

후방복사 초음파를 이용한 TMCP강의 부식피로 손상평가

Assessment of Degradation by Corrosion Fatigue of TMCP Steel using a Backward Radiated Ultrasound

김영환*, 송성진*[†], 배동호*, 박진형*, 유형주*, 권성덕**

Y. H. Kim*, S.-J. Song*[†], D.-H. Bae*, J.-H. Park*, H.-J. Yu* and S.-D. Kwon**

초 록 후방복사 레일리 표면파를 사용하여 부식피로에 의한 재료손상을 평가하였다. 25°C, 3.5 wt.% NaCl 수용액에서 TMCP 강재에 대하여 하중의 크기를 변화시키면서 부식피로 시험을 수행하였다. 각각의 시험편에 대해서 입사각에 따른 후방복사 초음파의 진폭변화를 측정하였다. 후방복사 프로파일이 최대가 되는 입사각으로부터 레일리 표면 탄성파의 속도를 결정하였는데, 부식피로 시험에서 파손수명이 길었던 시험편에서의 표면탄성파의 속도가 더 느렸다. 이 사실은 시험편 표면에 발생한 부식손상이 주로 부식환경에 놓인 시간에 의존함을 의미한다. 본 연구에서 얻어진 결과는 후방복사된 레일리 표면 탄성파가 노후 재료의 부식손상을 비파괴적으로 평가하는데 유용한 도구임을 보여주었다.

주요용어 : 부식피로, 부식손상, 레일리 표면파, 후방복사 초음파

Abstract Material degradation due to corrosion fatigue was evaluated nondestructively using backward radiated Rayleigh surface wave. A corrosion fatigue test was carried out for the specimens made of thermo-mechanically controlled process steel in 3.5 wt.% NaCl solution at 25°C. The backward radiation profile, which is the amplitude variation of backward radiated ultrasound according to the incident angle, of the specimens were measured in water at room temperature after the corrosion fatigue test. The velocity of Rayleigh surface wave, determined from the incident angle at which the profile of the backward radiated ultrasound became maximum, decreased for the specimen that had the large number of cycles to failure in the corrosion fatigue test. This fact implies that the corrosion degradation occurred at specimen surface in this specific test is dominantly dependant on the time exposed to corrosion environment. The result observed in the present work demonstrates the high potential of backward radiated Rayleigh surface wave as a tool for nondestructive evaluation of corrosion degradation of aged materials.

Keywords: corrosion fatigue, corrosion degradation, Rayleigh surface wave, backward radiated ultrasound

1. 서 론

최근 구조물이 복잡하고, 가혹한 환경(부식, 피로, 크립, 침식, 부식피로, 마모 등)하에서 사용됨에 따

라 강재의 요구 성능이 강화되고 다양화되고 있는 추세이다. 기본적으로는 고강도, 내진성, 용접성 등이 우수해야하나, 종래의 고강력강은 판 두께가 두꺼워지면 강도를 확보하기 어렵고, 반대로 강도

를 확보하기 위해서는 합금원소의 첨가가 필요하기 때문에 용접성을 해치는 결과를 초래하였다. 이러한 점을 보완하기 위해 개발된 것이, 저탄소당량으로서 용접성이 우수하며, 또 내진성도 우수한 TMCP(thermo-mechanically controlled process)강이다. 과거에 주로 조선용, 해양구조용 및 라인 파이프(line pipe)용 강의 제조에 적용하던 TMCP법을 다소 변형하여 제조한 TMCP강은 첨가하는 합금원소의 양을 줄이는 대신 적절한 제어압연과 가속냉각을 통한 열가공 제어 제조기술을 적용한 것으로 기존의 강도를 확보하면서 용접성을 개선한 재료이다. 이러한 장점 때문에 해외에서는 홍콩의 타임스퀘어 빌딩, 싱가포르 선택 패키지 프로젝트 등에 사용되었고, 일본의 경우에는 건축구조용 TMCP강재의 설계강도에 대해 이미 건설성의 일반인증도 받은 상태로, 동경도 신청사를 비롯하여 많은 적용 사례가 있다. 국내의 적용실적은 외국에 비해서는 극히 적은 상태이지만, 포스코 센터 빌딩과 최근의 인천 공항에 사용된 바가 있다[1].

하지만 이러한 장점에 비해 단점으로 지적되고 있는 것이 내식성에 대한 신뢰성 결여이다. 앞에서도 언급한 바와 같이, TMCP강은 건축 재료뿐만 아니라 선박, 해양구조물 및 라인 파이프용으로도 중요하게 적용되고 있기 때문에 부식성 환경에서의 내구성 평가와 이를 바탕으로 한 내환경 신뢰성 확보가 요구되고 있다.

초음파는 시험체 내부에 존재하는 결함을 비파괴적으로 찾는 탐상시험은 물론이고, 재료의 물성을 평가하는 데에 널리 사용된다. 일반적으로 초음파를 사용하여 재료의 물성을 평가할 때 초음파의 속도나 감쇠를 측정하는데, 이들은 모두 어느 정도 이상의 전파거리가 필요하므로 박판이나 표면 지역의 물성을 평가하는 데에는 어려움이 많다.

그러나 레일리 표면파는 깊이에 따라서 에너지가 지수적으로 감소하면서 표면을 따라 전파하며, 그 전파특성은 표면지역 한 파장 내외의 물성에 따라서 결정된다. 따라서 표면파는 표면지역의 결함 탐지 및 물성평가에 유용하게 사용될 수 있다[2]. 또한, 표면파의 파장은 주파수에 반비례하므로, 깊이에 따른 물성변화가 있을 경우에 표면파의 전파특성이 주파수에 따라 달라지고 이를 이용하면 깊이 방향으로 물성변화의 유추가 가능하다.

물 속에 담긴 시험체에 초음파를 입사시키면 특정한 입사각에서 표면파가 발생하고, 이 표면파가

산란과 에너지 누수로 인하여 입사한 방향으로 상당한 량의 초음파가 되돌아오는 후방복사가 일어난다[3]. 이 후방복사는 표면지역의 물성에 대한 정보를 내포하고 있어서 지금까지 이를 이용한 재료의 미세구조에 관한 연구가 시도되었다[4]. 또한 광대역 초음파를 사용하여 후방복사 초음파의 주파수의존성으로부터 표면파의 주파수 의존성에 대한 평가가 시도되었다.

후방복사 프로파일은 표면지역의 특성들에 관한 정보를 내포하고 있기에 많은 주목을 받아왔으며, 이는 전통적인 초음파 시험을 통해서 얻기 어려운 부식이나 마모에 의한 표층 열화 평가에 효과적으로 활용될 수 있다[5]. 부식에 관련된 연구로는 12Cr 합금강의 고속열화 시편에 대한 레일리 표면파 속도의 주파수 의존성을 액체/고체 경계면에서 후방복사된 초음파의 입사각 의존성으로 간접평가하고, 부식피로 특성과 비교 분석함으로써, 부식 열화에 의한 표면지역의 깊이에 따른 물성변화의 비파괴적 평가에 응용될 수 있음을 보였다[6-8].

본 연구에서는 하중을 달리하면서 부식피로 시험을 수행한 TMCP 강재 시험편을 대상으로 후방복사 프로파일을 측정하였다. 그 결과로부터 부식피로 시험으로 손상된 시험편의 레일리 표면파 속도와 분산을 측정하였으며, 이들 인자와 부식손상 사이의 관계를 도출하였다. 그 결과 후방복사 표면파는 부식손상을 평가하는 데에 유용하게 사용될 수 있음을 밝혔다.

2. 레일리 표면파의 후방복사

액체/고체 경계면에 초음파가 경사지게 입사하면 경계면에서는 반사, 굴절 및 모드 변환이 일어난다. 임계각에서는 종파나 횡파의 굴절각이 90° 가 되는데, 특히 레일리 각에서는 레일리 표면파가 발생한다. Fig. 1과 같이 액체/고체 경계면에 레일리 각(Rayleigh angle)으로 초음파가 입사하면 입사한 방향으로 산란되는 초음파의 세기가 갑작스런 증가를 보이는데 이를 후방복사(backward radiation)라 한다. 물 속에 담긴 시험체에 레일리 각으로 초음파를 입사시키면 그 에너지의 일부는 표면 상태에 따라 입사각과 같은 각도로 반사되고, 나머지는 고체로 침투하여 모드 변환에 의해 리키 레일리 표면파(leaky Rayleigh surface wave)로 전환되어 표면으로부터 수 파장의 깊이 정도에만 에너지가 분포하여

서, 표면을 따라 전파한다. 리키 레일리 표면파는 표면을 따라 전파하면서 반사파와 같은 방향으로 에너지를 누설하여 동일한 탐촉자에 의해 수신된다.

후방복사 초음파의 세기의 입사각 의존성을 프로파일이라 부르는데, 이 프로파일에는 시험체의 표면지역 물성에 대한 정보가 포함되어 있다. 특히, 시험체에서의 레일리 표면파의 속도는 스넬의 법칙으로부터 프로파일의 정점 입사각에 의해 결정된다. 입사각을 θ_i , 굴절각을 θ_r 라하고, 입사파의 속도를 c_i , 굴절되는 파의 속도 c_r 라하면 스넬의 법칙은

$$\frac{c_r}{c_i} = \frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_i} \quad (1)$$

와 같이 주어진다. Fig. 1에서와 같이 표면파가 발생할 경우는 θ_i 는 물에서 시험체로의 입사각, c_i 는 물에서의 초음파의 속도이고 굴절각 θ_r 이므로, 시험체 내부에서 진행되는 레일리 표면파의 속도 c_R 은 식 (1)으로부터

$$c_R = \frac{c_i}{\sin \theta_i} \quad (2)$$

와 같이 주어진다.

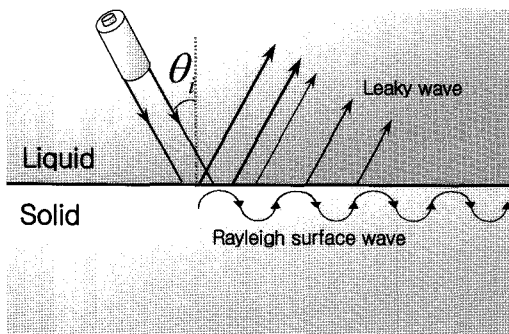


Fig. 1 Schematic representation of leaky surface wave and Rayleigh Surface wave

수신되는 후방복사 초음파 신호의 기구를 Fig. 2에 나타내었다. (a)는 입사지점에서 산란되어 직접 탐촉자에 도착하는 신호로 시간대역에서 가장 빨리 수신된다. (b)는 입사 초음파가 표면파로 모드 변환이 된 후에 표면을 따라 전파하다가 표면 지역과 표면 아래지역의 미세구조의 영향으로 산란된 후에 뒤로 전파되면서 누설된 신호이다. (c)는 발생된 표면파가 시험체의 모서리까지 진행하여 반사된 후에

누설된 초음파이다. (d)는 다중 반사에 의해 발생된 신호들이다. 이들 중에서 (c)에 의한 후방복사 신호가 가장 크고 coherent하지만 신호의 절대적인 크기는 모서리의 상태, 모서리까지의 거리 및 누설율에 따라서 크게 달라질 수 있다. (a)나 (b)에 의한 신호는 이러한 영향을 적게 받지만 신호가 작고 inherent하다. 따라서 본 연구에서는 (c)와 같이 시험편의 모서리에서 반사된 뒤에 후방복사되는 초음파 신호를 측정하였으며, 진폭의 절대적인 크기에 미치는 인자가 많으므로 본 연구에서는 이는 고려하지 않았다.

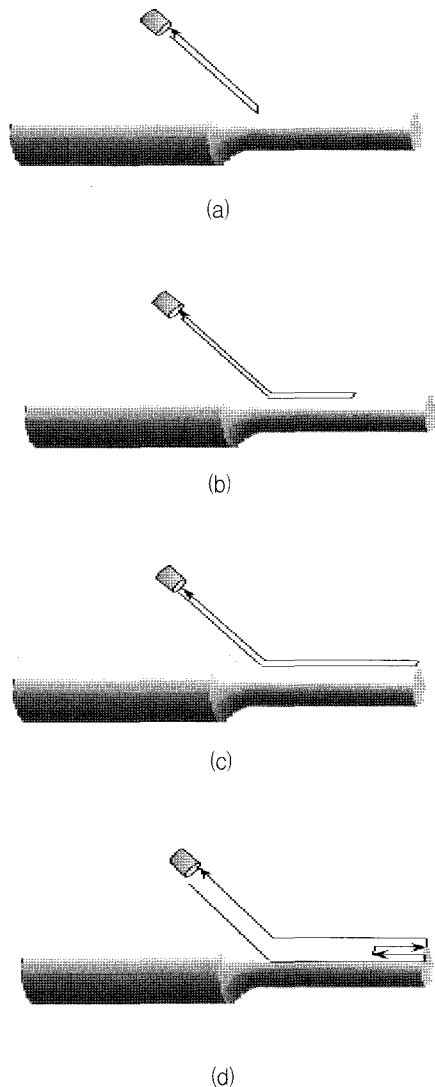


Fig. 2 Schematic diagrams of the backscattered ultrasound. (a) direct scattering, (b) scattering by microstructures, (c) reflected at the edge of specimen and (d) multiple scattering

3. 실험 장치 및 실험

3.1. 부식피로 시험

본 연구에 사용된 TMCP 강 성분 및 물리적 특성은 각각 Table 1과 같다. 부식피로를 위한 시험편은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 직경 6 mm의 원형단면의 소형 시험편에 노치(notch)를 인위적으로 가공하였다. 최대 하중이 20 kN인 수평으로 놓인 부식피로 시험기를 사용하였으며, 부식 셀은 시험기간 동안에 동일한 부식환경을 유지하도록 하였으며 갈바닉 부식이 없도록 아크릴로 제작하였다. 제작된 부식 셀의 모형과 부식피로 시험기의 사진을 Fig. 4

에 나타내었다. A~F까지 총 6개의 시험편에 대하여 응력집중을 고려하여 최초 하중을 항복 강도의 40%로부터 10% 하중감소법을 사용하여 제작하였으며, 하중형태는 일정한 진폭의 정현파(sine wave)로 하고, 하중반복속도는 부식 환경이 충분히 반영되도록 1 Hz로 하였다. 부식은 가장 효과적인 NaCl 3.5 wt.% 수용액에서 이루어 졌으며 하중을 변화시켜서 과단시간을 다르게 하였다. 시험편의 부식 조건과, 하중 및 과단시간을 각각 Table 2와 3에 나타내었다. 여기에서 P_{max} , P_{min} 및 ΔP 는 피로하중의 최대 크기, 최소크기 및 변화폭을 각각 나타내며 N_f 는 과단까지 걸린 시간(s), T_{Cor} 은 N_f 를 시간(hr)으로 환산한 것이다. 과단된 시험편은 공기 중에서 산화에 의한 지속적인 부식을 막기 위해 알코올에 저장하였으며, 후방복사 초음파 시험을 위하여 모서리에서 반사조건이 동일하도록 과단면의 끝단을 EDM으로 가공하였다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of TMCP steel

Elements	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni
Composition(%)	0.1	1.49	0.25	0.014	0.001	0.024	0.25
Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)		Elongation (%)				
519	228		34.2				

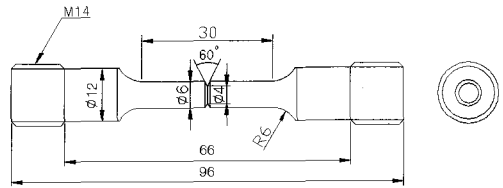


Fig. 3 Schematic diagram of the specimen

Table 2 Corrosion fatigue test conditions for notched specimen

Conditions	Contents	
Loading condition	Load frequency	1Hz
Environment conditions	Temperature	Room temperature
	Solution	3.5 wt.% NaCl solution

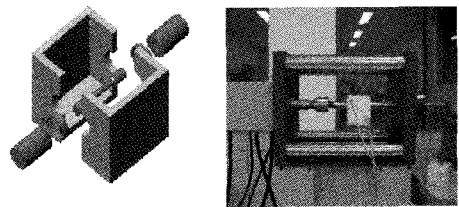


Fig. 4 Corrosion cell and corrosion fatigue tester

Table 3 The loading condition and number of cycles to failure for the specimens

Speimen ID	P_{max} (MPa)	P_{min} (MPa)	ΔP (MPa)	N_f	T_{Cor} (hr)
A	222.2	22.2	200.0	37,438	10.4
B	197.1	19.7	177.4	62,482	17.4
C	172.2	17.2	155.0	122,553	34.0
D	147.8	14.8	133.0	252,350	70.1
E	123.3	12.3	111.0	262,900	73.0
F	98.6	9.9	88.7	598,432	166.2

3.2. 후방복사 표면파 시험

후방복사 초음파 신호를 측정하기 위해서 정밀한 초음파 입사 각도를 제어할 수 있어야 하고, 측정하고자 하는 위치에 손쉽게 초음파를 입사시킬 수 있어야 한다. 이를 위해서 초음파 입사각도와 입사위치를 컴퓨터에서 자동으로 제어할 수 있는 후방복사 초음파 측정 시스템을 개발하였다[9]. 시험편 홀더는 입사각을 바꿀 수 있도록 회전이 가능할 뿐만 아니라 입사위치를 변화시켜가며 시험편을 스캔할 수

있다. 시편의 운동은 회전운동과 두 방향 직선운동을 하며 각 축에 연결되어 있는 micro-step motor를 제어하여 초음파의 입사각도와 입사위치를 제어하였다. 회전운동 축은 0.02°이내의 정밀도와 180°의 이동량을 가지며 직선운동 축들은 0.1 mm 이내의 정밀도와 50 mm의 이동량을 가진다.

초음파의 발진 및 수신은 Panametrics사의 pulser/receiver(Model 5800)와 5MHz 탐촉자를 사용하였으며, 얻어낸 초음파 신호의 파형을 디지털 오실로스코프(LeCroy LT342)로 수신하고 GPIB를 통해 PC로 전송하여 저장한 후에 신호를 분석하였다.

환형 시험편용 그립(grip)은 아크릴을 이용하여 제작하였고, 시험편과 탐촉자 사이의 거리와 각각의 시험편의 길이를 동일하게 맞출 수 있도록 설계하였다. 시험편의 모서리에서 반사되어 되돌아오는 신호를 측정하였으며, 파의 진행거리가 같도록 동일한 위치에 초음파가 입사하도록 조절하여 실험하였다. 후방복사 된 레일리 표면파를 측정하기 위해 물 속에 담겨진 시험편에 5 MHz인 광대역 초음파를 입사하였으며, 초음파 입사각은 0.2° 간격으로 25°에서 32° 까지 연속적으로 변화시키며 후방복사 된 레일리 표면파의 신호를 측정 및 저장하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

전체적으로 부식량은 부식률(부식의 진행속도)과 부식시간(부식환경에 놓인 시간)의 곱으로 주어지는

데, 부식률은 응력에 따라서 달라질 수 있으며 부식 시간은 부식피로수명과 같다. 본 연구에서 사용된 A 시편은 하중 차가 커서 부식피로 수명이 짧은 반면에 F 시편은 하중 차가 작아서 부식피로 수명이 길었고, 따라서 시험편 A보다는 F의 부식시간이 더 길다. 하지만, 하중이 부식률에 영향을 주기 때문에 시험편 A-F의 총체적인 부식량은 부식피로 시험 결과로는 정량적으로 알 수가 없다. 한편 부식은 시편 표면으로부터 깊이 방향으로 물성변화(gradient)를 유발하게 되며, 열화층의 부가효과(loading)로 레일리 표면파의 속도가 변하고 분산성을 나타내므로, 레일리 표면파의 속도를 측정하면 표면지역의 물성변화를 유추할 수 있다. 부식피로에 의한 열화도를 평가하기 위하여 각각의 시험편에 대하여 후방복사 레일리 표면파를 측정하였다.

Fig. 5는 시편 C에 대하여 입사각 27.6°, 28.0°, 28.4°, 28.8° 일 때 후방복사 레일리 표면파의 RF파형들이다. Fig. 5(c)에 나타난 파형은 개략적으로 4개의 그룹으로 나눌 수 있다. ①은 초음파가 입사한 지점에서의 후방복사된 신호로 Fig. 2의 (a)경로에 의해 수신된 신호이고 ②는 시험편 표면을 진행하면서 표면의 부식 등으로 인해 산란된 리키 레일리 표면파로 Fig. 2의 (b)경로에 의해 수신된 신호이고, ③은 모서리까지 진행한 후에 반사되어 되돌아오는 신호로 Fig. 2의 (c)경로에 의해 수신된 신호이며 ④는 다중 반사에 의한 신호이다. 본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 모서리에서 반사되는 ③신호의

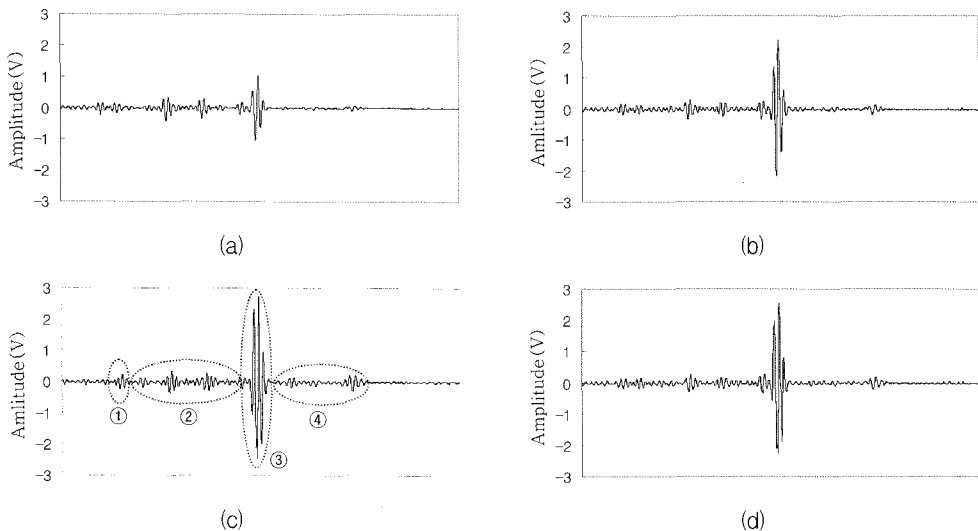


Fig. 5 RF waveforms obtained with the incident angle of (a) 27.6°, (b)28.0°, (c) 28.4° and (d) 28.8° at specimen C

크기를 측정하여 분석하였다. 이 신호의 크기는 입사각이 28.4°일 때에 가장 크고 그 전후로는 작아짐을 알 수 있다. 이와 같이 후방복사 세기의 입사각 의존성을 측정하여 후방복사 프로파일을 구하였다.

Fig 6은 부식피로로 열화된 6개의 시험편에 대하여 입사각을 25°에서 32°까지 0.2°간격으로 바꾸면서 측정한 프로파일을 나타낸다. 여기서 프로파일의 크기는 앞에서 논의된 바와 같이 누설율, 모서리까지의 거리, 모서리의 상태 등에 따라서 달라질 수 있기 때문에 절대적인 크기를 논하기는 어렵다. 따라서 모든 시험편에 대해서 얻어지는 프로파일의 최대 크기가 같도록 정규화 하였다. A시험편에서는 입사각 28.0°에서 프로파일의 최대 값이 측정되었고, F시험편으로 갈수록 후방복사 프로파일이 최대가 되는 정점 입사각이 커지는 것을 확인 할 수 있다. 레일리파의 속도는 식 (2)에 의해 후방복사의 세기가 최대가 되는 입사각(프로파일 정점 입사각)으로부터 결정된다. 측정된 프로파일 정점 입사각은 28.0°~29.6°의 범위를 보였고, 스넬의 법칙을 이용하여 각각의 시험편의 표면파 속도를 구한 값을 Table 4에 나타내었다. 여기에서 θ_p 는 정점입사각, θ_w 는 프로파일의 폭 그리고 c_R 은 시험체에서의 표면파의 속도이다. 또한, 표면파가 분산성이 있으면 후방복사 프로파일이 넓게 퍼지게 되는데 이를 정량적으로 기술하기 위해서 후방복사 프로파일의 폭을 후방복사의 세기가 피크 값의 절반 이상이 되는 입사각의 범위로 정의하였다. 부식피로시간에 대한 레일리 표면파의 속도와 후방복사 프로파일의 폭을 Fig. 7과 8에 각각 나타내었다.

후방복사 시험의 결과는 대체로 부식피로 시간이 긴 시험편에서는 프로파일의 정점각이 커지고, 프로파일의 폭이 넓어짐을 보여주는데 이는 표면파의 속도가 느려지면서 분산성이 커짐을 의미한다. 이러한 현상은 시험체 표면에 물성이 다른 물질의 부착된 구조로 설명할 수 있다[10]. 시험편 표면의 부식정도에 따라 깊이 방향의 물성변화(gradients)가 존재하게 되지만, 여기서는 간단히 깊이 방향의 물성변화가 없는 열화층을 가정한다. 열화가 진행될수록 상대적으로 작은 음향 임피던스를 가진 열화층의 두께가 두꺼워진다고 가정하면, 열화도가 심한 시험편일수록 열화층에 의한 부가효과/loading)로 표면파의 속도가 감소하게 되며 표면파의 분산이 심해진다[8].

따라서, 후방복사 초음파 시험으로부터 시험편 A 보다는 F가 부식이 보다 많이 일어났을 것으로 판단된다. 이는 응력이 달라지면 부식률과 부식피로 수명이 달라지는데, 부식피로수명의 변화가 부식속도의 변화에 비하여 매우 크다는 것을 의미한다. 일반적으로 부식의 양은 인가되는 응력이 커지면 증가하는 것으로 알려져 있지만 이번 연구에서는 시험편의 노치로 인하여 응력의 영향 여부를 명확히 판단할 수 없었다.

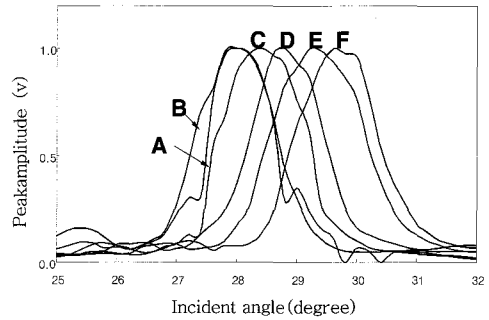


Fig. 6 Backward radiated surface wave profiles for the fatigue corrosion specimens

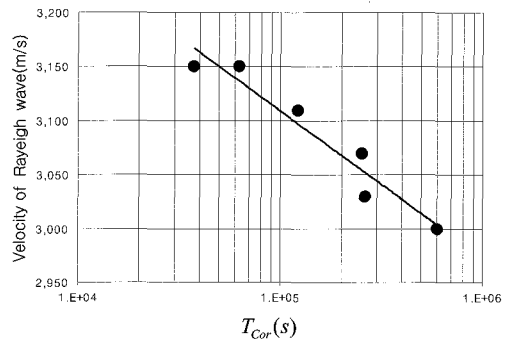


Fig 7. Relationship between wave velocity and the period under corrosion

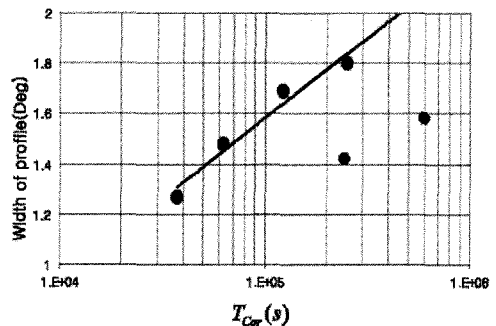


Fig. 8 Relationship between width of profile and the period under corrosion.

5. 결 론

부식도가 다른 6개의 시편에 대한 후방복사 초음파 탐상시험을 실시하였다. 표면에 발생한 부식양이 많아질수록 후방복사 프로파일의 정점 입사각이 커지고 프로파일의 폭이 넓어졌다. 이는 레일리 표면파의 속도가 감소하고 분산성이 커짐을 의미하는데, 부식으로 인하여 발생한 열화층의 부가효과로 설명이 가능하였다. 후방복사 레일리 초음파의 후방복사 프로파일은 표면지역 물성에 대한 정보를 지니고 있기 때문에 부식열화와 같이 표면지역 열화를 잘 평가할 수 있으며, 마모에 의한 잔류응력 분포의 평가 등 표면 지역 물성에 대한 비파괴적 평가에 응용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의해 수행되었음 (KRF-2002-042-D00005).

참고문헌

- [1] 박진형, "강의 부식열화도 및 부식피로강도 평가 방법 개발," 석사학위 논문, 성균관대학교, 수원, (2003)
- [2] R. J. Blake and L. J. Bond, "Rayleigh wave scattering from surface features: up-steps and troughs," *Ultrason.*, Vol. 30, No. 4, pp. 255-265, (1992)
- [3] S. Sasaki, "Back reflection of ultrasonic wave obliquely incident to solid surface in water," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 2, pp. 198, (1963)
- [4] P. Lemaitre, V. Buglino, F. Lakestani and R. Denis, "Ultrasonic imaging and characterisation of surface breaking cracks in silicon nitride by leaky Rayleigh waves," *J. Europ Cer Soc*, Vol. 12, pp. 15-25, (1993).
- [5] S. D. Kwon, D. H. Bae, S. J. Song and Y. Z. Lee, "Nondestructive Evaluation of the Characteristics of Degraded Materials Using Backward Radiated Ultrasound," *KSME Int.*, Vol. 16, No. 9, pp. 1084-1092, (2002)
- [6] 권성덕, 윤석수, 송성진, 배동호, "후방복사된 초음파를 이용한 12Cr강 부식 피로특성 평가", *비파괴검사학회지*, 제20권 5호, pp. 397-401 (2000)
- [7] 송성진, 김영환, 배동호, 정민호, 권성덕, "후방복사된 초음파를 이용한 터빈 블레이드 재료의 부식열화특성 평가," *대한기계학회 논문집*, 제 26권 제 11호, pp. 2322-2327, (2002)
- [8] S. -J. Song, Young H. Kim, D. H. Bae, M. H. Jung and S. -D. Kwon, "Evaluation of corrosion degradation of 12Cr alloy steel using an ultrasonic backward radiation," *Int. J. Mod. Phys. B*, Vol. 17, No. 8&9, pp. 1653-1658 (2003)
- [9] 송성진, 김영환, 정민호, 권성덕, "고무접합이 후방복사된 리키 램파 프로파일에 미치는 영향," *비파괴검사학회지*, 제22권 제5호, pp. 508-515 (2002)
- [10] S.-D. Kwon, M.-S. Choi and S.-H. Lee, "The application of ultrasonic backward radiation from a layered substrate submerged in liquid," *NDT&E int.* 33 (5), 275-281, (2000)