

2.25Cr1Mo강의 크리프 손상에 대한 초음파 시험평가

허광범* · 이인철* · 정계조* · 조용상* · 이상국* · 김재훈**

Ultrasonic Evaluation for the Creep Damage of 2.25Cr1Mo Steel

Kwang-Beom Hur, In-cheol Lee, Gye-jo Gung, Yong-sang Cho, Sang-Guk Lee, Jae-hoon Kim

Key Words: creep, creep life fraction, ultrasonic test, power plant, sound velocity

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 the 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 are carried out. And the absolute measuring method of quantitative ultrasonic velocity technique for Cr-Mo material degradation is analyzed. As a result of ultrasonic tests for crept specimens, we find that the sound velocity is decreased as the increase of creep life fraction(ϕ_c) and also, confirmed that hardness is decreased as the increase of creep life fraction(ϕ_c), but the coefficient of ultrasonic attenuation is increased as the increase of creep life fraction(ϕ_c). Finally based on the result in this paper, it can be recognized that the ultrasonic techniques using velocities and attenuation coefficient factor are very useful non-destructive methods to evaluate the degree of material degradation in fossile power plants.

1. 서론

크리프손상은 크리프변형, 기공과 공동과 같은 미세한 결함 및 크랙의 발생, 그리고 σ 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 전파특성의 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 잔여

* 한국전력공사 전력연구원
** 충남대학교 공대 기계설계공학과

수명에 대한 신뢰성이 있는 정보를 얻는 것이다. 재료나 구조물의 안전성과 잔여수명평가의 신뢰성은 그들의 파괴조건이나 사용조건을 판정가능하고, 재질이나 결함에 관한 정보가 정량적인지에 크게 의존한다. 그러한 정량성에 있어서, 각종의 비파괴검사법 중에서 초음파법이 정보량이 풍부하고 정량성 및 분해능이라는 점에서 현재로서는 가장 잠재력이 높다[2].

크리프 손상재의 초음파 특성은, 탐촉자로 되돌아온 초음파 빔의 음속과 강도(*beam intensity*)가 고온, 고압의 사용조건에서 발생한 재료내부의 개재물이나 불순물 등으로 인한 초음파의 산란, 흡수와 전위밀도, 결정립의 형상 또는 2차상의 석출 등의 급속조직적 변화와 대응하고 있어, 초음파 음속 및 감쇠율(감쇠계수)에 변화를 주게된다. 따라서, 비파괴적 초음파 특성의 변화를 실험으로 규명하기 위하여 실제 발전소의 사용 응력과 가열온도를 기초로 하여 결정된 시험조건으로 크리프 열화를 부여하여 재료열화에 대한 초음파 시험 특성을 아래의 세가지 방향으로 분석하고자 한다.

- 크리프손상에 따른 초음파 음속 및 밀도 측정
- 크리프손상 상태별 경도 측정
- 크리프손상재의 경도측정 결과와 초음파 음속 특성의 비교

Table 1.1 Principal study and test contents[1]

Creep stage	Creep damage morphology	Ultrasonic parameter
Primary creep	• Structural change	Ultrasonic - velocity: decrease - attenuation: increase
Secondary creep	• Creep void	"
Tertiary creep	• Microcrack, Macrocrack • Cavity, microcrack and macrocrack	"

2. 크리프 실험방법

2.1. 시험편

크리프손상 상태에 따른 초음파 신호측정을 위

한 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 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. Fig. 1은 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

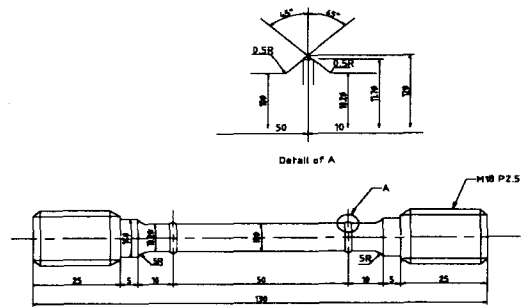


Fig. 1 Geometry of creep specimen (ASTM E139-83)

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 온도분포가 균일하게 유지되도록 설정온도에서 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켜 실험중 온도를 일정온도에서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 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 이틀로부터 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 크리

프 파단실험의 결과를 기초로 하여 크리프파단수명의 1/4, 1/2, 3/4의 시점에서 각각 실험을 중단시켰다.

3. 초음파 측정장비 및 측정방법

3.1. 초음파 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 10Hz의 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 5kW으로 실험에 맞는 송신출력을 제공하기 위하여 송신신호의 출력을 적절히 가감할 수 있도록 감쇠기(attenuater)가 연결되어 있으며, Low/High Pass Filter를 이용하여 원하는 주파수대역을 선택할 수 있도록 하였고 Signal Sampler를 통하여 수신신호를 주어진 채널로 수신되도록 되어 있다. 실험에 사용된 초음파 실험장치 구성도를 Fig. 2에 나타낸다.

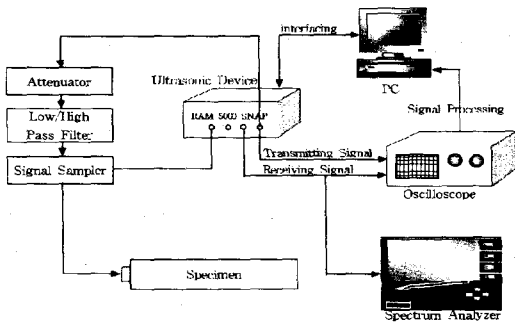


Fig. 2 Schematic diagram of high power ultrasonic test

3.2. 초음파 음속 및 경도 측정방법

본 논문에서는 초음파 변수중 음속측정에 의해 크리프 손상상태를 측정 및 평가 하였으며, 또한, 이들, 초음파 데이터나, 경도측정 데이터를 비교 분석하여 크리프 손상상태를 비파괴적으로 평가

하고자 하였다. 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.

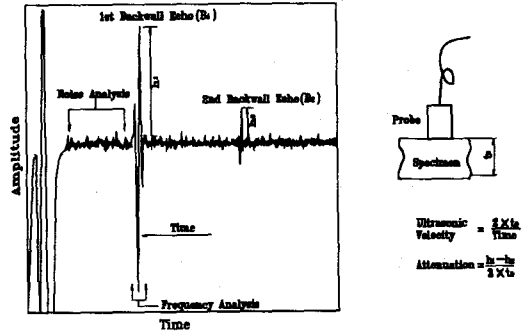


Fig. 3 Echo signals for ultrasonic attenuation measurement

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 때도 최대의 직선성을 유지하는 이점이 있으며, 신호 평균화 기법은 노이즈로부터 신호를 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 주파수와 기울기(slope)로부터 초음파 전파시간(acoustic time of flight) 및 지연시간(delay time)를 포함한 총 도달시간(acoustic transit time)을 다음의 (1)식으로부터 계산되었다.[4,5]

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

여기서, $\Delta \Phi_r$ = 위상 변화량(Radians)

ΔF = 주파수 변화량(MHz)

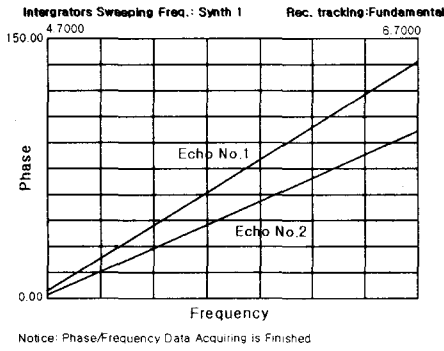


Fig.4 Absolute time measurement of two echos

따라서 음속(v)은 다음 식으로 계산하였다.

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

여기서, ΔT = 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 격자결함이 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, void의 발생이나 석출, 편석 등에 의해 재료의 미세조직에 불균일성이 생겨, 음속의 주파수의존성이 커지게 된다. 따라서, 재료평가에는 음속의 위상속도에 대한 주파수 의존성에 착안하는 것이 중요하다.[3]

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

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

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

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

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, 식의 $H(\omega)$ 를 이용하여 다음식으로 주어진다.

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

그리고 초음파 속도에 대한 porosity의 영향을 살펴보면, 초음파 산란이론을 이용하여 여러명의 연구자들에 의하여 취급되어 왔다. 등방성모체(isotropic matrix)에 구형기공이 있다고 가정하면 다음과 같은 선형관계식을 얻을 수 있다.[3]

$d_p/\lambda \ll 1$ 이고 기공밀도(pore concentration: volume fraction)가 $c_p \leq 5\%$ 인 범위에서, V_L 과 V_T 은 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, λ 는 초음파의 파장이 다.

V_L, V_T 및 V_L^0, V_T^0 는 각각 porosity를 가지고 있고, 가지고 있지 않은 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 porosity의 영향을 포함한 다음 식을 사용함으로써 위의 식 (7), (8)와 유사한 값을 계산할 수 있다.

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

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

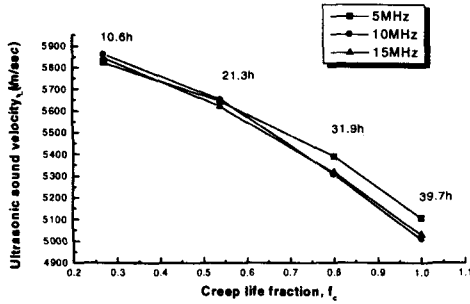
그리고, $\rho = \rho_0(1 - c_p)$ (11)

- 여기서, G: 전단계수
- E: Young's 계수
- ρ : 밀도
- μ : Poisson's ratio

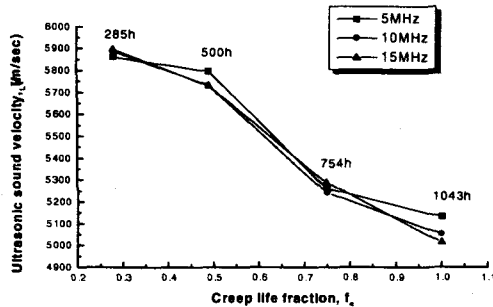
4.2. 초음파 음속 측정결과

4.2.1 크리프손상에 따른 초음파 음속측정결과

Fig. 5는 초음파 광대역 중파 탐촉자 5, 10, 15 MHz를 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 측정한 결과를 각각 나타낸 것이다. 크리프 온도 및 응력, 탐촉자 주파수에 관계없이 크리프손상이 증가함에 따라 일정한 크기로 감소함을 알 수 있다.



(a) Creep condition (T=500 °C, σ =340MPa)

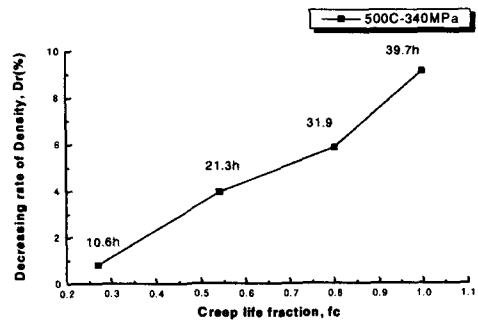


(b) Creep condition (T=550 °C, σ =165MPa)

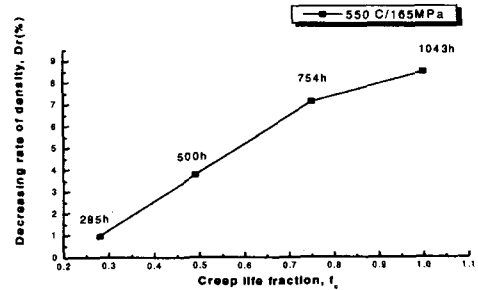
Fig. 5 Relationships of ultrasonic sound velocity vs. creep life fraction

4.2.2 크리프손상의 밀도측정결과

크리프손상에 따른 밀도변화는 10^{-1} 의 범위이며, 이 범위 이상에서 음속감소가 발생하였으며, 음속은 크리프 전체 단계를 통하여 약 10%이내의 범위에서 변화하였다. 이러한 음속변화는 초음파 중파의 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.



(a) Creep condition (T=500 °C, σ =340MPa)



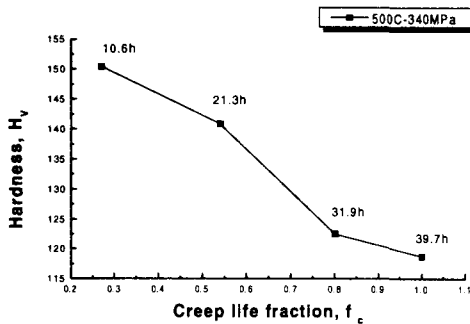
(b) Creep condition (T=550 °C, σ =165MPa)

Fig. 4 Relationships of density vs. creep life fraction

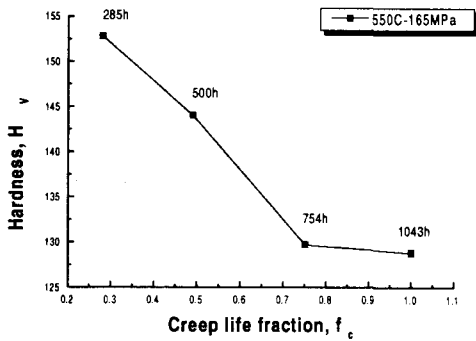
Fig. 5와 Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이, 크리프손상의 증가에 따른 음속감소 현상은 크리프 중단 및 파단재의 조직관찰로부터 크리프 손상을 $\phi_c=0.5$ 미만인 경우 주로 고온크리프에서 가장 특징적인 조직변화인 결정립내의 부결정립

(subgrain) 및 이들 입계의 다수 형성[4]에 의해, 그리고 크리프 손상을 $\phi_c=0.5$ 이상에서는 크리프 손상 증가에 의한 캐비티 발생으로 재료의 밀도가 감소하고, 이와함께 중파의 속도변화에 영향을 주는 탄성계수(Youngs modulus of elasticity)가 감소하여 생긴 결과로 해석된다.

4.2.3 크리프 손상상태별 경도측정 결과



(a) Creep condition ($T=500\text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma=340\text{MPa}$)



(b) Creep condition ($T=550\text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma=165\text{MPa}$)

Fig. 7 Relationships of between creep life fraction and hardness

Fig. 7은 2.25Cr1Mo강 크리프손상재를 대상으로 비커스(Vickers) 경도기를 이용하여 측정한 경도(경도감소량) 측정결과와 크리프손상율과의 관계를 비교분석한 것으로, 각각 서로 다른 크리프 온도 및 응력에 따라 실험한 결과를 나타낸다. 그림에서와 같이, 경도감소율 ΔV 는 크리프손상율의 증가에 따라 직선적으로 증가하는 좋은 상관관계를 나타낸다.

이들 결과를 이용하면, 경도감소량과 크리프손

상과의 관계로부터 크리프손상량을 추정할 수 있다.

5. 결 론

발전소 고온배관 재료에서 많이 발생하는 입계상의 기공이나 미소크랙의 형태를 가진 크리프 손상에 대한 초음파 측정 연구를 수행한 결과로서, 대상설비 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, 밀도변화를 고려하면 음속측정에 의해 크리프 손상상태 평가가 가능함을 확인하였다.

2) 시험온도 및 응력, 탐촉자 주파수에 관계없이 크리프손상이 증가함에 따라 경도감소율은 거의 일정하게 증가하였으며 경도감소율의 증가에 따라 초음파 음속은 감소하는 현상으로부터 경도 및 음속측정을 통해 크리프손상상태의 평가가 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. M. Matsubara and A. Nita, 1988, "Theoretical Study on Creep Damage Detection by Ultrasonic Wave Measurement", CRIEPI Report, T88014, pp.4-6
2. M. Matsubara and A. Nita, 1988, "Study on Application of Ultrasonic Wave Measurement to Creep-fatigue Damage Detection", CRIEPI Report, T87046, pp.6-7
3. M. Matsumoto, 1985, "Nondestructive Evaluation of Creep Damage", Journal. of NDI, Vol.35, No.2, pp.140
4. H. Stamm, 1992, "An Overview of the Ultrasonic Detection of Creep Damage", European Journal of NDT, Vol. 1. No.2, pp. 169-178