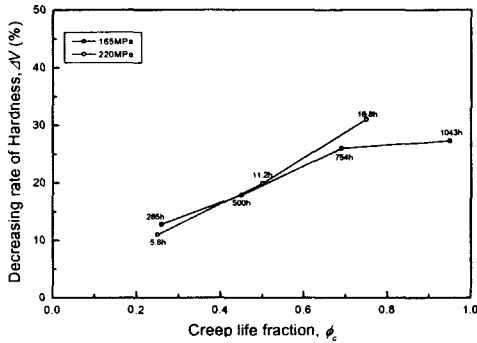


Fig. 7 Relationship of between creep life fraction and hardness (2.25Cr1Mo, creep temperature : 550 °C)

이들 결과를 이용하면, 경도감소량과 크리프손상과의 관계로부터 크리프손상량을 추정할 수 있다.

#### 4.3. 크리프손상재의 경도측정결과와 초음파 특성과의 비교

Fig. 8은 2.25Cr1Mo강 크리프손상재를 대상으로 비커스(Vickers) 경도기를 이용하여 측정된 경도(경도감소량) 측정결과와 크리프손상율과의 관계를 초음파 음속 측정결과와 비교분석한 것으로, 각각 서로 다른 크리프 온도 및 응력으로 실험한 결과를 나타낸다. 그리고 초음파측정에 있어서는 초음파 광대역 중파 탐촉자 5, 10, 15MHz를 각각 이용하였으며, 경도값은 비커스 경도값을 이용한 결과이다.

크리프손상에 따른 경도 변화상태와 초음파특성을 측정된 결과, 시험온도 및 응력, 탐촉자 주파수에 관계없이 크리프손상이 증가함에 따라 경도감소량은 거의 일정하게 증가하였으며 경도감소율의 증가에 따라 초음파 음속은 감소하는 현상을 나타내었다.

이러한 음속 및 경도감소 현상은, 크리프손상의

증가에 따라 재료내부의 탄화물 석출(carbides precipitation)에 의한 연화(softening), 캐비티(cavity)의 발생 및 미세균열(microcrack) 등이 발생하여, 밀도감소에 의해 음속이 일정한 크기로 감소되며 이와함께 경도가 감소하는 것으로 해석할 수 있다. 이들 결과를 이용하면, 현장에서 측정된 경도데이터와 초음파 데이터에 의해 크리프 손상 정도를 비교분석할 수 있다.

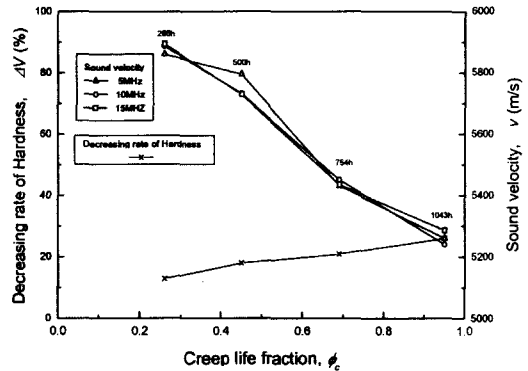


Fig. 8 Relationship of between hardness and ultrasonic velocity (2.25Cr1Mo, creep condition : 550 °C, 165MPa)

## 5. 결 론

발전소 고온배관 재료에서 많이 발생하는 입계상의 기공이나 미소크랙의 형태를 가진 크리프 손상에 대한 초음파 및 경도 측정 연구를 수행한 결과로서, 고온배관 재료인 2.25Cr1Mo강의 인공 열화재를 대상으로 이들에 대한 크리프 손상 단계별 초음파 음속 및 경도 측정연구를 통한 비파괴 특성 연구결과를 통하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파 음속은 크리프 온도 및 응력, 탐촉자 주파수에 관계없이 크리프 손상이 증가함에 따라 일정한 크기로 밀도감소와 함께 감소하며, 밀도 변화를 고려하면 음속측정에 의해 크리프 손상 상태 평가가 가능함을 확인하였다.
- 2) 크리프손상이 증가함에 따라 경도감소율은 거의 일정하게 증가하였으며 경도감소율의 증가

에 따라 초음파 음속은 감소하는 현상으로부터 경도 및 음속측정을 통해 크리프손상상태의 평가가 가능함을 확인하였다.

### 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 Report, 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-HAGA-NE, Vol.71, No.13, pp.237, 1985
- 5) Nakashrio, M. et al., TETSU-TO-HAGA-NE, Vol.73, No.13, pp.147, 1987
- 6) Kyo, K., 配管技術, pp.134, 1987
- 7) McSkimin, H. J., In Physical Acoustics, Vol.IA, W. P. Manson ed. (Academic Press, New York), pp.27, 1964
- 8) McSkimin, H. J., and P. Andreatch, J. Acoust. Soc. Am., 34, pp.609, 1962
- 9) Fortunko, C. M., G. L. Peterson, "Absolute Measurement of Elastic-wave Phase and Group Velocities in Lossy Materials", Rev. Sci. Instrum. 63(6), pp.3481, 1992
- 10) 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価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) Okazaki, M., "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) Nakashrio, M. et al., "超音波特性によるクリープ損傷評価", 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) Bhatia, A. B., Ultrasonic Absorption, Oxford, Clarendon Press, 1967
- 15) Hirsekorn, S., J. Acoust. Soc. Am. 72, pp.1021-1031, 1982