

# 전자기 음향 공진을 이용한 강선의 표면 미세 결함 탐상 타당성 연구

## Feasibility Study on Surface Microcrack Detection of the Steel Wire Rods Using Electromagnetic Acoustic Resonance

허태훈\*\*\*, 조승현\*†, 안봉영\*, 임종수\*\*\*

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

**초 록** 철강 생산 제품 중 강선(steel wire rod)은 제조 과정 중 종방향으로 미세한 표면 결함이 매우 빈번하게 발생하는데 이중 깊이가 수 십 마이크로미터 이상인 결함들은 최종 생산품의 불량을 유발하는 심각한 원인이 되고 있다. 이와 같은 이유로 강선의 제조 단계에서 표면의 미세 결함의 깊이를 평가하는 방법의 개발이 절실히 요구된다. 표면 미세 결함을 평가할 수 있는 여러 가지 방법 중에서, 본 연구에서는, 전자기 음향 공진법의 적용 가능성을 고찰하고자 한다. 전자기 음향 공진(electromagnetic acoustic resonance, EMAR)은 전자기 음향 트랜스듀서(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)을 이용하여 시편의 공진 특성을 측정하는 방법으로서, 대상의 작은 변화에도 민감하게 반응하고 비접촉 측정이 가능하여 현장 적용에 용이하다는 장점이 있다. 전자기 음향 공진 실험을 통하여 표면 미세결함과 잔향특성의 변화를 관찰하여 깊이 약 100 마이크로미터 내외의 결함은 탐상 가능함을 확인하였다.

**주요용어:** 강선, 표면 미세 결함, 전자기 음향 공진, 전자기 음향 트랜스듀서, 비접촉, 모드 형상, 공진 주파수, 감쇠 계수

**Abstract** The surface microcrack over a few tens of micrometers is one of severe problems of a steel wire rod to lead to the failure of the final products, so the method to evaluate crack depth has been required to develop. This work investigates the feasibility of electromagnetic acoustic resonance (EMAR) for this problem. EMAR is the method for measurement of resonant features using electromagnetic acoustic transducer (EMAT). Generally, EMAR is sensitive to small variation of the structures and easy to apply it to the industrial field because of the feature of noncontact measurement. Through several EMAR experiments, the change of the resonant frequencies and attenuation in reverberation has been observed. The results confirms that the surface cracks of around 100 micrometer depth can be detected successfully with the present method.

**Keywords:** Wire Rod, Surface Microcrack, Electromagnetic Acoustic Resonance (EMAR), Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT), Noncontact, Mode Shape, Resonant Frequency, Attenuation Coefficient

### 1. 서 론

다양한 산업용 부품의 원재료로 활용되는 강선(steel wire rod)은 생산 과정 중에 미세한 표면 결함이 강선의 길이방향을 따라 매우 빈번하게 발생한다. 이러한 강선의 표면 미세 결함은 2차

제품의 제조 단계에서 대부분 제거되지만 상대적으로 깊이가 큰 결함은 2차 제작품에 그대로 남아 최종 생산품의 심각한 불량을 유발하고 있다. 이를 방지하기 위해서는 강선을 생산할 때 표면 결함의 깊이를 평가하여 불량품을 미리 선별하는 것이 요구된다. 현재, 생산업체에서는 강선의 일

[접수일: 2013. 1. 7, 수정일: 2013. 2. 4, 게재확정일: 2013. 2. 7] \*한국표준과학연구원 안전측정센터, \*\*과학기술연합대학원대학교(UST) 측정과학전공, \*\*\*포항산업과학연구원 EPT연구팀, †Corresponding Author: Center for Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea (E-mail: seungcho@kriss.re.kr)  
© 2013, Korean Society for Nondestructive Testing

부를 무작위로 선택한 후 일부분을 절취한 원기둥 형태의 시편을 축방향으로 압축한 후에 단면의 변형을 육안으로 검사하는 방법을 적용하고 있다. 하지만, 이러한 방법은 전수 검사가 불가능하고, 검사 표본을 늘리기 위해서는 많은 시간과 비용이 소모된다. 이를 극복하기 위해서는 표면 미세 결함을 비파괴적으로 검사할 수 있는 방법의 개발이 절실하게 필요한 실정이다.

본 연구에서는 강선의 표면 미세 결함 탐상을 위해 전자기 음향 공진 (EMAR)을 적용하고자 하였다. 이는 전자기적인 방법으로 측정 대상에 공진을 발생시키고, 그 공진 특성을 관찰하여 대상을 평가하는 방법이다. 전자기 음향 공진은 전자기 음향 트랜스듀서 (EMAT)를 이용하므로 비접촉으로 초음파 변환이 가능하다. 이러한 비접촉 특성은 넓은 영역을 고속으로 스캔하는데 매우 유리할 뿐만 아니라, 측정 시스템이 측정 대상에 미치는 영향을 최소화시켜 대상의 작은 변화에 대한 민감도를 향상시키는 장점이 있다.

전자기 음향 공진을 이용한 연구는 주로 일본 오사카 대학의 Hirao 등에 의해 다양하게 진행되어왔다 [1-7]. 전자기 음향 공진을 이용하여 주로 재료의 잔류 응력이나 탄성계수를 측정하거나, 피로나 크리프 손상에 의한 재료의 재질 열화 및 내부 구조 변화를 파악하고자 하였다. 하지만, 본 연구에서 다루고자하는 강선의 표면 미세결함에 대한 연구는 아직까지 보고된 바가 없다.

현장에서 실제로 제작되는 강선은 감아서 보관하므로 약간의 곡률을 가지지만, 본 연구에서는 형상의 영향을 최대한 배제하고 표면 미세 결함만의 영향만을 보기 위해 직선 형태의 곧은 강선 (straight steel wire rod)을 실험을 위한 시편으로 사용하였다. 그리고 시편의 표면에 축방향으로 길이 10 mm, 폭 20  $\mu\text{m}$ 의 인공 결함을 가공하였다.

강선 시편에 공진을 발생시키기 위해서 시편의 원주 방향으로 횡파를 발생시켰으며, 이를 위해서 코일과 자석 및 시편 거치를 위한 고정틀을 제작하였다. 일정 시간동안 수십 사이클 이상의 정현파를 가진 후에 잔향 신호를 측정하고, 이를 일정 대역에서 주파수를 변화시켜가면서 반복하였다. 이렇게 각 주파수에서 측정된 잔향신호를 분석하여 공진 주파수와 감쇠계수를 추출하였다.

실험을 통해서 강선의 단면에서 원주방향 횡파로 인한 전자기 음향 공진 특성이 잘 측정됨을

확인하였다. 또한, 결함 시편에 적용하여 결함 부위에서 공진 특성의 변화를 관찰하였다. 축방향 스캔 시험을 통해서 깊이 80  $\mu\text{m}$  이상의 결함의 탐상이 가능함을 보였다.

## 2. Circumferential Shear EMAR 시험

본 연구의 대상인 강선은 원통 형상을 지니고 있으므로 음향 공진 현상을 발생시키기 위해서 원주방향으로 횡파를 발생시켜 단면에서 공진을 유발하는 circumferential shear EMAR 방법을 적용하였다. Fig. 1은 circumferential shear EMAR을 형성하기 위한 실험 구성을 나타내고 있다. 먼저 시편 둘레에 미앤더 라인 (meander line) 형태의 코일을 감아 원주방향으로 동자기장 (dynamic magnetic field)을 만든다. 그리고 그 위에 솔레노이드 (solenoid) 코일을 설치하여 축방향 (axial direction)으로 정자기장 (static magnetic field)을 만든다. 이러한 조건에서 형성된 자기장의 영향에 의해서 시편에서는 자기변형 (magnetostriction)에 의해 원주방향으로 횡파가 발생해서 진파하고, 이는 구조물의 단면내에서 진동 현상을 유발한다 (Fig. 2 참조).

이때 발생하는 진동현상은 원형 자유 표면 (free surface)에 대한 경계 조건 (boundary condition)을 갖는 탄성 구조의 동탄성 방정식 (elastodynamic equation)으로 기술이 가능하다 [4]. 중공 원통 (hollow cylinder)의 공진 조건에 대한 주파수 관계식은 다음과 같다 [6].

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

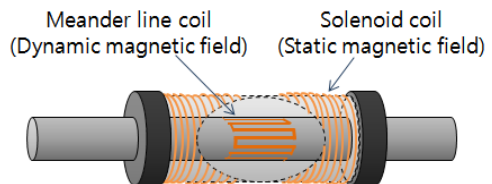


Fig. 1 The schematic diagram for the circumferential shear EMAR of a cylindrical structure

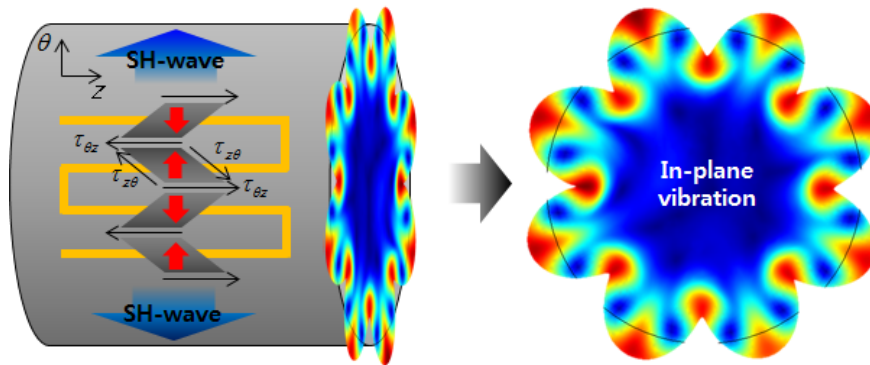


Fig. 2 Vibration of the steel wire rod's cross section by the magnetostrictively generated circumferential shear waves

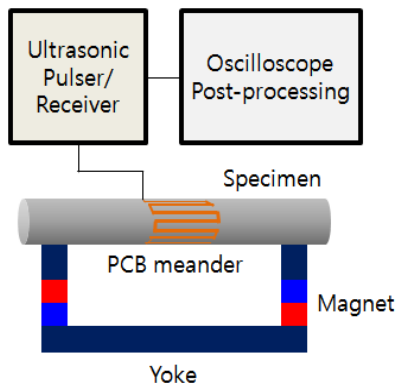


Fig. 3 The schematic diagram of the experimental setup for EMAR test of a steel wire rod

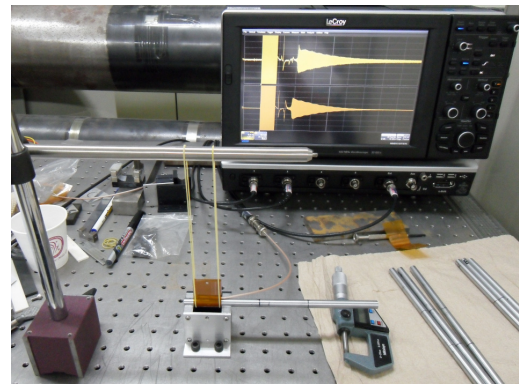


Fig. 4 Photograph of the circumferential shear EMAR test for a steel wire rod

여기서  $J_n$ 과  $Y_n$ 은 베셀 함수 (Bessel function)로, 각각 제1종 베셀 함수 (Bessel function of the first kind)와 제2종 베셀 함수 (Bessel function of the second kind)이다. 그리고  $R_a$ 와  $R_b$ 는 각각 외경과 내경을 나타낸다. 본 연구에서는 속이 꽉 찬 원통형 막대 (rod) 시편이므로 내경 ( $R_b$ )이 0이 되면서 식을 더욱 간략화 할 수 있다.  $k$ 는 파수 (wavenumber)이다. 위의 주파수 관계식을 풀면 평면 내 진동의 공진 모드들을 구할 수 있고, 본 연구에서는 표면 미세 결함의 탐상을 목적으로 하므로 표면에 가장 에너지가 집중된 모드를 선택하여 가진 및 수신을 할 수 있도록 실험 장치를 구성하여 실험하였다.

## 2.1. 실험 장치 및 시편

전자기 음향 공진 시험은 원통형 시편에 원주 방향으로 초음파를 발생시키고 표면 미세 결함에

유무에 따른 잔향의 공진주파수의 변화나 감쇠율의 변화를 관찰하는 방법으로 이루어졌다. 시험을 위해 코일, 자석, 초음파 신호 발생 장치, 신호증폭기, 오실로스코프 (oscilloscope), 시편 거치용 지그 (jig) 등이 사용되었다. 먼저 Fig. 3에 최종적으로 구성된 전자기 음향 공진 측정을 위한 실험 장치를 모식도로 나타내었다. 그리고 Fig. 4에서는 실제로 이루어지는 실험의 예시 사진을 제시하였다.

Fig. 5은 실험에 사용한 미엔더 라인 패턴의 얇은 코일이다. 미엔더 라인 코일은 100  $\mu\text{m}$  정도 두께의 얇은 연성 인쇄 회로 기판 (FPCB, flexible printed circuit board)에 각각 100  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ 의 선폭으로 선로를 인쇄하여 제작하였다. 이와 같이 제작된 100  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  선폭의 코일은 각각 400  $\mu\text{m}$ , 600  $\mu\text{m}$ , 800  $\mu\text{m}$ 의 파장으로 수평전단파를 발생시킬 수 있다. 다만, 코일이 평면이 아닌 곡면으로 이루어진 시편에 사용되기 때문

에, 시편의 직경에 따라서 시편에 생성된 파장과 코일의 파장이 조금 다르다.

시편에 자기장을 형성시키기 위해 솔레노이드 코일 대신 영구자석(permanent magnet)과 자기 회로(magnetic circuit)를 형성시키기 위해 요크(yoke)를 두어 실험 장치를 구성하였다.

초음파 송신 및 수신을 위해서는 라이텍(RITEC)사의 RAM-10000 High-power Ultrasonic Pulser/Receiver 장비를 사용하였다.

Fig. 6은 실험에 사용된 시편이다. 시편은 탄소강 계열의 재료를 사용하였고, 지름 9 mm와 길이 20.5 mm의 치수로 가공되었다. Fig. 7은 표면 미세 결함의 현미경 사진이다. 인공 결함은 시편

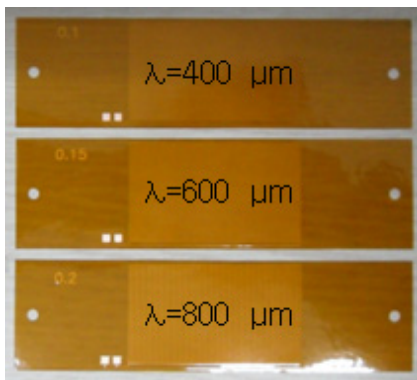


Fig. 5 Fabricated meander line patterned coil made of flexible PCB



Fig. 6 Specimen of steel wire rods

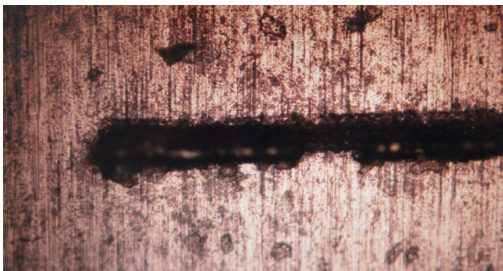


Fig. 7 Microscopic image of a surface microcrack in a specimen

의 길이방향으로 10 mm 길이와 20  $\mu\text{m}$ 의 폭, 그리고 각각 깊이 40  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ 의 치수로 레이저 가공되었다.

## 2.2. 실험 방법

표면 결함에 의한 시편의 형상 변화는 공진주파수와 감쇠계수의 변화를 유발한다. 본 연구에서는 이를 측정하기 위해서 수십 사이클의 정현파를 가진 후 시편에 남아있는 잔향을 측정한다. 일정 주파수 대역에서 주파수를 변화시켜가면서 잔향을 관찰하여 공진주파수를 측정하고 공진주파수에서 잔향이 감쇠하는 비율을 링다운 감쇠 비율(ringdown decay rate)이라고 한다 [7].

본 연구에서는 표면 미세 결함의 영향을 극대화하기 위해 표면에 가장 에너지가 집중되는 반경 방향(radial direction)으로는 기본 모드이면서 원주 방향(circumferential direction)으로 가능한 고차 모드를 선택하여 실험하였다. Fig. 8은 위와 같이 측정된 주파수 스펙트럼(frequency spectrum)을 나타내는 그래프이다. 먼저 넓은 범위에 대하여 주파수 스캔을 한 후, 에너지가 가장 높은 공진점을 확대하여 공진주파수의 미세변화를 감지하였다.

Fig. 9는 초음파 공진의 잔향이 감쇠하는 것을 나타내는 링다운 커브(ringdown curve) 그래프이다. 이를 구하기 위해서 공진 주파수에서 측정된 잔향 신호를 단시간 푸리에 변환(STFT, short time Fourier transform)한 후 공진 주파수에서의 스펙트로그램(spectrogram)의 크기를 추출한다. 이렇게 구한 값을 지수 감쇠 모델로 커브 피팅

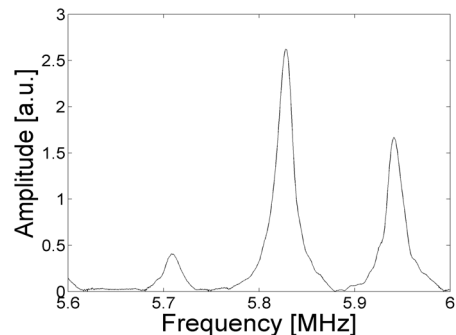


Fig. 8 Frequency spectrum obtained by the EMAR test

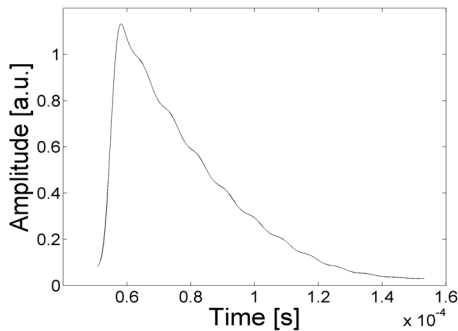


Fig. 9 Ringdown curve of acoustic reverberation at a resonant frequency

(curve fitting)하면 잔향의 감쇠 계수 (attenuation coefficient)을 구할 수 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

먼저 실험의 신뢰도를 알아보기 위하여 측정 재현성 시험 (gauge R&R test)을 수행하였다. 각각 40  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  깊이의 인공 결함 시편에 대하여 Fig. 10과 같이 비결함부 (Position 1)와 결함부 (Position 2)를 각각 5회 반복 측정하여 실험을 진행하였다. 측정은 완전히 시편을 분리한 후 장착하는 방식으로 이루어졌고, 최대한 같은 위치를 측정하고자 하였다.

Table 1은 위의 실험 결과를 표로 나타낸 것이다. 공진주파수와 감쇠계수의 평균값과 표준편차를 각각 표시하였다. 측정 결과를 살펴보면, 먼저 표준 편차가 비교적 작아 측정 신뢰도가 높음을 알 수 있었다. 공진 주파수의 경우는 0.009 ~ 0.014 %의 매우 작은 측정 편차를 보였고, 감쇠 계수의 경우는 7.1 ~ 24.0 %의 상대적으로 큰 측정 편차를 보였다. 공진 주파수의 경우는 측정 편차가 아주 작아 미세한 변화에도 공진주파수의 변화를 관찰할 수 있는 가능성이 보였다. 다만, 민감도가 너무 높아 시편 단면 형상 (geometry)의 미세한 차이에도 너무 크게 반응하여 결함을 판별하는데 방해가 될 수 있다. 반면에 감쇠 계수의 경우는 측정 편차가 커서 상대적으로 변화에 대한 민감도가 떨어짐을 알 수 있었다. 다만, 감쇠 계수의 경우는 커브 피팅의 과정에서 발생하는 오차가 다소 포함되므로 이를 감안한다면 실제 편차는 더 작아질 수 있다.

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

40 $\mu\text{m}$		Healthy region	Microcrack region
Resonant frequency (MHz)	Mean	5.8246	5.8252
	Standard deviation	0.0005	0.0005
Attenuation coefficient (Nepers/ $\mu\text{s}$ )	Mean	0.0241	0.0253
	Standard deviation	0.0020	0.0018
80 $\mu\text{m}$		Healthy region	Microcrack region
Resonant frequency (MHz)	Mean	5.8204	5.8256
	Standard deviation	0.0004	0.0007
Attenuation coefficient (Nepers/ $\mu\text{s}$ )	Mean	0.0353	0.0397
	Standard deviation	0.0032	0.0029
100 $\mu\text{m}$		Healthy region	Microcrack region
Resonant frequency (MHz)	Mean	5.8241	5.8260
	Standard deviation	0.0005	0.0008
Attenuation coefficient (Nepers/ $\mu\text{s}$ )	Mean	0.0219	0.0350
	Standard deviation	0.0019	0.0084

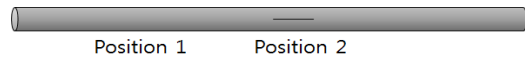


Fig. 10 Positions of measurement

측정 결과 값을 살펴보면, 전반적으로 공진 주파수와 감쇠 계수가 결함의 유무에 따라 어느 정도 차이를 보임을 알 수 있다. 그러나 이런 유의미한 영향이 시편 결함의 깊이에 따라 일관적으로 나타나지는 않았고, 정량적 평가의 가능성은 이 실험 결과로는 판단할 수 없었다. 따라서 비결함부와 결함부의 차이를 더 쉽게 구분하고, 좀더 의미 있는 결과를 얻기 위해 시편의 길이방향을 따라 1-D 스캔을 실시하였다.

1-D 스캔 측정을 위해 시편 길이방향으로 미엔더 라인 코일과 지그를 1 mm씩 이동해가면서 실험하였다. 각각 40  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  깊이의 인공 결함 시편에 대하여 시편마다 총 160여개의 지점에서 받은 신호를 정리하여 Fig. 11, 12에 나타내었다. 결함부의 측정 위치는 이동거리 변화 (distance variation)가 80 ~ 90 mm인 지점에 위치하고 있다.

Fig. 11은 공진 주파수를 1-D 스캔한 결과이다. 40  $\mu\text{m}$  시편에서는 결함 신호가 제대로 구분이 되지 않는 것을 알 수 있었고, 80  $\mu\text{m}$  시편에서는 결함 신호가 확연히 구분이 되었다. 그러나 100  $\mu\text{m}$  시편에서는 결함 위치를 확실하게 판별하기가 어려웠다.

Fig. 12는 공진 주파수로 가진된 초음파 공진의 잔향의 감쇠 계수를 1-D 스캔한 결과이다. 마찬가지로 40  $\mu\text{m}$  시편에서는 결함 신호가 제대로 구분이 되지 않는 것을 알 수 있었고, 80  $\mu\text{m}$  시

편에서는 이전 측정 결과와는 다르게 결함 신호가 구분이 되지 않았다. 100  $\mu\text{m}$  시편에서는 결함 위치를 잘 판별할 수 있었다.

실험 결과가 일관적으로 나오지 않은 이유를 고찰해보면, 먼저 시편의 미세한 형상 변화에 의해 공진 주파수의 변화가 발생하면서 결함 정보에 영향을 주는 점을 들 수 있다. 다른 문제점으로는 시편을 분리하고 재장착하여 다시 측정할 때마다 코일과 시편 사이의 거리, 즉 리프트 오프 (lift-off)의 정도가 미세하게 달라지는 것이다.

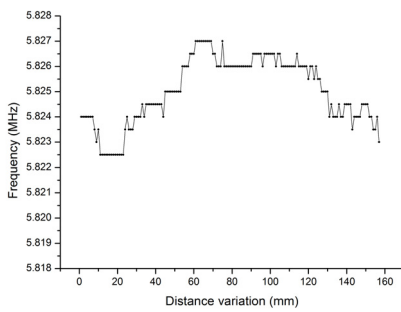
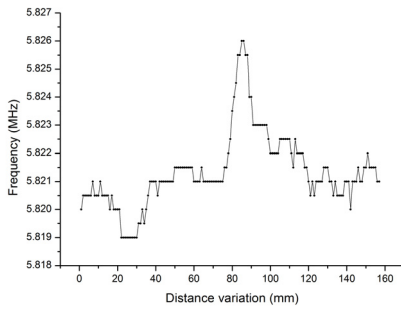
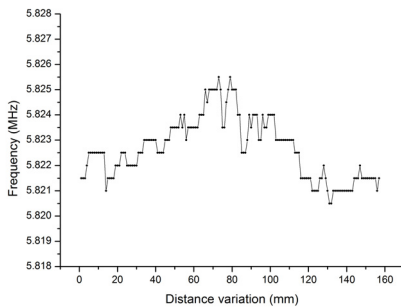
(a) 40  $\mu\text{m}$ (b) 80  $\mu\text{m}$ (c) 100  $\mu\text{m}$ 

Fig. 11 1-D scans of resonant frequency

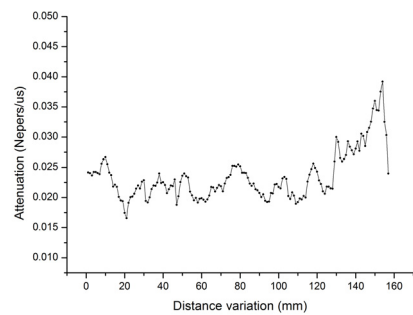
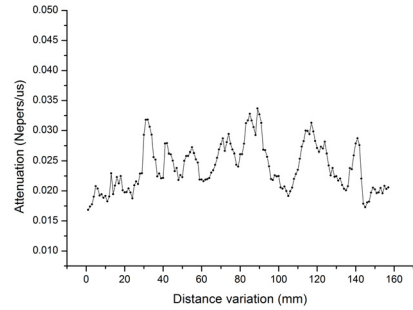
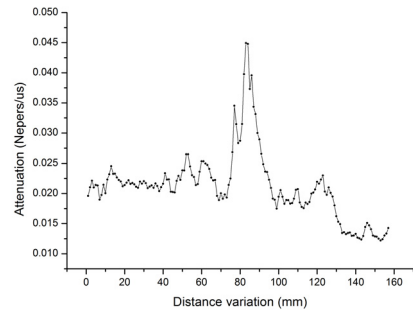
(a) 40  $\mu\text{m}$ (b) 80  $\mu\text{m}$ (c) 100  $\mu\text{m}$ 

Fig. 12 1-D scans of attenuation coefficient for resonant frequency

이에 의해 초음파 진폭의 변화가 발생하기 때문에 리프트 오프의 미세한 변화가 정량화를 어렵게 만드는 요소로서 작용할 것으로 판단된다. 그리고 시편 표면의 미세한 굽힘이나 결함 위치의 미세한 틀어짐에 의해 초음파 경로 차이가 발생하면서 에너지 손실(energy loss)이 일어나 초음파 공진 잔향의 감쇠 계수의 차이가 나타날 수 있다. 이러한 문제들을 개선하기 위해서는 정교하게 가공된 시편이 필요하고, 리프트 오프를 정확하게 조절할 수 있는 지그가 필요하다. 또한, 결함의 위치를 시편의 길이 방향과 정확하게 수평이 되도록 가공해야 하고, 시편 표면의 상태를 굽힘 없이 깨끗하게 유지해야 할 것이다.

이러한 실험적인 오류에도 불구하고 제안한 방법으로 결함의 위치를 비교적 명확하게 관찰할 수 있었다. 추후 실험 장치가 정교화되고 측정의 불확도 요인에 대한 분석이 추가로 이루어진다면 결함의 정량적 평가 능력도 개선될 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 비접촉 방식의 전자기 음향 공진 기법을 이용하여 강선의 표면 미세 결함 탐상에 적용하였고, 결함과 공진 특성 사이의 관계를 확인하여 전자기 음향 공진을 이용한 강선 표면 미세 결함의 진단 가능성을 확인하였다. 시편과 그 시편 상의 표면 미세 결함을 좀 더 정교하게 가공하고, 시편의 표면 상태 개선 및 지그의 개발을 통하여 최적의 신호를 측정할 수 있는 시스템이 필요성을 파악하였다. 이를 기반으로 하여 결함 신호의 정량화를 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

[1] M. Hirao, H. Ogi and H. Fukuoka, "Resonance EMAT system for acoustoelastic stress

measurement in sheet metals," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 64 (11), pp. 3198-3205 (1993)

- [2] G. L. Petersen, B. B. Chick, C. M. Fortunko and M. Hirao, "Resonance techniques and apparatus for elastic-wave velocity determination in thin metal plates," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 66 (1), pp. 192-198 (1994)
- [3] M. Hirao and H. Ogi, "Electromagnetic acoustic resonance and materials characterization," *Ultrasonics*, Vol. 35, pp. 413-421 (1997)
- [4] H. Ogi, M. Hirao and K. Minoura, "Non-contact measurement of ultrasonic attenuation during rotating fatigue test of steel," *Journal of Applied Physics*, Vol. 81 (8), pp. 3677-3684 (1997)
- [5] H. Ogi, H. Ledbetter, S. Kim and M. Hirao, "Contactless mode-selective resonance ultrasound spectroscopy: electromagnetic acoustic resonance," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 106 (2), pp. 660-665 (1999)
- [6] H. Ogi, T. Hamaguchi and M. Hirao, "Ultrasonic attenuation peak in steel and aluminum alloy during rotating bending fatigue," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 31A, pp. 1121-1128 (2000)
- [7] T. Ohtani, H. Ogi and M. Hirao, "Electromagnetic acoustic resonance to assess creep damage in Cr-Mo-V steel," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 45, No. 5B, pp. 4526-4533 (2006)
- [8] A. V. Clark and S. R. Schaps, "Acoustoelastic determination of residual stress by measurement of resonance peaks and phase shifts," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, No. 2, pp. 89-102 (1998)