

## 자왜형 원거리 초음파검사에서 실시간 수신신호 처리를 위한 소프트웨어 접근

### A Software Approach for the Realtime Received Signal Processing in Magnetostrictive Long-Range Ultrasonic Testing

허원녕\*, 임형택\*, 김태경\*, 최명선\*\*†

Won Nyong Heo\*, Hyung Taik Lim\*, Tae Gyung Kim\* and Myoung Seon Choi\*\*†

**초 록** 위상배열 기술에 기반을 둔 통상의 초음파검사에서처럼, 자왜형 원거리 초음파검사에서도 실시간 수신신호 처리를 위해 복잡한 전자회로들을 사용하여왔다. 본 연구는 위상 보상, 노이즈 필터링, 파형 변환 등과 같은 필수적인 작업들을 기존의 하드웨어 접근보다는 소프트웨어 접근을 이용하여 수행할 때, 보다 유연하고 효율적인 실시간 신호처리가 가능해진다는 것을 보여준다. 이는 비용효율적인 원거리 초음파검사 시스템 구축과 검사 결과 분석에 기여할 것이다.

**주요용어:** 원거리 초음파검사, 자왜, 유도파, 실시간 신호처리

**Abstract** Like the phase array based ultrasonic system, complicated electronics has been used for real time signal processing in the magnetostrictive long-range ultrasonic testing(LRUT) system. This study shows that the software approach including the phase compensation, noise filtering and waveform transformation takes advantage rather than the previous hardware approach. Furthermore, it is possible for the software approach to be able more flexible and efficient realtime signal processing. These results will contribute to a cost-effective LRUT system and analysis of the inspection data.

**Keywords:** Long-Range Ultrasonic Testing, Magnetostrictive, Guided Waves, Realtime Signal Processing

#### 1. 서 론

원거리 초음파검사(long range ultrasonic testing: LRUT)를 위해 사용되는 자왜형 탐촉자는 보통 2개 채널의 동일한 센서 코일들을 포함한다[1]. 대부분의 경우, 다리 폭에 비해 훨씬 긴 다리 길이를 갖는 개별 코일은 다리 길이에 수직한 방향으로 진행되는 유도파(guided wave)를 주로 탐지한다. 인접한 두 코일 다리 사이의 간격은 보통 중심주파수에서의 1/4 파장에 해당한다[2-5]. 이들을 위상배열 이론에 따라 운영할 때 유도파의 수

신 방향을 선택할 수 있다[6]. 이 방향성 조종은 손쉬운 신호해석을 가능하게 하는 단순한 에코 구조를 얻도록 검사원을 돕는다.

통상의 초음파검사에서처럼 자왜형 LRUT에서도 개별 센서에 의해 탐지된 신호는 임피던스 매칭, 노이즈 제거 등을 위한 전처리 회로를 거친 후 증폭회로로 입력된다. 증폭된 채널 신호들은 센서 위치 차이에 기인한 위상지연을 보상하는 과정을 거친 후 더해져서 하나의 RF신호로 검사 시스템 화면에 표시되어 왔다[1-5]. 이러한 실시간 수신신호 처리를 위해 복잡한 전자회로들을

사용하여 왔으며 하드웨어에 주로 의존하는 실시간 신호처리에서는 필터의 형태 및 주파수 대역폭, 검사 시스템 화면에 표시되는 신호의 형태 및 수(number) 등의 선택에서 상당한 제한이 있다. 이 제한을 줄이려면 전체 LRUT 시스템의 비용은 증가한다.

거의 모든 LRUT에서 수신신호들의 중심주파수와 반복율(repetition rate)은 각각 200 kHz와 10 Hz를 넘지 않고 신호 수집과정에서 센서들은 움직이지 않는다. 이는 LRUT에서 요구되는 수신신호 처리 속도가 통상의 초음파검사에 비해 상당히 느려서 소프트웨어의 사용에 의해서도 실시간 신호처리가 가능할 수 있다는 것을 암시한다 [7]. 본 연구의 목적은 보다 유연하며 비용효율적인 LRUT 시스템 개발의 일환으로써 하드웨어에 주로 의존하는 기존의 실시간 수신신호 처리를 대체할 수 있는 소프트웨어 프로그램을 개발하는 것이다. 여기서는 개발된 소프트웨어의 알고리즘과 그 구현에 대해 먼저 기술한다. 그리고 이 알고리즘의 유효성을 평가하기 위한 실험을 수행하며 그 결과들을 논의한다.

2. 실시간 수신신호 처리

Fig. 1은 실시간 수신신호 처리 소프트웨어의 알고리즘을 도식적으로 보여준다. 먼저 위상배열 탐촉자의 두 센서(채널-1과 채널-2)에 의해 탐지되어 전처리 과정과 증폭 과정을 거친 아날로그 신호들을 디지털 데이터로 변환한다. 의도된 수신 방향을 고려하여 90도 위상지연이 요구되는 채널과 그렇지 않은 채널을 선택한다. 이들 선택 스위치는 서로 반대 방향으로 공시적으로(synchronously) 움직인다. 선택된 두 신호 데이터

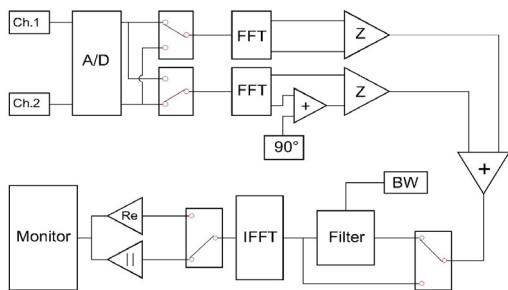


Fig. 1 A software approach concept for the realtime receive signal processing in magnetostrictive LRUT

에 대해 푸리에(Fourier)변환을 수행함으로써 그들의 진폭 및 위상 스펙트럼을 얻고 위상보상(phase compensation)을 수행한다. 그리고 위상이 보상된 주파수 스펙트럼을 복소수 데이터로 변환한 후 더한다. 이 더하기 과정의 출력을 역푸리에(inverse Fourier)변환함으로써 시간영역의 복소수 신호를 얻는다. 이 IFFT과정 전에 노이즈 제거를 위해 대역폭(bandwidth: BW) 통과필터를 사용할 수도 있다. 복소수 신호의 실수 성분과 절대크기 성분으로부터 각각 RF 형태와 비디오 형태의 검사 시스템 수신 신호를 얻고 그 중 하나를 선택하여 모니터에 나타낸다.

윈도우7 운영체제를 갖는 랩톱 PC와 LabVIEW 2011(미국, National Instrument)을 사용하여[8] A/D 변환기와 모니터 사이의 모든 과정들을 처리하는 이 소프트웨어 알고리즘을 구현하였다. A/D변환기는 Picoscope 3424(영국, Pico Technology)이었다[9]. FFT는 식(1)에 의해 정의되는 이산푸리에변환(discrete Fourier transformation, DFT)을 효율적으로 수행하는 알고리즘이다.

$$y_k = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} x_l e^{-j(2\pi kl/N)} \quad (k=0,1,2,\dots,N-1) \quad (1)$$

여기서  $x_l$ 은 A/D변환기에 의해 수집된 데이터이고  $N$ 은 데이터 개수 그리고  $j = \sqrt{-1}$ 이다. 이  $y_k$ 의 실수부와 허수부로부터 식(2)와 (3)으로 표현되는 신호 스펙트럼의 진폭과 위상을 얻는다.

$$A_k = \sqrt{(Re(y_k))^2 + (Im(y_k))^2} \quad (2)$$

$$\theta_k = \tan^{-1}(Im(y_k)/Re(y_k)) \quad (3)$$

대역폭 통과 필터에는 식(4)에 의해 정의되는 가우시안(Gaussian) 윈도우를 사용하였다.

$$g_k = y_k^p e^{-(k-m)^2/2(\sigma n)^2} \quad (k=0,2,\dots,n-1) \quad (4)$$

여기서  $y_k^p$ 는 위상보상 및 구성신호 더하기 과정이 수행된 후의 신호 스펙트럼이다.  $n$ 은 이 윈도우가 적용되는 스펙트럼 데이터의 개수이고,  $m = (n-1)/2$ , 그리고  $\sigma$ 는 표준편차이다. 본 연구에서 적용된  $n$ 은 식(5)에 의해 결정되었다.

$$n = \text{INT}(2Nf_c/f_s) \quad (5)$$

여기서  $\text{INT}(xx)$ 는  $xx$ 의 정수부분을 의미하고  $f_c$ 와  $f_s$ 는 각각 센서 코일의 중심주파수와 A/D변환기의 샘플링 주파수이다. 정확한 스펙트럼을 얻기 위해 보통  $f_c$ 보다 10배 이상 큰  $f_s$ 의 사용을 추천한다. 식(4)와 (5)는  $2f_c$ 이하 주파수 영역에서의 신호 스펙트럼에 윈도우가 적용된다는 것을 의미한다. 필터가 사용될 경우,  $2f_c$ 보다 큰 주파수 영역에서의 신호 스펙트럼 데이터는 영으로 대체되었다.

$$g_k = 0 \quad (k = n, n+1, \dots, N-1) \quad (6)$$

중심주파수에 대한 6-dB 대역폭의 백분율(BW%)은 식(7)에 의해 정의된다.

$$\frac{BW}{100} = \frac{2|m-b|}{m} \quad (7)$$

여기서  $b$ 는  $g_b = y_b^p/2$ 로부터 주어지는 식(8)에 의해 결정된다.

$$\frac{1}{2} = e^{-(b-m)^2/2(\sigma m)^2} \quad (8)$$

식(7)과 (8) 그리고 큰  $m$ 에 대해 적용되는 근사식  $n \approx 2m$ 으로부터 표준편차와 대역폭 사이의 다음 관계식을 얻는다.

$$\sigma \approx \frac{BW}{400\sqrt{2\ln 2}} \quad (9)$$

100% BW에 대응되는  $\sigma$ 는 0.2133 정도이다.

IFFT는 다음 식에 의해 정의되는 역(inverse) DFT를 효율적으로 수행하는 알고리즘이다.

$$x_l^p = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y_k^p e^{j(2\pi kl/N)} \quad (l = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (10)$$

필터가 사용될 경우, 식(10)에서  $y_k^p$ 는 식(4), (6), (9)에 의해 결정되는  $g_k$ 로 대체된다. 검사 시스템 화면에 표시되는 RF 신호와 비디오 신호는 각각  $x_l^p$ 의 실수 성분과 절대대기 성분으로 주어진다.

### 3. 실험 및 논의

Fig. 2는 위에서 기술된 소프트웨어에 의한 실시간 수신신호 처리 알고리즘의 유용성을 평가하기 위한 실험의 구성을 도식적으로 보여준다. 시편은 3 m 길이, 100 mm 외경, 5 mm 두께의 탄소강 파이프이었고 탐촉자는 에폭시를 사용하여 파이프 길이의 약 1/3 위치에 부착된 철-코발트 합금 스트립(0.1 mm 두께)과 그 스트립을 감싸도록 만들어진 두 채널의 동일한 나선형 코일로 구성되었으며[2-4] 펄서/리시버는 GWR 320(한국, Digital Ultrasonics)이었다. 컴퓨터는 이 펄서/리시버와 피코스코프(ps3424)를 조종하며, Fig. 1에 나타내었던 것과 같이 수신신호 처리를 수행한다. 이 실험에서 펄서는 탐촉자가 양의(positive) 방향으로 진행하는 T(0,1)모드 펄스(50 kHz, 2 cycle)를 발생시키도록 조종되었다. 즉, 위상배열 이론에 따라 왼쪽 코일에 전기펄스를 가한 다음 1/4 주기에 해당하는 시간에 오른쪽 코일에 동일한 전기펄스를 가하였다. 그리고 리시버 증폭이득은 0 dB로 설정되었으며 수신신호 처리과정에서 채널 선택 스위치들은 채널-2 신호의 위상이 90도 지연되도록 설정되었다. 이는 양의 방향으로 진행하는 에코들에 비해 음(negative)의 방향으로 진행하는 에코들이 월등히 우세하게 시스템 화면에 표시된다는 것을 의미한다.

Fig. 3은 필터를 사용하지 않고 얻은 RF형태의 수신신호를 보여준다. 2 m 위치의 에코신호는 파이프 우측 끝으로부터 반사에, 3 m 위치의 에코신호는 파이프를 한번 왕복한 유도파들에 기인된다. 전자의 피크 진폭이 후자의 그것보다 크다. 이는 두 에코의 수신 방향 차이에 주로 기인한다. 전자는 의도된 방향으로 수신된 에코이고 후자는 의도된 것과 반대 방향으로 수신된 에코이다. 송신 과정에서 의도된 것과 반대 방향으로 발생한 작은 펄스에 기인된 왼쪽 끝으로부터의 반사에코는 양의 방향으로 진행하다가 수신 과정에서 의도된 것과 반대 방향으로 탐지될 수 있다. 1 m 위치에 나타날 수 있는 이 에코신호는 보이지 않았다. 이것은 사용된 시스템의 방향성 조종 능력이 매우 우수하다는 것을 가리킨다.

Fig. 4는 중심주파수의 50%에 해당하는 25 kHz의 6 dB 대역폭을 갖는 가우시안 필터를 사용하여 얻은 RF신호와 비디오신호를 비교하여 보여준

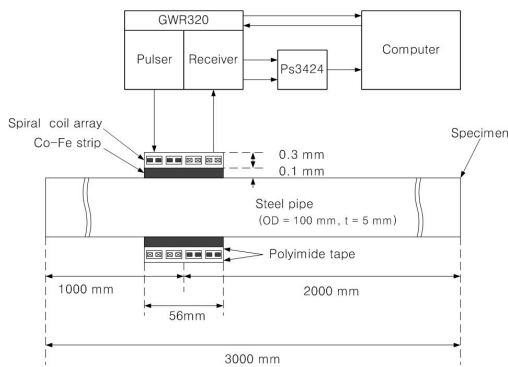


Fig. 2 Experimental setup

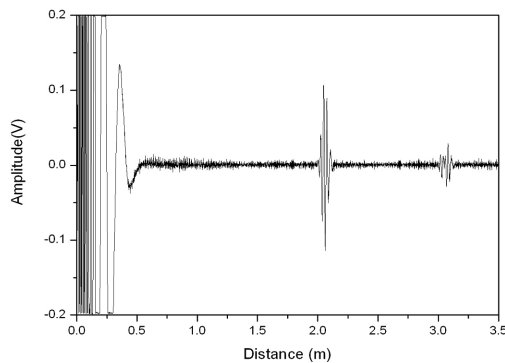


Fig. 3 RF signal obtained without using a filter

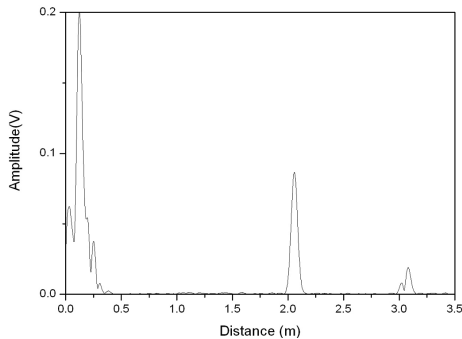
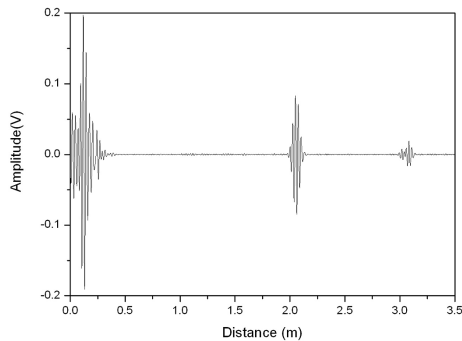


Fig. 4 RF and video signals obtained with using a Gaussian filter (% BW = 50)

다. 메인뱅(main bang) 신호 근처에 보이는 저주파 성분과 전체 영역에서 보이는 고주파 성분이 제거되어 두 에코가 우수한 SNR(signal-to-noise ratio)를 갖는다는 것을 알 수 있다. 저주파 노이즈는 탐촉자 코일에 가해진 전기펄스의 전위가 영이 된 직후 코일에 흐르는 유도전류에, 고주파 노이즈는 펄스폭변조(pulse width modulation) 기술에 기반을 둔 전원장치들에 주로 기인된 것으로 추측된다. 하드웨어에 의존하는 기존의 자외형 LRUT 시스템을 사용하여 비디오신호를 얻기 위해서는 별도의 신호분석 소프트웨어를 사용해야 할뿐 아니라 이 분석 작업은 데이터수집 후 사무실에서 이루어져야 했다. 본 논문에서 기술된 수신신호 처리 방법을 사용한다면, 다양한 필터와 파형 변환 등이 검사 현장에서 실시간으로 이루어질 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 자외형 LRUT를 위한 실시간 수신신호 처리 알고리즘을 제안하고 그 유효성을 검증하는 실험을 수행하였다. 결론적으로 위상보상, 노이즈 제거, 파형 변환 등과 같은 필수작업들을 소프트웨어로 대체할 수 있다는 것을 보였다. 더욱이 이러한 소프트웨어 접근은 수신에코 진행방향의 선택뿐 아니라 노이즈 필터의 형태 및 대역폭, 검사 시스템 화면에 표시되는 신호의 파형 및 수 등에서도 자유로운 선택을 가능하게 한다. 이는 비용효율적인 LRUT 시스템 구성과 검사 결과 분석에 기여할 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 논문의 일부는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제의 결과임을 밝힌다.

#### 참고문헌

[1] H. Kwun, S. Y. Kim and G. M. Light, "Long-range guided wave inspection of structures using the magnetostrictive sensor," *Journal of the KSNT*, Vol. 21, No. 4, pp. 383-390 (2001)

- [2] M. S. Choi, W. N. Heo and J. K. Jun, "Design and fabrication of the spiral coils for guided wave magnetostrictive transducers," *Journal of the KSNT*, Vol. 28, No. 6, pp. 496-503 (2008)
- [3] W. N. Heo and M. S. Choi, "Spiral coil magnetostrictive strip transducers for long range ultrasonic testing of cylindrical structures," *Journal of the KSNT*, Vol. 28, No. 5, pp. 416-420 (2008)
- [4] S. J. Kim and M. S. Choi, "Magnetic property effects of the strip on transducer sensitivity in magnetostrictive strip type guided wave transducers," *Journal of the KSNT*, Vol. 28, No. 2, pp. 205-210 (2008)
- [5] Y. M. Cheong, "Experimental evidence and analysis of a mode conversion of guided wave using magnetostrictive transducer," *Journal of the KSNT*, Vol. 29, No. 2, pp. 93-97 (2009)
- [6] M. G. Silk, "Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing," pp 90-93 and 117-119, Adam Hilger, Bristol (1984)
- [7] W. N. Heo, "Study on a magnetostrictive transducer system for long-range ultrasonic testing," MS Thesis, Chap. 4, Yeungnam Univ. (2012)
- [8] <http://www.ni.com/labview/ko/>, LabVIEW 프로 그래밍 언어에 대한 소개 참조 (2012)
- [9] <http://www.picotech.com/oscilloscope.html>, PC 오실로스코프의 기능과 성능 참조 (2012)