

Full Matrix Capture 기법을 통한 초음파신호 영상화 향상 연구

Study on Enhancements to Ultrasonic Data Imaging Using Full Matrix Capture Technique

이태훈*[†], 윤병식*, 이정석*

Tae-Hun Lee*[†], Byung-Sik Yoon* and Jeong-Seok Lee*

초 록 일반 위상배열 시스템에서는 다수의 압전소자를 가지는 탐촉자의 개별 소자에 인가하는 시간지연을 조절함으로써 초음파빔을 전자적으로 제어하고 초음파 영상을 획득한다. 반면, full matrix capture(FMC) 기술은 위상배열 탐촉자에 대해 하나의 소자에서 초음파를 입사시킨 신호를 모든 압전소자에서 수신하고, 이 방법으로 모든 가능한 송수신 조합의 신호 데이터를 수집하는 방법이다. 이 FMC 데이터는 후처리를 통해 초음파 영상으로 재구성될 수 있으며, 기존 위상배열 초음파 영상과 동등한 영상뿐만 아니라 가상적으로 관심영역의 모든 지점에 집속하여 분해능과 선명도가 향상된 total focusing method(TFM) 영상으로도 합성이 가능하다. 본 논문에서는 일반 위상배열장치를 이용하여 FMC가 가능하도록 시스템을 구현하고, 취득된 FMC 신호로부터 sector B-scan 및 TFM 이미지를 영상화하는 알고리즘에 대한 연구를 수행하였다.

주요용어: 위상배열 초음파검사, 초음파 영상, Full Matrix Capture, Total Focusing Method, 후처리

Abstract A conventional phased array system can control an ultrasonic beam electronically by adjusting the excitation time delay of individual elements in a multi-element probe and produce an ultrasonic image. In Contrast, full matrix capture (FMC) is a data acquisition process that allows receiving ultrasonic signals from one single shot of the phased array transducer element through all the other elements and captures the complete dataset from every possible transmit-receive combination. This FMC data can be used to create the ultrasonic image in post processing. It is possible to produce not only images equivalent to conventional phased array image but also total focusing method (TFM) images with improved resolution and sharpness, which is virtually focused at any point in a region of interest. In this paper, the system that can perform FMC by using a conventional phased array instrument is developed, and a study was conducted on the imaging algorithms to reconstruct sector B-scan and TFM images from FMC dataset.

Keywords: Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT), Ultrasonic Image, Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), Post Processing

1. 서 론

검사는 결함의 방향성에 따라 검출과 크기 측정에 어려움이 있기 때문에, 검출 확률을 향상시키기 위해서 부가적인 각도로 검사를 추가적으로 수행하게 되며[1], 이로 인해 많은 시간과 노력을 소모하게 된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 제시되는 기술이 위상배열 초음파검사(phased array

ultrasonic testing) 기술이다. 이 기술은 다수의 압전소자를 배열하고, 각 소자에 인가하는 펄스의 시간지연(time delay)을 조절함으로써 각각의 압전소자에 발생된 파면의 상호 보강 간섭을 통하여 초음파빔 에너지의 전파 방향과 집속 위치를 전자적으로 제어할 수 있는 기술이다[1,2]. 상기 기술은 넓은 검사영역에 탐촉자를 재배치하지 않고 빔 조향을 통해 한 번에 다양한 굴절각도로

[Received: July 31, 2015, Revised: September 14, 2015 / September 23, 2015, Accepted: October 1, 2015] *한국수력원자력(주) 중앙연구원, [†]Corresponding Author: KHNP Central Research Institute, Daejeon 305-343, Korea (E-mail: taehun.lee@khnp.co.kr)

검사가 가능하기 때문에 검사시간을 단축할 수 있으며, 형상이나 용접부에 의해 검사영역이 제한된 대상에 대하여도 탐촉자의 이동을 최소화하여 적용이 가능하다. 또한 감도 및 신호 대 잡음비가 향상되고, 형상이 복잡한 검사 대상에 대해서 검사 결과를 2, 3차원 영상 형태의 직관적인 정보를 출력하기 때문에 신호 분석 및 결함 판정에 유리함을 가지며 이를 통해 검사의 신뢰도 및 신속성을 향상시킬 수 있다[3-5].

일반적인 위상배열 초음파검사 기술에서는 초음파를 원하는 방향과 위치에 집속시키기 위해서 검사를 수행하기 전에 각각의 압전소자에서의 시간지연을 결정하는 focal law를 계산하여야 하며, 이를 계산하기 위한 주요 인자로는 검사구성(검사위치, 검사 초음파 모드, 조향각도, 집속거리 등), 탐촉자 형태(압전소자의 모양, 개수, pitch 등), 검사대상 특성(매질의 초음파 속도, 검사면의 곡률 등) 등이 있고, 웨지(wedge)를 사용하는 경우에는 웨지의 특성(경사각, roof각, 웨지의 초음파 속도 등)을 필요로 한다. 하지만, 검사 수행 후 이러한 인자들이 적절하지 않는 것이 확인되는 경우 재검사를 수행해야 한다는 문제점이 있다.

이 연구에서 사용하는 full matrix capture(FMC) 기법은 위상배열 초음파의 신개념의 신호수집 기술로써, 위상배열 탐촉자에서 사용하고자 하는 개별 압전소자의 모든 송수신 조합의 시간도메인 신호(A-scan) 데이터를 수집하는 기법이며[6,7], 일부 연구에서는 SPA(sampling phased array)라는 용어를 사용하고 있다[8,9].

이와 같이 수집된 데이터는 후처리(post-processing)를 통해 가상적으로 조향 및 집속된 초음파신호를 구현할 수 있으며, 기존의 위상배열 초음파 시스템을 이용했을 때와 동등한 신호를 얻을 수 있다[9-11]. 이러한 점에 기반하여 plane B-scan, focused B-scan, sector B-scan 등과 같이 기존 위상배열 초음파에서 구현 가능한 결과영상들을 후처리를 통해 동일하게 구현할 수 있다[6].

특히 가상적으로 관심영역 모든 지점에 초음파를 집속시킨 영상인 total focusing method(TFM) 영상을 통해 선명도, 분해능, 신호 대 잡음비 등이 개선된 영상으로 합성이 가능하다[6-7,9-11]. 이와 함께 멀티모드 초음파 영상화를 통해 저면의 수직균열을 영상화하고[12,13], 균열의 방위 벡터를 구하는[14] 등 다양한 결함 특성 정보를

획득하는 응용연구가 이루어지고 있다. 또한 이 기술은 후처리 기술을 기반으로 하기 때문에, 조향각도 및 집속거리등 검사 방법이 변경되더라도 별도의 focal law를 생성하거나 추가 검사 없이도 변경된 초음파 영상을 구성할 수 있다. 이와 같이 다양한 초음파 결과영상을 제공하는 것은 평가자로 하여금 결함 크기 측정 및 판정에 있어 많은 도움을 줄 수 있다.

이번 연구에서는 기존 상용 위상배열장치에 대하여 focal law 수정을 통해 FMC가 가능하도록 구현하고, 기본적인 영상화 알고리즘 연구와 함께, 수집된 데이터를 이용하여 기존 위상배열 초음파와 동등한 결과영상과 TFM 이미지를 영상화하고 기존 결과와 비교하여 그 성능에 대해 확인하고자 하였다.

2. Full Matrix Capture 이론

일반 위상배열 시스템은 초음파 빔을 특정한 방향으로 조향 및 집속하기 위해 검사 이전에 개별 압전소자에 시간지연을 계산한다. 한 검사각도에 대해 배열 압전소자는 개별로 지정된 시간지연을 갖는 고전압 펄스로 순차적으로 가진되고, 수신된 초음파신호는 각 개별 압전소자에 대해 지정된 시간지연이 적용되어 단일 초음파신호를 형성하도록 합산한 후 데이터 수집 장치로 보내어진다. 이 과정을 관심영역에 대한 모든 검사각도에 대해 수행한다.

반면에 FMC 기술은 시간지연에 따른 초음파 가진과 신호 합산 과정을 필요로 하지 않는다. Fig. 1에서 보는 것과 같이 i 번째 압전소자 하나만 단독으로 초음파를 입사시킨 뒤 모든 압전소자(N 개)에서 개별로 반사신호를 시간도메인 신호인 $y_{ij}(t)$ ($j=1, 2, \dots, N$)로 저장한다. 이를 순차적으

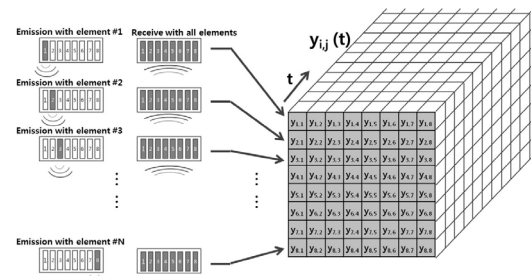


Fig. 1 Data acquisition concept of FMC

로 모든 압전소자에 대해 N 번 시행하여 총 N^2 개의 데이터 세트를 수집하는 기법이 FMC 기법이다. 이와 같이 저장된 FMC 신호는 후처리 기술을 통해 다양한 초음파 영상을 구현할 수 있다.

3. 초음파 영상 합성 알고리즘

앞서 기술한 바와 같이 FMC 데이터의 후처리를 통해 일반 위상배열 초음파에서 구현 가능한 신호 및 결과영상들을 동일하게 구현할 수 있다. 이 때 합성되는 신호 및 영상은 실제 물리적인 초음파를 조향 및 집속한 신호가 아닌 가상적으로 이를 구현한 결과이다.

위상배열 초음파 시스템에서 가장 널리 사용되는 sector B-scan 영상은 Fig. 2와 같이 극좌표(polar coordinate)로 나타낼 수 있으며, FMC 데이터를 이용하여 해당 영상을 구현하는 알고리즘은 식(1)과 같다[6,11].

$$I(r, \theta) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_{i,j} \left(\frac{2r}{c} - t_i(\theta) - t_j(\theta) \right) \quad (1)$$

이 때, c 는 검사 대상 재질의 초음파 속도이고, $t_n(\theta)$ 는 검사 각도(θ)에 대해 n 번째 소자의 지정되는 시간지연값으로 일반 위상배열 초음파 시스템에서 계산되는 시간지연값과 동일하다. 평면 위상배열 탐촉자에 대해 $t_n(\theta)$ 는 다음과 같이 계산되어진다[3].

$$t_n(\theta) = \frac{F}{c} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{nd}{F} \right)^2 - 2 \frac{nd}{F} \sin \theta \right]^{1/2} \right\} + t_0 \quad (2)$$

여기서 F 는 집속거리, d 는 압전소자간 거리, t_0 는 음의 시간지연을 피할 수 있을 만큼의 최소한의 시간이다.

모든 지점에 가상적으로 초음파를 집속시킨 결과영상인 TFM 영상은 모든 송수신 A-scan 신호에 대하여 해당하는 좌표까지의 전파시간(time of flight)에 해당하는 신호의 크기를 누적하여 영상을 구성한다. Fig. 3과 같이 직교좌표계에 대하여 임의의 위치에서의 식(2)와 같이 각 송수신 압전소자까지의 전파거리를 계산하고 식(3)과 같이 전파시간을 결정한다. 영상 값은 각 송수신 데이터에서 전파시간에 해당하는 신호의 크기를 식(5)와 같이 누적함으로써 TFM 영상을 구성한다[6].

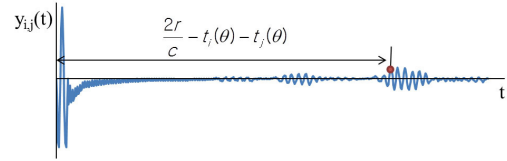
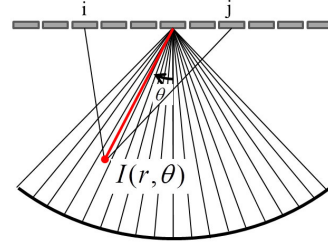


Fig. 2 Sector B-scan image reconstruction using FMC

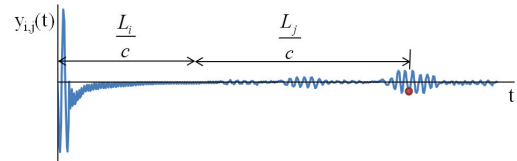
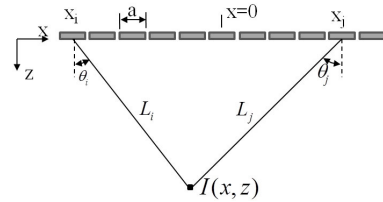


Fig. 3 TFM image reconstruction using FMC

$$d_{i,j}(x, z) = L_i + L_j = \sqrt{(x-x_i)^2 + z^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + z^2} \quad (3)$$

$$t_{i,j}(x, z) = \frac{d_{i,j}(x, z)}{c} \quad (4)$$

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_{i,j}(t_{i,j}(x, z)) \quad (5)$$

4. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 FMC 시스템을 구현하기 위해 일반 상용 위상배열 초음파장치인 ZETEC사의 Tomoscan III를 이용하였고, 신호수집에 사용된 소프트웨어는 TomoView2.2R9(ZETEC) 버전을 사



Fig. 4 Tomoscan III



Fig. 5 Phased array transducer

용하였다. 시험에서 사용한 위상배열 탐촉자는 선형배열 탐촉자로서 Fig. 5와 같으며 기본 사양은 Table 1과 같다. 이번 연구에서는 배열탐촉자의 총 32개 압전소자 중 1번부터 16번까지 16개의 압전소자만 부분적으로 사용하였다.

일부 FMC와 TFM이 가능한 상용 제품이 출시되고 있기는 하지만[8], 일반적으로 기존 위상배열 초음파 시스템은 이러한 기능을 제공하거나 최적화되어 있지 않다. 최적화된 FMC 시스템은 Fig. 1과 같이 1개의 소자에서 초음파를 가진시킨 후 전체 압전소자에서 동시에 신호를 저장할 수 있어야 하지만, 현재 상용 시스템에서는 이를 구현하기가 어렵다. 이번 연구에서는 일반 위상배열 음파 시스템에서 FMC 기능을 구현하기 위해서 focal law를 FMC가 가능하도록 변경하는 방법을 선택하였다. TomoView 소프트웨어는 자체 focal law 계산 기능을 가지고도 있지만, 텍스트파일 형태의 focal law 파일을 불러들여 인식할 수 있다. 해당 파일을 편집하여 압전소자를 활성화

Table 1 Specification of phased array ultrasonic transducer

Parameter	Design Value
Frequency	5 MHz
No. of elements	32
Axis pitch	1 mm
Element spacing	0.1 mm
Width of element	10 mm
Used elements	1-16

Table 2 Transmit/receive sequence for FMC

sequence	No. of transmit element	No. of receive element
#1	1	1
#2	1	2
#3	1	3
⋮	⋮	⋮
#15	1	15
#16	1	16
#17	2	1
#18	2	2
#19	2	3
⋮	⋮	⋮
#32	2	16
#33	3	1
⋮	⋮	⋮
#256(n^2)	16	16

화/비활성화시키는 방법을 통해 Table 2와 같은 순서로 신호를 수집하도록 하였다. 비록 한 세트의 FMC 데이터를 수집하기 위해 n^2 번의 가진과 수신을 수행하기 때문에 가장 최적화 되어 있는 방법은 아니지만 16개 압전소자 배열탐촉자에 대하여 최대 6 Hz의 속도로 FMC신호 수집이 가능하였다. 신호는 정류(rectified)되지 않은 RF형태의 신호로 취득하였다. 신호 수집 이후 신호를 파일로 추출하고 MATLAB을 이용하여 초음파 영상을 재구성하였다.

성능 검증을 위해 사용한 결함시험편은 Fig. 6, 7과 같다. 재질은 SUS304이며 블록에 직경 1 mm 측면공(side drilled hole)이 가공되어 있다. 탐촉자 중심은 시편 중앙에 모여 있는 5개의 측면공을 중심으로 검사할 수 있도록 위치시켰다.

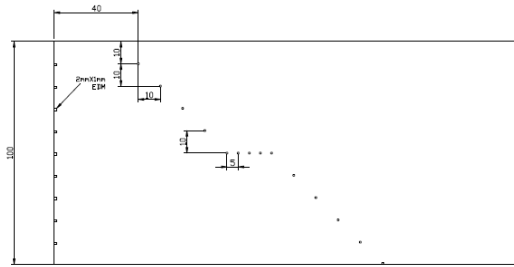


Fig. 6 Design drawing of specimen



Fig. 7 Photo of specimen

5. 실험 결과 및 고찰

5.1. FMC 신호 수집 및 후처리

FMC결과와 기존 위상배열 초음파 결과와 동등성을 검증하기 위해 기존 방법으로 조향각도를 $-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$, 각도분해능 0.5° , 집속거리(FL)를 25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm로 달리하여 초음파빔을 제어한 sector B-scan 검사를 추가적으로 수행하였다. 이를 위한 focal law는 ZETEC의 advanced PA calculator를 이용하여 계산하였다. 결과영상은 정류된 파형에 digital smoothing 처리를 하였으며 결과는 Fig. 9과 같다.

FMC가 가능하도록 수정한 focal law파일을 Tomoscan III에 인식시켜 16개 압전소자에 대한 FMC 신호수집 데이터는 Fig. 8와 같다. 수직방향은 전과거리 또는 시간에 해당하고 수평방향으로 Table 2와 같은 송수신 순서로 취득된 신호가 순서대로 보여지고 있다.

FMC 데이터를 파일로 추출하고, 먼저 식(1)을 이용하여 sector B-scan 영상을 구성하였다. 계산에 사용한 시간지연값은 기존 초음파시험에서 초음파빔 제어를 위해 PA calculator에서 계산된 시간지연값과 동일하게 사용하였다. 이 때 영상은 기존 기법과 동일한 영상 형태를 얻기 위하여 hilbert 변환을 통해 정류 및 smoothing 처리를 하였다. FMC sector B-scan 결과는 Fig. 10과 같고

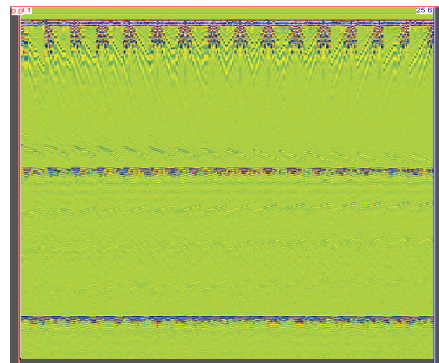


Fig. 8 Data acquired by full matrix capture

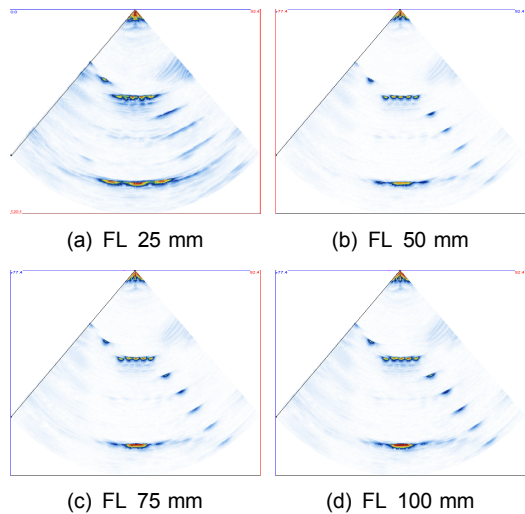


Fig. 9 Focused sector B-scan image of conventional phased array

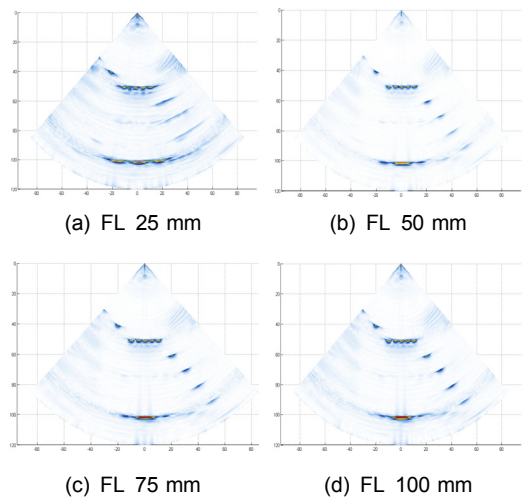


Fig. 10 Focused sector B-scan image reconstructed from FMC dataset

기존 위상배열 초음파 결과와 비교하였을 때 두 결과가 동등함을 확인할 수 있었다. 특히 Fig. 11와 같이 12° 조향각도의 A-scan에서 결합신호를 비교하였을 때 합성된 신호와 기존 초음파 결과

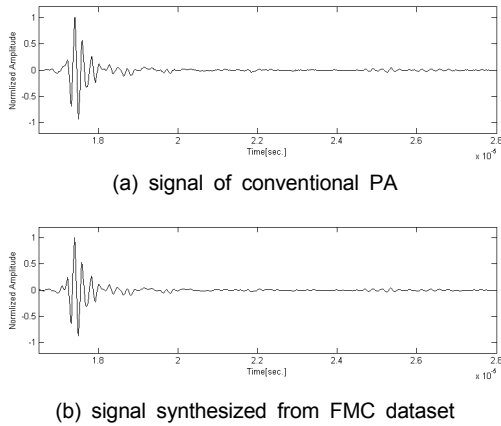


Fig. 11 Equivalence of conventional PA and FMC at 12° of steering

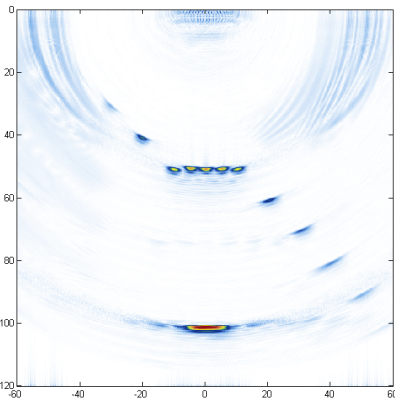


Fig. 12 TFM image from FMC dataset

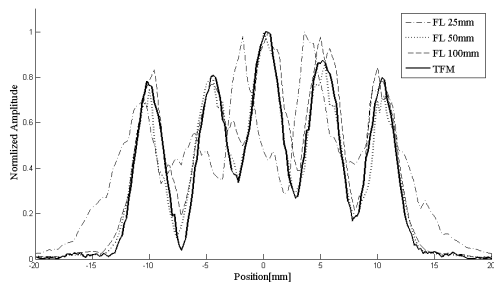


Fig. 13 Amplitude analysis of 5 side drilled holes positioned in a line at 50 mm from the top

신호가 동일한 것을 볼 수 있다. 이 결합신호는 중앙에 일렬로 배치된 5개의 측면공 중 맨 우측에 위치해 있는 측면공에 대한 신호이다.

다음으로 식(3)~(5)를 이용하여 TFM 영상을 구성하였으며 결과는 Fig. 12와 같다. 중심의 5개의 측면공에 대하여 Fig. 13와 같이 위치별 진폭결과를 볼 때 기존 위상배열 초음파 결과는 집속거리 따라 결합을 분해하는 성능을 달리하지만, TFM는 이와 상관없이 가장 높은 분해능을 가지는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 기존 초음파 결과 대비하여 분해능과 선명도가 향상된 것을 확인할 수 있다.

특히 주목할 점은 Fig. 10와 Fig. 12 결과는 모두 한 세트의 FMC 데이터를 이용하여 합성한 결과들이라는 것이다.

이상의 결과들로부터 FMC 데이터를 이용하여 기존 초음파 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 TFM 결과를 통해 선명도, 분해능 등의 성능이 향상된 초음파검사 결과영상을 얻을 수 있었다.

5.2. FMC 기법의 한계

FMC 및 TFM의 기술은 많은 잠재적 가능성을 가지고 위상배열 초음파기술 분야에서 촉망받는 기술로 주목을 받고 있긴 하지만 최적화된 시스템을 구축하기 위해서는 아직 하드웨어나 소프트웨어 부분에서 많은 난제를 가지고 있다[7].

우선 위상배열 초음파는 신호저장을 기본으로 하는데 FMC 기법은 한 위치에서 N^2 개의 raw data를 저장해야 하기 때문에 기존 대비 방대한 저장용량이 요구된다. 또한 다채널 신호를 동시에 수집장치로 전송하고 저장하여야 하는데 방대한 용량 때문에 빠른 속도로 실시간 검사하는데 한계를 가진다. 또한 한 압전소자에서 입사된 초음파의 반사된 신호를 수신하기 때문에 낮은 에너지의 수신에 따른 신호수집 시스템의 전기적 노이즈가 문제시 된다.

하지만 현재 저장장치의 용량, 메모리, CPU, 데이터 전송 속도 등 하드웨어 기술 부분과 병렬 연산기술, 신호압축기술 등 소프트웨어 분야에 있어 발전이 지속되고 있기 때문에 상당부분 개선될 것으로 예상되고 있다.

6. 결 론

이번 연구에서는 위상배열 초음파의 신개념 신호 수집기술인 FMC 기법을 상용 위상배열 초음파장치를 이용하여 구현하고, FMC로 취득된 데이터의 후처리를 통해 sector B-Scan과 TFM 이미지를 영상화하였다. 이를 기존 기법으로 얻어진 결과와 비교하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기존 상용 위상배열 초음파장치를 활용하여 focal law를 수정하는 방법으로 통해 FMC 신호수집이 가능하도록 구현하였다. 16개의 압전소자에 대해 6 Hz의 속도로 FMC 신호 수집이 가능하였다.
- 2) FMC로 수집된 데이터에 대해 특정 조향각도에서의 A-scan 신호를 비교해 보았을 때 신호의 형상이 동일하였고, sector B-scan 영상을 재구성한 결과 일반적인 위상배열 초음파영상 결과와 동등한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.
- 3) 모든 지점에 가상적으로 초음파를 집속시킨 결과영상인 TFM 영상을 FMC 데이터 후처리를 통해 재구성한 결과 기존 결과와 대비하여 분해능과 선명도가 향상되었다.
- 4) FMC 데이터의 영상화는 후처리 기술을 기반으로 하기 때문에, 조향각도 및 집속거리 등 검사조건이 변경되어도 별도의 추가 검사 없이도 후처리를 통해 해당 영상을 구할 수 있었다.

본 연구에서 연구한 위상배열 초음파의 FMC 및 TFM 기술은 다양한 형태의 초음파 영상을 제공하여 결함 특성에 관한 다양한 정보를 획득해 줄뿐만 아니라 기존 결과 대비 분해능과 선명도가 향상된 영상을 획득할 수 있기 때문에 평가자로 하여금 결함 크기 측정 및 판정에 있어 많은 정보를 제공함으로써 검사 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단한다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20131510200380)

참고문헌

- [1] Olympus NDT, "Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications," Olympus NDT, Waltham, MA, USA, pp. 7-14 (2007)
- [2] Y.-S. Cho and J.-H. Kim, "A small crack length evaluation technique by electronic scanning," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 1, pp. 15-20 (2009)
- [3] Y.-S. Cho, G.-J. Jung, S.-K. Park and J.-H. Kim, "A study on a crack evaluation technique for turbine blade root using phased array ultrasonics," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 2, pp. 151-157 (2004)
- [4] B.-S. Yoon, Y.-S. Kim and J.-S. Lee, "Development of the phased array ultrasonic testing technique for nuclear power plant's small bore piping socket weld," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 33, No. 4, pp. 368-375 (2013)
- [5] H. J. Shin, S.-J. Song and Y. H. Jang, "Nondestructive inspection of steel structures using phased array ultrasonic technique," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 20, No. 6, pp. 538-544 (2000)
- [6] C. Holmes, B. W. Drinkwater and P. D. Wilcox, "Post-processing of the full matrix of Ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation," *NDT&E International*, Vol. 38, pp. 701-711 (2005)
- [7] P. Tremblay, D. Richard and H. K. Ann, "Development and validation of a full matrix capture solution," *Ultrasonic NDE Workshop Proceedings*, pp. 85-94 (2012)
- [8] A. Bulavinov, R. Pinchuk, S. Pudovikov, "Innovative ultrasonic testing (UT) of nuclear components by sampling phased array with 3D visualization of inspection results," *8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components*, pp. 1-8 (2010)

- [9] K. Nakahata, M. Hirata and S. Hirose, "Flaw reconstruction from scattering amplitude using full-waveform sampling and processing," *Journal of The Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol. 59, No. 6, pp. 277-283 (2010)
- [10] A. Bulavinov and M. Kröning, "Real-time quantitative ultrasonic inspection," *IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires*, pp.1-15 (2007)
- [11] T. H. Lee, B. S. Yoon and G. Y. Moon, "Synthesis of Ultrasonic image Using Signals Acquired by Full Matrix Capture," *Proceedings of KSNT Spring Conference*, pp. 385-392 (2014)
- [12] S. Robert, O. Casula, M. Njiki and O. Roy, "Assessment of real-time techniques for ultrasonic non-destructive testing," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 31, pp. 1960-1967 (2012)
- [13] M. V. Felicen, A. Velichko and P. D. Wilcox, "Accurate depth measurement of small surface-breaking cracks using an ultrasonic array post-processing technique," *NDT&E International*, Vol. 68, pp. 105-112 (2014)
- [14] P. D. Wilcox, C. Holmes and B. W. Drinkwater, "Advanced reflector characterization with ultrasonic phased arrays in NDE applications," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 54, No. 8, pp. 1541-1550 (2007)