

신경회로망과 점진적 손상 모델링을 이용한 크리프 기공의 평가

조 석 제* · 정 현 조**

(1999년 5월 10일 접수)

Estimation of Creep Cavities Using Neural Network and Progressive Damage Modeling

Seog-je Cho and Hyunjo Jeong

Key Words: Creep Cavity(크리프 기공), Neural Network(신경회로망), Progressive Damage(점진적 손상), Ultrasonic Velocity(초음파 속도), Anisotropy(이방성), Porosity Content(기공량)

Abstract

In order to develop nondestructive techniques for the quantitative estimation of creep damage a series of crept copper samples were prepared and their ultrasonic velocities were measured. Velocities measured in three directions with respect to the loading axis decreased nonlinearly and their anisotropy increased as a function of creep-induced porosity. A progressive damage model was described to explain the void-velocity relationship, including the anisotropy. The comparison of modeling study showed that the creep voids evolved from sphere toward flat oblate spheroid with its minor axis aligned along the stress direction. This model allowed us to determine the average aspect ratio of voids for a given porosity content. A novel technique, the back propagation neural network (BPNN), was applied for estimating the porosity content due to the creep damage. The measured velocities were used to train the BP classifier, and its accuracy was tested on another set of creep samples containing 0 to 0.7 % void content. When the void aspect ratio was used as input parameter together with the velocity data, the NN algorithm provided much better estimation of void content.

1. 서 론

고온에서 장시간 하중을 받는 설비의 파괴사고는 인명은 물론 경제적으로 큰 손실을 가져오기 때문에 노후화된 설비의 안전성을 확보하기 위한 정밀진단과 잔여수명 예측기술의 개발은 아주 중요한 과제이다. 화력발전 설비의 부품은 크리프가 수명소비의 주요 원인이 된다. 크리프 손상은

일반적으로 기공이 발생, 성장하여 미소 균열이 발생하고 그것이 성장해 파손, 파괴에 이르는 과정을 밟는다.^(1,2) 이 과정에서 재료의 밀도와 탄성 계수가 변하므로 초음파 속도 감소와 이방성이 나타나게 된다. 실험결과와 잘 일치하는 모델의 개발은 기공량의 비파괴 평가와 잔여 수명의 예측에 있어서 유용한 도구로 사용될 수 있기 때문에 크리프 기공에 의한 속도 변화를 미시역학 모델에 기초하여 설명할 필요가 있다. Hirao 등⁽³⁾과 Ledbetter 등⁽⁴⁾은 구리에서 크리프 기공으로 인한 속도 의존성을 기공의 모양과 방향을 고려하여 설명을 시도하였다. 또한 크리프 손상평가 및 잔여수명 예측을 위해서는 크리프 기공량의 정확한 평가가 필요하며 이를 비파괴적 방법으로 구할

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

** 회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

E-mail : hjeong@hyowon.cc.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2471 FAX : (051)514-7640

수 있으면 바람직하다. 비파괴적 방법은 실기를 크게 훼손시키지 않고 비교적 손쉽게 단시간내에 많은 위치를 진단할 수 있기 때문에 관심이 집중되고 있다. 최근에 체적적인 크리프 손상 탐지를 위한 초음파 비파괴 검사 결과가 보고되고 있다. (Willems,⁽⁵⁾ Birring⁽⁶⁾ 등) 이들은 크리프손상이 진행됨에 따라 초음파속도가 감소하며 감쇠계수가 증가함을 보였다. 이와 같이 초음파는 침투력이 우수하여 결함 탐지뿐만 아니라 재료성질과 미시적 손상 평가에 사용될 수 있는 유용한 도구이나, 손상량의 정량화와 추정 손상량의 정확도 향상이 문제점으로 남아 있다. 이러한 결점을 보완하기 위하여 신경회로망(neural network)을 이용한 비파괴 평가법을 고려할 수 있다. Song⁽⁷⁾은 신경회로망을 용접부의 결함 분류에, Takadoya⁽⁸⁾는 균열의 크기와 각도 측정에 사용하여 그 타당성을 입증한 바 있다. 본 연구에서는 신경회로망을 크리프 기공 평가에 적용하여 체적손상의 탐지 가능성을 살펴보고자 한다.

먼저 고온 장시간 사용재의 크리프 기공을 조사하기 위하여 순수 구리(Cu)를 크리프 시험하여 여러 종류의 중단 시편을 준비하고 초음파 속도를 측정한다. 다음으로 크리프 손상으로 인한 기공량을 구하고 이와 관련된 속도 변화와 방향성을 고찰한다. 실험에서 관찰된 속도-기공량의 상관관계를 설명하기 위해서 미시역학에 기초를 둔 점진적 손상모델링을 수행한다. 모델링 과정에서 기공은 편구면체로서 일정한 방향분포를 갖는다고 가정하고 최소자승법으로 중단 시편들의 기공형상비를 구한다. 마지막으로 역전과 신경회로망을 이용하여 크리프 기공량을 평가하기 위하여 입력패턴으로서 초음파 속도만 사용하는 경우와 속도외에 미시역학 모델에서 구한 기공의 형상비를 추가로 사용하는 경우에 추정된 기공량의 정확도를 각각 비교한다.

2. 실험

2.1 크리프 손상 Cu 시편

크리프 시험에 사용된 재료는 99.95 질량퍼센트, 두께 20 mm의 압연된 구리 판재이다. 시편의 형상과 0- $x_1x_2x_3$ 좌표계가 Fig. 1에 나와 있다. x_1 방향은 원래 판재의 두께 방향이고 x_2 는 압

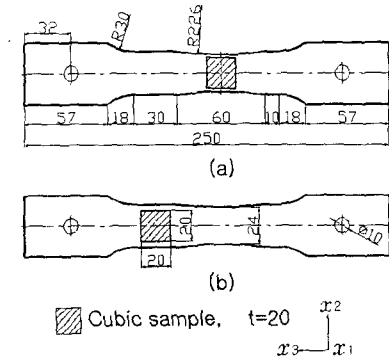


Fig. 1 Specimen geometry and sample coordinate system 0- $x_1x_2x_3$: (a) notch sample, (b) plane sample

Table 1 Creep test conditions and rupture time

Stress (MPa)	6.0			
	Temperature (°C)	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	

연 방향이다. 파단시간을 알기 위해서 8개의 시편이 사용되었으며 4개는 500°C, 다른 4개는 550°C에서 크리프 파단되었다. 수직하중은 최소단면에서 6.0 MPa이다. 크리프 시험 조건과 파단시간을 Table 1에 나타내었다. 평균 파단시간 t_r 은 500°C에서 597.8이고, 550°C에서 270.8이었다.

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

손상 정도가 다른 20 mm의 정육면체 시편을 얻기 위해서 얇은 노치를 시편의 중앙에 가공하였다.(Fig. 1 참조) Fig. 1에서와 같이 시편의 노치

부위에서 절단한 시편은 노치시편(notch specimen)으로, 약간 왼쪽에서 절단하여 얻은 시편은 평면시편(plane specimen)으로 명한다. 두 위치에서 얻은 시편은 동일한 온도 이력 사이클하에서 서로 다른 응력 상태에 놓이게 되므로 손상의 정도가 달라지게 된다. 크리프 시험 중단 시편과의 비교를 위해서 손상을 전혀 받지 않은 참조 시편을 같은 치수로 준비하였다.

2.2 미시조직과 기공량 측정

크리프 손상 시편의 전형적인 금속조직 사진이 Fig. 2에 나와 있다. 입자의 형상은 각 축방향으로 거리가 같으며, 평균 크기는 0.1 mm이다. 기공은 임의의 분포를 가지고 있지 않으며, x₃ 방향에 수직인 입계에 우선적으로 모여 있다. 그림에서 보인 크리프 단계에서 기공의 지름은 약 10 μm 이다.

크리프 손상의 증가에 따라 기공량이 증가하며 밀도는 감소하게되므로 기공량 p 를 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$p = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_0}$$

여기서 첨자 0 과 * 는 각각 참조 시편과 크리프 중단 시편을 나타낸다. 본 연구에서는 Ratcliffe의 방법⁽⁹⁾으로 무게를 측정하여 기공량을 다음 식으로 구하였다.

$$p = 1 - \frac{W_a^*(W_0^a - W_0^w)}{W_0^a(W_a^* - W_a^w)}$$

여기서 첨자 a 와 w 는 각각 공기와 물에서의 무게이다.

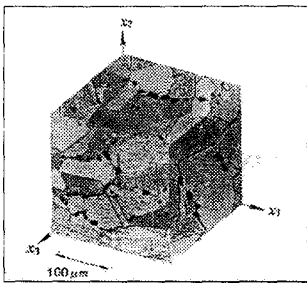


Fig. 2 Photomicrograph of creep damaged copper: notched position, t/tr=0.7, 550°C, 6.0 MPa

2.3 초음파 속도 측정

중심주파수 5 MHz, 지름 1/2 인치 (12.7 mm)인 광대역 초음파 탐촉자를 사용하여 펄스-에코 방식으로 종파 속도를 측정하였다. 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 한계내($ka \ll 1$)에 있다고 볼 수 있다. 따라서 속도의 주파수 의존성을 무시하고 시간영역에서 연속된 두 반사파 사이의 시간 차이를 중첩법으로 구하였다. 시험에 사용된 구리 판재는 원래 압연으로 제작되었으므로 특정 방향의 조직을 가질 수 있으며 또한 크리프 손상으로 인하여 이방성이 발생할 수 있으므로 각 방향별로 속도를 측정하였다. 예를 들면 속도 V_{ij} 는 x_i 방향으로 전파하고 x_j 방향으로 입자의 운동을 일으키는 초음파의 속도를 나타낸다. 3개의 종파 속도 V_{11} , V_{22} , V_{33} 를 측정하였다.

노치 및 평면 시편에 대한 종파 속도의 측정 결과를 기공 부피분율의 함수로 Fig. 3에 나타내었다. 크리프 하중으로 인하여 손상(여기서는 기공)은 비등방성으로 발생하며, 그 이방성은 원래 설정한 좌표축의 방향과 일치하며 조직 이방성에 중첩되어 나타난다고 간주할 수 있다. 기공이 특정방향으로 성장하여 속도 이방성 ($V_{11} \approx V_{22} < V_{33}$)이 나타나므로 크리프 손상을 받은 구리 시편들은 응력(하중)축에 대하여 횡방향 등방성의 성질을 가짐을 알 수 있다. 이러한 사실은 횡파 속도 측정 결과($V_{12} > V_{13} \approx V_{23}$)를 통하여 추가로 확인할 수 있었다.

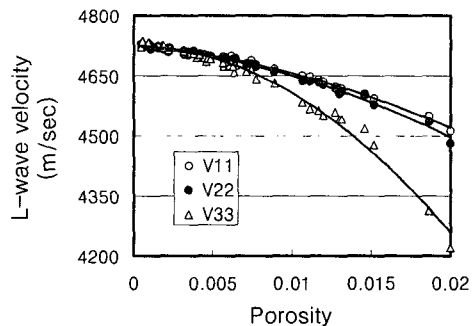


Fig. 3 Measured longitudinal wave velocities as a function of porosity

종파 속도는 기공량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이며, 2차 다항식을 이용하여 최소자승법으로 곡선맞춤을 하였다. 최대 기공량 2.0%에 대하여 약 11%의 속도 감소가 발생한다.

3. 미시역학 모델

3.1 개재물이 한 방향으로 정렬된 경우의 유효 탄성계수

탄성계수 C_1 , 밀도 ρ_1 의 구면체 개재물이 C_0 , ρ_0 의 균질매질내에서 한 방향으로 정렬되어 있을 때 2상 복합재료의 유효탄성계수 식은 다음과 같이 주어진다.⁽¹⁰⁾

$$C^c = C_0 + v_1(C_1 - C_0)A \quad (1)$$

여기서 v_1 은 개재물의 부피분율이며, 기지재의 부피분율을 v_0 라고 할 때 $v_0 + v_1 = 1$ 의 관계가 성립한다. A 는 변형을 집중계수 (strain concentration factor)로서 구형 개재물 내부의 변형을 ϵ 와 무한 경계에서의 균일한 변형을 ϵ^0 사이를 관계짓는 텐서이다. Mori-Tanaka의 평균장 근사(mean field approximation)⁽¹¹⁾에 의하면 A 는 다음과 같이 주어지고,

$$A = A_{dil}[v_0I + v_1A_{dil}]^{-1} \quad (2)$$

A_{dil} 은 Eshelby의 등가 개재물 원리(equivalent inclusion principle)에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$A_{dil} = [I + SC_0^{-1}(C_1 - C_0)]^{-1} \quad (3)$$

여기서 S 는 Eshelby 텐서이고, I 는 4차 항등 텐서이다. 등방성 기지재의 경우 Eshelby 텐서는 개재물의 모양과 기지재의 Poisson 비에 의존한다. 복합재료의 유효 밀도는 혼합법칙에 의해 $\rho = \rho_0 + v_1(\rho_1 - \rho_0)$ 로 주어지므로, 유효 속도를 구할 수 있다. 개재물이 기공인 경우 $C_1 = \rho_1 = 0$ 로 두면 된다.

크리프 기공을 함유한 구리 시편의 경우 금속 조직 사진에 기초하여 관찰된 속도 이방성은 기공의 모양과 방향분포에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 크리프 손상재의 유효 속도 예측을 위하여 미시역학 모델에서 기공의 모양을 편구면(oblite

spheroid)으로 가정한다. 이 때 세 축의 상대적 크기는 $a_1 = a_2 > a_3$ 이고, 형상비는 $a_3/a_1 < 1.0$ 로 정의한다. 개재물이 방향분포를 갖는 경우 유효 탄성계수를 구하기 위하여 식 (1)에서 방향의존양의 방향평균을 고려해야 한다.

3.2 방향분포를 갖는 타원체 기공

개재물이 일반적인 타원체의 경우에 개재물과 관련된 양은 방향에 의존하는 양이 된다. 방향 분포는 방향분포함수(ODF)에 의해 결정되며, Fig. 4에 오일러 각도로 표시한 기지재와 타원체 기공의 좌표가 나타나 있다.

방향의존 텐서의 방향평균은 $\langle \cdot \rangle$ 으로 나타내며 ODF $w(\xi = \cos \theta, \psi, \phi)$ 의 가중 적분에 의해 다음 식으로 구해진다.

$$\langle \cdot \rangle = \int w(\xi, \psi, \phi)(\cdot) d\xi d\psi d\phi \quad (4)$$

ODF는 다음과 같이 정규화시킬 수 있으며

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 w(\xi, \psi, \phi) d\xi d\psi d\phi = 1 \quad (5)$$

$w(\xi, \psi, \phi)$ 의 물리적 의미는 ξ 와 $\xi + d\xi$, ψ 와 $\psi + d\psi$, 그리고 ϕ 와 $\phi + d\phi$ 사이에 존재하는 기공의 부피분율을 나타낸다. Roe⁽¹²⁾는 ODF를 다음 식과 같이 일반화된 spherical harmonics로 전개할 수 있음을 보였다.

$$w(\xi, \psi, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l W_{lmn} Z_{lmn}(\xi) e^{-im\psi} e^{-in\phi} \quad (6)$$

$Z_{lmn}(\xi)$ 는 Roe에 의해 정의된 일반화된 Legendre 함수이고, W_{lmn} 는 Roe 계수이다. $Z_{lmn}(\xi)$ 의 직교성으로부터 W_{lmn} 은 다음과 같이 주어진다.

$$W_{lmn} = \frac{1}{4\pi^2} \times \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 w(\xi, \psi, \phi) Z_{lmn}(\xi) e^{im\psi} e^{in\phi} d\xi d\psi d\phi \quad (7)$$

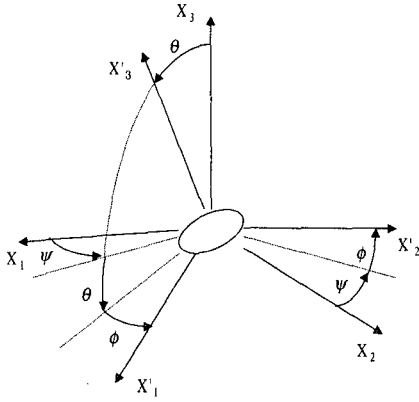


Fig. 4 Definition of the Euler angles (ψ, θ, ϕ) with respect to specimen axes x_1, x_2, x_3 and void axes x'_1, x'_2, x'_3

크리프 손상 구리 시편에서 측정된 속도의 횡방향등방성으로부터 기공의 ODF가 x_3 축에 대하여 축대칭인 경우를 고려해 보면 ODF $w(\xi, \psi, \phi)$ 는 $\xi = \cos \theta$ 만의 함수가 되므로 식 (7)은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$W_{l00} = \int_{-1}^1 w(\xi) \sqrt{\frac{2l+1}{2}} P_l^0(\xi) d\xi \quad (8)$$

여기서 P_l^0 는 정규화된 Legendre 다항식이며, W_{200} 과 W_{400} 만이 0이 아닌 값을 가진다. 간단한 분포함수로서 평균값이 $\theta = \cos^{-1} \xi = \alpha$ 인 Gaussian 분포를 고려하면 다음 식으로 주어진다.

$$w(\theta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\theta-\alpha)^2/2\sigma^2} \quad (9)$$

여기서 σ 는 ODF 형상 파라미터를 나타내며 $\alpha=0$, $\sigma \rightarrow 0$ 일 때 x_3 축방향으로 완전하게 정렬된 방향분포를 나타낸다. $\alpha=0$ 와 $\sigma=0.25, 0.5, 0.75$ 에 대하여 구한 ODF를 Fig. 5에 도시하였고, 이에 상응하는 W_{lmn} 값은 Table 2에 나와있다.

개재물이 임의의 방향분포를 갖는 경우에 유효탄성계수 C 는 식 (1)의 한 방향으로 정렬된 탄성계수에 ODF를 가중시켜 적분한 방향평균으로부터 구할 수 있다. 즉,

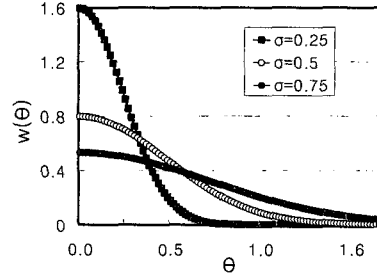


Fig. 5 Axisymmetric orientation-distribution function described by a Gaussian distribution centered at $\alpha=0$

Table 2 Calculated values of W_{lmn}

	σ	W_{200}	W_{400}
(Aligned)	0.0	0.04005	0.05373
	0.25	0.03652	0.04020
	0.5	0.02826	0.02169
	0.75	0.02025	0.01308

$$C = \langle C^a \rangle = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 T^*(\xi, \psi, \phi) C^a w(\xi, \psi, \phi) d\xi d\psi d\phi \quad (10)$$

T^* 는 국소좌표계(x'_1, x'_2, x'_3)와 기준좌표계(x_1, x_2, x_3) 사이의 관계를 나타내는 8차 변환 텐서이다. C^a 는 고정좌표계에서 정의된 양이므로 적분기호 밖으로 옮기면 식 (10)은 다음과 같이 나타낼 수 있고

$$C = TC^a = T[C_0 + v_1(C_1 - C_0)A] \quad (11)$$

T 는 8차 텐서로서 다음과 같이 정의된다.

$$T = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 T^*(\xi, \psi, \phi) w(\xi, \psi, \phi) d\xi d\psi d\phi \quad (12)$$

유효탄성계수 C 가 거시적으로 횡방향 등방성일 때 텐서 T 는 다음과 같이 계산된다.⁽¹³⁾

$$[T] = \frac{1}{105} \begin{bmatrix} 4(14+8a+3c) & 0 & 4(7-2a-6c) & 21-24a+12c & 8(7-2a-6c) \\ 7-8a+4c & 35+56a & 8(7-5a-c) & 7-8a+4c & 4(-7+8a-4c) \\ 7+4a-16c & 35-28a & 4(14+5a+8c) & 7+4a-16c & 4(-7-4a+16c) \\ 8(7-8a+4c) & 0 & 4(7+4a-16c) & 21+48a+32c & 8(7+4a-16c) \\ 49/2-10a-16c & -35/2+14a & 2(-7-4a+16c) & 7+4a-16c & 2(21+6a+32c) \end{bmatrix}$$

여기서 $a = \frac{\sqrt{10}\pi^2}{105} W_{200}$, $c = \frac{\sqrt{2}\pi^2}{105} W_{400}$.

따라서 크리프 손상 구리 시편에서와 같이 기공의 축대칭 방향분포로 인하여 거시적으로 횡방향 등방성의 성질을 갖는 재료의 유효 탄성계수는 식 (11)로부터

$$\begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{33} \\ C_{44} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} C_{11}^a \\ C_{12}^a \\ C_{13}^a \\ C_{33}^a \\ C_{44}^a \end{bmatrix} \quad (13)$$

또 유효 탄성계수와 밀도로부터 유효 속도 성분은 다음 식으로 주어진다.

$$V_{11} = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}}, V_{22} = \sqrt{\frac{C_{22}}{\rho}}, V_{33} = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}} \quad (14)$$

3.3 속도 예측

식 (14)로부터 크리프 손상 시편의 속도를 예측하기 위해서는 기지재의 탄성계수와 밀도, 기공의 부피분율과 모양 및 방향분포를 알아야 한다. 기공량이 증가할수록 속도 이방성과 함께 속도 감소율이 급격히 증가하는 실험결과를 설명하기 위하여 기공의 모양을 편구면체로 가정하고 크리프 손상이 진행함에 따라 기공의 방향분포는 일정하며 기공의 모양(형상비)이 점진적으로 변한다고 가정하였다. 즉, 기공의 방향분포는 편구면체의 단축인 x_3 축이 응력축과 일치하는 축대칭 분포이며, Table 2에 주어진 4개의 Gaussian 분포 형상에 대한 W_{200} 과 W_{400} 값을 사용하였다. 주어진 기공 부피분율에서 최적의 형상비 α 는 아래 식에서와 같이 속도차의 제곱의 합이 최소가 되도록 하는 비선형 최소자승법으로 구할 수 있다.

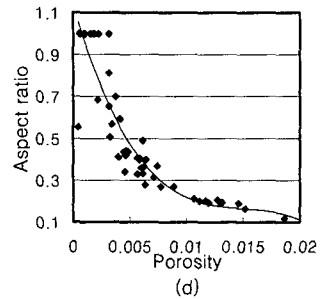
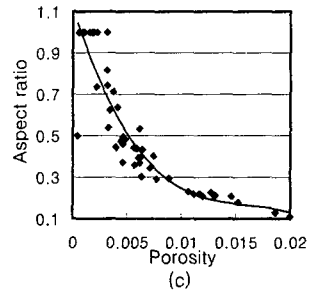
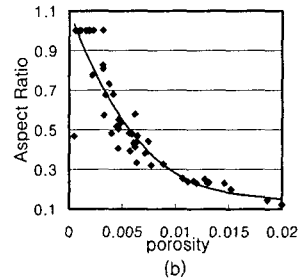
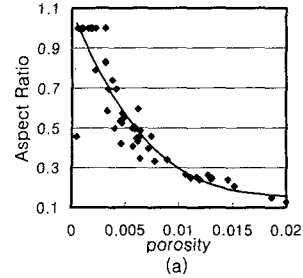


Fig. 6 Calculated aspect ratios of assumed oblate spheroidal voids: (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.25$, (c) $\sigma=0.5$, (d) $\sigma=0.75$

$$E(a) = \sum (V_i^m - V_i^p)^2 \quad (15)$$

여기서 첨자 “*m*” 과 “*p*” 는 각각 측정값과 예측값을 의미한다. Table 2에 나와 있는 4 가지의 방향분포 형상에 대하여 계산한 α 값을 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 실선은 형상비 α 값을 3차 곡선으로 맞추는 것을 나타낸다.

Fig. 6의 4가지 경우에 대하여 속도를 계산한 다음 측정 값과 비교하였을 때 (c)의 $\sigma=0.5$ 일 때 가장 잘 일치하였으며, 비교한 결과를 Fig. 7에 도시하였다.

이와 같이 각 손상단계에서 서로 다른 기공의 모양을 고려하지 않고서는 측정속도의 급격한 감소와 이방성을 이론적 모델로 설명하기 어렵다. Fig. 7에서와 같이 형상비를 고려했을 때 측정속도를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 크리프 손상으로 인해 발생한 기공은 손상이 진행됨에 따라 기공의 부피분율이 증가함과 동시에 기공의 기하학적 형상이 점진적으로 변화함을 간접적으로 알 수 있으며, 또한 실제 기공의 방향분포 양상을 추측할 수 있다.

4. 신경회로망 구성

4.1 신경회로망

신경회로망은 애매한 패턴을 인식하거나 비선형 함수를 예측하는데 적합하기 때문에 최근 많은 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 크리프 기공량을 평가하기 위하여 현재 가장 널리 사용되고 있는 역전파(Back Propagation) 알고리즘을 사용하였다.

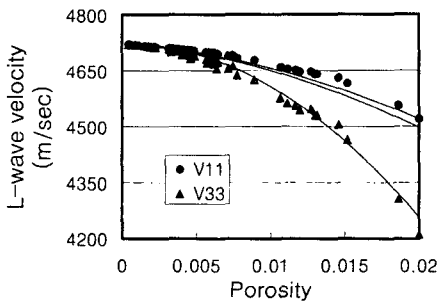


Fig. 7 Comparison of predicted and measured velocities

역전파 알고리즘은 일반화된 델타 규칙이라고도 불리며 보통 입력층, 은닉층, 출력층의 3개의 층으로 구성되어 있다 (Fig. 8). 학습과정은 오차함수를 최소화하는 방향으로 연결강도를 수정하는 과정으로서 최소강하법의 근사화로 보면 쉽게 이해할 수 있다.⁽¹⁷⁾

4.2 신경회로망 구성

■ 방법1.

중과속도 (V_{11}, V_{22}, V_{33}) 값을 입력 패턴으로 하고, 기공 부피분율을 목적 패턴으로 하였다. 정확한 패턴분류를 위하여 입력패턴은 정규화된 속도를 사용하였다. 노치시편에서 구한 데이터는 신경회로망의 학습에 사용하고, 평면시편에서 구한 데이터는 학습된 신경회로망을 평가하였다. 신경망은 입력층 유니트 3개, 은닉층 유니트 5개, 출력층 유니트 1개의 구조이다.

■ 방법2.

입력패턴으로 방법 1의 중과속도 값외에 점진적 손상 모델링에서 구한 기공의 형상비 α 값을 추가하여 같은 방법으로 학습하고 평가하였다. α 값은 예측속도와 측정속도가 가장 잘 일치한 $\sigma=0.5$ 에서의 W_{200}, W_{400} 값을 사용하였다. 신경망은 입력층 유니트 4개, 은닉층 유니트 7개, 출력층 유니트 1개의 구조이다.

방법 1과 2에 의한 추정 결과를 실제 기공량과 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서 기호들이 대각선 방향의 실선위에 위치할 때 예측값

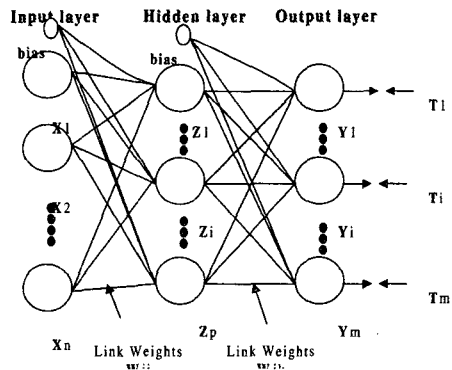


Fig. 8 Architecture of BP neural network

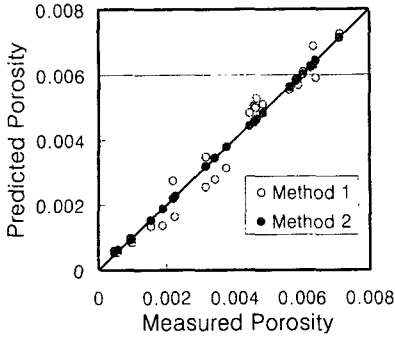


Fig. 9 Agreement between the measured and predicted porosity

과 실측값의 완전한 일치를 나타낸다. Fig. 9에서 방법 1에 의한 예측값의 평균 오차가 11.1%로서 전체적으로 기공량을 비교적 잘 예측한다고 할 수 있겠으나 몇몇 지점에서는 20% 이상의 큰 차이를 보이고 있다. 이에 반하여 방법 2로 구현한 결과값은 평균 오차가 1.6%로서 아주 정확하게 기공량을 평가함을 알 수 있다. 이와 같이 미시역학 모델에 기초한 점진적 손상모델링으로부터 구한 기공의 부피분율을 초음파 속도에 추가하여 신경회로망의 입력 파라미터로 사용할 때 미소한 범위의 손상량 (0~0.7% 기공량)인 경우에도 그 값을 아주 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 고온 고압하의 주요 손상기구인 크리프 손상으로 인한 기공량을 평가하기 위하여 역전파 신경회로망을 적용하였다. 역전파 알고리즘은 그 구조가 간단하고, 애매한 패턴을 인식하거나 비선형 함수를 예측하는 응용에 적합하기 때문에 현재 가장 널리 쓰이고 있다. 크리프 기공을 모사한 구리 시편에 대하여 초음파 속도는 비선형적으로 감소하였다. 이로부터 신경회로망을 학습한 결과 양호한 예측값을 얻을 수가 있었으며 미시역학 모델링에 의한 형상비를 입력패턴에 추가함으로써 추정손상량의 정확도를 향상시킬 수 있음을 보였다. 또한 크리프 손상으로 인해 발생한 기공은 손상이 진전함에 따라 기공의 부피분율이 증가함과 동시에 기하학적 형상이 점점 달라짐을 간접적으로 확인할 수 있으며, 또한 실

제 기공의 방향분포 형상을 대략적으로 짐작할 수 있었다. 이와 같이 신경회로망과 점진적 손상 모델링을 이용하여 기공과 같은 체적손상탐지 기술의 가능성을 제시하였다.

참고문헌

- (1) 전재영, 1996, "입계기공의 확산성장 모델을 이용한 고온기공의 크립균열전파 해석(1) - 응력장 및 균열전파속도에 미치는 입계기공의 영향," 대한기계학회논문집(A), 제20권 제4호, pp. 1177~1185.
- (2) 전재영, 1996, "입계기공의 확산성장 모델을 이용한 고온기공의 크립균열전파 해석(2) -특이적분 방정식 해를 통한 응력장 해석," 대한기계학회논문집(A), 제20권 제4호, pp. 1186~1193.
- (3) Hirao, M., Morishita, T., and Fukuoka, H., 1990, "Ultrasonic Velocity Change with Creep Damage in Copper," *Metallic Transactions*, Vol. 21A, pp. 1725~1732.
- (4) Ledbetter, H. M., Fields, R. J., and Datta, S. K., 1987, "Creep Cavities in Copper: An Ultrasonic Velocity and Composite Modeling Study," *Acta Metallica*, Vol. 35, pp. 2393~2398.
- (5) Willems, H., Bendick, W., and Weber, H., 1986, "Nondestructive Evaluation of Creep Damage in Service Exposed 14 MoV 63 Steel," in *Nondestructive Characterization of Materials II*, J. F. Bussiere, J.-P. Monchalain, C. O. Rudd and R. E. Green, Jr., Eds., Plenum Press, New York, pp. 451~460.
- (6) Birring, A. S., Alcazar, J. J., and Hanley, J. J., 1989, "Detection of Creep Damage by Ultrasonics," in *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 8B, pp. 1833~1840.
- (7) Song, S.-J., and Schmerr, L. W., Jr., 1990, "Ultrasonic Flaw Classification in Weldments Using Neural Networks," in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 10A, pp. 697~704.
- (8) Takadoya, M., and Mandai, T., 1996, "Crack Parameter Characterization by a Neural Network," *The First US-Japan Symposium on Advances in NDT*, pp. 321~326.

- (9) Ratcliffe, R. T., 1965, "The Measurement of Small Density Changes in Solids," *British Journal of Applied Physics*, Vol. 16, pp. 1193~1196.
- (10) Hill, R., 1963, "Elastic Properties of Reinforced Solids: Some Theoretical Principles," *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 11, pp. 357~372.
- (11) Jeong, H., Hsu, D. K., Shannon, R. E., and Liaw, P. K., 1994, "Characterization of Anisotropic Elastic Constants of Silicon-Carbide Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites: Part II. Theory," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 25A, pp. 811~819.
- (12) Roe, R. J., 1965, "Description of Crystallite Orientation in Polycrystalline Materials. III. General Solution to Pole Figure Inversion," *Journal of Applied Physics*, Vol. 36, pp. 2024~2031.
- (13) Dunn, M. L and Ledbetter, H. M., 1996, "Estimation of the Orientation Distribution of Short-Fiber Composites Using Ultrasonic Velocities," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 99, pp. 283~291.
- (14) Fausett, L., 1994, *Fundamentals of Neural Networks, Architectures, Algorithms, and Applications*, Prentice Hall, NY.