

후방복사된 초음파를 이용한 터빈 블레이드 재료의 부식열화특성 평가

송성진* · 김영환* · 배동호* · 정민호** · 권성덕***
(2002년 3월 2일 접수, 2002년 9월 9일 심사완료)

Evaluation of Corrosion Degradation Characteristics of Turbine Blade Material Using Backward Radiated Ultrasound

Sung-Jin Song, Young H. Kim, Dong Ho Bae, Min-Ho Jung and Sung-Duk Kwon

Key Words: Corrosion Degradation(부식열화), Backward Radiated Ultrasound(후방복사 초음파),
Rayleigh Surface Wave(레이리 표면파), Dispersion(분산)

Abstract

The corrosion degradation characteristics of the 12Cr alloy steel, which is widely used in fossil power plants as a turbine blade material, are evaluated nondestructively by use of the backward radiated Rayleigh surface wave. In order to evaluate corrosion degradation characteristics, we constructed automated system for the backward radiation, and 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 specimens. The velocity of the surface wave decrease as the increase of the aging time in the backward radiation profile, which seems to result from the increase of the effective degrading layer thickness. And, amplitude of the surface wave increase as the aging time, which seems to result from the increase of the intergranular corrosion. The result observed in this study demonstrates high potential of the backward radiated ultrasound as a tool for the nondestructive evaluation of the corrosion degradation characteristics of the aged materials.

1. 서 론

12Cr 합금강은 화력 발전 플랜트의 터빈 블레이드 재료로 사용되고 있기 때문에, 역학적 조건뿐만 아니라 사용환경도 매우 열악한 부식성 조건으로 파악되고 있다. 따라서 부식에 의해 생성된 활성적 표면 피트(pit)로부터 균열이 발생 및

성장하여 손상에 이르게 되면, 운전중지와 보수를 위한 부품교체 등으로 인해 상당한 경제적 손실이 야기되므로, 터빈 블레이드의 안전설계와 건전성 평가를 위해서는 재료의 부식열화 특성 평가가 필요하다. 열화에 의한 터빈 블레이드 재료의 특성평가를 위해서는 피로파괴 시험이나 경도시험, 충격시험과 같은 파괴적 평가와 초음파 시험을 이용한 비파괴적 평가 등이 사용될 수 있다. 그러나, 파괴적 평가를 위해서는 운전중인 설비로부터 시편을 채취해야 하는 어려움이 있는 반면에, 비파괴적 평가법은 이러한 문제점 없이 열화특성을 평가할 수 있다.⁽¹⁾ 그런데, 응축기(condenser), 정속계(demineralizer system) 및 순환기 계통에서의 누설, 과열기와 보일러 내의 불순물의 용해, 포화증기에 혼입된 mist의 용해 등 다양한 원인들에 의해 과열기를 거쳐 터빈에 유입된

* 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : sjsong@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7451 FAX : (031)290-5276

* 성균관대학교 기계공학부

** 한국가스안전공사 가스안전시험연구원

*** 안동대학교 물리학과

불순물들이 극히 미량이라 할지라도 터빈 블레이드의 표면에 부착되면, 국부적으로 농축되어 표면부식이 발생하게 되므로 전통적인 초음파 시험법으로 표면부식에 의한 부식열화 특성을 평가하는 데에는 많은 어려움이 있다. 그러나 후방복사된 레일리 표면파의 입사각 의존성과 주파수 성분 분석을 이용하면 손쉽게 재료의 부식열화를 평가할 수 있다.

레일리 표면탄성파는 길이에 따라 변위가 지수적으로 감소하며 표면을 따라 전파한다. 표면파의 효과적인 침투깊이는 한 파장 정도이므로 표면파의 전파특성은 표면지역 한 파장 이내의 길이에 따른 물성변화(Gradients)에 의해 결정된다.^(2,3) 파장은 주파수에 반비례하며 부식열화와 같은 길이에 따른 물성변화가 있는 경우 표면파의 속도는 주파수에 의존하므로 이 주파수 의존성(Dispersion)으로부터 표면지역 물성변화의 유추도 가능하다.⁽⁴⁾ 물 속에 담겨진 시험표면에 초음파를 입사시키면 특정 입사각에서 표면파가 모드 변환에 의해 발생하고 발생된 표면파의 에너지 누수와 산란으로 인하여 경계면에 반사빔의 수평적 이동인 쇼흐(Schoch)변위와 후방복사 등으로 이루어진 비대칭적 반사장이 나타난다.⁽⁴⁾ 이러한 입사한 방향으로 상당량의 가간섭성 초음파가 되돌아오는 후방복사 초음파를 이용한 시험 표면지역의 미세구조에 대한 연구가 있었다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 화력발전 플랜트의 터빈 블레이드 재료인 12Cr 합금강의 인공열화 시험에 대한 레일리 표면탄성파의 산란과 속도의 주파수 의존 특성을 액체, 고체 경계 면에서 표면파의 발생기구에 의해 나타나는 후방복사 초음파 세기의 입사각 의존성으로 간접적으로 평가하고 부식열화 특성과 비교하여 열화 시험의 표면지역 물성 변화와 부식열화 특성의 비파괴적 평가를 시도하였다.

2. 관련이론

액체/고체 경계면에서 고체표면에 표면파가 발생하는 레일리 각(Rayleigh angle)에서 입사한 방향으로 복사되는 초음파의 세기가 갑작스런 증가를 보이는데 이를 후방복사(backward radiation)라 한다. 액체/고체 경계면에 레일리 각으로 물 속에 담긴 시험체에 초음파를 입사시키면 그 에너지의

일부는 입사각과 같은 각도로 반사되고, 나머지는 고체로 침투하여 모드 변환에 의해 레일리 표면파(Rayleigh surface wave)로 전환되어 표면으로부터 수 파장의 깊이정도에만 에너지가 분포하여서, 표면을 따라 전파한다. 리키 레일리 표면파는 표면을 따라 전파하면서 반사파와 같은 방향으로 에너지를 누수하며 표면 지역과 표면 아래지역의 미세구조의 영향으로 산란 특성이 변화한다. 그리고, 입사점에서 전방으로 반사되는 반사파는 액체로 누수되는 리키 레일리 표면파와 상쇄간섭을 일으켜 널 음장(null field) 영역을 형성하고, 반사파의 중심이 전방으로 이동하여 나타나는데 이 이동한 거리를 쇼흐 변위(Schoch displacement)라 한다.

또한 이 표면파가 미세구조에 의한 산란과 에너지 누수로 인하여 입사한 방향으로 상당한 량의 초음파가 되돌아오는 후방복사가 일어난다. 최근 연구에 따르면 후방복사가 단순한 피크가 아니라 초음파 탐촉자의 지향성 프로파일과 관련이 있어 표면파 속도의 주파수 의존성이 없는 경우에는 지향성 프로파일을 닮은 프로파일을 보이며 주파수 의존성이 있는 시험에서 광대역 탐촉자가 사용될 경우, 그 주파수 영역의 속도 곡선의 기울기에 따라 후방복사 프로파일의 폭은 변하게 됨이 밝혀졌다. 원리적으로 주파수에 따른 속도변화가 클수록 후방복사가 나타나는 입사각의 폭인 프로파일의 폭이 넓어지며 입사한 에너지가 주파수 성분별로 입사각에 따라 재분배되는 주파수 대역 필터(band pass filter)의 기능으로 인해 후방복사 정점의 세기는 폭과 반비례하여 작아지게 된다. 입사각이 θ_i 일 때에, 후방복사 초음파의 세기, $A_B(\theta_i)$ 는 다음과 같이 주어진다.⁽⁵⁾

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

여기서 f 는 초음파의 주파수, A 는 비례상수이다. 또한, $D(\theta)$ 는 입사 초음파의 지향성, $T(f)$ 는 탐촉자의 주파수 특성으로 후방복사 초음파에 사용된 탐촉자의 특성을 기술한다. $C(f, d)$ 는 크기가 d 인 산란자에 의한 전방 누수파에서 후방 누수파로의 변환 효율으로 표면파의 산란 특성을 나타내는데, 산란자의 크기가 클수록 이 값은 커진다. $\Theta(f)$ 는 각도 분산성 함수로서, 표면파의

주파수 의존성을 기술하는 항이다. $D(\theta)$ 와 $T(f)$ 는 장치의 특성에 의존하며, $C(f, d)$ 와 $\theta(f)$ 는 시험편의 물성특성에 의존한다. 동일한 시험장치를 사용할 경우에는 $D(\theta)$ 와 $T(f)$ 는 동일하므로 후방복사 프로파일의 변화는 전적으로 시험편의 물성에 의하므로, 후방복사 프로파일을 분석하면 시험편의 물성변화를 알 수 있다.

3. 실험장치 및 실험

3.1 실험장치

지금까지 후방복사 초음파 신호를 측정하기 위해서는 크게 두 가지의 문제점을 가지고 있었다. 첫 번째가 정밀한 초음파 입사각도를 제어할 수 없다는 것이고, 두 번째가 측정하고자 하는 위치에 손쉽게 초음파를 입사시킬 수가 없다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는, 초음파 입사각도와 입사위치를 컴퓨터에서 자동으로 제어할 수 있는 후방복사 초음파 측정 시스템이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 위의 문제점들을 해결할 수 있는 자동화된 후방복사 초음파 측정 시스템(Automatic backward radiated ultrasonic measurement system)을 개발하였다. Fig. 1은 자동화된 후방복사 측정시스템이다.

시험편 홀더는 입사각을 바꿀 수 있도록 회전이 가능할 뿐만 아니라 입사위치를 변화시켜가며 시험편을 스캔할 수 있다. 이러한 동작을 위해 세 개의 마이크로 스텝 모터가 사용되어 졌고, 컴퓨터에 의해 제어되어진다. 회전운동 축과 병진운동 축의 정밀도는 각각 0.01° 와 0.05mm 이내 이다.

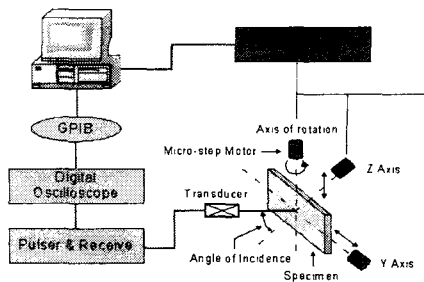


Fig. 1 Schematic diagram of automatic backward radiation experimental setup

여러 입사각에서 시험편을 조사하기 위하여 5MHz의 광대역 초음파 탐촉자(Technisonic 사)가 사용되었으며, 초음파를 발진하고 수신하는 펄서 리시버는 Panametrics 5800을 사용하였다. 수신된 후방복사 신호는 디지털 오실로스코프 (LeCroy LT342)를 통해 획득되어지고 컴퓨터로 전송되어지며, 전송된 후방복사 초음파의 RF 파형과 주파수 스펙트럼은 저장되고 분석되어진다.

3.2 시험편 및 실험방법

시험에 사용된 재료는 12Cr 합금강으로, 시험편의 크기는 $63 \times 60 \times 18\text{mm}^3$ 이다. 재료를 부식시키는 환경인자는 다양하나, 여화물과 황화물에 의한 영향이 가장 크다. 따라서, 본 연구에서는 부식액으로 3.5wt.%, 90°C NaCl용액과 1M, 90°C Na_2SO_4 용액을 사용하였다. NaCl용액에서 6개월과 9개월간, 그리고 Na_2SO_4 용액에서 3개월과 6개월간 부식 열화 시킨 후 초음파 후방복사 시험이 수행되었다. 본 연구에서 사용된 부식 시험편의 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 그리고 Na_2SO_4 용액에서 부식 열화 시킨 시험편은 표면 부식피복을 제거하여 표면 부식피복의 존재 여부에 따른 부식피로 평가 가능성을 보고자 하였다.

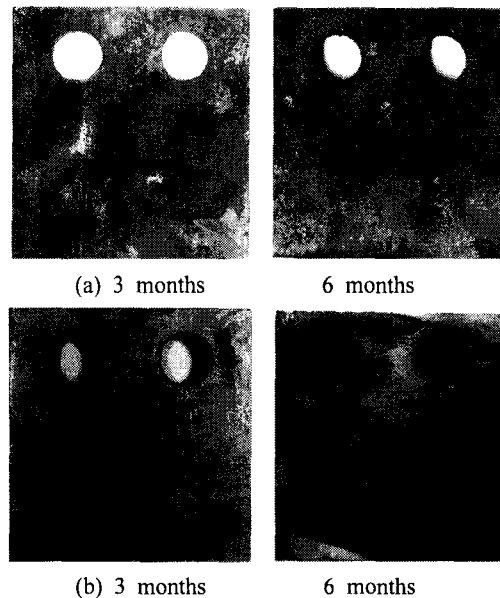


Fig. 2 Specimens for backward radiated ultrasonic test. ((a) in 3.5%, 90°C NaCl solution, (b) in 1M, 90°C Na_2SO_4 solution)

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of 12Cr alloy steel⁽¹⁾ (wt.%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Content (%)	0.16	0.34	0.46	0.016	0.003	0.18	11.9	0.09	0.06
Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)		Elongation (%)						
989.4	1205		13						

Table 2 Fatigue test condition⁽¹⁾

Conditions	Contents	
Loading condition	Load ratio ($R = P_{min} / P_{max}$)	0.1
	Load range (ΔP)	Constant
	Maximum load (P_{max})	7848N
	Loading speed (f)	0.5Hz
DCPD method	Input current	10A

Table 1에 실험에 사용된 12Cr 강의 화학적 조성과 기계적 물성치를 나타내었고, 피로파괴 시험 조건은 Table 2와 같다.

후방복사된 레일리 표면파를 측정하기 위해서 본 연구를 통해 개발된 후방복사 초음파 측정 시스템을 사용하였다. 물 속에 담겨진 부식열화 시험편에 중심주파수가 5MHz인 광대역 초음파 (Technisonic)를 입사하였으며, 초음파를 발진하고 수신하는 pulser-receiver는 Panametrics 5800을 사용하였다. 입사각을 0.1° 간격으로 26° 에서 32° 까지 연속적으로 바꾸어가며 후방복사된 레일리 표면탄성파의 신호를 측정 및 저장하여 분석하였다. 수신된 후방복사 신호는 디지털 오실로스코프(LeCroy LT342)를 통해 획득되어 컴퓨터로 전송되어지며, 전송된 후방복사 초음파의 RF 파형과 주파수 스펙트럼은 저장되고 분석되어 진다. 시험편의 입사위치는 시험편의 모서리로 갈수록 되돌아오는 에너지가 증가하는 구석효과(corner

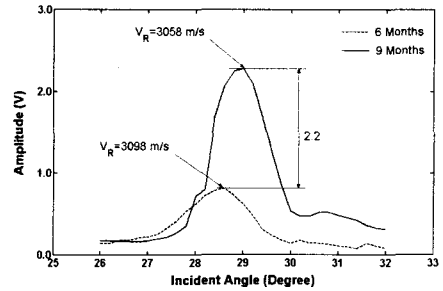


Fig. 3 Comparison of backward radiated surface wave profiles for corroded specimens in NaCl solution during 6 months or 9 months

effect)를 고려하여 동일한 위치에 입사하도록 조절하여 실험하였다.

4. 결과 및 논의

Fig. 3은 3.5wt.%, 90°C NaCl용액에서 6개월과 9개월간 부식열화 시킨 시편에 대한 후방복사된 초음파의 입사각 의존성과 후방복사 세기를 보여주는 프로파일이다. 프로파일에서 후방복사된 표면파의 최대 피크를 보여주는 입사각은 6개월간 부식된 시험편의 경우 28.6° 이고, 9개월간 부식된 시험편은 29° 이다. 이를 속도로 환산하면 스넬의 법칙에 의해 각각 6개월간 부식시편은 3,098m/s이고, 9개월간 부식시편은 3,059m/s이다. 이는 시편 표면의 부식정도에 따라 깊이에 따른 물성변화(gradient)가 존재하게 되며, 열화도가 심한 시험편 일수록 열화층이 음향학적으로 작은 임피던스를 갖는 얇은 층의 부과효과/loading)를 나타내어 표면파의 속도가 감소하게 된다.⁽⁶⁾ 따라서, 이러한 물성변화에 의해 표면파의 속도가 변화하는 분산성(dispersion)을 나타내기 때문에, 이러한 분산성으로부터 표면지역의 물성변화의 유추가 가능하다.

그리고, 6개월과 9개월간 NaCl 용액에서 부식된 시험편에서의 후방복사되어 입사한 방향으로 되돌아오는 초음파의 최대세기를 비교하면 부식정도가 커질수록 세기가 커지며, 이는 입계부식이 진전됨에 따라 표면파의 후방산란이 심해져 입사한 방향으로 되돌아오는 후방복사파의 에너지가 증가하기 때문으로 추정된다. 열화층의 두

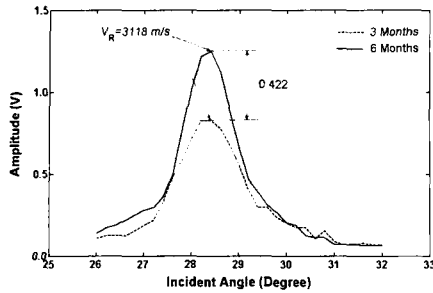


Fig. 4 Comparison of backward radiated surface wave profiles for corroded specimens in Na_2SO_4 solution during 3 months or 6 months

계가 부식피로 실험에서 피로균열의 진전속도에 직접적인 영향을 미치므로 부식열화도 증가에 따른 후방복사 프로파일의 세기의 증가를 통해서 부식 강도를 비파괴적으로 평가 할 수 있다.

Fig. 4는 1M, 90°C Na_2SO_4 용액에서 3개월과 6개월간 부식열화된 시편에 대한 후방복사된 초음파의 입사각 의존성과 후방복사 세기를 보여주는 프로파일이며, 3개월과 6개월간 Na_2SO_4 용액에서 부식된 시험편에서의 후방복사되어 입사한 방향으로 되돌아오는 초음파의 최대세기를 비교한 것이다. 이 실험은 시험편의 부식피복을 제거한 후에 측정하여 부식피복이 없는 상태에서도 열화도 평가 가능성을 보고자 하였다. 부식피복을 제거한 경우에 프로파일에서 후방복사된 표면파의 최대 피크를 보여주는 입사각은 3개월과 6개월간 부식된 시험편 둘 다 동일하게 28.4° 이고, 표면파의 속도는 $3,118\text{m/s}$ 이다. 이는 부식피복을 제거함으로써 음향학적으로 작은 임피던스를 가지는 얇은 층의 부과효과 또한 사라지게 되어 부식열화에 상관없이 표면파의 속도가 일정하게 된다. 그러나 부식피복이 존재할 때보다는 입사한 방향으로 되돌아오는 후방복사 세기의 변화량이 감소하지만 여전히 후방복사된 초음파의 세기는 열화도의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 그러므로 후방복사된 초음파의 분산성(dispersion)보다 세기의 정도에 따른 평가법이 더욱 우수함을 보여준다

5. 결론

후방복사 초음파 신호를 측정하기 위해 초음파 입사각도와 입사위치를 컴퓨터에서 자동으로 제어할 수 있는 자동화된 후방복사 초음파 측정 시스템을 개발하였다. 개발된 후방복사 초음파 측정 시스템을 사용하여 화력 발전 플랜트의 터빈 블레이드 재료로 사용되는 12Cr 합금강의 부식열화도를 분석하였다.

3.5wt.%, 90°C NaCl용액에서 6개월과 9개월간 부식열화된 12Cr 합금강 시편과 3개월과 6개월간 Na_2SO_4 용액에서 부식된 시편에 대한 후방복사된 초음파의 입사각 의존성과 후방복사되어 입사한 방향으로 되돌아오는 에너지 세기의 증가를 통해서 간접 평가하였다. 그리고 부식피복을 제거한 경우에도 후방복사 초음파의 세기의 정도를 통해서 부식 시간에 따른 열화도 비교가 가능하였다.

표면 지역 물성에 대한 정보를 가지고 있는 후방복사된 표면파의 프로파일은 부식열화 뿐만 아니라 앞으로 마모에 의한 잔류응력 분포의 평가 등 표면 지역 물성에 대한 비파괴적 평가에 응용할 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Cho, S. Y., Kim, C. H., Ryu, S. W., Kim, H. J., and Bae, D. H., 2000, "A Study on the Corrosion Susceptibility and Corrosion Fatigue Characteristics on the Material of Turbine Blade," *Trans. KSME, A*, Vol. 24, No. 3, pp. 603~612.
- (2) Szabo, T. L., 1975, "Obtaining Subsurface Profiles from Surface Acoustic Wave Velocity Dispersion," *J. Appl. Phys.*, Vol. 46, No. 4, pp. 1448~1454.
- (3) Kwon, S. D. and Kim, H. C., 1987, "Dispersion of Acoustic Surface Waves by Velocity Gradients," *J. Appl. Phys.*, Vol. 62, pp. 2660~2664.
- (4) Bertoni, H. L., and Tarnir, T., 1973, "Unified

Theory of Rayleigh Angle Phenomena for Acoustic Beams at Liquid - Solid Interfaces," *Appl. Phys.*, Vol. 2, pp. 157~172.

(5) Kim, H. C., Lee, J. K., Kim, S. Y. and Kwon, S. D., 1999, "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.

(6) Lee, K. C., and Lee, J. S., 1999, "Non-destructive evaluation by joint time-frequency analysis of degraded SUS 316 steel," *J. Kor. Soc. Nondestr. Test.*, Vol. 19, No. 4, pp. 270~276.