

후방복사된 초음파를 이용한 12Cr강 부식 피로특성 평가

Evaluation of Corrosion Fatigue Characteristics of 12Cr Steel Using Backward Radiated Ultrasound

권성덕*, 윤석수*, 송성진**, 배동호**

Sung-Duk Kwon*, Seok-Soo Yoon*, Sung-Jin Song** and Dong-Ho Bae**

초 록 화력발전 플랜트의 터빈 블레이드(blade) 재료인 12Cr 합금강의 고속 열화 시편에 대한 레일리(Rayleigh) 표면탄성파의 산란과 속도의 주파수 의존특성을 액체/고체 경계 면에서 표면파의 발생기구에 의해 나타나는 후방복사 초음파 세기의 입사각 의존성으로 간접 평가하고 부식피로 특성과 비교 분석하였다. 후방복사 현상이 발생하는 입사각 쪽은 부식온도와 반비례하였으며 이는 효과적 부식층의 두께 증가로 설명되었다. 이 프로파일의 폭은 피로시험에서 균열성장 관계식인 파리스(Paris) 법칙의 지수 m 과 선형적으로 반비례하여 열화시편의 부식 피로 특성의 비파괴적 평가에 있어 후방복사된 초음파를 이용한 기술이 매우 유용함을 보여 보여주었다.

주요용어: 초음파, 부식, 피로특성, 레일리 표면파, 주파수 의존성

Abstract The corrosion-fatigue characteristics of the 12Cr steel, which is widely used in fossil power plants as a turbine blade material, are evaluated nondestructively by use of the Rayleigh surface wave. In this study, the frequency dependency of the Rayleigh surface wave is investigated indirectly by measuring the angular dependency of the backward radiation of the incident ultrasonic wave in the aged specimens, and then compared to the corrosion-fatigue characteristics. The width of the backward radiation profile decreases as the increase of the aging temperature, which seems to result from the increase of the effective degrading layer thickness. This parameter also shows an inversely proportionality to the exponent, m , in the Paris law which predicts the crack size increasement due to fatigue. The result observed in this study demonstrates high potential of the backward radiated ultrasound as a tool for the nondestructive evaluation of the corrosion-fatigue characteristics of the aged materials.

Keywords: ultrasound, corrosion, fatigue test, Rayleigh surface wave, dispersion

1. 서 론

레일리 표면탄성파는 깊이에 따라 지수적으로 감소하는 변위를 보이며 표면을 따라 전파된다. 표면파의 효과적인 침투깊이는 한 파장 정도이며[1] 따라서 표면파의 전파특성은 표면지역 한 파장이내의 깊이에 따른 물성변화(gradients)에 의해 결정된다. 파장은 주파수에 반비례

하므로 깊이에 따른 물성변화가 있는 경우 표면파의 속도는 주파수에 의존하며 이 주파수 의존성(dispersion)으로부터 표면지역 물성변화의 유추도 가능하다[2,3]. 물속에 담겨진 시편표면에 초음파를 입사시키면 특정 입사각에서 표면파가 모드전환에 의해 발생하고 발생된 표면파의 에너지 누수와 산란으로 인해 경계면에 반사빔의 수평적 이동인 쇼흐(Schoch)변위, 최소반사율 그리고 후방

복사 등으로 이루어진 비대칭적 반사장이 나타난다[4]. 최근 입사한 방향으로 상당량의 가간섭성 초음파가 되돌아오는 후방복사를 이용한 시편 표면지역의 미세구조에 대한 연구가 있었고[5] 광대역의 초음파를 사용하여 후방복사된 초음파의 입사각 의존성으로부터 부분적인 표면파 속도의 주파수 의존성의 평가가 시도되었다[6]. 본 실험에서는 화력발전 플랜트의 터빈 블레이드(blade) 재료인 12Cr 합금강의 고속 열화 시편에 대한 레일리(Rayleigh) 표면탄성과 속도의 주파수 의존성을 후방복사된 초음파의 입사각 의존성(angular profile)으로 간접 평가하고 부식피로 특성과 비교 분석하여 열화 시편의 표면지역 물성변화와 부식 피로특성의 비파괴적 평가를 시도하였다.

2. 실험

Table 1은 실험에 사용된 12Cr 강의 화학적 성분이다. 시편의 크기는 63x60x13mm³ 이며 25°C, 60°C, 90°C의 증류수 환경에서 9개월 고속 열화된 후 피로시험이 수행되었다. 피로시험의 조건은 Table 2와 같다. 후방복사의 입사각 의존성 측정을 위하여 물속에 담겨진 시편에 대해 입사각이 등각속도로 변하는 초음파 각도계 시스템이 사용되었다. 4.7MHz 중심의 광대역 초음파가 입사되었다. 입사지역에서 산란으로 인해 직접 발생된 후방복사파의 주파수 성분은 저주파성분이 유실되어 있고 진행후 시편의 끝에서 반사되어 되돌아온 표면파로부터의 후방복사파는 진행중 누수율의 주파수 의존성으로 인해 고주파 성분이 유실된다. 본 실험에서는 발생된 표면파의 주파수 성분의 측정이 중요하므로 표면파의 누수와 산란 성분을 모두 포함하도록 입사지역을 시편의 끝인 구석으로 이동하여 후방복사파의 주파수 성분 유실을 최소화하는 구석 효과법(corner effect)이 사용되었다. Fig. 1은 효과법과 초음파 측정 시스템의 구역그림이다.

3. 이론적 고려

액체/고체 경계면에서 후방산란된 초음파 세기의 입사각 의존성 곡선에 모드전환에 의해 고체표면에 표면파가 발생하는 레일리 각에서 갑작스런 세기의 증가(peak)가

Table 1 Chemical composition of 12Cr alloy steel

| | | | | | | | | | | |
|------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|
| Element | C | Si | Mn | P | S | Ai | Cr | Mo | Al | Cu |
| Content(%) | 0.16 | 0.34 | 0.46 | 0.016 | 0.003 | 0.18 | 11.9 | 0.09 | 0.006 | 0.06 |

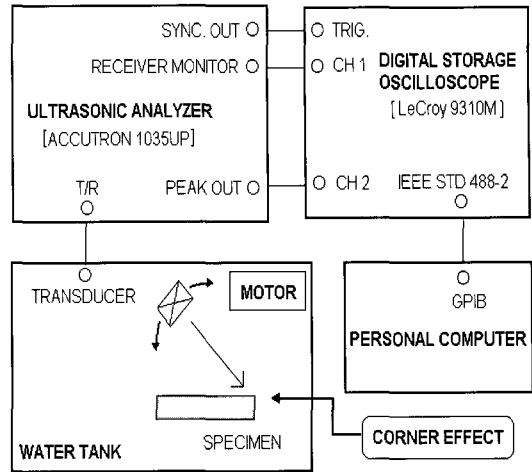


Fig. 1 Ultrasonic backscattering by corner effect and measuring system

Table 2 Fatigue test condition

| Conditions | Contents | |
|----------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| | Loading condition | Load ratio ($R = P_{min}/P_{max}$) |
| Load range (ΔP) | | Constant |
| Maximum load (P_{max}) | | 7848N |
| Loading speed(f) | | 0.5Hz |
| DCPD method | Input current | 10A |

보이며(Fig. 2) 이를 후방복사(backward radiation)라 한다. 최근 연구[6]에 따르면 후방복사가 단순한 피크가 아니라 탐촉자의 지향성 프로파일과 관련이 있어 표면파 속도의 주파수 의존성이 없는 경우에는 지향성 프로파일을 닮은 프로파일을 보이며 주파수 의존성이 있는 시편에서 광대역 탐촉자가 사용될 경우 그 주파수 영역의 속도 곡선의 기울기에 따라 후방복사 프로파일의 폭은 변하게 됨이 밝혀졌다. 원리적으로 주파수에 따른 속도 변화가 클수록 후방복사가 나타나는 입사각의 폭인 프로파일 폭은 넓어지며 입사한 에너지가 주파수 성분별로 입사각에 따라 재분배되는 주파수 대역 필터(band pass filter)의 기능으로 인해 후방복사 정점의 세기는 폭과 반비례하여 작아지게 된다. 아래의 식은 후방복사 세기의 입사각 의존성 이론이며 각 입사각에서의 후방복사 세기는 탐촉자의 주파수 응답특성, 표면파의 산란특성, 탐촉자의 지향성 그리고 표면파 속도의 주파수 의존성등에 의해 결정됨을 보여준다[6].

$$A_B(\theta_i) = A \int_0^{\infty} T(f) C(f, d) D(\theta_i - \theta(f))^2 df \quad (1)$$

- f : frequency,
- A : proportional constant
- θ_i : incidence angle of beam center
- $D(\theta)$: directivity of ultrasonic beam
- $T(f)$: frequency characteristics of transducer
- $\theta(f)$: angular dispersion function
- $C(f, d)$: conversion function from forward to backward leaky wave where d is the scatter size

4. 결과 및 논의

Fig. 2는 90°C 증류수 환경하에서 9개월 고속열화된 시편에 대한 후방산란된 초음파의 입사각 의존성이다. 제 1 왼쪽의 피크는 수직 입사일 때이며 입사각의 미소증가에도 후방산란 에너지의 급격한 감소를 보여준다. 이 감소율은 표면 거칠기에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 17° 정도에서 보이는 산란 에너지의 완만한 증가는 고체내 굴절된 종파가 전방산하는 제 1 임계각 근처에서 표면을 따라가는 종파의 산란에 의한 것으로 그 프로파일의 퍼짐으로 보아 산란이 주 요인임을 말해준다. 34° 에서 보이는 후방산란파의 증가가 바로 표면파의 발생과 산란 그리고 입사방향으로의 에너지 복사에 의해 나타나는 후방복사이다. 제 1 임계각 근처에서 나타난 프로파일과는 확연히 다르게 날카로운 봉우리와 후방복사의 특성인 좌우 비대칭 프로파일 패턴을 보여준다[6]. 이

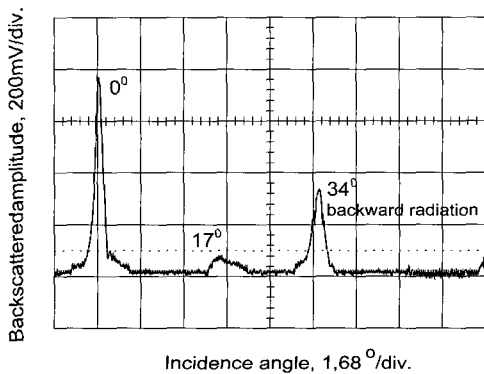


Fig. 2 Angular dependence of ultrasonic backscattering by corner effect involving the backward radiation of 90°C specimen

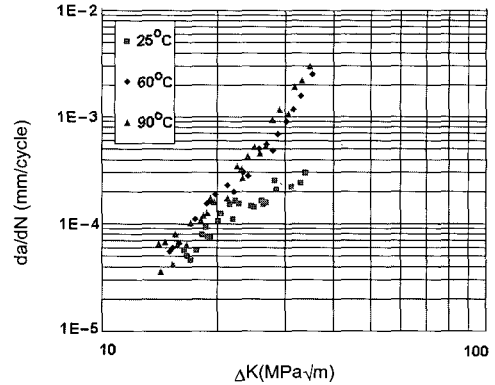


Fig. 3 Relationship between da/dN and ΔK in distilled water

비대칭성은 레일리각과 인접한 제 2 임계각 근처에서 횡파의 산란과 표면파의 고체내 산란에 의한 것으로 표면 거칠기나 표면지역내 미세결합등의 평가에 사용될수 있을 것이다. 따라서 본 연구의 주 목적인 표면파 속도의 주파수 의존성의 간접 측정에는 산란영향을 받지 않는 프로파일의 오른쪽 쪽을 사용하는 것이 타당하다.

Fig. 3에는 증류수내 하중범위 ΔP 일정 피로시험을 수행하여 얻은 12Cr합금강 균열재의 균열성장특성곡선인 $da/dN - \Delta K$ 의 관계를 증류수의 온도에 따라 비교 도시한 것이다. 온도가 증가함에 따라 균열성장속도가 증가하는 결과를 나타내고 있다. Table 3에는 균열성장 관계식 파리스(Paris) 법칙에 따라 결정된 상수 C 와 m 수직 반사 값에 대해서 규격화된 후방복사 세기 A_B 그리고 후방복사 프로파일의 정점각인 레일리각을 스넬의 법칙(Snell's law)에 대입하여 환산된 레일리 표면파의 속도 v_R 가 제시되어 있다.

Table 3 Experimental estimation of C , m in Paris law, A_B , v_R and $\Delta \theta$

| Temperature (°C) | 25 | 60 | 90 |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| C in Paris law | 9.36×10^{-10} | 8.00×10^{-10} | 3.00×10^{-10} |
| m in Paris law | 2.23 | 3.55 | 4.49 |
| A_B (dB) | 12.24 | 11.07 | 7.42 |
| v_R (m/s) | 2823.2 | 2796.6 | 2628.8 |
| $\Delta \theta$ (degree) | 1.07 | 0.89 | 0.73 |

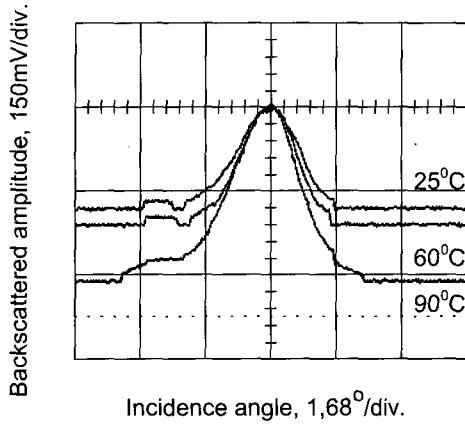


Fig. 4 Comparison of normalized backward radiation profile for 25°C, 60°C and 90°C specimens

Fig. 4는 후방복사 프로파일의 패턴과 폭을 비교하기 위해 스케일을 수직신호 대비 규격화하고 정점끼리 일치 시켜본 그림이다. 부식 온도가 증가할수록 프로파일의 폭이 감소하며 산란영향을 적게 받는 오른쪽 폭은 선형적 감소를 보여준다. 표면지역 거칠기나 미소결합의 분포와 관련이 있는 왼쪽 폭은 오른쪽 폭과 다르게 60°와 90°시편이 큰 차이를 보이지 않으며 Table 3에 보여진 파리스 법칙의 상수 C 역시 60°와 90°시편의 값에서 25°시편의 값에 비해 큰 차이를 보이지 않는 것은 흥미로운 일이다. 온도에 따라 선형적 변화를 보여주는 오른쪽 폭 $\Delta\theta$ 가 정점비 5dB의 값으로 Table 3에 제시되어 있다. 후방복사 프로파일 폭의 감소는 주파수 의존곡선 기울기의 감소를 의미한다. 부식열화에 의한 영향은 깊이방향으로 지수적 함수관계를 가질 것이나 논의를 위해 단순히 효과적 열화층(effective degrading layer)이 존재하는 것으로 가정하자. 열화가 심한 고온에서 표면과 속도가 감소한 것은 열화층이 음향학적으로 작은 임피던스를 가진 얇은층의 부과효과/loading)로 볼수 있다[7]. 이 경우 표면과 속도의 주파수 의존 곡선은 주파수와 부과된 얇은층 두께의 증가에 따라 감소하며 그 기울기는 점차 작아져 부과층 만의 표면과 속도값에 수렴하는 형태이다[2]. 따라서 큰 열화층 두께일 경우 기울기는 작아지고 프로파일의 폭은 감소하게 되므로[3] 온도 증가에 따라 부식에 의한 효과적 열화층의 두께가 증가한다는 결론에 이른다. Table 3에서 보듯이 부식 온도가 높을수록 후방복사 세기가 증가한 것은 후방복사의 비대칭성으로 볼 때 부식으로 인한 산란원의 증가가 한 원인이기도 하겠으나

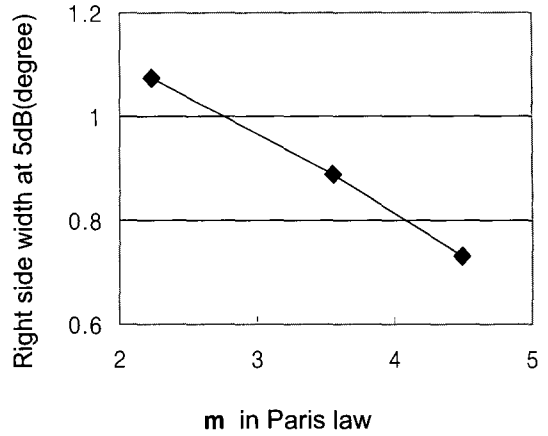


Fig. 5 m versus the variation of a right half width at 5dB of backward radiation profile

[7] 높은 온도에서 열화층의 증가와 함께 표면과 속도의 주파수 의존 곡선의 기울기가 작아져 이론에서 설명된 것과 같이 후방복사 폭은 좁아지고 주파수대역 필터의 효과가 감소된다. 따라서 정점각에서 되돌아 오는 후방복사파의 주파수 성분은 낮은 온도 시편에 비해 상대적으로 더 많이 중첩되고 더 큰 에너지가 되돌아 온 것이 후방복사 세기의 증가에 더 큰 영향을 준 것으로 생각된다.

Fig. 5는 각기 후방복사 프로파일 폭에 대한 파리스 법칙(Paris law)에 나타난 지수 m의 변화를 나타낸 것이다. m은 프로파일 폭에 선형적으로 반비례하였다. 열화층의 두께변화가 부식피로 실험에서 피로균열의 진전속도에 직접적인 영향을 미침이 확실하므로 피로시험 관계식 상수와의 선형성은 후방복사 프로파일의 폭을 이용한 부식강도의 비파괴적 평가의 우수성을 보여준다.

5. 결론

12Cr 합금강의 고속 열화 시편에 대한 레일리(Rayleigh) 표면탄성과 속도의 주파수 의존성을 액체/고체 경계 면에서 후방복사된 초음파의 입사각 의존성으로 간접 평가하였고 부식피로 특성과 비교 분석하였다. 후방복사 프로파일의 폭은 부식 온도 증가에 따라 감소하였으며 주파수 의존성 커브의 기울기가 작아짐을 의미한다. 이는 높은 온도에서 열화된 시편은 낮은 온도에 비해 상대적으로 표면층 아래 더 깊이 부식에 의한 영향을 받아 효과적 열화층(effective degrading layer) 두께가 증가

된 것으로 해석된다. 균열성장 관계식인 파리스 법칙의 급수 m 과는 선형적으로 반비례하였고 상수 C 와는 지수적인 비례를 보였다. 표면파 속도의 주파수 의존성 정보를 가지고 있는 후방복사 프로파일의 폭은 부식강도뿐 아니라 마모에 의한 잔류응력 분포의 평가등 표면지역의 깊이에 따른 물성변화(Gradients) 비파괴적 평가에도 응용이 될 수 있을 것으로 본다.

참고문헌

- [1] I. A. Viktorov, Rayleigh and Lamb waves, (Plenum Press, New York, (1967)
- [2] T. L. Szabo, J. Appl. Phys., Vol. 46(4), pp. 1448-1454, (1975)
- [3] S. D. Kwon and H. C. Kim, "Dispersion of acoustic surface waves by velocity gradients," J. Appl. Phys., Vol. 62, pp. 2660-2664, (1987)
- [4] H. L. Bertoni and T. Tamir, "Unified theory of Rayleigh angle phenomena for acoustic beam at liquid-solid interfaces," J. Appl. Phys., Vol. 2, pp. 157-72, (1973)
- [5] Ho C. Kim, Jeong K. Lee, Sang Y. Kim & Sung D. Kwon, "Influence of microstructure on the ultrasonic backscattered energy from a liquid/solid interface at the Rayleigh angle," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 38, Part 1, No. 1A, pp. 260-267, (1999)
- [6] Sung D. Kwon, Myoung S. Choi and Seung H. Lee, "The applications of ultrasonic backward radiation from a layered substrate submerged in liquid," NDT & E International, Vol.33, No. 5, pp. 275-281, (2000)
- [7] K. C. Lee, J. H. Oh, K. W. Nam and J. S. Lee, "Non-destructive evaluation by joint time-frequency analysis of degraded SUS 316 Steel," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 19, No. 4, pp. 270-276, (1999)