



배관 진단을 위한 배열형 유도초음파 검사시스템 개발

†조현준* · 이동훈** · 강토*** · 박진호*** · 한성진*

*(주)품질안전기술원, **한국가스안전공사, ***한국원자력연구원,
(2015년 8월 19일 접수, 2015년 10월 5일 수정, 2015년 10월 6일 채택)

A Development of an Array Guided Wave Ultrasonic Testing System for pipe inspection

Hyun-Joon Cho* · †Dong-Hoon Lee** · To-Kang*** · Jin-Ho Park*** · Seong-Jin Han*

*Institute of Safety And Quality, 209 Kyungsu-Daero, Uiwang 16076, Korea

**The Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corp.

Wonjung-ro, Maengdong-myeon, Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do, 369-811, Korea

***Nuclear Technology Convergence Division, Korea Atomic Energy Research Institute 111,
Daeduk-Daero 989 Beon-Gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34057, Korea

(Received August 19, 2015; Revised October 5, 2015; Accepted October 6, 2015)

요약

국내 에너지, 석유화학 산업분야에서 주로 사용되는 배관은 다양한 요인에 의해 발생하는 결함들에 대한 검출과 평가가 상시적으로 이슈화되곤 한다. 에너지와 석유화학 배관은 특성상 비교적 긴 거리에 걸쳐 시공되는 경우가 많고 다양한 부위에 여러 형태의 결함이 존재하게 되는데, 본 연구를 통해 국내 배관에 주로 발생하는 보온재 아래의 부식을 보다 효율적으로 검출하기 위한 방법으로 유도초음파 검사기법을 활용하는 시스템과 신호개선방법을 개발했다. 배관 내 결함의 검출능을 높일 수 있는 수단으로 초음파 탐촉자를 배열화하여 유도초음파를 발생시키고 신호대잡음비를 개선할 목적으로 송신 집속기법이 가능하도록 했다. 본 논문에서는 배열 유도초음파 검사시스템의 개발과 송신 집속을 통한 신호대잡음비 개선에 관해 기술한다.

Abstract - Pipes, commonly used in energy and petrochemical facilities, have various types of defects induced by diverse factors and this is often issued in NDE society. Ultrasonic guided wave inspection method are normally adopted to insure the healthiness of industry pipes. Recently, ultrasonic guided wave inspection is shifted to adopt arrayed probes and system. And here we developed an array guided wave ultrasonic testing system can adapt arrayed probes and focusing methods. In this paper, an array guided wave ultrasonic testing system is presented including a transmitting focusing technique and flaw signal level enhancement.

Key words : guided wave, array, ultrasonic, pipe, inspection

1. 서론

국내 에너지, 석유화학 산업 현장의 장거리 배관에 발생하는 결함 중 CUI(corrosion under insulation) 결함의 발생빈도가 큰 편이다. CUI 결함은 배관의 원주방향 임의의 개소에 용접부와 모재를 불문

하고 발생하는데, 이러한 결함을 검출하기 위해 유도초음파검사기법이 활용되곤 한다. 그러나 재래식 유도초음파검사방법의 경우 기법의 특성상 배관을 전파하는 초음파의 모드가 다양하고 유도초음파 빔의 경로가 국부적으로 도달하는 한계가 있다. 이런 문제점 때문에 세계적으로 배열화된 초음파 탐촉자를 사용하여 유도초음파를 배관의 원주방향 전 영역(whole area)으로 전파시킴으로써 결함의 검출능을 향상시키는 연구가 활발히 진행되어왔다. 본 연구는

†Corresponding author:impegasus@icloud.com
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

이러한 연구의 일환으로 배열화된 초음파 탐촉자 채널들에 개별 가진지연(delayed pulsing)을 적용한 유도초음파를 전파하여 배관의 원주방향 전 영역에 대한 결함검출능(detectability)을 향상시킴과 동시에 신호대잡음비(signal to noise ratio)도 향상시킬 수 있는 시스템을 개발하고자 수행되었다. 기존의 실험실적 수준의 선행 연구수준을 넘어 현장 적용성을 고려한 배열형 유도초음파 검사시스템을 개발하고자 하드웨어, 소프트웨어, 집속기법(focusing technique)까지 고려한 개발을 수행하였다. 본 논문에서는 배열형 유도초음파 검사시스템의 개발과 집속성능에 대하여 기술한다.

II. 배열 유도초음파 검사시스템 하드웨어 개발

개발하려는 배열 유도초음파 검사시스템의 제작에 앞서 해외의 주요 배열 유도초음파 검사시스템에 대한 장단점을 분석하고 이를 기반으로 개발할 시스템의 기본 구성과 사양을 설계하였다. 설계된 사양에 맞추어 회로설계와 아트워크 설계, 디바이스 드라이버 설계, 소프트웨어 설계 등을 수행했다.

Table 1. Specifications of guided wave UT Systems

제품명	A 시스템	B 시스템	배열유도초음파
발전방식	압전 (air coupled)	자왜 (epoxy bonding)	압전 (couplant)
주파수	65 KHz 이하	4~250 KHz	10~1000KHz
주파수 변환	자동변환 (선택제어불가)	선택적 (8가지 case)	가변적 (대상에 따라 변동)
모니터링	불가	가능	불가
사용 모드	T or L (재설정)	T or L (재설정)	F/L/T 사용가능 (입사각제어/센서 교체)
채널별 발전	불가	불가	가능 (집속기술 가능)
채널별 수신	가능	불가	가능 (집속기술 가능)
검사거리	100 M 이상	50 M 이상	30M
결함 탐지능 목표치	단면감소 10~20%	단면감소 10~20%	단면감소 10% 이하
검사결과	신호	신호	이미지+신호

유도초음파 검사시스템의 대표적인 타입 2가지를 선정하고 비교하여 개발하려는 배열형 유도초음파 검사시스템의 목표 항목을 설정했다. Table 1에 비교 대상시스템 A, B와 개발하려는 시스템을 비교한 표를 보였다.

본 연구에서 개발한 배열형 유도초음파 검사시스템은 Fig. 1에 보인 것과 같이 8채널의 배열형 탐촉자, 배열형 유도초음파 검사용 시스템 하드웨어와 하드웨어의 제어와 신호수집/평가 등을 담당하는 시스템 소프트웨어로 구성되도록 했다. 시스템 하드웨어는 배열형 탐촉자의 각 채널에 별도의 지연시간을 적용하여 유도초음파 신호를 송수신하고 처리할 수 있도록 지연 트리거와, 펄서/리시버, ADC(analog to digital converter), 신호전처리 로직(preprocessing logic), 신호전송로직 등을 설계했다. 시스템 소프트웨어는 시스템 하드웨어에 대한 제어와 신호수집, 디스플레이, 신호후처리, 신호평가, 리포팅(reporting) 등이 가능하도록 설계했다.

배열형 유도초음파 검사시스템의 하드웨어를 구

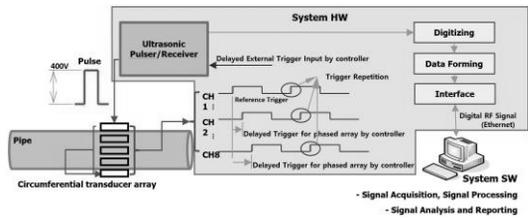


Fig. 1. A schematic diagram of array guided wave UT system.

Table 2. Design specifications of ultrasonic P/R

Pulser spec.	Receiver spec.
Pulse type: square/ tone burst wave	Bandwidth: 50kHz~5MHz
	Phase: inverting
Pulse voltage: 400V	Gain selection: ~70dB(10/1/0.1dB step)
Pulse width: 25nS ~ 10uS(step:25nS)	High pass filter: none/50KHz/100KHz/300KHz/1MHz
Mode: pulse-echo, through-transmission	Low pass filter: none/1/2/3/5MHz
Pulse repetition rate(Ext.): 0~10KHz	Max signal output : 1.5V peak terminated in 50 ohms
Trigger delay interval: 25 ~ 100,000 ns	Input impedance: 500 Ω
	Output impedance: 50 Ω

Table 3. Design specifications of digitizer/controller

Contents	Specification
ADC	Max sampling rate : 10MSPS/Ch
	Resolution : 12 bit
	Output type : LVDS/CMOS
	Input bandwidth(-3dB) : 400MHz
FPGA	Main FPGA : Spartan(Xilinx)
	Main Clock : ³ 200MHz
Memory	Program memory : Flash/SRAM
	Data buffer memory : DDR2-SDRAM
	Data buffer memory Size : ³ 32MB/Ch
Communication	Control interface : compact PCI
	Ethernet link: 1000Base-T

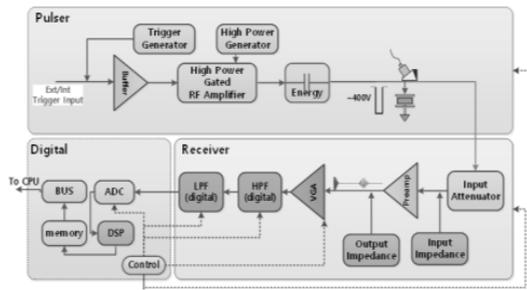


Fig. 2. A block diagram of pulser/receiver module.

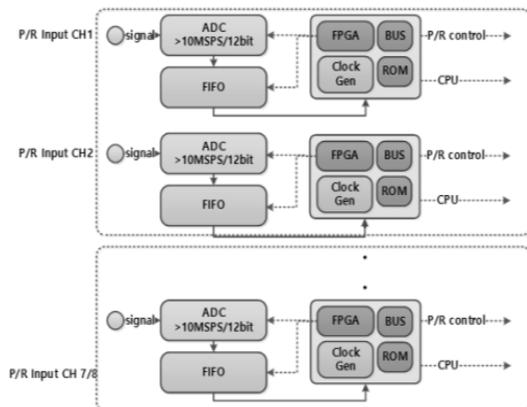


Fig. 3. A block diagram of ADC/control module.

성하는 핵심모듈은 초음파 펄서/리시버/ADC 모듈과 제어모듈인데, 초음파 펄서/리시버/ADC 모듈이 시스템의 하드웨어적 성능을 결정짓는 가장 중요한 역할을 모듈이라고 할 수 있다.

앞서 Table 1에 정한 사양을 따르며 검사수행과 전반적 신호성능에 문제가 없도록 초음파 펄서/리시버와 ADC, 제어 회로 등에 대한 사양을 설계했는데, 설계 사양은 Table 2와 Table 3에 정리했다.

배열형 유도초음파 검사시스템의 펄서/리시버 모듈은 Fig. 2에 보인 것과 같이 초음파 신호를 가진 (pulsing)하기 위해 가진주파수에 부합하는 펄스폭 (pulse width)을 가지는 고전압 펄스를 인가하는 펄서모듈과 수신된 초음파 신호를 증폭(amplifying), 필터링(filtering) 등의 과정을 거쳐 ADC로 인가하는 리시버 모듈로 구성했다.

펄서/리시버 모듈을 거친 초음파 신호는 ADC 모듈을 거쳐 통신 인터페이스를 통해 시스템 제어 컴퓨터(CPU 모듈)로 전송되는데, Fig. 3에 보인 것과 같이 ADC와 전처리, 전송 인터페이스의 제어를 위해 ADC 모듈에 별도의 FPGA를 실장하고 제어로직을 구현하도록 설계했다. 시스템 제어 컴퓨터와의 인터페이스는 compact PCI 인터페이스를 사용하도록 설계했다.

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6에 보인 것과 같이 배열형 유도초음파 검사시스템의 구성과 사양설계, 블록설계에 따라 초음파 펄서/리시버 모듈과 ADC 모듈에 대한 회로설계와 아트워크 설계를 수행했다. 초음파 펄서/리시버 모듈과 ADC 모듈은 하나의 PCB(printed circuit board)에 통합된 형태의 보드(이후 "Array GWUT 보드")로 아트워크했고, 제어용 FPGA와 PCI 칩도 함께 실장되도록 설계했다.

초음파 검사시스템의 일반적 노이즈 문제를 최소화하기 위해, 아트워크 설계 시 아날로그 패턴과 디지털 패턴의 그라운드를 분리하고 신호 입력과 아날로그 입력 간, 아날로그 출력과 디지털 입력 간 임피던스 매칭에 주의를 기울였다. 한 개의 보드에 두 개 채널을 구성하고 필요한 만큼 백플레인(back plane)에 연결해 구동 가능하도록 했다.

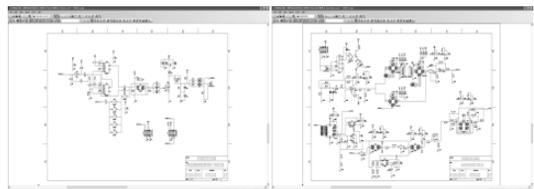


Fig. 4. Schematics of pulser/receiver module for array guided wave UT system.

아트워크 설계에 따라 제작된 PCB 기판에 부품을 실장하여 array GWUT 보드를 제작했다. Fig. 7에 제작된 array GWUT 보드의 사진을 보였다. 그림에서와 같이 펄서와 리시버, ADC 칩이 각 채널별로

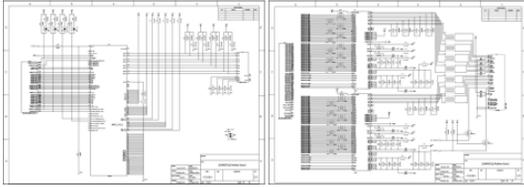


Fig. 5. Schematics of digitizer/controller module for array guided wave UT system.

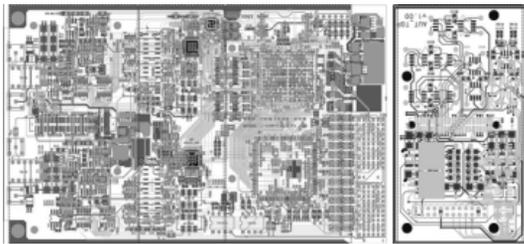


Fig. 6. An artwork of pulser/receiver/ADC/controller module for array guided wave UT system.

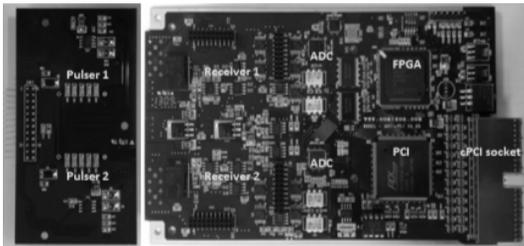


Fig. 7. A developed array guided wave ultrasonic testing board.

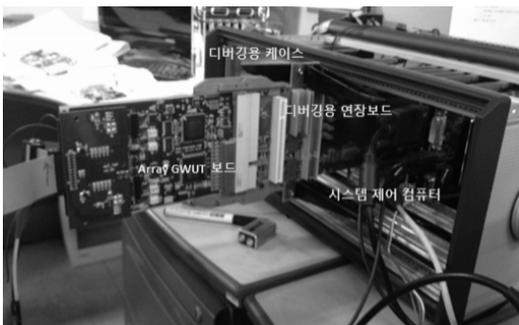


Fig. 8. An integrated array guided wave ultrasonic testing system hardware.

로 1개씩 상하로 배치되었으며, 제어를 위한 FPGA 칩과 전송 인터페이스를 위한 PCI 칩이 보드 우측에 위치한다. 인터페이스용 소켓은 compact PCI를 사용했다. Fig. 8에 디버깅과 소프트웨어 개발을 위해, 개발된 Array GWUT 보드를 시스템 제어 컴퓨터, 파워공급장치, 백플레인과 통합하여 시스템화한 사진을 보였다.

III. 배열 유도초음파 검사시스템 소프트웨어 개발

Array GWUT 보드는 시스템 소프트웨어가 설치된 검사 PC(client PC)를 통해 통제되고 신호수집 및 전송 동작을 수행한다. Array GWUT 보드의 FPGA에서 시스템 소프트웨어가 설치된 검사 PC(client PC)에 이르는 데이터 수집과정은 먼저, 초음파검사 모듈을 제어하는 검사 PC에서 배열형 유도초음파 검사 시스템 내의 서버 PC(시스템제어 컴퓨터)에게 현재 FIFO에 수집된 DMA(direct memory access) 데이터의 전송 명령을 패킷(packet)에 실어 보낸다. 이때 시스템 소프트웨어는 TCP/IP 통신을 통해서 클라이언트로부터 패킷수신을 대기 중인 수신 스레드(receiving thread)가 패킷을 수신토록 한다. 수신한 패킷은 정해진 형식에 맞추어 파싱(parsing)한 후 해당 명령을 수행할 함수를 호출하고 호출된 함수는 현재 DMA된 데이터를 얻는 함수를 호출한다. 마지막으로 라이브러리로부터 받은 데이터를 형식에 맞게 패킷화하고 클라이언트에 전송한다.

라이브러리에서 DMA를 읽는 함수는 보드 아이디, 채널 아이디, 데이터 버퍼 등을 매개변수로 작동하는데 드라이버에 전달할 파라미터(채널번호), 명령코드, 수신 버퍼 시작주소 등을 담은 IRP(I/O request packet)를 만들어 드라이버에 전달한다. Fig. 9는 디바이스와 디바이스 드라이버, 시스템제어 컴퓨터, 시스템 소프트웨어 간 동작 과정을 그린 블록도이다.

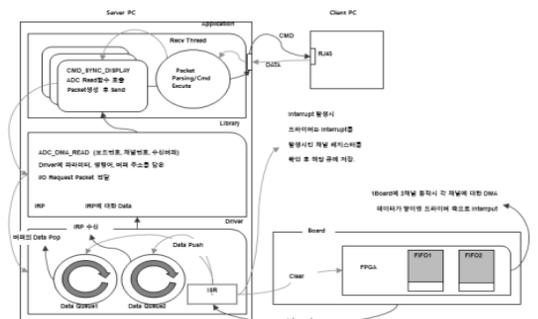


Fig. 9. A block diagram of array GWUT board device driver.

Fig. 10에 배열형 유도초음파 검사시스템의 시스템 소프트웨어 구성도를 보였다. 시스템 소프트웨어는 검사시스템을 직접 조작하고 신호를 수집하여 평가하기 위한 수단으로써 데이터 수집을 위한 통신, 데이터 전송, 데이터 관리, 다중 프레임 신호 디스플레이

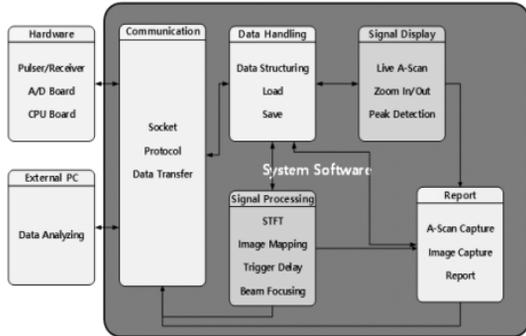


Fig. 10. A block diagram of array guided wave ultrasonic testing system software.



Fig. 11. A screen capture of array GWUT board device driver registration to a Windows OS.

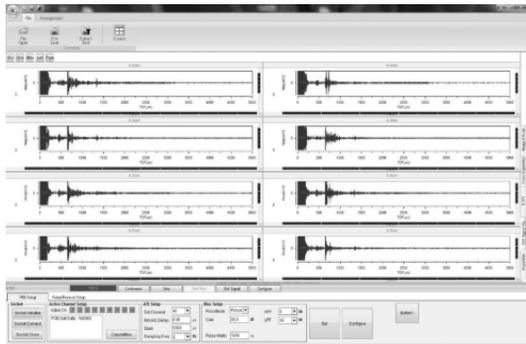


Fig. 12. A screen capture of array GWUT system software(multi channel signal acquisition).

레이, 신호/이미지 후처리, 리포트 모듈 등으로 구성된다. 이 소프트웨어를 이용해 외부의 컴퓨터에서도 검사 데이터의 평가가 가능하도록 설계했다.

디바이스 드라이버와 시스템 소프트웨어의 블록 설계 개념을 바탕으로 디바이스 드라이버와 시스템 소프트웨어 중 시스템 하드웨어 제어 및 신호수집 모듈을 개발했다.

개발된 디바이스 드라이버는 array GWUT 보드가 설치된 운영체제(Windows 7)를 기반으로 작동하도록 했다. 하드웨어 아이디를 통해 보드를 인식하기 위해 inf 파일 작성을 작성했다. WINDDK(microsoft windows driver development kits)와 visual studio 2008 을 사용해 제작했다. 개발된 device driver 기본 사양은 32/64bit 지원, verisign code 서명, 전송률 5MB 이상이다. 개발된 소프트웨어를 이용한 디바이스 등록화면과 기본 신호수집 화면을 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 보였다.

IV. 배열 유도초음파 검사시스템 신호집속

Array GWUT 시스템은 하드웨어와 소프트웨어에서 채널별 신호의 펄싱 지연시간을 조절함으로써 송신집속 알고리즘을 적용할 수 있도록 개발하였는데, 이를 통해 배열 유도초음파 신호의 전파 시에 배관 내 측정위치에 대한 신호의 집속이 가능하다. Fig. 13에 보인 것과 같이 원주방향으로 배열된 각 초음파 탐촉자에 의해 생성되어 배관 내를 전파하는 유도초음파를 배관 내의 특정 위치에 집속시키고자 할 경우, 식(1)에 정의한 것과 같이 각 유도초음파 빔의 전파경로를 따르며 집속하고자 하는 위치에서 동일한 위상이 중첩되는 최소 시간차를 산출함으로써 각 채널의 탐촉자를 구동하는 시간지연을 계산할 수 있다. 여기서 Δd_{12} 는 비교 채널간 유도초음파 빔의 전파경로 거리 차이, Δt_{12} 는 비교 채널간 유도초음파의 시간지연, C 는 음속이다.

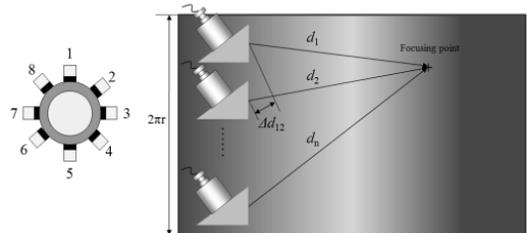


Fig. 13. A conceptual drawing of guided wave UT signal focusing algorithm based on beam propagation distance.

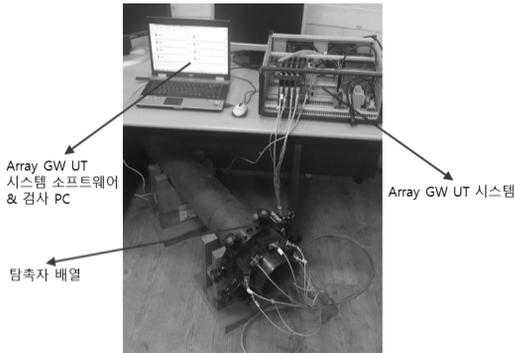


Fig. 14. An experimental setup to detect artificial flaws in pipe with array GWUT system.

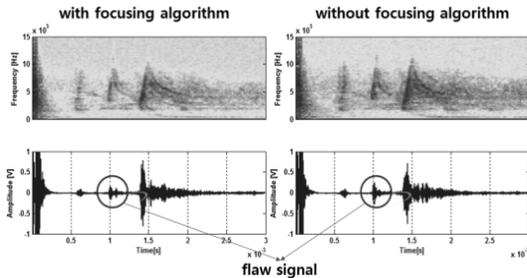


Fig. 15. An experimental result acquired from a pipe engraved artificial flaws with array GWUT system and software.

$$e^{-i\omega \frac{\Delta d_{12}}{C}} = e^{-i\omega \Delta t_{12}} \quad (1)$$

원주방향 결함이 가공된 시험편에 Fig. 14와 같이 배열 탐촉자를 장착하고 array GWUT 시스템과 시스템 소프트웨어를 이용해 탐촉자에 가해지는 펄스의 시간지연을 조정하였다. 그리고 가공 결함이 존재하는 위치에서 송신집속을 적용한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 각각 유도초음파 신호를 수집했다.

Fig. 15에 송신집속 알고리즘을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 유도초음파 결합신호를 비교하였다. 채널별 시간지연을 적용하여 송신집속을 수행한 경우의 유도초음파 결합신호가 그렇지 않은 경우의 신호보다 더 높은 신호대잡음비를 가지는 것을 확인할 수 있다.

Table 4에 각 신호의 에너지와 피크 전압차이를 비교하였는데, 송신집속 알고리즘을 사용하는 경우 에너지는 30% 이상 피크전압은 20% 이상의 개선효과가 있는 것을 확인할 수 있다.

Table 4. A comparison of signal levels between non-focused signal and focused signal

구 분	집속 알고리즘 미적용(A)	집속 알고리즘 적용(B)	(B/A)×100%
Energy [J]	2.454	3.278	133.6
Peak to Peak [V]	0.174	0.217	124.7

V. 결 론

에너지, 석유화학 배관 내에 존재하는 CUI 결함을 검출하기 위하여 배열형 유도초음파 검사시스템을 설계하고 시스템 하드웨어 회로와 시스템 소프트웨어를 개발했다.

개발된 배열형 유도초음파 검사시스템은 배관의 모든 부위에 대한 결함을 검출할 수 있도록 다수의 유도초음파 탐촉자를 원주방향으로 배열하고 유도초음파검사를 수행할 수 있게 했다.

배열형 유도초음파 검사시스템을 이용하여 배관에서 수행한 원주방향 인공노치 검출실험에서 결함을 검출할 수 있음을 확인하였다.

배열형 유도초음파 검사시스템은 신호대잡음비의 향상을 위해 시스템 하드웨어와 소프트웨어를 이용해 송신집속이 가능하도록 개발되었는데, 송신집속을 사용한 경우에서 결합신호의 에너지 향상은 30% 이상, 피크전압 향상은 20% 이상임을 확인하였다.

추가 연구를 통해 배열형 유도초음파 검사시스템의 회로성능을 개선하고 수신집속 알고리즘을 통합함으로써 신호대잡음비와 결함검출능을 향상시킬 계획이며 STFT(short fourier transform), 2D/3D 검사이미지 매핑, radial profile 매핑 등의 신호/이미지 후처리 기능을 개발할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 한국에너지기술평가원 에너지기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

사용기호

C : wave velocity [m/s]

J : energy [joule]

V : electric voltage [volt]

그리스 문자

ω : angular velocity(rad/sec)
 Ω : electric resistance [ohm]

REFERENCES

- [1] J.Y.Kim, D.H.Lee, J. Ahn, S.M.Kang, H.J.Cho, 1st Annual Research Report, Development of Monitoring System for Safety of Petrochemical Plant and Guided Wave Devices, Korea, (2014)
- [2] S. -C. Wooh and Y. Shi, "Synthetic phase tuning of guided wave," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., 48, 200-223 (2001).
- [3] D. Alleyne, P. Cawley, "Long range propagation of lamb wave in chemical plant pipe-work", Materials Evaluation, 45(4), 504-508, (1997)
- [4] J. Li and J. L. Rose, "Implementing guided wave mode control by use of phased array transducer," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., 48, 761-768 (2001).