

크리프 기공의 초음파 비파괴평가에 관한 연구 Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Creep-Induced Cavities

장영수*, 정현조**

Young-Su Jang* and Hyunjo Jeong**

초 록 크리프 손상을 단계적으로 받은 순수 구리 시편에 대하여 손상 진전에 따른 기공의 미시구조 변화를 관찰하고 초음파 속도와 주파수 의존 진폭 스펙트럼 및 감쇠를 측정하였다. 손상 진전에 따른 입계기공의 비등방적 성장으로 인하여 하중축에 대하여 세 방향으로 측정된 속도는 이방성 거동을 보였다. 최대 2%의 기공에 대하여 종파와 횡파는 각각 11%와 4%의 속도 감소를 보였으며, 기공량의 증가와 함께 비선형적인 감소 경향을 보였다. 진폭 스펙트럼은 기공량이 증가함에 따라 고주파수 성분이 감소하고 중심 주파수가 저주파수로 이동하였으며, 감쇠는 사용 주파수 범위에서 거의 선형적인 거동을 보였다. 기공량의 정량적 비파괴평가 파라미터로서 정규화 속도, 진폭 스펙트럼의 중심 주파수, 감쇠 기울기를 선정하였으며 기공량과의 상관관계를 제시하였다.

Abstract In order to ultrasonically evaluate creep cavities pure copper samples were subjected to creep test and their microstructures were examined. Ultrasonic velocities, frequency-dependent magnitude spectra and attenuations were measured on a series of copper samples obtained from the different stages of creep test. Velocities measured in three directions with respect to the loading axis decreased and their anisotropy increased as a function of the creep-induced porosity. The anisotropic behavior could be attributed to the progressive change of pore shape and preferred orientation as the creep advanced. The 2% porosity by volume decreased the longitudinal and shear wave velocities by 11% and 4%, respectively. Furthermore, both velocities decreased nonlinearly with the porosity. As the creep damage developed, the magnitude spectra lost high frequency components and their central frequencies shifted to lower values. The attenuation showed almost linear behavior in the frequency range used. Normalized velocity, central frequency shift and attenuation slope were selected as nondestructive evaluation parameters. These results were presented and showed good relations with the porosity content.

1. 서 론

화력발전 설비와 같이 고온에서 장시간 하중을 받으며 가동되는 부품의 수명은 크리프 손상에 의해 제한된다. 크리프는 고온에서 하중을 받아 시간의 경과와 함께 변형률이 누적되어 가는 손상으로 기공의 발생, 합체를 거쳐 미소 균열이 발생하고 그것이 성장해 파손, 파괴에 이르는 과정을 밟는다. 또한 탄화물이나 석출물

의 석출 거동과 관련된 재질 연화도 진행되어 재료의 강도 저하를 유발시키기도 한다.

크리프 손상은 기공의 발생, 성장, 합체의 과정으로 진행하므로 기공을 관측하므로써 크리프 손상을 직접 평가할 수 있다. A변수(A parameter)법(1,2)은 관찰한 결정입계 총 수에 대한 기공 발생 입계 수의 비를 구하고 수명 소비율과의 상관관계로부터 크리프 손상량을 구하게 된다. 그 밖에도 크리프 기공 면적율(3,4)

및 면밀도법[5]이 제안되었다. 손상의 진행에 따른 열화와 미소결합의 발생에 의해 전기적 및 전기화학적으로 특성변화가 일어나는 것에 착안하여 전기저항법[6], 와전류법과 분극법[7] 등이 제안되었다.

초음파는 침투력이 우수하므로 재료성질과 미세적 손상 평가에 대한 잠재력을 지니고 있다. 최근에 체적적인 크리프 손상 탐지를 위한 초음파 시험 결과가 보고되고 있다. Willems 등[8]과 Birring[9]은 서로 다른 정도의 크리프 손상을 받은 시편에 대하여 측정된 초음파 속도는 손상 등급 (또는 크리프 변형률)이 증가할수록 감소함을 보였다. Hirsekorn[10]은 크리프 손상을 받은 페라이트 철에서 초음파 속도는 기공의 체적률이 증가할수록 감소하며, 일정한 체적률에서 초음파의 파장이 짧아질수록 서서히 감소함을 보였다. 이러한 연구들에서는 크리프 시간의 증가에 따른 기공의 미시구조 특성 변화와 그로 인한 속도 감소 및 이방성을 설명하지 않고 있다. 또한 기공에 의한 주파수 의존 감쇠를 고려하지 않았다.

본 연구에서는 크리프 손상을 단계적으로 받은 순수 구리 시편에 대하여 주요 손상 기구인 기공을 식별하고 이에 민감한 초음파 파라미터를 선정한다. 여기에 사용된 측정 파라미터는 초음파의 속도, 신호의 주파수 의존 진폭 스펙트럼 및 감쇠이다. 손상의 진전 또는 기공량의 증가에 따른 기공의 미시구조 변화에 의해 나타나는 속도의 이방성과 속도 감소의 비선형 거동을 고찰한다. 기공량 평가 및 크리프 수명 소비율 (또는 잔여수명)을 비파괴적으로 평가하기 위한 초음파 파라미터로서 정규화 속도, 진폭 스펙트럼의 중심 주파수, 감쇠 기울기를 선정하고 이들 파라미터와 기공량과의 상관관계를 제시한다.

2. 실험

2.1. 시편

시험된 재료는 질량 퍼센트로 99.95의 순도를 갖는 구리이다. 크리프 시편은 두께 20mm의 압연된 판재로 가공되었다. 판재는 가공하기 전에 3시간 동안 크리프 온도보다 높은 800℃에서 풀림 열처리를 하였다. 크리프 시험 전에 20시간 동안 550℃에서 추가로 풀림 열처리를 하였다. 시편의 형상과 0-x₁x₂x₃ 좌표계가 Fig. 1에 나와 있다. x₁ 방향은 원래 판재의 두께 방향이고 x₂는 롤링 방향이다. 파단시간을 알기 위해서 8개의 시

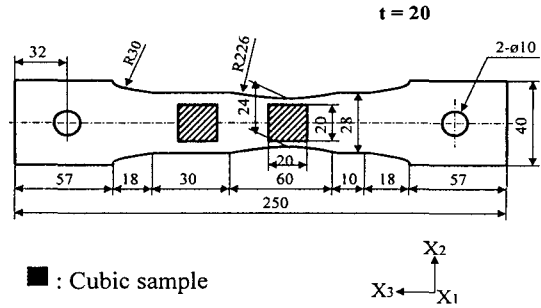


Fig. 1 Specimen geometry and sample coordinate system 0-x₁x₂x₃

편이 사용되었으며 4개는 500℃, 다른 4개는 550℃에서 크리프 파단되었다. 수직하중은 최소단면에서 6.0MPa이다. 시험 온도는 2℃이내로 유지되었다. 즉, 시편 내부의 위치에 따른 온도 변화는 2℃보다 작다. 크리프 시험 조건과 파단 시간을 Table 1에 나타내었다. 평균 파단시간 t_r은 500℃에서 597.8이고, 550℃에서 270.8이었다. 파단된 시편의 신장은 상온에서 꽤 높은 연성임에도 불구하고 무시할 수 있었다. 현저한 조짐없이 취성파괴가 발생하였으며, 그 위치는 최소 단면의 10mm 이내였다.

밀도와 속도는 파단 시험과 동일한 조건하에서 실시된 중단 시험을 통하여 측정하였다. t_r에 대한 상대적인 값으로서 11개의 중단 시간을 선택하였으며, Table 1의 맨아래 행에 그 값들이 나와 있다.

손상 정도가 다른 20mm의 정육면체 시편을 얻기 위해서 얇은 노치를 시편의 중앙에 가공하였다 (Fig. 1 참조). Fig. 1에서와 같이 시편의 중앙에서 절단한 시편은 노치시편(notch specimen)으로, 약간 왼쪽에서 절단하여 얻은 시편은 평면시편(plain specimen)으

Table 1 Creep test conditions and rupture time

Stress (MPa)	6.0					
Temperature (℃)	500			550		
Rupture time, t _r (hr)	618.9			279.2		
	573.1			264.2		
	580.5			267.3		
	618.6			272.6		
	Average t _r	597.8			270.8	
Time of interrupt test (t/t _r)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	

로 명명한다. 두 위치에서 얻은 시편은 동일한 온도 이력 사이클하에서 서로 다른 응력 상태에 놓이게 되므로 손상의 정도가 달라지게 된다. 노치 밑 부분에서의 응력집중으로 인한 손상의 비균질성은 무시하였다. 크리프 시험 중단 시편과의 비교를 위해서 열처리한 후 같은 치수로 손상을 전혀 받지 않은 참조 시편 6개를 준비하였다.

2.2. 미시조직과 기공량 측정

크리프 손상 시편의 전형적인 금속조직 사진이 Fig. 2에 나와 있다. 그레인의 형상은 각 축방향으로 거리가 같으며, 평균 크기는 0.1mm이다. 기공은 랜덤하게 위치하지 않고 있으며, x_3 방향에 수직인 입계에 우선적으로 모여 있다. 그림에서 보인 크리프 단계에서 기공의 지름은 약 $10\mu\text{m}$ 이다.

크리프 손상의 증가에 따라 기공이 증가하며 밀도는 감소하게 되므로 기공량 p 를 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$p = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_0} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 "0"와 "*"는 각각 초기 시편과 크리프 중단 시편을 나타낸다. 본 연구에서는 Ratcliffe의 방법[11]으로 무게를 측정하여 기공량을 다음 식으로 구하였다.

$$p = 1 - \frac{W_0^*(W_0^* - W_0^w)}{W_0^w(W_0^* - W_0^w)} \dots\dots\dots (2)$$

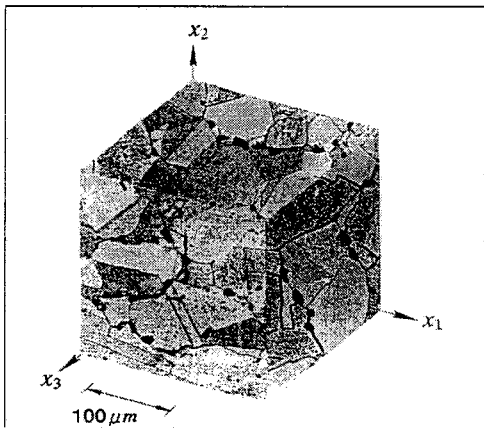


Fig. 2 Photomicrograph of creep damaged copper; notched position, $t/tr=0.7$, 550°C , 6.0MPa

여기서 "a"와 "w"는 각각 공기와 물에서의 무게이다. 측정 오차는 $\pm 10^{-4}$ 보다 작다. 이 방법으로 측정된 기공량은 시편의 부피와 액체의 밀도에 독립적이다.

2.3. 초음파 속도 및 감쇠 측정

지름이 1/2 인치 (12.7mm)인 광대역 초음파 탐촉자를 사용하여 펄스-에코 방식으로 종파 및 횡파 속도를 측정하였다. 탐촉자의 중심주파수는 모두 5MHz였다. 속도는 시편 두께의 2배를 첫 번째와 두 번째 반사파 사이의 시간차로 나누어 줌으로써 계산된다. 사용한 주파수의 파장($\lambda=0.9\text{mm}$)이 기공의 크기(반지름 $a=5\mu\text{m}$)에 비해 매우 큰 값을 가지므로 장파장 한계 내($ka \ll 1$)에 있다고 볼 수 있다. 따라서 속도의 주파수 의존성을 무시하고 시간영역에서 연속된 두 반사파 사이의 시간 차이를 중첩법으로 구하였다.

시험에 사용된 구리 판재는 원래 물링으로 제작되었으므로 특정 방향의 텍스처를 가질 수 있으며 또한 크리프 손상으로 인하여 이방성이 발생할 수 있으므로 각 방향별로 속도를 측정하였다. 예를 들면 속도 V_{ij} 는 x_i 방향으로 전파 하고 x_j 방향으로 입자의 운동을 일으키는 초음파의 속도를 나타낸다. 3개의 종파 속도 V_{11}, V_{22}, V_{33} 와 3개의 횡파 속도 V_{12}, V_{13}, V_{23} 를 측정하였다. 횡파의 경우 대칭성으로부터 $V_{12}=V_{21}, V_{13}=V_{31}, V_{23}=V_{32}$ 이다.

기공의 존재는 재료 내부를 전파하는 초음파의 좋은 산란 요인이 되므로 산란 인자와 관련되는 양의 주파수의존성을 측정하기 위하여 Fourier 변환을 이용하였다. 임의의 함수 $f(t)$ 의 Fourier 변환 $F(f)$ 와 역 Fourier 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i 2\pi f t} dt, \quad -\infty < f < \infty \dots\dots (3)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{i 2\pi f t} df$$

초음파 탐촉자에서 발생하는 신호 u 를 다음과 같이 두면,

$$u = f_0(\omega t) \dots\dots\dots (4)$$

여기서 ω 는 각주파수($=2\pi f$)이다. R_{ij} 는 j 매체에서 i 매체로 반사되는 반사 계수, T_{ij} 는 i 매체에서 j 매체로 투과되는 투과 계수로서 각각 다음과 같이 정의된다.

$$R_{ij} = \frac{\rho_i c_i - \rho_j c_j}{\rho_i c_i + \rho_j c_j} = -R_{ji} \dots\dots\dots (5)$$

$$T_{ij} = \frac{2\rho_i c_i}{\rho_i c_i + \rho_j c_j} = 2 - T_{ji}$$

관심의 대상이 되는 신호로 Fig. 3에서와 같이 시편의 아랫면에서 처음과 두 번째로 반사된 파를 선택하여 $f(t), g(t)$ 라고 하고 각각을 Fourier 변환하면

$$f(t) = T_{12}R_{23}T_{21} f_0(\omega t - 2kd)$$

$$g(t) = T_{12}R_{23}R_{21}R_{23}T_{21} f_0(\omega t - 4kd)$$

$$F(f) = T_{12}R_{23}T_{21} e^{-i2kd} F_0(f) \dots\dots\dots (6)$$

$$G(f) = T_{12}R_{23}R_{21}R_{23}T_{21} e^{-i4kd} F_0(f) \dots\dots\dots (7)$$

이며, d 는 시편의 두께이고 $F_0(f)$ 는 함수 f_0 의 Fourier 변환이다. 식 (7)을 식 (6)으로 나누면,

$$\frac{G(f)}{F(f)} = R_{21}R_{23}e^{-i2kd} \dots\dots\dots (8)$$

복소수 파수 $k = k_1 + ik_2$ 를 식 (8)에 대입하여 정리하면,

$$e^{-i2kd} = e^{-i2d(k_1 + ik_2)} = e^{2k_2 d} e^{-i2k_1 d}$$

$$= \frac{1}{R_{21}R_{23}} \frac{G(f)}{F(f)} = M e^{i\phi}$$

또는

$$k_1(f) = -\phi/2d, \quad k_2(f) = (\ln M)/2d \dots\dots\dots (9)$$

여기서 $k_1 = \omega/V_p$ 이므로 위상 스펙트럼 ϕ 로부터 위상 속도 V_p 를 주파수의 함수로 구할 수 있다. 식 (9)에서

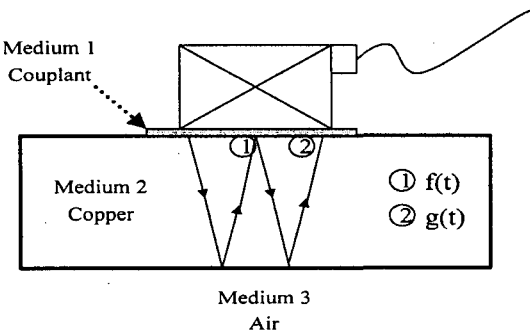


Fig. 3 Back-surface reflected waves used in ultrasonic measurements

감쇠계수 $\alpha(f)$ 는 다음 식으로 구해지며

$$\alpha(f) = k_2 = \frac{\ln M}{2d} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 $M = \left| \frac{1}{R_{21}R_{23}} \frac{G(f)}{F(f)} \right|$ 이다.

3. 결 과

3.1. 수명 소비율과 기공량

크리프 시간에 따른 기공률 p 의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 시편의 위치와 시간에 따라 모두 다른 관계를 보인다. 시편 중앙부의 노치 시편이 평면 시편보다 약간 높은 응력을 받으므로 같은 온도에서 평면 시편보다 더 많은 양의 기공이 발생하였다.

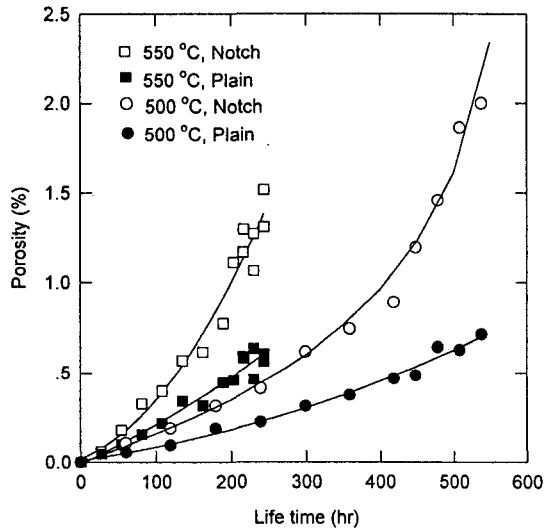


Fig. 4 Evolution of porosity with creep time

Table 2 Ultrasonic velocities of reference samples (P: plain)

Sample	Annealing	V_{11}	V_{22}	V_{33}	V_{13}	V_{21}	V_{32}
A0	800℃, 3 hours	4724	4727	4732	2279	2307	2281
A0P		4729	4727	4739	2284	2307	2283
A01	550℃, 20 hours	4732	4726	4738	2275	2306	2281
A02		4727	4726	4737	2284	2305	2276

3.2. 종파 및 횡파 속도

참조 시편들에 대한 방향별 속도 측정 결과를 Table 2에 수록하였다. 여기서 속도의 단위는 모두 m/sec 이다. 이 시편들은 롤링 텍처로 인하여 직교 이방성을 보이며, 최대 속도 차이는 종파일 경우 0.23%, 횡파의 경우 1.17%가 발생한다.

크리프 하중으로 인하여 손상(여기서는 기공)은 비등방적으로 발생하며, 그 이방성은 원래 설정한 좌표축의 방향과 일치하며 텍처 이방성에 중첩되어 나타난다고 간주할 수 있다. 기공이 특정방향으로 성장함으로써 크리프 손상을 받은 구리 시편들은 응력(하중)축에 대하여 횡방향 등방성의 성질을 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과로 실제로 6개의 속도를 측정하였으나, $V_{11} = V_{22}$, $V_{13} = V_{23}$ 이므로 이 가운데 4개의 속도(V_{11} , V_{33} , V_{12} , V_{23})만 독립적인 것으로 볼 수 있다.

크리프로 인하여 기공의 발생이 가장 많은 500℃의 노치 시편의 속도를 기공 부피분율의 함수로 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 종파와 횡파 속도는 모두 기공량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이며, 2차 다항식을 이용하여 최소자승법으로 곡선맞춤(curve fitting)을 하였다. 최대 기공량 2.0%에 대하여 종파의 경우 약 11%, 횡파의 경우 약 4%의 속도 감소가 발생한다.

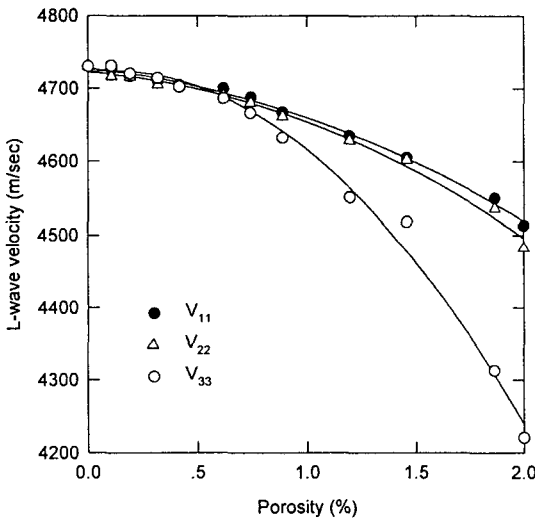


Fig. 5 Measured longitudinal wave velocities as a function of porosity: Notch specimens, test conditions: 500℃, 6.0 MPa, $t_c = 597$, 8 hours

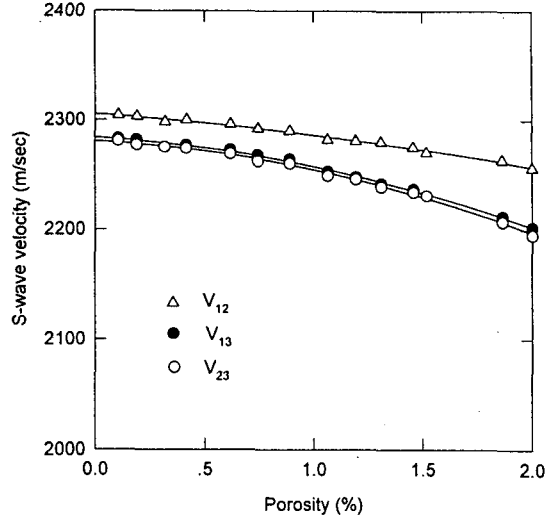


Fig. 6 Measured shear wave velocities as a function of porosity: Notch specimens, test conditions: 500℃, 6.0 MPa, $t_c = 597$, 8 hours

3.3. 진폭 스펙트럼

기공량이 서로 다른 6개의 시편을 임의로 선정하여 첫 저면 반사 신호 (Fig. 3의 $f(t)$)를 푸리에 변환하여 진폭 스펙트럼을 구하였다. 기공으로 인한 속도 감소는 x_3 방향으로 최대이므로 진폭 스펙트럼 및 감쇠도 이 방향으로 측정하였다. 기공량 및 주파수 의존성을 Fig. 7에 나타내었다. 주파수 범위 1-9MHz에서 기공량이 증가할수록 진폭 스펙트럼 성분은 전체적으로 감소하며 동시에 중심 주파수가 저주파수로 이동함을 알 수 있다. 이와 관련된 물리적 기구는 주파수 의존 감쇠이며 저주파수에서 보다 고주파수에서 더 심한 감쇠가 발생하기 때문이다. 이 중심 주파수의 이동은 감쇠와 서로 관련지을 수 있다.

3.4. 감쇠계수

식 (10)으로부터 감쇠를 계산하고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 3.3절에서와 같은 6개의 시편에 대한 결과를 표시하였으며 최대 기공량은 2.0% 이다. 기공량이 증가할수록 감쇠도 증가하며, 주어진 각 기공량에서 주파수가 높아질수록 감쇠도 커진다. Fig. 8에 보인 모든 기공 시편에 대하여 주어진 주파수 범위내에서 감쇠는 거의 선형적인 경향을 보임을 알 수 있다.

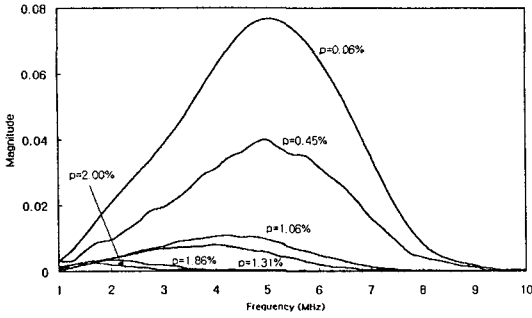


Fig. 7 Frequency and porosity dependent magnitude spectrum of the first reflected wave $f(t)$

4. 크리프 기공 평가 파라미터

기공을 포함한 시편에 대한 초음파 측정 결과를 기초로 크리프 손상에 의한 기공량을 비파괴적으로 직접 평가할 수 있는 초음파 측정 파라미터를 선정하고자 한다. 여기서 선정한 파라미터는 종파의 속도를 크리프 손상을 받지 않은 참조시편의 속도로 나누어 준 정규화 속도 감소(normalized velocity decrease), 진폭 스펙트럼의 중심주파수 이동 (central frequency shift) 및 감쇠 기울기 변화(attenuation slope change)이다.

4. 1. 정규화 속도

본 연구에 사용된 시편을 세분하면 모두 4종류가 되는데, 이는 노치 시편과 평면 시편 각각에 대하여

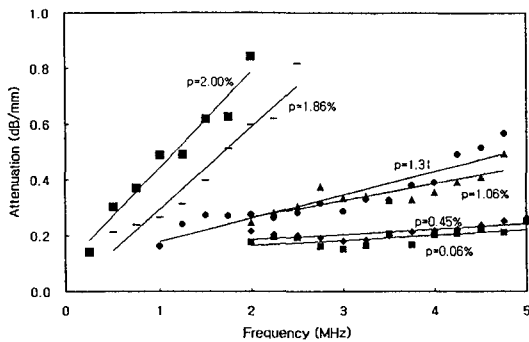


Fig. 8 Frequency and porosity dependent ultrasonic attenuation

550℃와 500℃의 크리프 시험 온도가 사용되었기 때문이다. 크리프 기공의 초음파 비파괴평가를 위한 파라미터로서 크리프 시험을 받지 않은 참조 시편의 속도를 나누어 줌으로써 정규화 속도를 구하고, 시편의 종류에 관계없이 기공량의 함수로 하나의 그래프에 나타내었다. Fig. 9에는 정규화 종파 속도값을 나타내었다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 정규화 속도값은 기공량과 좋은 상관관계를 가지며, 여기서 실선은 2차 곡선맞춤을 나타낸다. 여기서는 보이지 않았지만 기공량이 같은 경우 종파가 횡파보다 2배 이상의 속도 감소를 일으키므로 더 나은 파라미터라고 볼 수 있다.

4. 2. 진폭 스펙트럼의 중심 주파수

3. 3에서 관찰한 바와 같이 기공량이 증가함에 따라 진폭 스펙트럼의 고주파수 성분이 급격히 감소하고 이와 동시에 중심 주파수가 저주파수로 이동하였다. 이에 기초하여 기공량 평가를 위한 파라미터로서 중심 주파수 이동량을 다음과 같이 구하였다. 크리프 손상을 받지 않은 참조 시편의 중심 주파수를 f_0 , 손상을 받아 기공이 발생한 시편의 중심 주파수를 f_i 로 두고 $\frac{f_0 - f_i}{f_0}$ 의 값을 계산하였다. 그 결과는 Fig. 10과 같으며 여기서 실선은 최소자승법으로 구한 2차 곡선맞춤을 나타낸다.

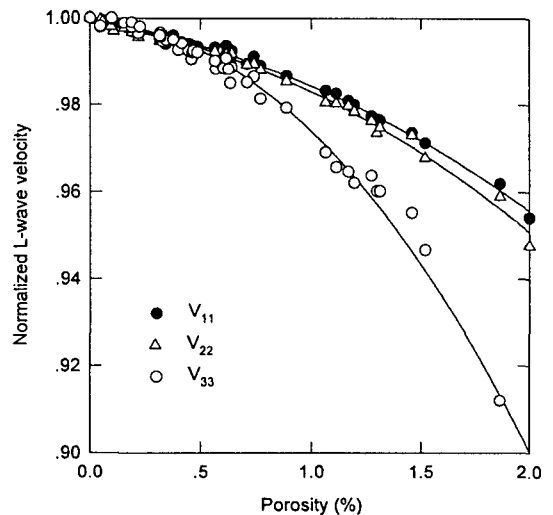


Fig. 9 Relations between porosity and normalized longitudinal wave velocities

4.3. 감쇠 기울기

산란의 물리적 양으로서 감쇠를 정의하였고 감쇠 측정 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 측정한 감쇠는 주파수의 함수로서 사용 주파수 범위에서 거의 선형 거동을 보였으므로 기공량의 비파괴적 평가 파라미터로서 감쇠 기울기 $\frac{d\alpha}{df}$ 를 구하였다. Fig. 11에 나타낸 바와 같이 기공의 증가에 따라 감쇠 기울기가 증가함을 알 수 있고 그 경향은 진폭 스펙트럼의 중심 주파수 이동과 같이 비선형적임을 알 수 있다.

5. 결 론

크리프 손상을 받은 순수 구리에 대하여 주요 손상 기구를 분석하고, 초음파 시험을 수행한 결과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 크리프 손상 시편에서 주요 손상 기구는 결정립계에서 발생한 기공이었다. 손상이 진전함에 따라 기공량은 증가하고, 모양이 변하며 하중축에 대하여 특정한 방향성을 가지므로 초음파 속도 측정에서 관찰된 이방성의 주요 원인이었다.
- 2) 기공량이 증가함에 따라 초음파 속도는 비선형적으로 감소하고, 종파가 횡파보다 더 큰 감소율을 보였다. 각 방향으로 측정한 속도는 점진적인 손상에 의한 이방성을 잘 나타내었다. 즉, 종파는 하중축 방향(V_{33})으로 가장 낮은 속도값을 보였으며, 다른 두 방향(V_{11}, V_{22})은 비슷한 값을 보였다. 횡파는 하중

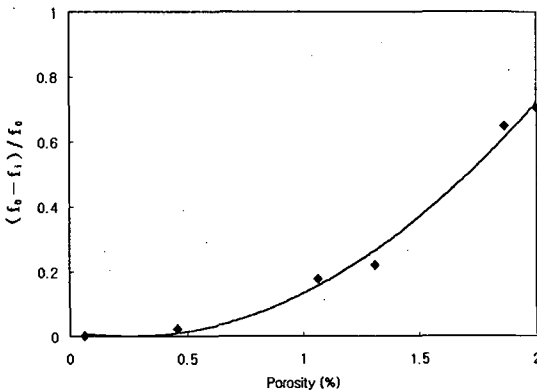


Fig. 10 Relations between porosity and central frequency shift of magnitude spectrum

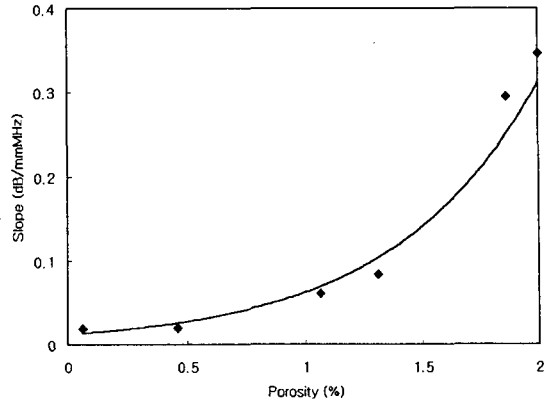


Fig. 11 Relations between porosity and attenuation slope

축 방향을 포함하는 평면(V_{13}, V_{23})에서 더 낮은 속도값을 가지며 이 두 속도는 비슷하고, 하중축을 포함하지 않는 평면 (V_{12})에서 더 높은 속도값을 보였다.

- 3) 기공으로 인한 속도 감소는 기공 부피분을 2%에서 종파의 경우 약 11%, 횡파의 경우 약 4% 였다.
- 4) 첫 저면 반사 신호의 진폭 스펙트럼은 기공량이 증가함에 따라 고주파수 성분이 더 많이 감소하였고 이와 동시에 중심 주파수가 저주파수로 이동하였다.
- 5) 감쇠는 기공량이 증가함에 따라 증가하였고, 사용한 탐촉자의 유효 주파수 범위에서 거의 선형성을 보였다.
- 6) 기공량의 비파괴평가를 위한 파라미터로서 정규화 속도, 진폭 스펙트럼의 중심 주파수, 감쇠 기울기를 제시하였으며 이들 파라미터와 기공량 사이에는 좋은 상관관계가 있었다.

후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME-97-C-15) 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

(1). B. J. Cane and R. D. Townsend, Proc. ASME Materials Seminar, Flaw and Fracture at Elevated Temperature, pp. 279, (1983)

- [2] ASTM E 1351: Standard practice for production and evaluation of field metallographic replicas, American Society for Testing and Materials (1996)
- [3] 문한규 외, 고온사용설비의 비파괴 진단기술개발, 한국표준과학연구원, KRISS-92-063-IR, (1993)
- [4] S. Ishizaki, et al., International Conference on Life Assessment and Extension, Hauge, Netherlands, Paper 1.2.2, pp. 54-64, (1988)
- [5] 動力プラントと構造物の餘壽命推定技術, 日本機械學會編, 技報堂出版, (1992)
- [6] M. Sukekawa, M. Shiga, Y. Tobita and S. Kirihara, "Fundamental study on non-destructive detection for creep damage of austenitic stainless steel", International Conference on Creep, Tokyo, Japan, April 14-18, pp. 321-325, (1986)
- [7] 정세희, 김정기, "고온재료의 재료특성 변화", 대한기계학회지, 제 32권, 제 4호, pp. 326-334, (1992)
- [8] H. Willems, W. Bendick, and H. Weber, "Nondestructive evaluation of creep damage in service exposed 14 MoV 63 steel", in Nondestructive Characterization of Materials II, J. F. Bussiere, J.-P. Monchalin, C. O. Rudd and R. E. Green, Jr., Eds., Plenum Press, New York, pp. 451-460, (1986)
- [9] A. S. Birring, J. J. Alcazar, and J. J. Hanley, "Detection of creep damage by ultrasonics", Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 8B, pp. 1833-1840, (1989)
- [10] S. Hirsekorn, "The scattering of ultrasonic waves by polycrystals", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 72, pp. 1021-1031, (1982)
- [11] R. T. Ratcliffe, "The measurement of small density changes in solids", British Journal of Applied Physics, Vol. 16, pp. 1193-1196, (1965)