

전자기음향공진을 이용한 강선의 표면 미세 결함 평가

Surface microcrack estimation of the steel wire rods using electromagnetic acoustic resonance

조승현† · 허태훈*,** · 안봉영* · 임중수***

Seung Hyun Cho, Taehoon Heo, Bongyoung Ahn and Zhong Soo Lim

1. 서 론

강선(steel wire rod)은 산업 전반에 걸쳐 매우 다양한 부품 제작에 사용되는 중요한 소재이다. 강선의 제조 공정 중에 미세한 표면 결함이 강선의 길이방향을 따라 매우 빈번하게 발생하는데, 2차 제작품을 생산 시 대부분 제거되지만 상대적으로 깊이가 큰 결함은 2차 제작품에 그대로 남아 최종 생산품의 품질에 심각한 불량을 유발한다. 이를 방지하기 위해서는 강선의 최초 제조단계에서 표면 결함의 깊이를 정량적으로 평가하여 불량품을 미리 선별하는 것이 요구된다. 현재 수행되고 있는 검사 방법은 생산된 강선의 일부를 무작위로 선택한 후 이를 절취하여 단면을 검사하는 방식으로 이루어지고 있는데, 이 방식은 전수 검사가 어려워 표본 검사를 해야 하므로 표본 수에 따라 많은 시간과 비용이 소모된다. 그리고 파괴적인 검사방법이기 때문에 표본 수에 비해서 많은 시간과 비용을 소모하게 된다. 따라서, 이를 극복하기 위해 강선의 표면 미세 결함에 대한 정량적 비파괴 검사 방법의 개발이 매우 절실하다.

본 연구에서는, 강선의 표면 미세 결함 탐상을 위해 전자기음향공진(EMAR, electromagnetic acoustic resonance)법을 적용하여 평가하고자 하였다. 이는 전자기적인 방법으로 측정 대상에 공진을 발생시키고, 그 공진 특성을 관찰하여 대상을 평가하는 방법이다. EMAR 실험은 대개, 전자기음향트랜스듀서(EMAT, electromagnetic acoustic

transducer)를 이용하여 비접촉식으로 초음파 공진을 발생시키고 측정한다. 그러므로 측정시스템이 측정대상에서 발생하는 공진 현상에 영향을 미치지 않아 좀 더 정밀한 변화 관찰이 가능하다. 실제로 제작되는 강선은 곡률이 있지만, 실험용 시편으로는 직선 형태의 끈은 강선(straight steel wire rod)을 사용하였다. 그리고 시편 위에 종방향으로 10mm 길이와 20 μm의 폭, 그리고 수십 μm 단위의 깊이를 가진 인공 결함을 생성하였다. 결론적으로, 강선의 표면 미세 결함과 전자기음향공진 특성 사이의 관계를 확인하여 전자기음향공진을 이용한 강선 표면 미세 결함의 진단 가능성을 고찰하였다.

2. Circumferential Shear EMAR

본 연구는 원통형 시편에 적합한 전자기음향공진 기법인 Circumferential Shear EMAR을 선택하여 적용하였다. 원통형 시편에 미연더 라인 코일(meander line coil)을 감아 원주방향으로 자기장을 만들고, 그 위에 솔레노이드 코일(solenoid coil)로 축방향 자기장을 만들어 재료의 자기변형성을 이용하여 축방향으로 진동하면서 원주방향을 따라 이동하는 수평전단파(SH wave, shear horizontal wave)를 발생시켰다. 이를 절단면에서 전파 방향과 공진 조건을 보면, 원주방향 수평회파에 의한 공진은 단면의 평면 내 진동(in-plane vibration)과 동일함을 알 수 있다. 따라서, 공진 조건에 대한 주파수 관계식은 다음과 같다⁽¹⁾.

† 교신저자; 정회원, 한국표준과학연구원 안전측정센터
E-mail : seungcho@kriss.re.kr
Tel : (042)868-5752

* 한국표준과학연구원 안전측정센터
** 과학기술연합대학원대학교(UST) 측정과학전공
*** 포항산업과학연구원 EPT연구팀

$$\left\{ \frac{nJ_n(kR_a)}{kR_a} - J_{n+1}(kR_a) \right\} \cdot \left\{ \frac{nY_n(kR_b)}{kR_b} - Y_{n+1}(kR_b) \right\} - \left\{ \frac{nJ_n(kR_b)}{kR_b} - J_{n+1}(kR_b) \right\} \cdot \left\{ \frac{nY_n(kR_a)}{kR_a} - Y_{n+1}(kR_a) \right\} = 0$$

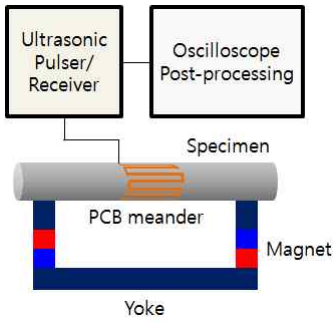
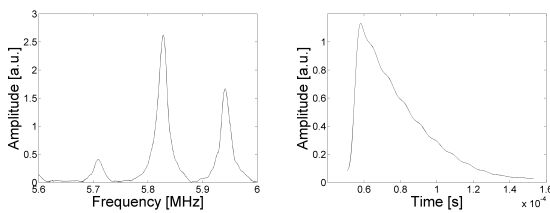


Fig. 1 Experimental setup

시편의 결함 유무에 따라 이러한 공진 조건이 바뀌게 되면 공진 모드의 변화가 생길 수 있으므로 공진주파수 shift가 발생할 수 있고, 또한 가진된 초음파 공진의 잔향이 감소하는 정도(ringdown decay rate)가 변할 수 있다. 본 연구에서는 공진 모드의 선택에서 표면에 가장 에너지가 집중되는 반경(radial)방향의 기본모드(fundamental mode)를 기준으로 가능한 한 원주(circumferential)방향의 고차모드를 선택하여 표면 미세 결함의 영향을 극대화하고자하였다.

실험은 초음파 공진을 발생시켜 주파수의 변화와 잔향 감쇠율의 변화를 관찰하는 방식으로 이루어졌다. 실험에 사용한 코일은 연성인쇄회로기판(FPCB, flexible printed circuit board)에 150 μm 선폭으로 인쇄하여 제작하였고, 자석과 요크를 이용하여 솔레노이드 코일을 대체하였다. 그리고 RITEC RAM-10000 Ultrasonic Pulse/Receiver 장비를 사용하여 Fig. 1와 같이 실험장치를 구성하였다. 주파수 스캔 결과, Fig. 2 (a)와 같이 5.6~6 MHz 사이에서 공진주파수 peak이 관찰되었고, 그 중 peak의 크기가 가장 큰 5.8 MHz 근방의 공진주파수를 확대하여 미세한 주파수 변화를 관찰하였다. 초음파 공진의 잔향에 대한 감쇠율은 Fig. 2 (b)와 같이 ringdown curve⁽²⁾에서 exponential 함수의



(a) Frequency spectrum (b) Ringdown curve
Fig. 2 Experimental results

Table 1 The measured resonant parameters, the resonant frequency and the attenuation coefficient

A (crack depth=100 μm)		Healthy region	Microcrack region
Resonant frequency (MHz)	Mean	5.8241	5.8260
	Standard deviation	0.0005	0.0008
Attenuation coefficient (Nepers/ μs)	Mean	0.0219	0.0350
	Standard deviation	0.0019	0.0084
B (crack depth=80 μm)		Healthy region	Microcrack region
Resonant frequency (MHz)	Mean	5.8204	5.8256
	Standard deviation	0.0004	0.0007
Attenuation coefficient (Nepers/ μs)	Mean	0.0353	0.0397
	Standard deviation	0.0032	0.0029
C (crack depth=40 μm)		Healthy region	Microcrack region
Resonant frequency (MHz)	Mean	5.8246	5.8252
	Standard deviation	0.0005	0.0005
Attenuation coefficient (Nepers/ μs)	Mean	0.0241	0.0253
	Standard deviation	0.0020	0.0018

계수값을 추출하는 방식으로 구하였다. 결함부와 비결함부를 각각 5회 반복 측정하면서 실험을 진행하였고, 각각 100, 80, 40 μm 깊이의 인공 결함 시편 A, B, C에 대하여 실험하였다. Table 1에서 비결함부와 결함부에 대하여 측정된 공진주파수 값과 감쇠계수 값을 나타내었다. 그리고 측정된 값은 평균값과 표준편차로 각각 표시하였다. 측정 결과, 결함의 영향이 공진주파수와 감쇠계수에 유의미한 영향을 주는 것을 관찰하였다. 시편에 따라 결함 유무의 상대적인 비교는 가능했지만, 깊이별로 정량화 시키기는 어려웠다.

3. 결 론

본 연구에서는 강선의 표면 미세 결함 탐상을 위해 비접촉 방식의 전자기음향공진을 적용하여, 결함과 공진특성 사이의 관계를 확인하여 전자기음향공진을 이용한 강선 표면 미세 결함의 진단 가능성을 확인하였다. 앞으로 결함 깊이에 따른 공진주파수와 감쇠계수 변화 데이터를 더 확보하여, 결함 신호의 정량화를 위한 연구가 더 필요할 것이다.