

초음파 속도를 이용한 Type 316LN 스테인리스 강의 크리프 손상 평가

이원†, 노경용*, 윤송남*, 김우곤**

Evaluation of the creep damage of the Type 316LN stainless steel by the ultrasonic wave velocity

Won Yi, Kyung-Yong Noh, Song-Nam Yun, and Woo-Gon Kim

ABSTRACT

Creep damage is one of the most important characteristics for the stability of high temperature structures such as huge energy converting facilities. Creep failure of Type 316LN stainless steel is highly correlated to generation and growth of the voids. In this paper, in order to investigate the correlation of creep rupture time and ultrasonic parameters (group velocity, angular velocity), creep-damaged Type 316LN specimens and measurements for the ultrasonic parameters were made. However, bi-directional measurements were applied along the load direction and the perpendicular direction to the load line by means of the contact type probe of which the central frequencies are 10MHz, 15MHz and 20MHz. Analyzing the angular velocities of the ultrasonic signals obtained from the load direction, it was confirmed that the angular velocities were declined as the creep time passed when 15MHz and 20MHz probes were used. Also, the group velocities were declined for all three frequencies as the creep time increased. Thus, positive feasibility for the creep damage evaluation by means of the angular and group velocities was confirmed. Moreover, result of analysis for the ultrasonic signal which was obtained from the perpendicular direction upon the angular and group velocities indicated little variation for both of the angular and group velocities. Therefore, the creep damage is likely to represent anisotropic itself.

Key Words : Ultrasonic Wave, Creep Time, Group Velocity, Angular Velocity, Grain Boundary

1. 서론

원자력발전설비와 같은 대형에너지 전환설비의 지속적인 증설과 사용 시간의 증가에 따라 설비의 안전성 확보 및 수명 예측 기술이 요구되고 있다. 이러한 설비의 수명 및 안전성을 평가하기 위해서는 설비의 재료물성 값을 알아야 하며 이러한 물성 값은 가동 시간의 증가에 따라 변화되는 것으로 알려져 있다. 특히 가혹한 환경에서 운전되는 산업설비에는 기계적 성질이 저하되는 재료의 열화현상이 발생된다. 이러한 열화현상은 설비의 수명과 안전운전에 매우 큰 영향을 미치므로 이에 대한 정기적이고 지속적인 검사가 요구되고 있다^[1]. 가동 중 설비에 대한 비파괴적인 평가 방법에는 경도 측정에 기반을 둔 압입법, 탄성과 전파특성에 기반을 둔 초음파법, 전기적 성질 변화에 기반을 둔 전기비저항법 등이 연구되고 있다. 이들 방법 중 초음파법은 재료의 내부 결함의 검출뿐만 아니라 기계적 재료물성 평가에도 이용되고 있는 방법이다. 초음파법은 선형초음파

법과 비선형 초음파법으로 나누어진다. 선형초음파법은 재료 내에 음파를 입사시켜 음파와 재료와의 상호작용 후 산란된 신호를 분석하여 음파의 감쇠와 속도의 변화 등을 측정하여 재료의 정보를 얻는 방법이다. 많은 연구자^[2,3]들이 다양한 재료에 대한 연구결과를 보고하고 있으며, 초음파 속도 감소에 의한 재료의 열화평가가 가능한 것으로 알려져 있다. 특히 초음파의 감쇠계수는 재료내부 결정입자의 크기와 초음파의 주파수에 민감하다^[4]. 또한 매질이 분산매질(다결정 매질)의 경우 초음파의 속도는 주파수에 의존하는 것으로 알려져 있다.

비선형초음파법은 매질에 입사된 초음파가 매질 내의 비선형 응답을 수반하는 인자인 비교적 큰 공동, 균열 등과의 상호작용으로 신호가 왜곡되는 원리를 이용하는 방법이다^[5]. 특히 기본파의 배진동 발생은 비선형 응답의 대표적인 현상이다.

이상의 대부분 연구자들은 수침법을 이용하여 실험하였다. 그러나 실제 구조물에 직접 수침법을 사용하기에는 어려운 부분이 많다. 따라서 본 연구에

서는 접촉식 탐촉자를 이용하여 선형해석에 기반을 둔 초음파의 속도변화 분석을 통하여 316LN 스테인리스강의 고온 크리프 손상을 평가하고자 한다.

2. 신호 획득 원리

Fig. 1에서와 같이 펄스 리시버에서 발진된 전기 펄스는 광대역 초음파 탐촉자에서 초음파 파동으로 변환하여 시험편을 통과한 후 다시 광대역 초음파 수신 센서에 의해 전기신호로 전환된다. 여기서 시간영역에서의 각 과정의 특성함수를 $f(t)$, $g_1(t)$, $h(t)$, $g_2(t)$ 라고 하면 제1반사파 $b_1(t)$, 및 제2반사파 $b_2(t)$ 는 이러한 함수의 중첩 적분으로 나타낼 수 있다. 주파수 영역에서는 각 함수를 Fourier변환한 함수의 적으로 나타낼 수 있다.

$$B_1(w) = F(w) \cdot G_1(w) \cdot H(w) \cdot G_2(w) \quad (1)$$

$$B_2(w) = F(w) \cdot G_1(w) \cdot H(w) \cdot H(w) \cdot G_2(w) \quad (2)$$

여기서 $B_1(w)$, $B_2(w)$, $F(w)$, $G_1(w)$, $H(w)$, $G_2(w)$ 은 각각의 특성함수를 Fourier변환한 것이다. 위 식에서 펄스 발신기와 광대역 초음파 센서의 영향을 반사파로부터 제거한 신호를 식 (3)과 같이 추출할 수 있다.

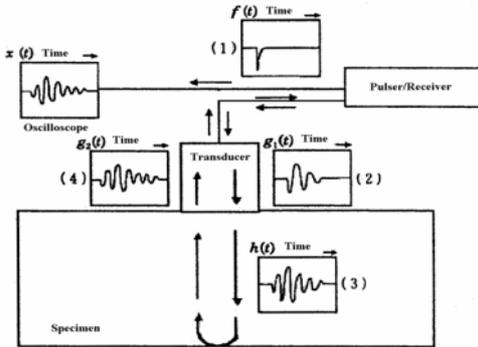


Fig. 1. Principles of pulse echo method in the ultrasonic analysis

$$\frac{B_2(w)}{B_1(w)} = H(w) \quad (3)$$

2.1 초음파 속도 측정

속도에는 각속도와 균속도가 있다. 각속도는 정현파의 진행 속도이고 균속도는 합성파가 크게 분리되지 않는 범위에서 에너지 전파 속도이다. 일반적인 재료에서는 격자결함이 필연적으로 존재하기에 속도 분산이 있다. 그러므로 음속이 주파수에 따라 변하기에 전파 거리가 커지면서 펄스폭이 넓어지고

형상도 변화된다. 이런 경우에는 각속도를 이용해야 한다. 재료가 열화된 경우 보이드의 발생, 석출물, 편석 등에 의해 재료의 미세조직에 불균질성이 발생하고 음속의 주파수 의존성이 높아진다. 그러므로 재료 평가에 초음파 속도를 이용하는 경우에는 각속도의 주파수 의존성에 주목하는 것이 중요하다. 측정된 첫 번째 펄스 반사를 $b_1(t)$ 라 하고 두 번째 펄스 반사파를 $b_2(t)$ 라 하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$b_2(t) = e^{-\alpha x} b_1(t - t_0) \quad (4)$$

여기서 x 는 전파거리, α 는 감쇠계수이다. $b_2(t)$ 를 FFT 처리한 $B_2(w)$ 는 아래와 같이 나타낸다.

$$B_2(w) = e^{-\alpha x} \cdot e^{-j\omega t_0} B_1(w) \quad (5)$$

여기서 전파시간 t_0 는 주파수영역에서 2개 반사파의 위상차에 대응한 것이며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$t_0 = \frac{\arg[H(w)]}{w} \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 각속도를 계산할 수 있다.

3. 실험방법

3.1 재료의 기계적 성질

본 연구에 사용된 316LN 스테인리스강의 조성은 Table 1과 같다. 소재의 제작을 위해 진공 유도용해 공정으로 잉곳을 제조하고, 아르곤 분위기에서 2시간동안 1270℃의 온도를 유지한 후에 두께를 15mm로 열간 압연 가공하였다. 후열처리는 1100℃로 가열한 후 1시간동안 용체화 처리한 후 수냉하였다.

재료의 기계적 성질을 측정하기 위해 600℃에서 인장시험과 크리프 시험을 실시하였다. 인장시험편은 직경 6.35mm, 표점거리 25.4mm의 환봉 형태로 가공하였으며, ASTM E21에 준하여 변위제어방식으로 1mm/min 하중속도조건에서 인장시험을 실시하였다. 시험온도는 저항식 전기로를 사용하여 600±2℃ 범위 내에서 조절하였다. 변위량은 시험편에 표점거리 25.4mm의 고온용 변위게이지를 부착하여 측정하였으며, 변위량과 하중신호를 X-Y기록계를 이용하여 연속적으로 기록하였다.

3.2 크리프 파단 실험

크리프 시험편은 지름 6mm, 표점거리 30mm, 두께 3mm의 편봉 형태로 가공하였으며, ASTM E139 규격에 따라 일정하중조건에서 시험하였다.

Table 1 Chemical components of 316LN stainless steel

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	B
Bal.	0.022	0.7	1.01	0.029	0.005	17.15	12.3	2.35	0.094	0.003

크리프 시험은 시험편을 600℃로 가열하고 2시간 이상 유지한 후 시작하였다. 시간에 따른 크리프 변위 측정을 위해 신장계(extensometer)를 시험편에 부착하였고, 신장계와 연결된 전달기구로 밖의 변위 게이지를 이용하여 크리프 변위 데이터를 측정하였으며 이 데이터를 시간에 따라 자동으로 컴퓨터에 기록저장 되도록 하였다.

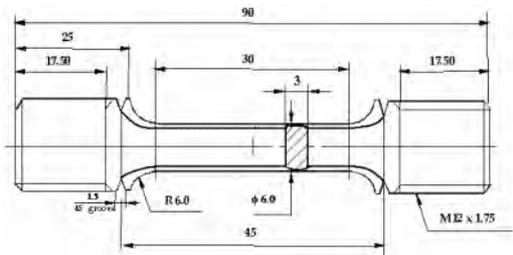


Fig. 2 Dimension of creep specimen

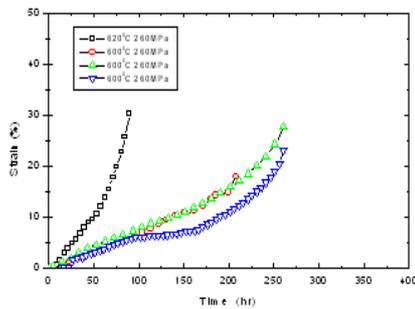


Fig. 3 Relationship between creep time and strain

3.3 초음파에 의한 재료의 크리프 손상 평가

3.3.1 실험 방법

Table 2 Dimension of ultrasonic test specimen

time to rupture (hr)	94	215	270	260	403	284
length (mm)	7.720	7.699	7.694	7.767	7.758	7.715
thickness (mm)	2.258	2.308	2.310	2.495	2.526	2.508

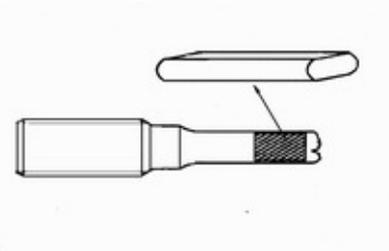


Fig. 4 Shape of ultrasonic test specimen

초음파 실험은 파단시간이 다른 여러 개의 크리프 시험편에서 초음파 측정용 시험편을 채취하여 하중 방향과 하중과 수직 방향에서 초음파를 입사시켜 초음파의 각속도와 균속도를 각각 측정하였다.

초음파용 시험편은 크리프 파단된 시험편의 파단 부근에서 8mm의 길이로 잘라 내어 Fig. 4와 같이 제작하였다. 접촉식 탐촉자에 의한 초음파의 실험에서 접촉면은 측정결과에 상당한 영향을 미치므로 이러한 영향을 최소화하기 위하여 시험편이 탐촉자와 접촉하는 단면을 1μm까지 폴리싱 한 후 하중작용 방향과 하중선 수직 방향으로 초음파 탐촉자를 부착하여 초음파 신호를 획득하였다. 시험편 규격은 Table 2에 나타낸바와 같다.

본 연구에 사용된 초음파 탐촉자는 중심 주파수가 10MHz(φ 10mm), 15MHz(φ 6mm), 20MHz(φ 3mm)를 사용하였다. 펄서-리시버는 JSR사의 PR35를 사용하였다. 펄서-리시버에서 수신된 신호를 처리하여 디스플레이 하는 디지털 오실로스코프는 Lecroy사의 9354A를 사용하였다. 이때 샘플링속도는 500MHz이다. 오실로스코프의 데이터는 노트북 컴퓨터에 의해 실시간으로 저장하였으며, 접촉매질로는 글리세린을 사용하였다.

3.3.2 하중작용선 방향에서의 평가

(a) 각속도 측정

Fig. 5는 20MHz 탐촉자를 이용하여 하중 방향에서 측정하여 얻은 초음파 신호의 비교적 명확한 진폭이 나타나는 제1반사파를 나타낸다. 10MHz에서는 구간을 10π로 하고, 15MHz, 20MHz에서는 4π로 하여 각속도를 계산한 결과를 크리프 파단 시간에 따라 Figs. 6~8에 나타냈다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 10MHz에서는 전파속도가 거의 변화가 없지만 Fig. 7, 8에서 볼 수 있듯이 15MHz와 20MHz에서는 크리

프 시간의 증가에 따라 각속도도 감소함을 알 수 있다. 이는 다른 연구자^[6]들의 연구와 유사하다. 10MHz에서 감소가 없는 것은 10MHz 탐촉자의 지름(10mm)이 시험편보다 커서 상당히 많은 노이즈가 발생한 것도 한 원인이라고 생각된다. 아울러 15MHz와 20MHz의 결과에서 각속도에 의한 크리프 손상 평가가 가능하다고 생각된다.

(b) 균속도 측정

시험편을 하나의 탄성봉으로 보고 끝단의 경계조건을 자유단이라고 설정하면 탄성파의 전파 이론에 의해서 입사된 파동의 변위는 끝단에서 원래의 크기와 위상으로 반사되어 돌아온다. 파동이 원래의 위상과 크기 그대로 반사되는 원리에 근거하여 반사파가 돌아오는 시간 간격으로부터 파의 전파속도를 구할 수 있다.

입사파의 선단에서 반사파의 선단까지 걸리는 시간으로부터 전파시간을 획득하고 획득한 시간에 따라 파의 균속도가 계산된다. 균속도는 크리프 파단 시간에 따라 감소함을 나타내고 있다.

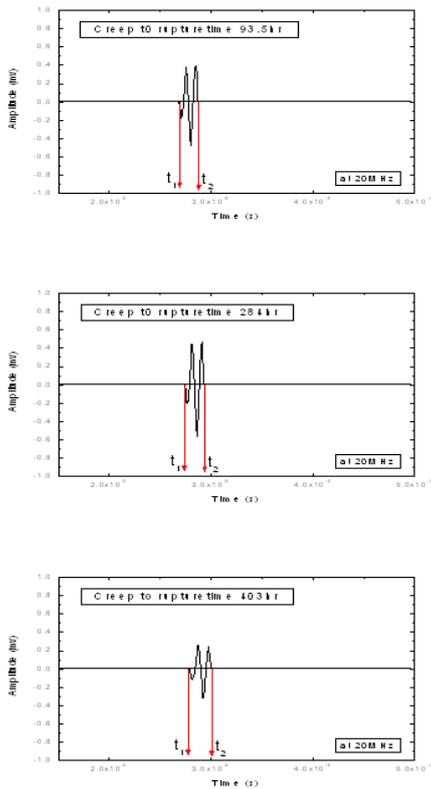


Fig. 5 First reflected waves of ultrasonic signal at 20MHz transducer

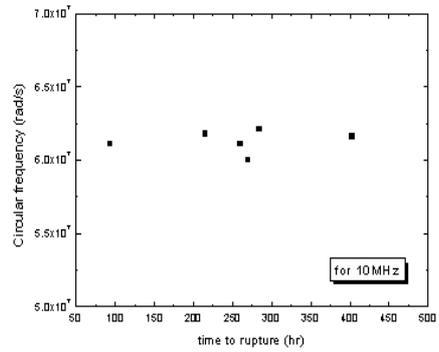


Fig. 6 Relationship between circular frequency and time to rupture at 10MHz transducer

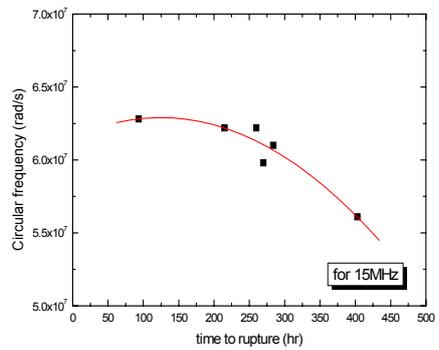


Fig. 7 Relationship between circular frequency and time to rupture at 15MHz transducer

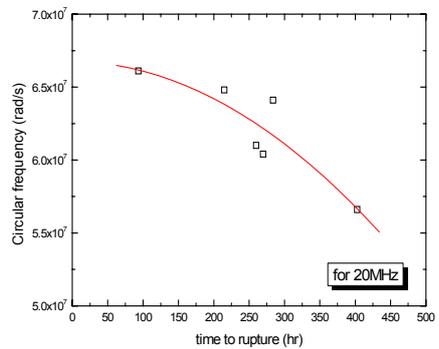


Fig. 8 Relationship between circular frequency and time to rupture at 20MHz transducer

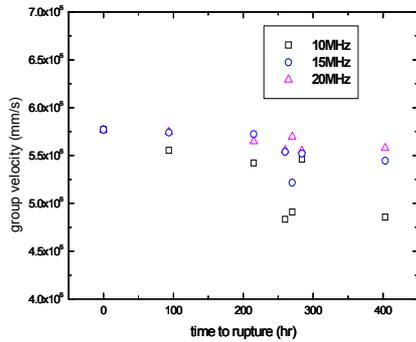


Fig. 9 Relationship between group velocity and time to rupture

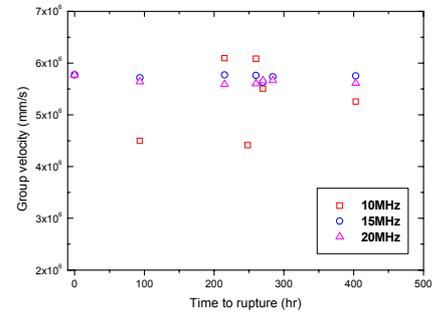


Fig. 10 Relationship between group velocity and time to rupture

3.3.3 하중작용선 수직 방향 측정

(a) 가속도 측정

10MHz에서는 구간을 10π 로 하였으며 15MHz, 20MHz에서는 6π 로 하여 가속도를 계산한 결과를 크리프 파단 시간에 따라 Fig. 11에 나타냈다. 여기서 볼 수 있듯이 모든 그래프에서 거의 변화가 없었다. 이는 하중작용선 수직 방향에서 시험편의 치수가 비교적 작기에 파의 진행거리가 짧아 재료의 크리프 특성이 적게 반영된 것이 한 원인이고, 다른 한 원인은 이 방향에서 하중작용 방향보다 크리프 손상에 의한 재료의 물성값의 변화가 적기 때문이라고 판단된다. 이러한 사실은 Tomohiro^[6]가 제안한 모델과도 일치하는 것이다. 그러므로 하중작용선 수직 방향에서의 평가를 하려면 보다 큰 시험편에 의한 실험이 필요하다고 생각된다.

(b) 균속도 측정

Fig. 10은 하중작용선 수직 방향에서의 균속도 측정결과이다. 여기에서도 마찬가지로 속도의 변화가 거의 감지되지 않았다.

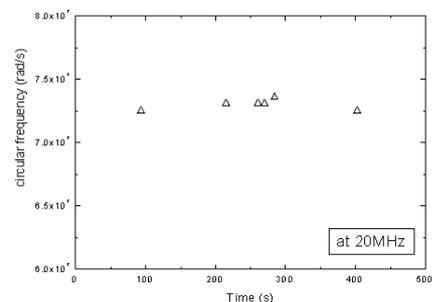
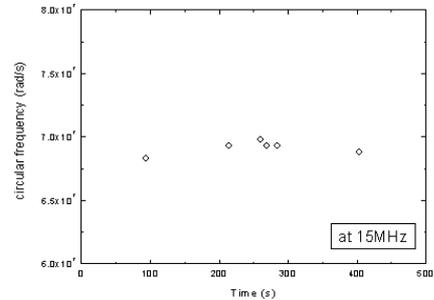
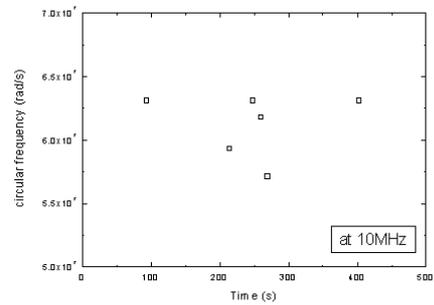


Fig. 11 Relationship between circular frequency and time to rupture

3.4 금속 조직사진에 의한 분석

Fig. 12는 파단시간이 93.5hr, 284hr, 403hr인 시험편의 사진이다. 사진은 크리프 파단된 시험편에서 파단부를 채취하여 그라인딩 및 폴리싱한 후 5%질산 용액에서 전해에칭을 한 후 100배 확대하여 얻은 것이다. 여기서 상하방향은 하중 작용 방향이다. 사진에서 볼 수 있듯이 캐비티(cavity)의 양은 크리프 시간의 증가에 따라 명확히 증가함을 알 수 있으며 캐비티는 하중 작용선과 수직인 방향으로 발생 성장함을 확인할 수 있다. 이는 하중선 방향에서 초음파 속도의 감소가 더 크게 나타나는 원인에 대한 설명이 될 수 있다.

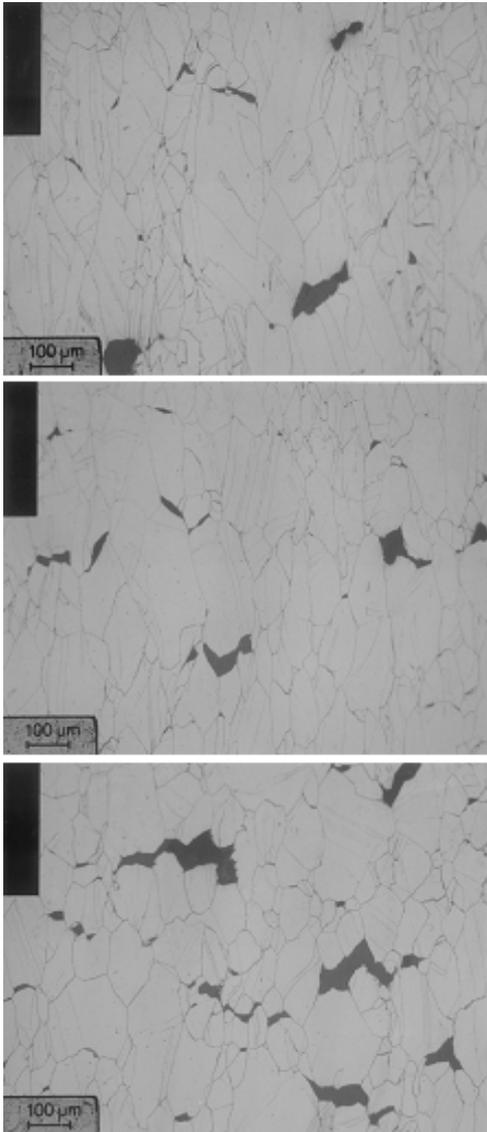


Fig. 12 Photography of micro- structure (a) for 93.5hr. (b) for 284hr. (c) for 403hr.

4.결 론

본 연구에서는 316LN 스테인리스강에 대한 크리프 파단 실험을 실시한 후 파단된 시험편에 대하여 하중작용선 방향과 하중작용선 수직 방향에서의 초음파 신호를 획득하였으며, 초음파에 의한 크리프 손상 평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 하중작용선 방향에서 얻은 초음파 신호에 대한 각속도와 균속도에 대한 분석을 통하여 15MHz와

20MHz 탐촉자를 사용하였을 때 크리프 시간에 따라 각속도가 감소함을 확인하였으며 따라서 각속도에 의해 크리프 손상 평가가 가능함을 확인하였다.

(2) 하중작용선 방향에서의 균속도에 대한 분석을 통해 크리프 하중 작용 시간이 증가함에 따라 모두 감소하는 것으로 나타났으며 따라서 균속도도 크리프 속도 평가가 가능할 것으로 확인되었다. 하지만 변화량이 각속도의 변화량에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

(3) 하중작용선 수직방향에서 얻은 초음파 신호에 대한 각속도와 균속도에 대한 분석에서는 모든 주파수의 탐촉자에서 각속도와 균속도의 변화가 거의 없었다. 이는 하중작용선 수직방향에서는 본 실험에 사용된 수직입사 탐상법으로는 평가가 어려움을 보여준다.

참고문헌

1. Lee, S.G., Chung, M.H., "Creep Damage Evaluation of High-Temperature Pipeline Material for Fossil Power Plant by Ultrasonic Test Method," The Korean Society of Ocean Engineers, Vol.13, No.2, pp.99-107, 1999.
2. Matsubara, S., Yokono, Y. and Imanaka, T., "Diagnosis of Material Degradation by Ultrasonic Wave," Japanese Society for Nondestructive Inspection, Vol.46, No.3, pp.185-190, 1997.
3. Kim, J.P., Seok, C.S., "A Study on the Evaluation of Material Degradation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel using Ultrasonic Techniques," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.25, No.12, pp.2116-2124, 2001.
4. Schmerr, JR L.W., 『Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation』, New York and London, pp.283-287, 1998.
5. Fukuhara, H., Shinyya, N. and Kyono, J., "Detection of Creep Damage by Ultrasonic Wave," Japanese Society for Nondestructive Inspection, Vol.40, No.7, pp.450-455, 1991.
6. Morishita, T., "Creep Damage Modeling Based on Ultrasonic Velocities in Copper," International Journal of Solids Structures, Vol.34, No.10, pp.1169-1182, 1997.
7. OH, S.W., Park, K.D., Kang, S.H. and Park, I.S. "The Steady-State Creep Rate and Creep-Rupture Life of 2024 Al Alloy at High Temperature," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.12, No.3, pp.513-519, 1988.