

## 원거리 초음파검사에서 수신에코 진행방향의 실시간 식별

### Realtime Identification of the Propagation Direction of Received Echoes in Long-Range Ultrasonic Testing

최명선\*†, 허원녕\*\*

Myoung Seon Choi\*† and Won Nyoung Heo\*\*

**초 록** 원거리 초음파검사에서는 송신 혹은 수신 방향성 조종을 위해 보통 1/4 파장의 일정한 간격을 갖는 다수의 동일한 변환기들로 구성된 위상배열 탐촉자를 사용한다. 본 논문은 이 변환기 간격에 기인한 위상차를 보정한 후 구성 수신 신호들을 더하는 과정에서 그 출력신호와 함께 그 입력신호들을 시스템모니터에 나타냄으로써 개별 에코들의 진행방향을 실시간으로 식별할 수 있다는 것을 보여준다. 이 구성 에코들의 보강간섭은 의도된 방향으로 진행한 정방향 에코를 가리키고 반대로 상쇄간섭은 의도된 것과 반대방향으로 진행한 역방향 에코를 암시한다.

**주요용어:** 유도파, 원거리 초음파검사, 에코식별, 진행방향

**Abstract** In long-range ultrasonic testing, a phased array probe composed of multiple identical transducers with a uniform interval of one quarter wavelength is usually used for the transmission or reception directivity control. This paper shows that the propagation directions of individual echoes can be identified in real time by displaying the inputs of a process for summing the constitution reception signals after compensating the phase difference due to the transducer interval, together with the output of the process. A constructive interference of the constitution echoes indicates a forward direction echo propagating along an intended direction while a destructive interference implies a reverse direction echo propagating along the direction opposite to the intended one.

**Keywords:** Guided Waves, Long-Range Ultrasonic Testing, Echo Identification, Propagation Direction

#### 1. 서 론

원거리 초음파검사(long-range ultrasonic testing: LRUT)에서는 송신 혹은 수신 방향성 조종을 위해 일정한(보통 중심주파수에서 1/4 파장에 해당되는) 간격을 갖는 다수의 동일한 변환기들로 구성된 위상배열(phased array) 탐촉자를 사용한다 [1,2]. 전형적인 수신과정은 개별 변환기의 위치를 고려하여 그 수신신호의 위상을 적절히 지연시킨 후 모든 구성신호들을 더하는 과정을 포함한다. 검사시스템 수신신호로 간주되는, 이 신호 더하기 과정의 출력을 (혹은 비디오 형태의 그

버전을) 시스템 모니터에 표시하여 왔다.

검사시스템 수신신호에서 개별 에코의 진행방향에 대한 식별이 매우 중요하다. 왜냐하면, 이 수신신호는 송신방향성 조종의 불완전성에 기인하거나 맞대기 용접부, 플랜지 등과 같은 기하학적 불연속들 사이에서 다중반사에 기인한 역방향 기하에코들(reverse direction geometric echoes)을 종종 포함하기 때문이다[3]. 탐촉자 좌/우측 영역에 대한 신호들을 각각 수집한 후, 이 영역들에 포함된 기하학적 불연속들에 대한 정보와 함께, 수집된 신호 데이터에 포함된 에코신호들을 서로 비교/분석함으로써 개별 에코의 진행방향을 식별

[접수일: 2012. 10. 18, 수정일: 2013. 1. 21, 게재확정일: 2013. 1. 23] \*영남대학교, \*\*엔스코(주), †Corresponding Author: Department of Physics, Yeungnam University, 280 Daehak-Ro, Gyeongsan, Gyeongbuk 712-749, Korea (E-mail: cmseon@yu.ac.kr)

하여 왔다[4]. 잘못된 식별을 피하기 위해 이 식별과정에 상당한 시간과 세심한 주의가 요구된다는 것이 알려져 왔다.

본 연구에서는 먼저 수신에코 진행방향의 실시간 식별을 가능하게 하는 신호처리 개념을 제안한다. 그리고 이 개념의 유효성을 평가하기 위한 실험을 수행하고 그 결과들을 논의한다.

## 2. 수신신호 처리 개념

Fig. 1에 도식적으로 나타낸 것같이, 중심주파수에서  $1/4$  파장( $\lambda$ )에 해당되는 간격으로 배치된 2개의 동일한 변환기로 이루어진 기본적인 위상 배열 탐측자에 대해 이 개념을 기술한다. 탐측자 우측영역을 검사하고자 할 때, 정방향 에코는 음의(negative) 방향으로 진행한 에코이고 역방향 에코는 양의(positive) 방향으로 진행한 에코이다. 탐측자 좌측영역을 검사하고자 할 때, 에코의 진행방향에 대한 정의는 이 그림에 표시된 것과 반대이다.

Fig. 2는 수신에코 진행방향의 실시간 식별을 위한 신호처리회로의 개념도를 보여준다. 이 회로는 한 채널 신호를 선택하여 그 위상을  $90$ 도 지연시킨 후 다른 채널 신호에 더하는 과정과 이 신호더하기 과정의 출력신호와 함께 두 입력신호들을 디지털데이터로 변환하여 모니터에 표시하는 과정으로 이루어진다. 신호더하기 과정 전이

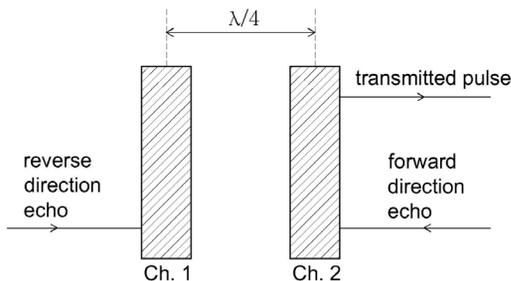


Fig. 1 Definition of the propagation directions of reception echoes

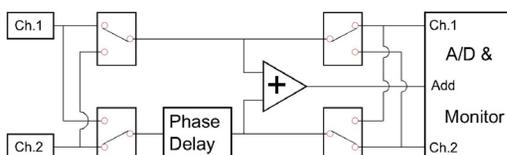


Fig. 2 Realtime received signal processing concept

나 후에서 두 스위치는 서로 반대 방향으로, 위쪽 혹은 아래쪽의 두 스위치들은 같은 방향으로 공시적으로(synchronously) 움직인다.

Fig. 2에서는 예로써, 채널-2 신호가 위상지연 회로로 들어가도록 입력채널 선택 스위치들이 설정되어 있다. 이 경우 정/역방향 에코들의 진행방향은 Fig. 1에 나타내었던 것과 같다. 그러므로 중심주파수에서, 정방향 에코에 대한 채널-2 변환기 신호의 위상은 채널-1 변환기 신호의 위상보다  $90$ 도 앞설 것이고 반대로 역방향 에코에 대한 채널-2 변환기 신호의 위상은 채널-1 변환기 신호의 위상보다  $90$ 도 뒤질 것이다. 위상지연 회로가 채널-2 변환기 신호의 위상을  $90$ 도 지연시키면, 신호더하기 과정에서 한 쌍의 입력에코 신호의 위상차는 거의  $0$ 도이거나  $180$ 도가 되어 그 출력에코 신호의 피크진폭은 수신에코의 진행방향에 따라 크게 달라질 것이다. 이는 신호더하기 과정의 출력신호와 함께 두 입력신호를 검사시스템 화면에 표시하면, 개별 수신에코의 진행방향을 실시간으로 식별할 수 있다는 것을 암시한다. 즉, 구성에코 신호들의 보강간섭은 정방향 에코를 가리킬 것이고 상쇄간섭은 역방향 에코를 의미할 것이다.

LRUT에서의 신호 수집은 탐측자가 정지한 상태에서 이루어지며 신호의 주파수와 반복율(repetition rate)이 일반적인 초음파검사의 경우에 비해 훨씬 낮다(보통 각각  $100$  kHz와  $10$  Hz 이하임). 이는 Fig. 2에 나타내었던 대부분의 신호처리 회로들이 소프트웨어의 사용에 의해 이루어질 수 있다는 것을 암시한다. Fig. 3은 Fig. 2의 과정과 동등한 신호처리 결과를 제공하지만 소프트웨어의 사용에 주로 의존하도록 수정된 수신신호 처리과정을 도식적으로 보여준다. 여기서 A/D 변환기 다음부터 시스템 모니터 전까지의 모든 과정들은 LabView2011 소프트웨어(미국 National Instrument)를 사용하여 구현되었으며 아래에서 기술되는 검증실험에서 사용되었다. 입력부분의 두 스위치에 의해 선택된 신호들을 푸리에(Fourier)변환함으로써 주파수 스펙트럼의 진폭 및 위상 성분들을 얻는다. 위상보상(phase compensation)을 수행한 후 각 신호들을 복소수 형태로 변환하고 두 신호들을 더한다. 이 더하기 과정의 출력을 역푸리에(inverse Fourier) 변환함으로써 시간영역에서의 복소수 신호를 얻는다.

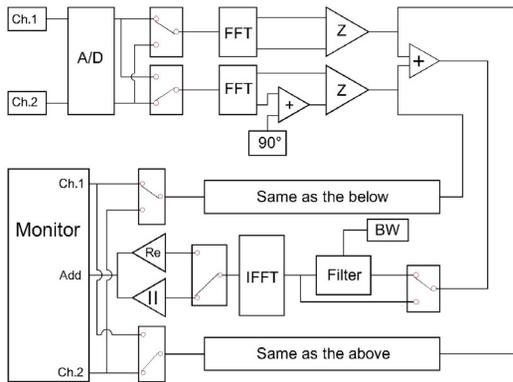


Fig. 3 Realtime received signal processing by using a software approach

이 과정에서 대역폭 (bandwidth: BW) 통과 필터를 사용하여 잡음들을 제거할 수도 있다. 이 복소수 신호의 실수 성분 혹은 절대크기 성분을 취함으로써 RF 신호나 비디오 신호를 얻고 시스템 모니터에 나타낸다. 신호처리 과정의 두 입력에 대해서도 출력의 경우와 같은 과정들을 수행한 후 그 결과들을 모니터에 표시한다. 하드웨어를 사용하는 경우에 비해, 소프트웨어를 사용한 이 과정들은 훨씬 더 유연하고 효율적인 신호처리를 허용하였으며 이는 주로 필터특성과 파형의 자유로운 선택에 기인되었다[5].

### 3. 실험 및 논의

기존 기술과의 비교를 통해, 본 연구에서 제안한 수신신호 처리과정의 유효성을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. Fig. 4는 이 실험에서 사용된 파이프라인 시편 (8-inch 외경, 8-mm 두께)을 도식적으로 보여준다. 이 시편은 1-m 길이의 한 파이프, 하나의 90도 엘보(elbow), 그리고 6-m 길이의 파이프 3개를 용접으로 연결하여 구성되었다. 이 시편의 양쪽 끝과 용접부들 (엘보 좌/우측 이음부들과 6-m 파이프들 사이의 이음부들)을 PE1, PE2, EW1, EW2, W1, W2로 명명하였다. 그리고 W2 용접부로부터 1.5-m 왼쪽에 탐촉자를 설치하여 펄스 (64-kHz, 2-cycle)/에코방식으로 T(0,1)모드를 송/수신하였다. 두 채널의 자왜변환기들로 이루어진 이 탐촉자에 대한 보다 자세한 정보들은 참고문헌들 [6-8]에서 기술되었다. 사용된 펄서/리시버는 GWR320(한국, 디지털초음파)이었다.

Fig. 5는 탐촉자 좌측부분과 우측부분에 대한 비디오 형태의 시스템 수신신호(채널 Add 신호)들을 한 그래프로 합성하여 보여준다. 여기서 MB는 메인뱅(main bang)에코를 가리킨다. 시편 양끝과 용접부들에 대한 정방향 에코들을 명확히 볼 수 있다. 나머지 다섯 에코들(X1, X2, X3, Y1, Y2)은 역방향 에코들이다. Xi 에코들은 송신 방향성 조종의 불완전성에 기인되어 PE2, W2, W1으로부터 반사된 것들이고 Yi 에코들은 탐촉자 근처의 두 용접부(W1과 W2) 사이에서 이중 반사에 기인된 것들이다. 실제 검사에서는 이들 시스템 신호의 즉각적인 비교가 어려울 뿐 아니라 결함 에코들이 유사한 크기의 역방향 기하에코들 사이에 나타날 수 있기에 그들의 구별이 쉽지 않을 수 있다.

Fig. 6은 채널1(dash dot line), 2(dot line), Add(solid line) 합성신호들을 함께 보여준다. 모든 정방향 에코에 대해 Add 신호의 피크진폭은 개별 채널 신호들의 그것보다 훨씬 크지만 모든 역방향 에코에 대해 Add 신호의 피크진폭은 한 채널 신호의 그것보다 작다는 것을 볼 수 있다. 그래서 탐촉자 좌/우측 영역들에 대한 데이터를 비교하지 않고도 개별 에코들의 진행방향에 대한 실시간 식별이 가능하다. 신호의 종류를 선의 형태보다는 색깔로 구분한다면, 이 식별은 보다 분명한 것이다.

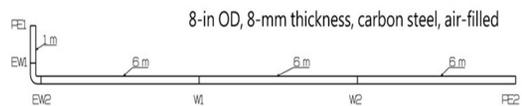


Fig. 4 Pipeline sample

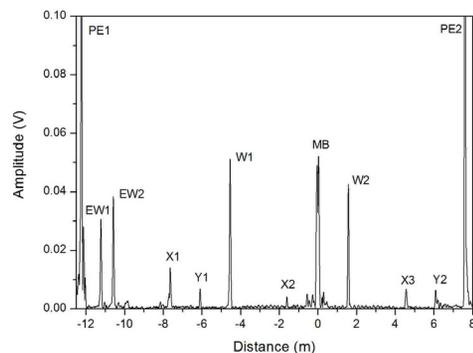


Fig. 5 Channel Add signals combined with the data for the both sides from the probe

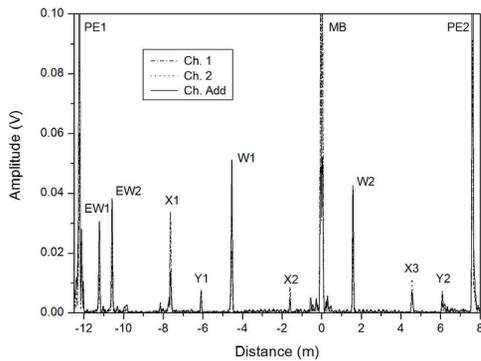


Fig. 6 Channel 1, 2, and Add signals combined with the data for the both sides from the probe

#### 4. 결론

위상배열 탐촉자의 변환기 간격에 기인한 위상차를 보상한 후, 구성 수신신호들을 더하는 과정에서 그 출력신호와 함께 입력신호들을 시스템 모니터에 나타냄으로써 개별 에코들의 진행방향을 실시간으로 식별할 수 있다. 구성 에코 신호들의 보강간섭은 의도된 방향으로 진행한 정방향 에코를 가리키고 반대로 상쇄간섭은 의도된 것과 반대방향으로 진행한 역방향 에코를 의미한다. 이 식별방법은 신호분석을 위한 별도의 소프트웨어를 사용하지 않고도 검사현장에서 수신에코 진행방향의 즉각적이고도 손쉬운 식별을 허용하며 이는 검사 결과 분석에 소요되는 시간과 비용을 크게 감소시킬 뿐 아니라 검사 결과의 정확성을 향상시킬 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 (주)디지털초음파와 앤스코(주)의 일부지원으로 수행되었으며 이에 감사를 표한다.

#### 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] 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)
- [3] Y-G. Kim, K-J Park, J-K Lee, H-S Moon and D-H Yoo, "Interpretation for a route reflection of torsional mode in guided wave," *Proc. KIIS Fall Conference*, Vol. 19, No. 2, pp. 316-318 (2009)
- [4] D. S. Gil, Y. S. Ahn and S. K. Park, "Application of guided ultrasonic wave technology for evaluation of welding part in cooling water pipe," *Kor. J. Power Sys. Eng.*, Vol. 14, No. 5, pp. 36-40 (2010)
- [5] W. N. Heo, H. T. Lim, T. G. Kim and M. S. Choi, "A software approach for the realtime received signal processing in magnetostrictive long-range ultrasonic testing," *Journal of the KSNT*, Vol. 32, No. 5, pp. 540-544 (2012)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 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)