

# 덴던 비파괴평가를 위한 Total Flux Leakage에서 높은 측정빈도의 데이터를 획득하기 위한 진폭복조의 응용

이주형<sup>1</sup>, 궤임종<sup>2</sup>, 조창빈<sup>3</sup>, 최지영<sup>4</sup>, 박광연<sup>5\*</sup>

## Application of Amplitude Demodulation to Acquire High-sampling Data of Total Flux Leakage for Tendon Nondestructive Estimation

Joo-Hyung Lee<sup>1</sup>, Imjong Kwahk<sup>2</sup>, Changbin Joh<sup>3</sup>, Ji-Young Choi<sup>4</sup>, Kwang-Yeun Park<sup>5\*</sup>

**Abstract:** A post-processing technique for the measurement signal of a solenoid-type sensor is introduced. The solenoid-type sensor nondestructively evaluates an external tendon of prestressed concrete using the total flux leakage (TFL) method. The TFL solenoid sensor consists of primary and secondary coils. AC electricity, with the shape of a sinusoidal function, is input in the primary coil. The signal proportional to the differential of the input is induced in the secondary coil. Because the amplitude of the induced signal is proportional to the cross-sectional area of the tendon, sectional loss of the tendon caused by ruptures or corrosion can be identified by the induced signal. Therefore, it is important to extract amplitude information from the measurement signal of the TFL sensor. Previously, the amplitude was extracted using local maxima, which is the simplest way to obtain amplitude information. However, because the sampling rate is dramatically decreased by amplitude extraction using the local maxima, the previous method places many restrictions on the direction of TFL sensor development, such as applying additional signal processing and/or artificial intelligence. Meanwhile, the proposed method uses amplitude demodulation to obtain the signal amplitude from the TFL sensor, and the sampling rate of the amplitude information is same to the raw TFL sensor data. The proposed method using amplitude demodulation provides ample freedom for development by eliminating restrictions on the first coil input frequency of the TFL sensor and the speed of applying the sensor to external tension. It also maintains a high measurement sampling rate, providing advantages for utilizing additional signal processing or artificial intelligence. The proposed method was validated through experiments, and the advantages were verified through comparison with the previous method. For example, in this study the amplitudes extracted by amplitude demodulation provided a sampling rate 100 times greater than those of the previous method. There may be differences depending on the given situation and specific equipment settings; however, in most cases, extracting amplitude information using amplitude demodulation yields more satisfactory results than previous methods.

**Keywords:** Total flux leakage, Solenoid sensor, Post-signal-process, Amplitude demodulation, Prestressed concrete, External tendon, Section loss, Non-destructive evaluation

### 1. 서론

프리스트레스 콘크리트(Prestressed concrete, PSC) 부재는 구조적 효율성을 높여주고 공간을 길게 할 수 있어 한국에는 다수의 PSC 교량이 사용되고 있다. 하지만 공용년수 증가에 따라 PSC 교량에 다양한 형태의 손상 및 열화가 발생하는 것

으로 분석되었다(Han et al., 2021). 특히 주요 구조부재인 텐던은 부식 환경이 조성되면 긴장력이 높을수록 부식의 진행도 빨라진다(Lee et al., 2017). PSC 교량 외부텐던의 부식과 파단은 그라우팅 품질 불량, 덕트내부의 공극, 제설제와 염해의 작용으로 인해 발생한 경우가 많은 것으로 알려졌다(Fricker and Vogel, 2015; Hurlebaus et al., 2016). 이 같은 형태의 텐던단면 감소의 실제 사례로 서울시 내부순환로 정릉천교에서 2016년 발생한 외부텐던 파단 사고가 있다. 그 원인은 시공 당시 그라우팅 충전이 불충분한 상태에서 그라우팅의 물 비율이 높아 블리딩이 발생하여 덕트내부에 부식 위험 공간이 만들어졌고, 그라우팅 후 에어벤트가 제대로 밀봉되지 않아 염소이온을 포함한 노면수가 덕트내부로 침투하여 부식이 발생한 것 때문으로 조사되었다(Yu et al., 2017; Yoon et al., 2019; Kim et al., 2019). 그리고 텐던 부식 정도가 증가하

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원 박사후연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원 연구위원

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 선임연구위원

<sup>4</sup>정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

<sup>5</sup>정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

\*Corresponding author: kypark@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

면 텐던 단면이 감소하고 유효 프리스트레스력이 감소하게 되는 등의 문제가 발생한다는 점도 실험적으로 확인되었다 (Ryu et al., 2017). 앞에서 언급한 정릉천교의 사례에서는 파손된 덩트 내부 텐던 다발 중 절반 이상의 단면이 부식으로 손실되어 덩트 전체의 파손 및 이탈이 발생하였다. FHWA에서는 텐던 단면의 5% 손실을 텐던 교체 기준으로 제시하는 것을 감안하면(FHWA, 2013), 평상시 PSC 구조물의 정기적인 유지관리 점검에서 5% 이내의 텐던 손상 여부에 대한 신뢰도 높은 비파괴 검사 방법이 필요하다. 미국에서 외부텐던 구조물 검사에 적어도 1개 이상의 주정부(state DOT)에서 사용되는 비파괴 검사법은 Videoscope (23%), Sounding (19%), Magnetic Flux Leakage (General)(12%), Ground Penetrating Radar (8%), Magnetic Main Flux Method (8%), Vibration Methods (4%), Impedance Methods (4%), Computerized Tomography (4%), Impact Echo (4%) 등이 있으며 각 방법의 장점과 단점을 고려하여 복합적으로 사용하기도 한다 (Hurlebaus et al., 2016). 이처럼 자기장을 이용한 방법도 외부텐던의 비파괴 검사에 용이한 측면이 있어 많이 적용되고 있는데 Remnant Magnetic Field, Magnetic Flux Leakage, Induced Magnetic Field, Magnetic Main Flux Method 등의 형태가 알려져 있고 텐던의 단면 부식 평가에서 가능성을 보인 것으로 평가되었다(Fernandes et al., 2013; Azizinamini and Gull, 2012). 하지만 기존에 개발된 자기장을 활용한 비파괴 검사 방법은 요크(Yoke) 형태의 무거운 자화시스템을 운용해야 하는데 이는 PSC구조에 적용하기에 실무적인 한계가 있다. 또한 자기장 발생 장치를 텐던을 따라 일정한 속도로 이동시키기 어려운 문제도 있다.

이를 해결하기 위해 무거운 요크 대신 가볍고 간편한 구조의 솔레노이드를 이용해 텐던에 자기장을 발생시키고 전체 자속의 변화를 측정해 단면변화를 감지하는 Total Flux Leakage (TFL) 방법이 제안된 바 있다(Kwahk et al., 2020). TFL 센서의 1차 코일에 현장에서 손쉽게 운용 가능한 범위 이내의 교류전류를 인가하고 단면변화에 따라 변화하는 자기장의 세기를 2차 코일로 검출해 비파괴검사 하는 방법이다. TFL이 적용된 솔레노이드 센서는 무게가 가벼워 현장 적용성이 좋다.

2차 코일에는 텐던의 단면 변화에 비례하는 진폭을 가진 정현파가 측정 되는데, Kwahk et al.(2020)은 진폭정보를 추출하기 위해 peak picking (PP) 방법을 사용했다. 하지만 이 방법은 TFL센서에서 측정된 신호의 측정빈도(sampling rate)를 크게 낮춰 센서를 텐던에 적용하는 속도에 제약을 주고 이후 추가적인 신호처리나 인공지능의 활용에 많은 제약을 준다.

이 논문에서는 기존에 개발된 TFL센서에서 측정된 신호를 후처리해 비파괴검사 결과 도출 과정을 돕는 방법을 소개한다. 측정된 신호의 특징을 분석하고 진폭변조 및 진폭복조 방

법을 사용해 신호로부터 진폭정보를 추출한다. 2장에서는 기존에 개발된 TFL센서를 간단히 소개한다. 3장에서는 센서에서 측정된 신호를 분석하고 진폭복조 방법을 이용해 진폭정보를 추출하는 방법을 소개하고 4장에서는 Kwahk et al. (2020)의 실험 결과를 이용해 제안된 방법의 결과를 보여주고 PP 방법과 비교해 장점을 분석한다.

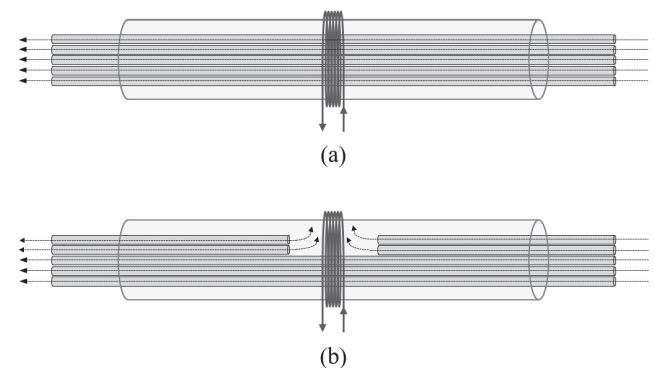
## 2. 전통적 솔레노이드를 이용한 TFL

전통적 솔레노이드를 활용한 TFL 방식은 Fig. 1처럼 텐던의 손상 구간에서 자속이 누설되는 것을 이용해 누설되지 않고 잔류한 전체 자속(Total Flux)의 변화를 측정하여 손상 유무와 정도를 탐지하는 원리이다(Kwahk et al., 2020).

Fig. 1(a)와 같이 텐던에 손상이 없는 경우 전체 텐던을 통해 흐르는 자속이 변화하지 않는다. 하지만 부식이나 파단이 발생해 텐던이 끊어진 경우 Fig. 1(b)와 같이 끊어진 텐던을 흐르는 자속이 외부로 흘러나가기 때문에 파단된 구간을 흐르는 전체 자속이 감소한다. 따라서 텐던 내의 자속 총합을 측정하면 손상이 발생한 곳에서 수치가 감소하여 단면이 감소한 곳을 찾아낼 수 있다. 이때 부식의 자기적 특성은 진공 혹은 공기와 거의 같아 파단된 경우와 동일하게 반응한다.

이러한 원리를 이용하기 위해 Kwahk et al.(2020)은 Fig. 2와 같이 1차 코일과 2차 코일로 이루어진 TFL 센서를 개발했다. Fig. 2(a)는 센서의 개념도를 보여준다. TFL센서는 텐던을 길게 감싸며 자속을 발생시키는 1차 코일과 텐던을 짧게 감싸며 전체 자속을 측정하는 2차 코일로 구성 되어 있다. Fig. 2(b)는 실제 제작된 TFL센서의 사진이다.

TFL센서의 1차 코일에 교류 전기를 흘리면 2차 코일에는 코일이 감싸는 단면 내부의 전체 자속이 측정된다. 이때 발생하는 2차 코일의 유도 기전력은 Fig. 1에서 설명한 원리로 인



**Fig. 1** Magnetic flux change of solenoid according to section loss of external tendons: (a) Flux distribution of normal tendon and (b) Leaked flux distribution when defects in tendon

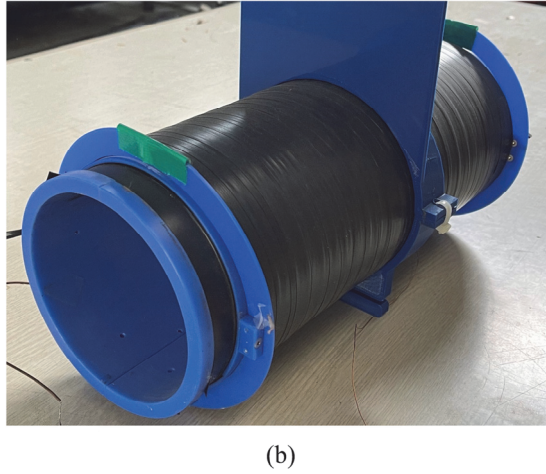
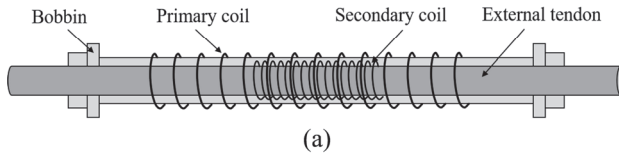


Fig. 2 TFL sensor: (a) concept and (b) picture

해 단면에 따라 변화한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다 (Kwahk et al., 2020).

$$V_{ind}(t) = -N_{2nd} \frac{d\Phi}{dt} = -N_{2nd} \frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

위 식에서  $V_{ind}$ ,  $N_{2nd}$ ,  $\Phi$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{A}$ 는 각각 2차 코일에 유도된 전압, 2차 코일이 감긴 회전 수, 2차 코일 내부의 전체 자속, 2차 코일이 만드는 평면에 투영되는 자속밀도, 2차 코일이 만드는 평면에 투영되는 텐던의 단면적이다.  $t$ 는 시간에 대한 변수이다. 2차 코일이 감싸는 단면 안에는 텐던뿐 아니라 공기, 고밀도 폴리에틸렌(High Density Polyethylene)으로 만들어진 덕트, 콘크리트 몰탈 등도 포함되어 있지만 강자성체인 텐던에 비해 무시할 수 있을 만큼 작은 투자율(permeability)을 가지고 있어 식 (1)과 같이 텐던의 단면적에 대한 식으로 표현 가능하다.

TFL센서의 1차 코일에 시간에 따라 변화하는 교류 전기를 흘리면 그 변화에 따라 자기장에 변화가 생겨 자속변화가 발생한다. 2차 코일은 자속의 변화량, 즉 자속의 미분에 해당하는 값을 측정하는데 이상적인 솔레노이드의 경우 솔레노이드 내부의 전체 자속이 일정하므로 2차 코일에 유도된 전압은 2차 코일이 만드는 평면에 투영되는 텐던의 단면적에 비례한다. 이를 이용하여 TFL센서를 외부텐던 전체 구간에 대해 이동시키며 2차 코일에 발생하는 유도 전압의 변화를 확인하면 텐던의 단면 변화를 탐지할 수 있다.

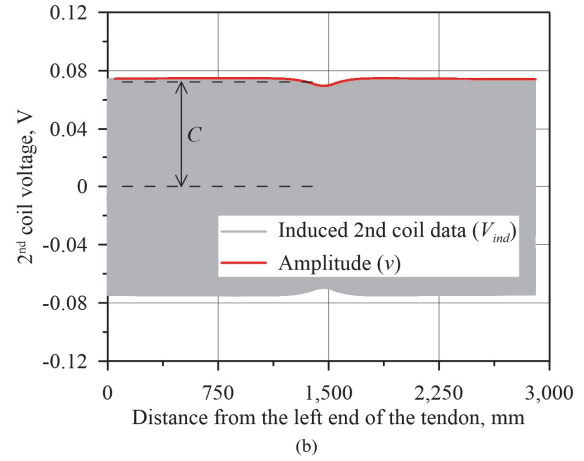
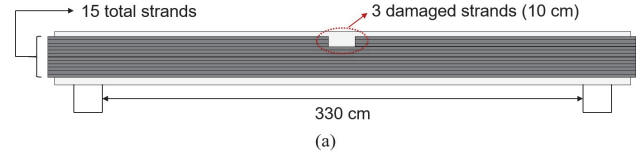


Fig. 3 Example of the test result with the EM sensor: (a) Concept of the test specimen and (b) Measured voltage in the 2<sup>nd</sup> coil

Fig. 3은 TFL센서를 이용해 텐던의 손상을 감지한 예시를 보여준다. 총 15가닥의 텐던 중 3개 텐던에 10 cm 길이의 손상이 있는 경우로 Fig. 3(a)는 실험체의 개념도를 보여준다. Fig. 3(b)는 Fig. 2(b)의 센서로 실험한 결과 2차 코일에서 측정된 전압을 보여주고 있다. 회색 선은 10 Hz로 진동하는 교류를 표시하고 있으며 빨간 선은 교류의 진폭 정보를 나타내고 있다. 빨간 선을 보면 텐던에 손상이 있는 위치에서 2차 코일에서 측정된 유도 전압이 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

### 3. 진폭복조를 이용한 신호 후처리 방법

#### 3.1 TFL센서와 진폭변조

식 (1)에서 설명한 바와 같이 2차 코일에서 측정되는 신호는 1차 코일에 가해 준 교류의 미분과 텐던의 단면적에 비례한다. 따라서 TFL센서에서 측정된 신호는 1차 코일과 동일한 주파수를 가지며 진폭 변화에 텐던의 단면감소에 대한 정보가 포함되어 있다. 이는 라디오 등에서 음성신호를 원거리로 송신하기 위해 사용하는 진폭변조와 그 형태가 비슷하다. 진폭변조는 다음 식을 이용해 메시지를 담은 신호를 고주파 신호에 실는다(Proakis and Salehi, 2002).

$$X(t) = (C + m(t)) \cos(\omega t) \quad (2)$$

여기서  $X$ ,  $m$ ,  $C$ ,  $\omega$ 는 각각 진폭변조된 신호, 메시지를 담은

신호, 정보를 담은 신호가 모두 양수가 될 수 있을 정도로 충분히 큰 임의의 상수, 변조주파수를 의미한다.

Fig. 3(b)를 보면 2차 코일에서 측정된 전압의 진폭 정보를 추출하면 텐던의 손상 여부를 알 수 있음을 확인할 수 있는데 이러한 성질을 이용하면 TFL센서에서 측정된 전압인  $V_{ind}$ 을 식 (2)와 비교해서 표현할 수 있다.

$$V_{ind}(t) = (C+v(t))\cos(\omega t) \quad (3)$$

위 식에서  $v$ 는 2차 코일에 유도된 전압의 진폭정보를 의미한다. Fig. 3(b)에 식 (3)의 각 변수들이 어떤 의미를 가지는지 표시 되어 있다.

### 3.2 진폭복조

식 (3)과 같이 표현된 2차 코일에 유도된 전압에 진폭복조를 적용하면 진폭정보를 추출할 수 있다. 진폭복조는 크게 envelope detector (ED)와 product detector (PD)로 나뉜다. ED는 축전기와 저항 등으로 구성된 회로에 신호가 입력되면 축전기에 전기가 저장되고, 이후 신호가 사라지더라도 축전기에 저장된 전기가 저항에 의해 천천히 감소하게 되는 원리를 이용한다. 하지만 축전기와 저항을 신호에 따라 적절히 조정하지 않으면 저장된 전압이 너무 빠르게 감소하거나 너무 느리게 감소하게 되어 올바른 복조 신호를 얻을 수 없다. 또한 아날로그 회로 상에서 진폭복조가 이루어지므로 디지털 신호처리를 사용한 후처리 방식에 적합하지 못하다는 단점도 가지고 있다.

PD는 삼각함수 공식을 이용해 복조하는 방식인데 대표적으로 삼각함수 2배각 공식(double-angle formula, DAF)을 사용하는 방법과 차수 감소 공식(power-reduction formula, PRF)을 사용하는 방법이 있다 (Proakis & Salehi, 2002). DAF를 이용한 방법은 다음 식으로 진폭정보를 추출한다.

$$\begin{aligned} V_{ind}(t)\cos(\omega t) &= (C+v(t))\cos^2(\omega t) \\ &= (C+v(t))\frac{1+\cos(2\omega t)}{2} \\ &= \frac{C}{2} + \frac{v(t)}{2} + \frac{1}{2}(C+v(t))\cos(2\omega t) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)는 TFL센서에서 측정된 신호에 1차 코일에 흘려 준 교류전기와 같은 주파수의  $\cos(\omega t)$ 를 곱하고 DAF로 전개해 진폭정보를 추출하는 진폭복조 과정을 보여준다. 식 (4)에서 계산된 신호를 변조주파수의 두 배 이상을 차단하는 고주파 차단 필터에 통과시키면  $\cos(2\omega t)$  항이 없어지므로 2차 코일에 유도된 전압의 진폭정보를 추출할 수 있다. PRF를 이용한 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{ind}(t)\cos(\omega t)\sin^2(\omega t) &= (C+v(t))\cos^2(\omega t)\sin^2(\omega t) \\ &= (C+v(t))\frac{1-\cos(4\omega t)}{8} \\ &= \frac{C}{8} + \frac{v(t)}{8} + \frac{1}{8}(C+v(t))\cos(4\omega t) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)는 TFL센서에서 측정된 신호에  $\cos(\omega t)\sin^2(\omega t)$ 를 곱하고 PRF로 전개해 진폭정보를 추출하는 과정을 보여준다. 식 (5)에서 나온 신호에 변조주파수의 네 배 이상을 차단하는 고주파 차단 필터에 통과시키면  $\cos(4\omega t)$  항이 제거되어 전압 진폭 정보가 추출된다.

본 연구에서는 TFL센서에서 측정되어진 원시신호(raw data)를 컴퓨터로 옮겨와 디지털 신호처리를 이용해 후처리를 하고 있으므로 ED보다는 PD가 더 적합하다. PD방법 중 DAF를 사용하는 방법은 계산량이 상대적으로 적고 전기회로로 구현하는 아날로그 신호처리방법에 유리하다. 하지만 변조된 신호와 곱해주는 코사인 신호에 위상 오차가 조금이라도 있으면 복조된 신호가 급격하게 작아져 신호 대 잡음비가 나빠지는 문제를 가지고 있다. 따라서 1차 코일에 가해 준 신호와 2차 코일에서 측정된 신호를 정밀하게 동기화해서 측정해 사용 가능하다. 반면 PRF를 사용하는 방법은 계산양이 상대적으로 많고 아날로그 신호처리로 구현하기 어려운 대신 위상이 조금 맞지 않아도 정상적으로 작동한다. 이러한 이유로 본 연구에서는 식 (5)를 사용하는, PRF를 활용한 PD방법으로 진폭 복조를 수행했다.

### 3.3 진폭복조 방법의 장단점 분석

TFL센서에서 측정된 신호로부터 진폭정보를 추출하기 위한 별도의 연구는 아직 없으며 TFL센서가 소개된 Kwahk et al.(2020)에서 사용한 방법이 유일하다. Kwahk et al.(2020)은 2차 코일에 유도된 전압의 진폭정보를 추출하기 위해 PP 방법을 사용했다. 이 방법은 진폭 정보를 추출하기 위한 가장 간단한 방법으로, 정현파로 진동하는 신호에서 각 주기의 극댓값(local maxima)을 모아 진폭 정보를 만든다. 정현파는 각 주기마다 하나의 극댓값을 가지므로 PP 방법으로 만들어진 진폭정보의 측정빈도는 TFL센서의 1차 코일에 가해진 교류의 주파수와 동일하다. 하지만 이 논문에서 제안한 진폭복조를 이용해 얻은 진폭 정보는 원시신호가 측정된 측정빈도를 그대로 유지한다. 보편적으로 측정빈도는 측정하고자 하는 신호가 가지는 최대 주파수의 10배 이상으로 설정하므로(Hamming, 1989) 진폭복조로 얻은 진폭정보는 PP방법으로 얻은 진폭정보보다 10배 이상 높은 측정빈도를 가지게 된다.

진폭복조를 이용하는 방법은 이러한 특징에서 기인한 몇 가지 장점을 가진다. 가장 큰 장점은 추출된 진폭정보를 추가

적인 신호처리나 인공지능 학습 등에 적용 하는 경우이다. 디지털필터 등 신호처리 방법의 성능은 측정빈도의 영향을 많이 받는데 측정빈도가 높을수록 유리하다(Hamming, 1989). 인공지능을 활용함에 있어서도 정보량이 많을수록 유리한데 측정빈도가 높은 것은 곧 정보량이 많음을 의미한다. TFL 센서를 이용한 비파괴검사 방법은 여타 비파괴검사 방법과 마찬가지로 측정된 신호를 경험적으로 분석해야 한다. 경험의 존도를 낮추기 위해서는 인공지능 등을 활용한 의사결정 보조 기술과 그에 수반되는 인공지능의 전처리 과정이 반드시 필요하다. 인공지능 및 디지털필터를 이용한 전처리 과정을 개발하는데 많은 유리함을 제공하는 진폭복조 방법은 추후 연구에 많은 이점을 제공 할 수 있다.

두 번째 장점은 비파괴검사를 수행할 때 센서를 움직이는 속도에 대한 제한이 적어지는 것이다. PP를 이용한 방법은 진폭정보의 측정빈도가 낮으므로 센서를 천천히 움직여야 충분한 정보를 모으며 비파괴검사를 수행할 수 있다. 예를 들어, 1차 코일에 가해지는 교류의 주파수가 10 Hz라면 1 m의 외부 텐던에 100개의 측정점을 만들기 위해서는 0.1 m/s의 속도로 천천히 움직여야 한다.

PP 방법으로 진폭정보의 측정빈도를 높이려면 1차 코일에 입력되는 교류의 주파수를 높여야 하는데 교류의 주파수를 높이는 데는 자기장의 표면효과(skin effect)나 임피던스(impedance) 등으로 인해 많은 제약이 있다. 이 부분은 이 논문의 논의 범위를 벗어나므로 별도의 연구를 통해 자세히 논하도록 하겠다.

반면 진폭복조를 이용해 얻은 진폭정보의 측정빈도는 2차 코일의 측정빈도와 같으며 2차 코일 측정빈도는 data acquisition (DAQ)가 허용하는 수준 내에서 자유롭게 설정할 수 있으므로 비파괴검사를 빠르게 진행해도 문제될 것이 없다. 예를 들어 TFL 센서의 2차 코일에 유도되는 전압을 1000 Hz의 측정 빈도로 측정했다면, TFL 센서를 1 m/s로 이동시켜도 1 m의 외부텐던 구간에 1000개의 측정점이 확보된다.

## 4. 실측예제

### 4.1 실험 상세

제안된 방법을 검증하기 위해 실험실에서 제작된 인공적인 손상을 입힌 실험체를 통한 실험 결과를 분석했다. 실험은 제

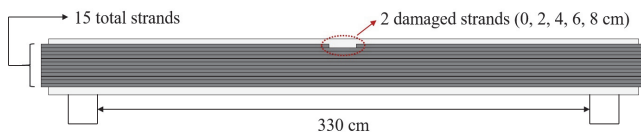


Fig. 4 Concept of the test specimen

안된 후처리 방법의 유효성을 검증하기 위해 Kwahk et al. (2020)의 실험에서 나온 원시신호를 그대로 이용했으며 진폭복조 방법과 PP방법으로 얻은 진폭 정보를 비교했다.

TFL 센서는 플라스틱 소재로 만들어진 37 cm 길이의 반통형 모듈 2개와 프레임, 1차 및 2차 코일로 구성되어 있다. 자기장을 형성하기 위한 1차 코일은 해당 반통형 모듈에 30 cm 길이로 400번 감겨 있으며, 텐던의 단면 손상을 탐지하기 위한 2차 코일은 센서 중앙부에 18번 감아서 제작하였다. 완성된 센서의 모습은 Fig. 2(b)와 같다. 1차 코일에 인가한 교류 전류는 10 Hz의 주파수, ±0.6 A의 진폭으로 가해졌으며 2차 코일에 유도된 전압은 1000 Hz의 측정빈도로 측정되었다.

실험체는 서울 정릉천고가에 사용된 외부텐던을 모사해 만들었다. 전체 15개의 스트랜드로 구성된 텐던에서 2개의 스트랜드에 손상 길이 0, 2, 4, 6, 8 cm 만큼의 파단된 단면 손상을 구현했다. Fig. 4에서 실험체의 모식도를 확인할 수 있으며 Fig. 5에서 2 cm 파단을 모사한 실험체의 사진을 확인할 수 있다.

실험은 제작된 실험체에 TFL 센서를 설치하고 텐던 길이방향으로 수동으로 움직이면서 수행하였다. 센서의 이동거리는 센서의 길이 방향 중앙 지점과 텐던 실험체 단부간의 거리를 레이저 장비를 통해 측정하였다.

### 4.2 실험 결과

TFL 센서의 2차 코일에서 측정된 원시신호와 PP방법으로 추출한 진폭정보, 진폭복조로 추출한 진폭정보가 Fig. 6에 그려져 있다. 원시신호는 TFL 센서에서 측정된 신호에서 고주파잡음만 제거한 것이며 PP방법은 MATLAB의 findpeaks 함수를 사용해 추출했다. 진폭복조 방법은 식 (5)를 이용해 계산했다. PP방법과 진폭복조 방법으로 추출한 진폭 정보는 유의미한 차이가 없이 비슷한 결과를 주며 특히 손상 여부를 판별하는 진폭 감소 구간은 동일한 수준의 진폭 감소를 확인할 수 있다.

진폭복조를 이용한 제안된 방법의 우수성을 확인하기 위해 Fig. 6의 510~514 mm 구간을 확대한 그림을 Fig. 7에 그렸다.

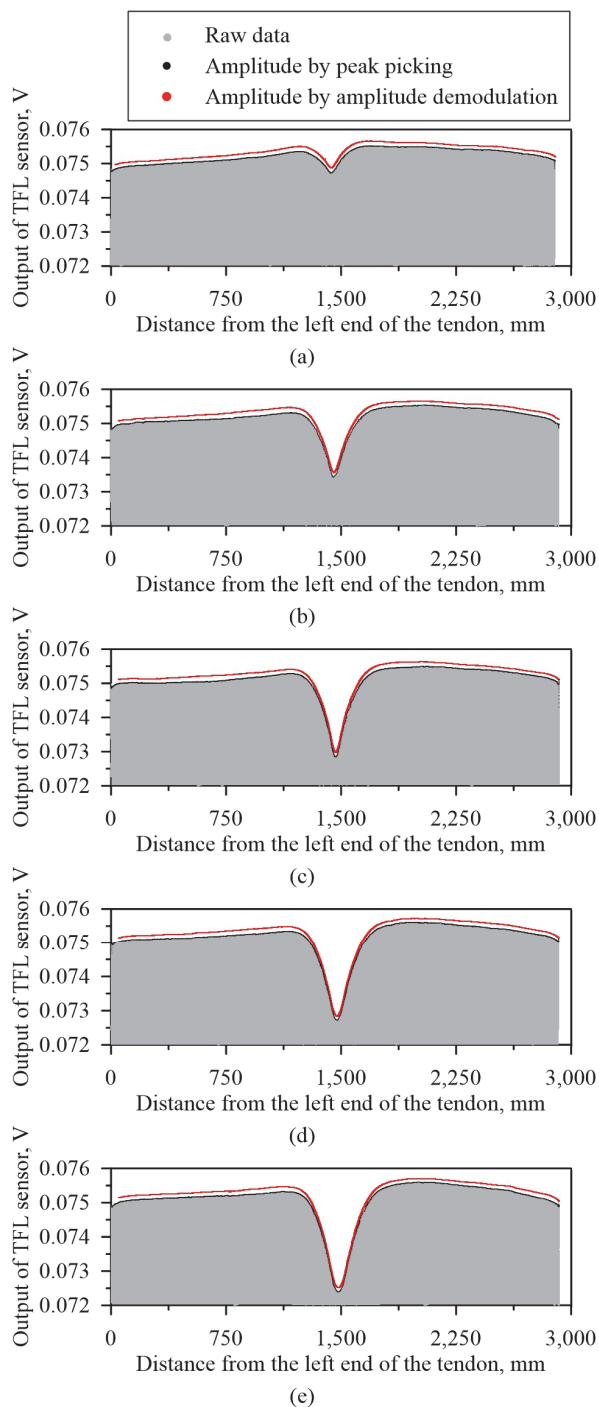


Fig. 5 2 cm of 2 strands damage case

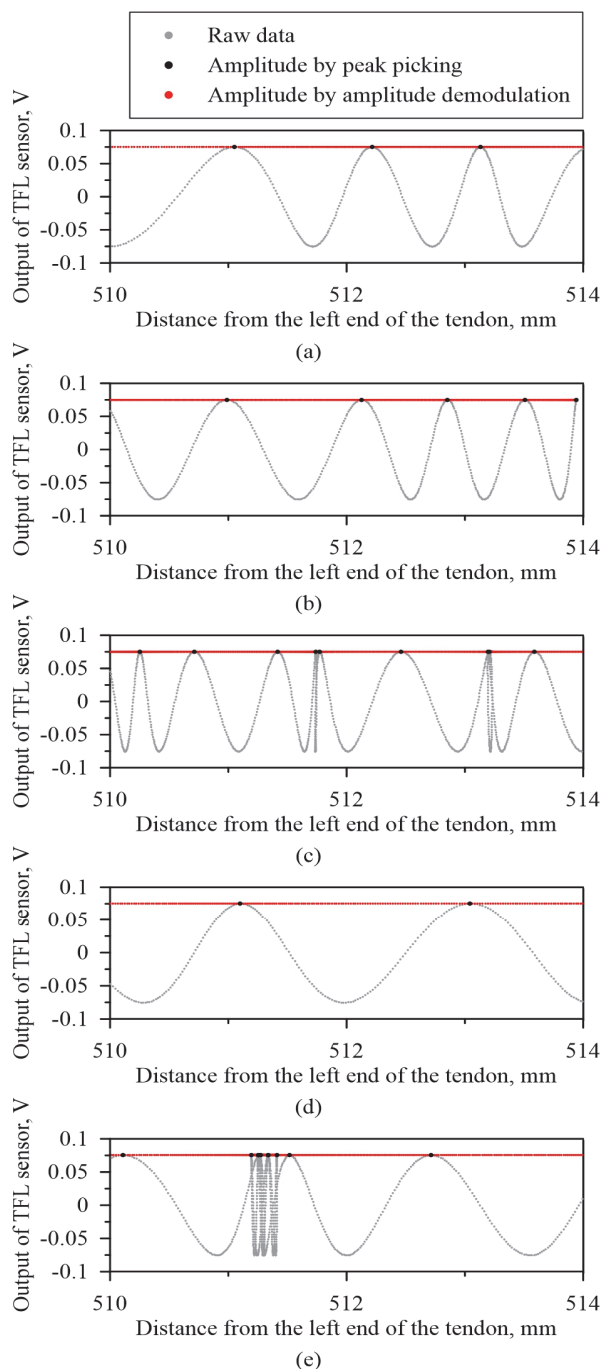
y축인 2차 코일 전압도 원시신호의 형상이 모두 보일 수 있도록 조정 했다. Fig. 7(c)와 (e)에서 원시신호가 다소 비정상적인 모습을 보이는데 이는 해당 위치에서 센서가 일시적으로 정지했거나 미세하게 뒤로 되돌아간 후 다시 전진 하는 과정에서 생기는 현상이다.

현재 실험 조건에서 1차 코일에 입력된 교류의 주파수가 10

Hz이고, 2차 코일 측정 빈도는 1000 Hz이다. 따라서 진폭복조로 얻은 진폭 정보는 1000 Hz, PP방법으로 얻은 진폭 정보는 10 Hz로 만들어져 결과적으로 진폭복조로 얻은 진폭정보가 PP방법에 비해 높은 측정빈도를 제공하는 것을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 7(a)와 (d)는 PP로 얻은 신호의 질이 아주 좋지 않은 반면 진폭복조 방법으로 계산한 결과는 높은 측정빈도를



**Fig. 6** Raw data of TFL sensor and its amplitude: (a) 0 cm defect, (b) 2 cm defect, (c) 4 cm defect, (d) 6 cm defect, and (e) 8 cm defect



**Fig. 7** Detailed amplitude using peak picking and amplitude demodulation methods: (a) 0 cm defect, (b) 2 cm defect, (c) 4 cm defect, (d) 6 cm defect, and (e) 8 cm defect

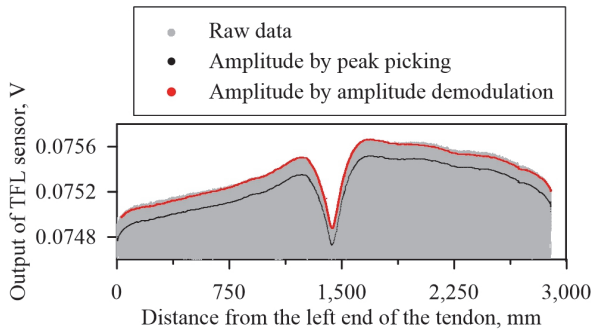


Fig. 8 Debiased raw data of TFL sensor and its amplitude for 0 cm defect case

가지고 있는 경우를 단적으로 보여준다. 따라서 3.3절에서 언급한 진폭복조 방법의 장점이 유효함을 알 수 있다.

또한 Fig. 7을 보면 원시신호가 일반적인 조화함수와 다르게 파장의 크기가 매번 변화 하는데, 이는  $x$ 축이 시간이 아닌 공간이기 때문이다. 1차 코일에 입력되는 교류는 시간에 대해 일정한 파장을 가지고 있다. 하지만 센서가 움직이는 속도가 일정하지 않아 공간상에서는 불규칙한 파장의 크기를 가지게 되고 이는 PP방법의 간격이 불규칙해지는 결과로 이어진다. 이러한 속성은 신호처리나 인공지능 등의 후처리에 불리하게 작용한다. 같은 이유로 진폭복조 방법으로 구한 값의 간격도 불규칙하지만 확보한 측정점의 수가 훨씬 많기 때문에 후처리 과정을 적용하기에 상대적으로 유리하다.

Fig. 6을 보면 진폭복조로 얻은 진폭 정보가 PP방법으로 얻은 진폭 정보보다 약간 큰 값을 가지고 있는데 이는 원시데이터가 약간 아래쪽으로 경향성을 가지고 있기 때문이다. 원시데이터가 경향성을 가지고 있기 때문에 PP방법은 다소 왜곡된 결과를 도출하는 반면 진폭복조 방법은 경향성과 무관하게 진폭정보 그 자체를 얻는 방법이기 때문에 더 정확한 결과가 도출된다.

Fig. 8에서 이런 사실을 확인할 수 있다. Fig. 8은 Fig. 6(a)의 원시신호에서 자기 자신의 평균을 빼고 그린 그림이다. 평균을 빼 경향성을 제거한 원시신호의 상위 포락선이 진폭복조 방법으로 계산한 진폭과 상당히 일치하는 모습을 확인할 수 있다. 하지만 완전히 일치하지는 않는데, 이는 원시신호가 단순히 평행이동 한 것이 아닌 여러 요인으로 인해 발생한 경향성을 가지고 있기 때문이다. 반면 진폭복조는 이러한 경향성을 모두 제거한 순수한 진폭을 제공한다.

Fig. 9는 TFL센서 이동 속도에 따른 차이를 보여준다. Fig. 9는 Fig. 7(c)와 (d)를 겹쳐 그린 것으로 손상길이 4 cm인 실험체와 6 cm인 실험체의 실험 결과를 비교했다. 앞서 설명한 바와 같이 TFL센서는 손으로 움직이면서 실험을 진행했기 때문에 센서의 속도를 일정하게 하는 것이 거의 불가능하다. 손상

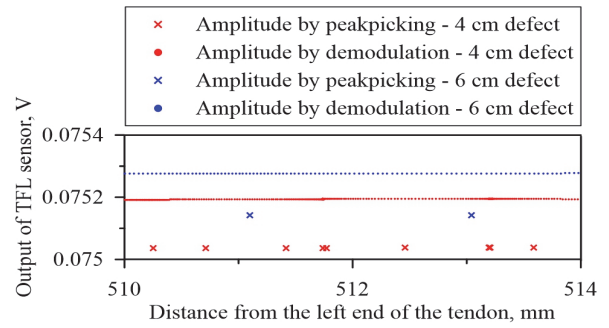


Fig. 9 Amplitude sampling comparison according to TFL sensor movement speed

길이 4 cm인 실험체에 TFL센서를 적용할 때는 510~514 mm 구간을 약 4.4 mm/s의 속도로 움직였을 것으로 추정 가능하다. 반면 6 cm인 실험체는 같은 구간을 약 20 mm/s의 속도로 움직였을 것으로 추측할 수 있다. PP방법으로 얻은 진폭 결과는 이러한 속도 차이에 의해 측정점 간 간격에 많은 차이를 보인다. 하지만 진폭복조로 얻은 진폭은 두 경우 모두 조밀하게 측정되어 있다.

## 5. 결론

외부텐던의 단면감소를 비파괴검사하는 TFL센서에서 측정되어 나온 신호에 진폭복조 방법을 적용해 진폭 정보를 추출하는 방법을 소개했다. 우선 기존에 개발된 TFL센서를 이용해 외부텐던을 비파괴검사하면 텐던의 단면이 감소했을 때 진폭이 감소하는 신호를 출력하는 원리를 요약했다. TFL센서에서 측정된 신호는 정현파 형태를 가지고 있고, 신호의 진폭 변화로 외부텐던을 비파괴검사한다는 특성을 이용해 진폭변조된 신호의 특성과 비교분석 했다. 분석결과를 이용해 진폭복조를 활용하면 원시신호에서 진폭 변화에 대한 정보를 추출할 수 있음을 보였다. 다양한 진폭복조 방법을 소개하고 특성을 분석해 PRF를 활용한 PD방법을 선택했다. 또한 실험체 대상 실험을 통해 제안된 방법이 가진 장점을 분석 했다.

진폭복조를 이용한 방법이 소개되기 전에는 정현파의 극대값을 모아 진폭 변화 정보를 추출하는 PP방법을 사용했는데 이 방법은 측정빈도가 TFL센서의 1차 코일에 입력한 신호의 주파수에 맞춰지는 반면, 새로 제안된 방법은 측정빈도를 실제 원시신호가 측정된 측정빈도 그대로 유지한다. 기존 방법은 측정빈도를 1차 코일에 입력하는 교류의 주파수 수준으로 크게 낮추기 때문에 입력 주파수 선택에 제한이 생기고, TFL센서를 움직이는 속도가 너무 빠르면 세밀한 비파괴검사가 어렵게 되며, 측정빈도가 너무 낮아져 추가적인 신호처리나 인공지능을 적용하기에 어려움이 많다. 하지만 제안된 방법

은 측정빈도를 원시신호와 동일하게 유지하기 때문에 이러한 문제점이 발생하지 않는다.

진폭복조를 이용한 TFL 센서 후처리 방법은 원시신호의 높은 측정빈도를 유지한 채 진폭정보를 추출할 수 있게 해 기존 극댓값을 이용한 방법을 쓸 때 보다 TFL 센서의 연구개발 방향의 다양성을 확보했다. 여기서 나온 결과를 토대로 추가적인 신호처리나 인공지능 기술 등을 개발한다면 TFL 센서의 정확도가 더욱 증대될 수 있을 것이라 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2022-00142566).

## References

1. Azizinamini, A., and Gull, J. (2012), Improved inspection techniques for steel prestressing/post-tensioning strand, In FDOT Contract No. BDK80 977-13 Final Report-Volume I, Florida Department of Transportation, Florida International University, Miami, FL, USA.
2. Fernandes, B., Nims, D., and Devabhaktuni, V. K. (2013), Comprehensive MMF-MFL inspection for corrosion detection and estimation in embedded prestressing strands, *J. Civ. Struct. Health Monit.*, 4, 43-55.
3. FHWA. (2013), Guidelines for Sampling, Assessing, and Restoring Defective Grout in Prestressed Concrete Bridge Post-Tensioning Ducts, FHWA Publication Number: FHWA-HRT-13-027 (PDF version), USA.
4. Fricker, S., and Vogel, T. (2015), Detecting wire breaks in a prestressed concrete road bridge with continuous acoustic monitoring, *Bridge Maint. Saf. Manag. Life-Cycle Perform. Cost*, 847-850.
5. Hamming, R. W. (1989), *Digital Filters* (3rd edition), Prentice Hall International (UK) Ltd., Hertfordshire, United Kingdom.
6. Han M., Park J. H., Lee J. H., and Min J. (2021), Analysis of structural safety for rebar exposure and corrosion in PSC I-girder bridge slab, *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, 25(1), 67-74.
7. Hurlbaeus, S., Hueste, M., Karthik, M., and Terzioglu, T. (2016), Condition Assessment of Bridge Post-Tensioning and Stay Cable Systems Using NDE Methods, NCHRP Report 14-28, NCHRP, Transportation Research Board of the National Academies: Washington, DC, USA, 7-19.
8. Kim, K., Youn, S., and Youn, S. (2019), Corrosion of Post-Tensioned Tendons and Technology of Grouting, Magazine of Korea Concrete Institute, Seoul, Korea, 31, 18-23.
9. Kwahk, I., Park, K. -Y., Choi, J. -Y., Kwon, H., and Joh, C. (2020), Non-Destructive for Sectional Loss of External Tendon of Prestressed Concrete Structures Using Total Flux Leakage, *Applied Sciences*, MDPI, 10, 7398.
10. Lee, B. Y., Koh, K. T., Ismail, M. A., Ryu, H. -S., and Kwon, S. J. (2017), Corrosion and strength behaviors in prestressed tendon under various tensile stress and impressed current conditions, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2017, 1-7.
11. Proakis, J. G., and Salehi, M. (2002), *Communication Systems Engineering* (2nd edition), Prentice Hall, Inc., New Jersey.
12. Ryu, H. S., An, G. H., Hwang, C. S., and Kwon S. J. (2017), Changes in corrosion progress and ultimate load of tendon under 20% and 40% of ultimate loading conditions, *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, 21(4), 47-52.
13. Yoon, I. -S., Kang, T. H. K., and Shin, H. -Y. (2019), Evaluation of corrosion prevention systems of strands for PSC structures, *J. Korea Concr. Inst.*, 31, 557-565.
14. Yu, C., Kim, K., Seol, D., and Youn, S. (2017), Endoscope survey of internal, external tendon in PSC Box Girder, *In Proceedings of the Annual Conference of Korea Concrete Institute*, Andong-Si, Korea.

Received : 12/28/2022

Revised : 04/11/2023

Accepted : 04/14/2023

**요 지 :** 이 논문은 total flux leakage (TFL) 방법을 이용해 외부텐던을 비파괴검사 하는 솔레노이드 형태의 센서의 측정 신호를 후처리하는 방법을 소개한다. 기존에 개발된 TFL 솔레노이드 센서는 1차 코일과 2차 코일로 이루어져 1차 코일에 정현파 형태의 교류를 입력하면 2차 코일에 그 미분에 비례하는 신호가 측정된다. 이때 진폭은 텐던의 단면에 비례하므로 파단 및 부식 여부를 확인할 수 있다. 따라서 TFL 센서의 측정 신호에서 진폭정보를 추출 하는 것이 중요한데 기존에는 단순히 극댓값을 모아 진폭정보를 취득했다. 하지만 이 방법을 사용하면 측정빈도가 크게 낮아져 추가적인 신호처리 및 인공지능 적용에 많은 제약이 생긴다. 이 논문은 높은 측정빈도를 가진 진폭정보를 추출하기 위해 진폭복조를 응용해 진폭정보를 획득하는 방법을 제시한다. 진폭복조를 이용해 진폭정보를 취득하면 측정빈도를 원시신호와 동일한 수준으로 유지할 수 있다. 이 방법은 TFL 센서의 1차 코일 입력 주파수 선택과 센서를 외부텐던에 적용하는 속도 등에 제약을 없애주어 개발 방향에 많은 자유도를 부여한다. 또한 높은 측정빈도를 유지하므로 추가적인 신호처리나 인공지능 등을 활용 하는데 유리함을 제공한다. 제안된 방법은 실내실험을 통해 검증 되었으며 기존 방법과 비교해 어떤 장점이 있는지 분석했다. 제시된 예제의 경우 진폭복조를 사용한 방법이 기존 방법에 비해 100 배 높은 측정빈도를 제공 하는 것을 확인 할 수 있었다. 주어진 상황과 구체적인 장비 설정에 따라 차이가 있겠지만 대부분의 경우 진폭복조를 사용해 진폭정보를 추출하면 기존 방법 대비 만족할만한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

**핵심용어 :** Total flux leakage, 솔레노이드 센서, 신호후처리, 진폭복조, 프리스트레스 콘크리트, 외부텐던, 단면감소, 비파괴검사