

J. Biomed. Eng. Res.  
Vol. 24, No. 3, 217-231, 2003

## 초음파 영상에서 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법

김배형 · 송태경

서강대학교 전자공학과

(2003년 4월 15일 접수, 2003년 6월 23일 채택)

### Multiple Transmit Focusing Method With Modified Orthogonal Golay Codes for Ultrasound Imaging

Bae-Hyung Kim, Tai-Kyong Song

Department of Electronics, Sogang University

(Received April 15, 2003. Accepted June 23, 2003)

**요약**: 상보적인 특성을 갖는 골레이 수열을 이용하여 코드화된 신호를 송신하는 것은 SNR과 침투도를 향상시킬 수 있는 효과적인 방법이다. 그러나 각 주사선을 형성하기 위해 두 개의 상보적인 이진 코드를 연속하여 두 번 송신하기 때문에 프레임 율이 반으로 감소하게 된다. 특히 이 방법은 측방향 해상도를 향상시키기 위해 다중 집속 기법(multi-zone focusing method)을 적용하면 송신 집속점의 개수에 따라 송신 횟수가 늘어나므로 프레임 율(frame rate)이 크게 저하된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법을 제안하였다. 제안한 방법은 프레임 율의 저하 없이도 두 쌍의 직교 골레이 코드를 사용하여 서로 다른 위치에 동시에 송신 집속할 수 있다. 그리고 수신시에 정합 과정을 통해 분리, 압축한 다음 일반적인 다중 집속 기법과 같이 집속된 빔들을 결합함으로써 기존의 골레이 코드를 사용하는 송신 고정 집속 기법과 같은 프레임 율을 유지하면서도 측방향 해상도를 개선할 수 있다. 실제 초음파 영상을 위해 송신 신호로 사용되는 골레이 코드는 전송 전력 효율(Transmit Power Efficiency)을 높일 수 있도록 변형되었다. 컴퓨터 모사 실험과 실제 실험 결과는 제안한 방법이 기존의 방법에 비해 매우 향상된 측방향 해상도와 침투도를 갖는 초음파 영상을 제공한다는 것을 보여준다.

**Abstract**: Coded excitation with complementary Golay sequences is an effective means to increase the SNR and penetration of ultrasound imaging, in which the two complementary binary codes are transmitted successively along each scan-line, reducing the imaging frame rate by half. This method suffers from low frame rate particularly when multiple transmit focusing is employed, since the frame rate will be further reduced in proportion to the number of focal zones. In this paper, a new ultrasound imaging technique based on simultaneous multiple transmit focusing using modified orthogonal Golay codes is proposed to improve lateral resolution with no accompanying decrease in the imaging frame rate, in which a pair of orthogonal Golay codes focused at two different focal depths are transmitted simultaneously. On receive, these modified orthogonal Golay codes are separately compressed into two short pulses and individually focused. These two focused beams are combined to form a frame of image with improved lateral resolution. The Golay codes were modified to improve the transmit power efficiency (TPE) for practical imaging. Computer simulations and experimental results show that the proposed method improves significantly the lateral resolution and penetration of ultrasound imaging compared with the conventional method.

**Key words**: Medical ultrasound imaging, Modified orthogonal Golay codes, Multiple transmit focusing, Pulse compression, Image resolution, SNR, Penetration, TPE, Frame rate.

## 서 론

통신저자 : 송태경, (121-741) 서울시 마포구 신수동 1  
서강대학교 전자공학과  
Tel. (02)705-8907, Fax. (02)-707-3008  
E-mail. tksong@ccs.sogang.ac.kr

초음파 영상 장치는 변환자(transducer)를 통하여 초음파를 송신하고 검사체로부터 반사되어 돌아온 신호를 수신하여 필요한 일련의 신호 및 영상처리 과정을 수행한 다음 조사하고자

하는 정보를 영상의 형태로 제공한다. 초음파 영상 장치는 다른 영상 장치에 비해서 실시간으로 영상을 구성할 수 있으며, 디지털 기술에 의한 빔 집속 방식의 발달에 따라 해상도가 비약적으로 향상되어서 최근에 의료용 진단기, 음파 탐지기, 비파괴 검사기로 많이 사용되고 있다[1-2]. 의료용 초음파 영상 장치에서 가장 널리 쓰이고 있는 B-모드 영상 기법은 배열 변환자(array transducer)를 사용한 전자 주사 및 집속 기술을 이용하여 인체 내부의 2차원 단면 영상을 실시간으로 보여준다.

B-모드 영상의 질을 결정하는 주요 요소들은 해상도(resolution), 대조도(contrast), 침투도(penetration), 프레임 율(frame rate)등이며 초음파의 송·수신과 영상 구성 과정에서의 신호처리 방식 및 충실도 그리고 회로의 특성에 의하여 좌우된다[3]. 초음파 B-모드 영상법은 일반적으로 폭이 매우 작은 초음파 펄스를 사용하여 인체 내부의 조직 경계면에서 반사된 신호의 크기와 위치를 측정하여 인체 내부의 구조를 영상화하며 이를 펄스-에코 영상(pulse-echo imaging)화 기법이라고 한다[1]. 이 때 초음파가 매질을 통과하면서 감쇠 현상이 일어나고 이로 인해 수신되는 신호의 전력이 감소하게 된다. 따라서 멀리 있는 반사체로부터 수신되는 초음파 신호로부터 영상을 구성하기 위한 정보를 얻기가 힘들다. 수신 신호의 전력이 송신 신호의 전력에 비례한다는 사실을 이용해서 송신 신호의 전력을 증가시켜 이러한 문제를 해결할 수 있다. 즉, 짧은 초음파 펄스를 사용하는 경우에는 송신 신호의 전력을 높이기 위해 송신 신호의 침투 전압을 크게 하는 방법이 있다. 그러나 송신 신호의 침투 전압을 높이면 초음파를 발생시키는 변환자에 무리가 가해져 파괴의 위험이 있을 뿐만 아니라 인체내부의 조직에 손상을 초래할 수 있기 때문에 송신 신호의 침투 전압을 증가시키는 데에는 한계가 있다. 따라서 짧은 펄스를 이용하는 초음파 영상 장치는 신호대잡음비(SNR)와 침투도(penetration)에 제한을 받는다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 송신 신호의 침투 전력보다는 평균 전력을 증가시켜서 SNR을 개선하는 펄스 압축 기법(Pulse Compression Method)을 이용하는 것이 제안되었다[4]. 펄스 압축 기법은 레이더 장치 등에서 1960년대부터 사용되는 것으로 높은 침투 전압을 가지는 짧은 송신 신호 대신에 상대적으로 낮은 전압을 가지는 긴 신호를 송신 신호로 사용하고 수신부에서 상관기(Correlator)와 같은 펄스 압축기(Pulse Compressor)를 이용해서 짧은 송신 신호를 이용하는 것과 같은 해상도를 얻도록 하는 방법이다[5]. 초음파 영상 장치에서 펄스 압축 기법을 위해 사용되는 송신 신호는 시간-대역폭의 곱(Time-Bandwidth Product)이 큰 신호로서 처프(Chirp), 골레이(Golay) 코드 등이 있다. 이 중에서 골레이 코드는 0°, 180°의 두 가지의 위상(Phase) 성분만을 가지고 있어서 기존의 초음파 영상 장치에서 짧은 펄스를 발생시키기 위해 사용되는 이극 펄서(bipolar-pulser)로도 구현이 가능하기 때문에 많이 연구되고 있다.

한편 초음파 영상의 해상도는 배열 변환자를 사용하여 수신시에 동적 집속(dynamic focusing)방법으로 모든 영상점을 실

시간에 구성함으로써 향상시킬 수 있다. 하지만 실시간 영상을 위해 송신시 고정 집속 방법을 사용하기 때문에 송신 집속점에서 멀어질수록 해상도가 저하되는 문제점이 있다[6-9]. 송신 고정 집속의 문제점을 해결하는 방법 중 하나로 송신시의 집속점을 변화시켜 얻은 여러 영상들을 합성하여 하나의 영상을 얻는 다중 집속 기법(multi-zone focusing method)이 제안되었으나, 송신 집속점 개수에 따라 송신 율수가 늘어나므로 프레임 율(frame rate)이 저하되는 단점이 있다[10]. 하지만 여러 집속점에 집속된 송신 신호들을 한번에 송신하고 수신시 각 신호를 분리할 수 있다면 프레임 율의 저하없이 개선된 해상도의 영상을 구성할 수 있다.

본 논문에서는 골레이 코드를 사용하는 기존의 송신 고정 집속 기법과 같은 프레임 율을 유지하면서 개선된 해상도를 얻기 위해 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법(Simultaneous Multiple Transmit Focusing Method)을 제안하였다. 제안한 기법은 펄스 압축 기법을 기반으로 하며 직교 특성을 갖는 골레이 코드를 여러 송신 집속점에 서로 독립적으로 집속하여 동시에 송신한다. 수신된 신호는 정합과정을 통해 서로 다른 지점에 송신 집속된 골레이 코드들로 분리되고 각각 짧은 펄스로 압축된다. 이렇게 압축되고 분리된 신호들은 수신 동적 집속된 후 집속 위치 부근의 좁은 폭의 빔패턴을 결합하여 개선된 해상도의 영상을 제공한다. 이를 위해 서로 직교 특성을 갖는 두 개의 골레이 코드를 설계하였고 실제 초음파 영상 장치에서 전송 전력 효율(Transmit Power Efficiency)과 SNR을 향상시킬 수 있도록 골레이 코드를 변형하여 송신 신호로 사용하였다. 이를 이론적으로 해석하고 모사 실험 및 실제 실험을 통해 그 특성과 성능을 검증하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 골레이 코드를 이용한 펄스 압축 기법에 대해서 설명하고 골레이 코드의 특성과 신호 대 잡음비 개선(GPSNR)에 대해서 해석하였다. 3절에서는 직교하는 골레이 코드의 설계와 골레이 코드의 변형에 대해서 설명하고 변형된 직교 골레이 코드를 이용하는 동시 다중 송신 집속 기법을 제시하였다. 4절에서는 컴퓨터 모사 실험 및 실제 실험 결과를 제시하고 이를 바탕으로 제안된 기법의 성능을 검증하였으며 5절에서 결론을 요약하였다.

## 골레이 코드를 이용한 초음파 영상 기법

펄스 압축 기법은 높은 침투 전압을 가지는 짧은 송신 신호 대신에 압축 특성을 갖도록 설계된 상대적으로 낮은 전압을 가지는 긴 신호를 송신하고 수신시 긴 송신 신호로 인해 저하된 축방향 해상도를 개선하기 위해 펄스 압축기를 이용해 짧은 송신 신호를 이용하는 것과 같은 해상도를 얻도록 하는 방법이다. 이 때 사용되는 펄스 압축기에는 상관기(Correlator), 위너 여파기(Wiener filter), 역함수 여파기(Inverse filter)등이 있으며 본 논문에서는 최대의 SNR을 얻을 수 있는 상관기에 기반을 둔 펄스 압축 기법을 사용하였다.

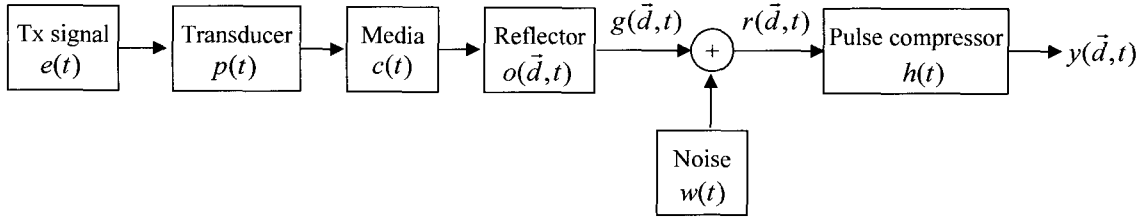


그림 1. 펄스 압축 기법.  
Fig. 1. Pulse compression method.

펄스 압축 방식의 초음파 영상 시스템을 그림 1과 같이 나타내어 해석하였다. 각 블록들은 선형 시스템으로 가정하였고 초음파가 신체내부와 같은 매질을 통과할 때 발생하는 비선형적 특성은 고려하지 않았다. 펄스 압축 방식의 초음파 영상 시스템은 수신시 펄스 압축기능을 수행한다는 것을 제외하고는 짧은 송신 신호를 이용하는 방식의 초음파 영상 시스템과 같은 특성함수를 갖는다. 그림 1에서  $e(t)$ 는 송신 신호를 나타내고  $p(t)$ 는 송·수신 변환자의 특성함수를 나타낸다.  $c(t)$ 는 송·수신시 초음파가 지나가는 변환자와 반사체 사이의 매질의 특성함수를 나타내고  $o(\vec{d}, t)$ 는  $\vec{d}$ 에 위치한 반사체의 특성함수이다. 수신 신호  $g(\vec{d}, t)$ 는 실제 영상을 구성하는데 사용되는 신호로서 다음과 같이 나타낸다.

$$g(\vec{d}, t) = e(t) * p(t) * c(t) * o(\vec{d}, t) = e(t) * u(\vec{d}, t) \quad (1)$$

여기서 \*는 컨볼루션을 의미하며  $u(\vec{r}, t)$ 는 변환자의 특성함수, 초음파가 진행하는 매질의 송·수신 특성함수, 반사체의 특성함수를 모두 포함한다. 시스템 잡음  $w(t)$ 가 첨가된 최종 수신 신호  $r(\vec{d}, t)$ 는

$$r(\vec{d}, t) = g(\vec{d}, t) + w(t) = e(t) * u(\vec{d}, t) + w(t) \quad (2)$$

가 되고 짧은 송신 신호가 사용되는 경우에  $e(t) \approx \delta(t)$ 가 되어 이 때의 수신 신호  $r(\vec{d}, t)_{pulse}$ 는

$$r(\vec{d}, t)_{pulse} = u(\vec{d}, t) + w(t) \quad (3)$$

가 된다. 그런데 펄스 압축 기법을 사용하는 경우에는 식 (2)로 나타내어지는 최종 수신 신호  $r(\vec{d}, t)$ 와 펄스 압축기의 충격 응답(impulse response)  $h(t)$ 가 컨볼루션되어 시간적으로 긴 신호가 되기 때문에 초음파가 진행하는 방향으로의 해상도를 저하시키게 된다. 따라서 짧은 송신 신호를 이용하는 방식과 같은 해상도를 얻기 위해서 펄스 압축기를 통과한 신호  $y(\vec{d}, t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$y(\vec{d}, t) = r(\vec{d}, t) * h(t) = e(t) * h(t) * u(\vec{d}, t) + w(t) * h(t) \quad (4)$$

이 신호가 식 (3)과 같기 위해서는 송신 신호  $e(t)$ 와 펄스 압축기  $h(t)$ 의 컨볼루션 결과가 다음의 조건을 만족하면 된다.

$$e(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e(\tau) h(t - \tau) d\tau \approx \delta(t) \quad (5)$$

만약 펄스 압축 방식으로 상관기를 이용한다면  $h(t) = e(-t)$ 이고 식 (5)는 다음과 같이 펄스 압축 기법을 위해 사용된 전송 신호  $e(t)$ 의 자기상관 함수가 된다.

$$e(t) * h(t) = e(t) * e(-t) = \Psi_e(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e(\tau) e(\tau - t) d\tau \quad (6)$$

따라서  $\Psi_e(t) \approx \delta(t)$ 의 특성을 가지면 긴 송신 신호를 사용 하여도 펄스 압축 과정을 거친 후에 짧은 펄스를 사용하는 경우와 같은 해상도의 위치정보를 얻을 수 있다.

콜레이 코드는 펄스 압축 기법에 사용되는 송신 신호로서 같은 길이를 가지는 한 쌍의 상보적인 수열로 구성되어 있다 [11]. 상보적인 수열은 두 종류의 원소로 구성된 유한개의 수열들의 집합들로 이루어져 있으며 각 수열들은 같은 길이를 가진다. 길이 N인 상보적인 수열들을  $a_1(n), a_2(n), \dots, a_M(n)$  ( $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ )이라고 하면 이 수열들의 자기상관 함수와 그 합은 다음과 같다.

$$\Psi_{a_i}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} a_i(n) a_i(n-k) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^M \Psi_{a_i}(k) = \Psi_{a_1}(k) + \Psi_{a_2}(k) + \dots + \Psi_{a_M}(k) = MN\delta(k) \quad (8)$$

콜레이 코드는 각 수열들이 +1과 -1로 이루어져 있으며 한 쌍의 콜레이 코드  $a_1(n), a_2(n)$ 는 다음과 같은 자기상관 함수의 합을 갖는다.

$$\sum_{i=1}^2 \Psi_{a_i}(k) = \Psi_{a_1}(k) + \Psi_{a_2}(k) = 2N\delta(k) \quad (9)$$

예로써, 길이가 4인 콜레이 코드 한 쌍과 자기 상관 함수의 합은 다음과 같다.

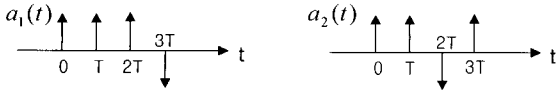


그림 2. 길이가 4인 한 쌍의 골레이 코드  $a_1(t)$ 와  $a_2(t)$ .  
 Fig. 2. A pair of Golay sequences of length 4,  $a_1(t)$  and  $a_2(t)$ .

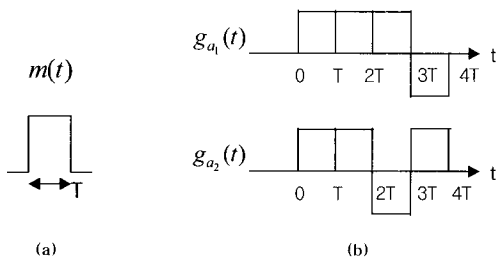


그림 3. 일반적인 골레이 신호: (a) 일반적인 골레이 신호를 발생시킬 때 사용되는 주기 T인 사각 창 함수, (b) 일반적인 골레이 신호 한 쌍  $g_{a_1}(t)$ ,  $g_{a_2}(t)$ .  
 Fig. 3. Conventional Golay codes: (a) a rectangular window function with duration T to generate conventional Golay signals and (b) a pair of conventional Golay signals,  $g_{a_1}(t)$  and  $g_{a_2}(t)$ .

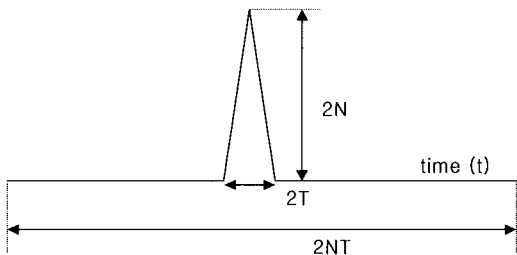


그림 4.  $m(t)$ 가 사각 창 함수 일 때 골레이 신호의 자기 상관의 합  $y(t)$ .  
 Fig. 4. A signal  $y(t)$  obtained by adding two auto-correlation functions of Golay codes that are modulated using a rectangular window function  $m(t)$ .

그림 4. A signal  $y(t)$  obtained by adding two auto-correlation functions of Golay codes that are modulated using a rectangular window function  $m(t)$ .

$$a_1(n)=[1 \ 1 \ 1 \ -1], \quad a_2(n)=[1 \ 1 \ -1 \ 1] \quad (10)$$

$$(n=0, 1, 2, 3)$$

$$\sum_{k=1}^2 \Psi_{a_i}(k) = \Psi_{a_1}(k) + \Psi_{a_2}(k) = 8\delta(k) \quad (11)$$

그림 2는 길이가 4인 골레이 코드를 나타내며 실제 송신 신호로 사용되는 골레이 신호는 다음과 같이 변조 함수(modulation function)  $m(t)$ 를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$a_1(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_1(n)\delta(t-nT), \quad a_2(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_2(n)\delta(t-nT) \quad (12)$$

기존의 골레이 코드는 스위칭 펄서(pulsar)로 발생시키므로  $m(t)$ 를 그림 3(a)와 같이 폭이 T인 사각 창(rectangular window) 함수로 나타낼 수 있다. 그리고 이렇게 발생된 일반적인 골레이 코드 한 쌍은 그림 3(b)와 같으며 각각 다음과 같이 표현된다.

$$g_{a_1}(t) = a_1(t) * m(t), \quad g_{a_2}(t) = a_2(t) * m(t) \quad (13)$$

골레이 코드를 이용한 초음파 영상 장치에서는 고정 집속된 상보적인 골레이 코드 한 쌍을 연속하여 두 번 송신하고 수신된 신호를 상관기를 이용해 펄스 압축시킨 다음 수신 동적 집속된 영상을 제공해준다. 다음은 수신된 골레이 신호들의 자기 상관 함수를 더한 결과로서 펄스 압축 특성을 보여준다.

$$y(t) = g_{a_1}(t - \tau_r) * g_{a_1}(-t) + g_{a_2}(t - \tau_r) * g_{a_2}(-t)$$

$$= a_1(t - \tau_r) * m(t - \tau_r) * a_1(-t) * m(-t)$$

$$+ a_2(t - \tau_r) * m(t - \tau_r) * a_2(-t) * m(-t)$$

$$= [a_1(t - \tau_r) * a_1(-t) + a_2(t - \tau_r) * a_2(-t)]$$

$$* m(t - \tau_r) * m(-t)$$

$$= [2N\delta(t - \tau_r)] * m(t - \tau_r) * m(-t)$$

$$= 2N[m(t - \tau_r) * m(-t)] \quad (\tau_r: \text{the propagation delay}) \quad (14)$$

이 식에서 볼 수 있듯이 골레이 코드의 자기상관 함수를 더한 결과는 변조함수  $m(t)$ 의 자기상관 함수가 된다. 따라서  $m(t)$ 가 시간적 길이 T를 가지는 사각 창 함수라면  $y(t)$ 는 주엽폭이 2T인 그림 4와 같은 삼각 함수(triangular function)가 된다. 여기서 T는 일반적으로 변환자의 중심주파수( $f_0$ )에 정합시키기 위해서  $1/f_0$ 로 한다. 위 식과 그림에서 볼 수 있듯이 골레이 코드의 길이 N이 증가하면 펄스 압축 후에 침투 값은 2N배 증가한다. 또한 N이 증가 할수록 침투 값이 증가하므로 -6dB 또는 -20dB 등으로 정의할 수 있는 유효 주엽폭은 감소하게 된다. 그러나 골레이 코드의 길이가 길면 근거리 영역의 이미지가 어려우며 대상체의 움직임에 영향을 받게 되므로 길이를 증가시키는 데는 한계가 있다[12].

앞서 예를 든 길이 4의 골레이 코드를 이용하여 골레이 신호의 길이를 늘리는 방법은 다음과 같다. 먼저 길이 4의 골레이 코드 한 쌍  $a_1(n), a_2(n)$ 을 기저(base)로 하고 이 기저를 연결하여 길이 8인 골레이 코드  $a_3(n), a_4(n)$ 를 다음과 같이 만든다.

$$a_3(n) = [a_1(n) \ a_2(n)] = [1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1] \quad (15)$$

$$(n=0, 1, \dots, 7)$$

$$a_4(n) = [a_1(n) \ -a_2(n)] = [1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1] \quad (16)$$

$$(n=0, 1, \dots, 7)$$

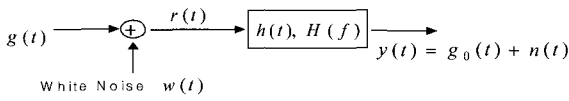


그림 5. 잡음이 첨가된 수신기 모델  
Fig. 5. Noisy receiver model

이와 같은 방법으로 길이 16, 32, ..., 2<sup>n</sup>의 골레이 코드를 만들 수 있다.

상관기에 기반을 둔 펄스 압축 기법을 초음파 영상 장치에 적용할 때는 길이가 긴 신호가 압축되어 압축된 신호의 침투 전압이 증가하게 되고 이로 인해 PSNR과 침투도가 향상되는 장점을 가지고 있다. 펄스 압축 특성을 갖는 긴 신호를 이용한 경우의 신호 대 잡음비 이득(GPSNR: Gain in PSNR)에 대해 해석해 보았다. 그림 5는 잡음이 첨가되는 일반적인 수신기 모델을 나타내며  $w(t)$ 는 전력 스펙트럼 밀도(power spectrum density)가  $N_0$ 로 일정한 상가성 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN)이다[13]. 여기서 수신된 신호  $r(t)$ 는 다음과 같다.

$$r(t) = g(t) + w(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (17)$$

그리고 선형 시불변 시스템(Linear Time Invariant System)  $h(t)$ 를 통과한 신호  $y(t)$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$y(t) = r(t) * h(t) = g(t) * h(t) + w(t) * h(t) = g_0(t) + n(t) \quad (18)$$

여기서 PSNR은  $y(t)$ 의 수신 신호 성분  $g_0(t)$ 의 침투전력(peak power)과 잡음 성분  $n(t)$ 의 평균 전력의 비로 나타내며,  $t = t_0$ 일 때  $g_0(t)$ 의 크기가 최대가 된다면 PSNR은 다음과 같이 정의된다.

$$PSNR = \frac{|g_0(t_0)|^2}{E[n^2(t)]} \quad (19)$$

$g(t)$ 의 대역폭이 B이고 침투 전압이  $V_p$ 인 경우에 이를 상관기를 사용하여 펄스 압축 시킬 때 얻게 되는 GPSNR을 구해보았다. 짧은 송신 신호를 사용하는 방식의 초음파 영상 시스템에서  $h(t)$ 는 일반적으로 대역통과 필터(band-pass filter)이다. 여기서는 해석의 편의를 위해  $h(t)$ 를 이득(gain)이 1이고 대역폭이  $W(\geq B)$ 인 이상적인 대역통과 필터라고 가정하였다. 이 대역통과 필터를 통과한 최종 수신 신호  $y(t)$ 의  $PSNR_{pulse(BPF)}$ 는 다음과 같다.

$$PSNR_{pulse(BPF)} = \frac{V_p^2}{N_0 W} \quad (20)$$

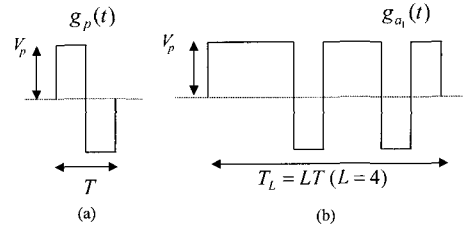


그림 6. 이극 펄스로 만들어진 짧은 펄스와 골레이 코드의 파형: (a) 짧은 펄스  $g_p(t)$ 의 파형, (b) 골레이 코드  $g_{a1}(t)$ 의 파형(L=4인 경우)

Fig. 6. Waveforms of a short pulse and a conventional Golay code generated using a bi-polar pulser: (a) a short pulse  $g_p(t)$  and (b) a Golay code  $ag_{a1}(t)$  (length 4)

상관기를 이용한 펄스 압축 방식의 초음파 영상 시스템에서 정합 필터(matched filter)  $h(t)$ 를 통과한 최종 수신 신호  $y(t)$ 의  $PSNR_{code}$ 는 다음과 같다[13].

$$PSNR_{code} = \frac{|\Psi_{g_c}(0)|^2}{N_0 \Psi_{g_c}(0)} = \frac{\Psi_{g_c}(0)}{N_0} \quad (21)$$

따라서 수신시 대역폭이 W인 이상적인 대역 필터를 통과하는 경우에 비해서 상관기를 이용해 압축시키는 경우에 얻을 수 있는 PSNR의 이득 GPSNR은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$GPSNR = \frac{PSNR_{code}}{PSNR_{pulse(BPF)}} = \frac{\Psi_{g_c}(0)/N_0}{V_p^2/(N_0 W)} = \frac{\Psi_{g_c}(0)}{V_p^2} W \quad (22)$$

이는 시간적으로 길이가 긴 송신 신호를 사용하고 펄스 압축 과정으로 상관기를 사용하는 경우에  $g_c(t)$ 의 에너지  $\Psi_{g_c}(0)$ 에 비해서 GPSNR이 증가한다는 것을 보여준다.

한편 길이가 긴 코드 신호  $g_c(t)$ 뿐만 아니라 짧은 펄스 신호  $g_p(t)$ 도 상관기를 통과시키는 정합과정을 수행하는 경우의  $PSNR_{pulse(correlator)}$ 를 구해서 GPSNR을 비교하면 다음과 같다.

$$GPSNR = \frac{PSNR_{code}}{PSNR_{pulse(BPF)}} \geq \frac{PSNR_{code}}{PSNR_{pulse(correlator)}} = \frac{\Psi_{g_c}(0)/N_0}{\Psi_{g_p}(0)/N_0} = \frac{\Psi_{g_c}(0)}{\Psi_{g_p}(0)} \quad (23)$$

여기서  $\Psi_{g_c}(0)$ 와  $\Psi_{g_p}(0)$ 는 각각  $g_c(t)$ 와  $g_p(t)$ 의 에너지를 의미한다. 따라서  $g_c(t)$ 의 에너지를 증가시키면 GPSNR은 증가된 에너지만큼 향상된다. 만약  $g_c(t)$ 가 기존의 짧은 펄스  $g_p(t)$ 와 같은 침투 전압을 가지면서 길이는 L배 길다면  $g_c(t)$ 의 에너지가 증가하게 되고 GPSNR은 증가된 길이만큼 향상된다는 것을 알 수 있다. 이는  $g_c(t)$ 의 자기상관 결과가

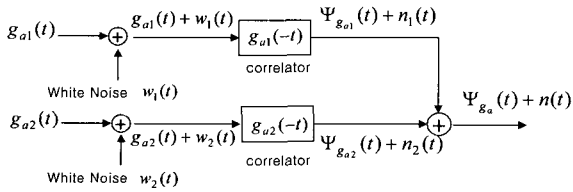


그림 7. 골레이 코드의 PSNR을 해석하기 위한 수신기 모델  
Fig. 7. A receiver model to analyze the PSNR of Golay codes

짧은 펄스로 압축된다면  $g_c(t)$ 의 길이를 길게 하여 증가시킨 에너지에 비례하여 GPSNR이 증가하게 되므로 초음파 영상의 PSNR을 개선시킬 수 있는 중요한 특성이 된다.

이상의 해석을 이용하여 골레이 코드를 사용한 펄스 압축 기법을 초음파 영상 장치에 적용할 때 얻게 되는 GPSNR을 구할 수 있다. 제품으로 상용화된 대부분의 초음파 영상 시스템의 송신 장치(transmitter)는 스위칭 펄서를 이용하여 '+1'과 '-1'이 증폭된 이상 신호(bi-phase signal)를 발생시켜 변환자에 인가한다. 따라서 변환자에 인가되는 기존의 짧은 펄스는 그림 6(a)와 같이 침두 전압이  $V_p$  이고 시간적인 길이가 T인 이극(bi-polar)의 파형이 된다. 이극 펄서를 이용해 발생시킨 골레이 코드는 그림 6(b)와 같이 기존의 짧은 펄스와 크기는 같고 길이는  $L \cdot T$ 가 된다.

앞에서 살펴본 대로 짧은 펄스  $g_p(t)$ 와 골레이 코드  $g_{a1}(t)$ 가 모두 상관기를 이용해 펄스 압축된 경우 GPSNR은 최소값을 가진다. 짧은 펄스  $g_p(t)$ 와 골레이 코드  $g_{a1}(t)$ 가 각각 정합 필터를 통과한 후의 PSNR은 다음과 같다.

$$PSNR_{g_p} = \frac{\Psi_{g_p}(0)}{N_0} = \frac{2T V_p^2}{N_0} \tag{24}$$

$$PSNR_{g_{a1}} = \frac{\Psi_{g_{a1}}(0)}{N_0} = \frac{2LTV_p^2}{N_0} \tag{25}$$

따라서 이 때 GPSNR을 구하면

$$GPSNR = \frac{PSNR_{g_{a1}}}{PSNR_{g_p}} = L \tag{26}$$

이 된다. 그런데 골레이 코드는 상보적인 수열 한 쌍으로 구성되어 있으므로 각각의 자기상관 함수를 더하고 난 후의 PSNR을 알아야 한다. 이를 위해 두 골레이 코드가 그림 7과 같은 수신기와 상관기를 통과한 후 각 상관 결과를 더하는 과정을 해석해 보았다. 펄스 압축된 두 골레이 코드를 더한 후에 잡음의 평균전력을 구하면 다음과 같다.

$$E[n^2(t)] = E[\{n_1(t) + n_2(t)\}^2] = E[n_1^2(t)] + E[n_2^2(t)]$$

$$= N_0 \Psi_{g_{a1}}(0) + N_0 \Psi_{g_{a2}}(0) = N_0 [\Psi_{g_{a1}}(0) + \Psi_{g_{a2}}(0)] = N_0 \Psi_{g_a}(0) \tag{27}$$

따라서 PSNR은

$$PSNR_{g_a} = \frac{|\Psi_{g_a}(0)|^2}{E[n^2(t)]} = \frac{|\Psi_{g_a}(0)|^2}{N_0 \Psi_{g_a}(0)} = \frac{\Psi_{g_a}(0)}{N_0} = \frac{4LTV_p^2}{N_0} \tag{28}$$

이 되고 GPSNR은 최종적으로 다음과 같다.

$$GPSNR_{min} = \frac{PSNR_{g_a}}{PSNR_{g_p}} = \frac{\Psi_{g_a}(0)}{\Psi_{g_p}(0)} = 2L \leq GPSNR \tag{29}$$

$$GPSNR_{min}(dB) = 10 \log_{10} 2L \tag{30}$$

이 결과는 골레이 코드를 이용한 펄스 압축 기법을 초음파 영상 장치에 적용할 때 적어도 골레이 코드의 자기 상관 함수를 더하여 얻게 되는 침두 값의 증가치만큼 PSNR이 개선된다는 것을 보여준다. 즉, 짧은 펄스의 길이를 L배 길게하여 송신 에너지를 증가시킨 골레이 코드를 만들면 증가된 송신 에너지로 인해 펄스 압축 후 L배 이상의 GPSNR을 얻게 되고, 자기 상관시킨 골레이 코드를 더하고 나면 2L배 이상의 GPSNR을 얻는다는 것을 알 수 있다.

### 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법

#### A. 변형된 직교 골레이 코드

한 쌍의 골레이 수열  $a_1(n)$ ,  $a_2(n)$ 로터 이와 직교하는 또 다른 골레이 수열 한 쌍을 설계하는 방법은 다음과 같다 [14,15].

$$b_1(n) = \widetilde{a_2}(n), \quad b_2(n) = -\widetilde{a_1}(n) \tag{31}$$

여기서  $\widetilde{a_1}(n)$ 는  $a_1(n)$ 의 원소의 순서를 거꾸로 배열한 수열을 말한다. 이렇게 해서 한 쌍의 골레이 코드  $g_{a1}(t)$ ,  $g_{a2}(t)$ 로부터 이와 직교하는 또 다른 골레이 코드 한 쌍  $g_{b1}(t)$ ,  $g_{b2}(t)$ 를 만들 수 있고 다음과 같은 직교 특성으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} a_1(n) * b_1^*(-n) + a_2(n) * b_2^*(-n) &= 0 \tag{32} \\ g_{a1}(t) * g_{b1}^*(-t) + g_{a2}(t) * g_{b2}^*(-t) \\ &= a_1(t) * m(t) * b_1^*(-t) * m^*(-t) + a_2(t) \\ &\quad * m(t) * b_2^*(-t) * m^*(-t) \end{aligned}$$

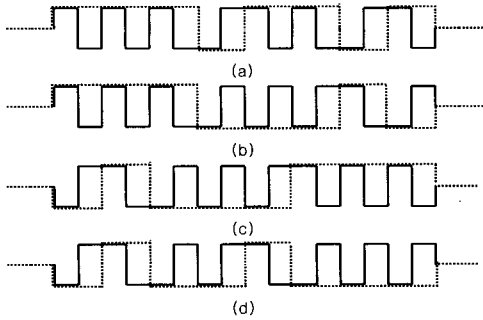


그림 8. 길이 8인 서로 직교하는 기존의 골레이 코드(점선)와 변형된 골레이 코드(실선): (a)  $g_{a_1}(t)$ , (b)  $g_{a_2}(t)$ , (c)  $g_{b_1}(t)$ , (d)  $g_{b_2}(t)$ . (변형된 골레이 코드는 이상 사각 창 함수를 이용해서 만들었음)

Fig. 8. Conventional(dashed) and modified(solid) orthogonal Golay codes of length 8: (a)  $g_{a_1}(t)$ , (b)  $g_{a_2}(t)$ , (c)  $g_{b_1}(t)$  and (d)  $g_{b_2}(t)$ . (Modified Golay codes are generated using a bi-phase doublet rectangular window function.)

$$= [ a_1(t) * b_1^*(-t) + a_2(t) * b_2^*(-t) ] \quad (33)$$

$$* m(t) * m^*(-t) = 0$$

제한된 대역폭을 가지는 초음파 변환자에 송신 신호의 주파수 성분들이 정합되도록 하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 송신 신호로 사용되는 골레이 코드의 전송 전력 효율을 높이기 위해서 변형된 골레이 코드를 사용하였다. 변형된 골레이 코드는 일반적인 골레이 코드를 발생시킬 때 사용되는 사각 창(rectangular window) 함수 대신에 상용화되어 있는 여러 가지 창 함수의 조합으로 발생된다[16]. 본 논문에서는 이상 사각 창 함수(bi-phase rectangular window function)를 이용하여 변형시킨 골레이 코드를 사용하였으며 이 경우는 식 (13)의 변조 함수  $m(t)$ 가 그림 6(a)와 같이 된다[17]. 이상 사각 창 함수를 이용하여 변형된 골레이 코드를 발생시키는 방법은 다음과 같다.

- 1) 일반적인 골레이 코드를 발생시킨다.
- 2) 발생된 골레이 코드를 이용해서 골레이 코드의 요소가 +1인 경우에는 [+1, -1], -1인 경우에는 [-1, +1]이 되도록 발생시킨다.
- 3) 변형된 코드가 발생되었으면 송신 샘플링 주파수와 중심 주파수의 비를 고려한 변형된 골레이 코드를 발생시킨다.

예를 들어 샘플링 주파수가 30MHz이고 중심 주파수가 7.5MHz인 변환자를 사용할 때, 길이가 4인 골레이 코드 [1 1 1 -1]를 이상 사각 창 함수를 이용해서 변형하면 [1 -1 1 -1 1 -1 1 1]이 되고 샘플링 주파수/중심주파수가 4인 점을 고려해서 [1 1 -1 -1 1 1 -1 -1 1 1 -1 -1 -1 1 1]로 만들어 줘야 중심 주파수에 정합된 신호가 된다.

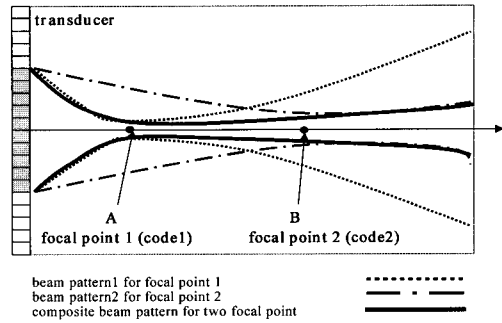


그림 9. 두 송신 집속점에 대한 다중 송신 집속 기법의 측방향 빔패턴  
Fig. 9. Lateral beam pattern of a multiple transmit focusing with two focal points

그림 8은 길이 8인 사각 창 함수를 이용한 골레이 코드(실선)와 이상 사각 창 함수를 이용해 변형시킨 골레이 코드(점선)를 나타낸다. 그림 8(a), (b)는 각각 길이 8인 변형된 골레이 코드  $g_{a_1}(t), g_{a_2}(t)$ 을 나타내고 그림 8(c), (d)는 이와 직교하는 또 다른 변형된 골레이 코드  $g_{b_1}(t), g_{b_2}(t)$ 을 나타낸다. 점선은 기존의 골레이 코드이고, 실선은 이상 사각 창 함수를 이용해 변형시킨 골레이 코드이다.

**B. 제안한 기법**

골레이 코드는 상보적인 관계를 가지는 한 쌍의 코드로 구성되어 있어서 한 주사선(scanline)을 얻기 위해 연속해서 두 번 송·수신한다. 그리고 수신된 신호를 각각 자기상관시킨 후 더해서 압축시킨 다음 수신 동적 집속 방법으로 영상을 구성한다. 하지만 실시간 영상을 위해서 송신시 한 지점에 고정 집속을 하므로 집속점을 벗어난 부분에서는 빔이 급격히 퍼지는 현상을 보여 측방향 해상도가 좋지 않다. 본 논문에서는 골레이 코드를 사용한 기존의 송신 고정 집속 기법과 같은 프레임율을 가지면서 개선된 해상도의 영상을 얻기 위해 직교 특성을 갖는 두 쌍의 골레이 코드를 설계하여 같은 두 번의 송·수신으로 동시에 두 개의 송신 집속점을 구성할 수 있도록 하였다. 이렇게 하여 고정된 송신 집속점으로부터 멀어질수록 해상도가 저하되는 문제점을 해결하고 집속 깊이를 확장시킬 수 있다. 본 논문에서 제안한 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법에 대하여 자세히 설명하면 다음과 같다.

그림 9는 집속점 2개에 대하여 제안된 동시 다중 송신 집속 기법의 송신 빔패턴을 개념적으로 나타내며 A는 한 쌍의 골레이 코드  $g_{a_1}(t), g_{a_2}(t)$ 의 송신 집속점이고 B는 이와 직교하는 또다른 한 쌍의 골레이 코드  $g_{b_1}(t), g_{b_2}(t)$ 의 송신 집속점이다. 송신 집속점에 따라 서로 다른 직교 골레이 코드가 사용되므로 두 직교 골레이 코드는 다른 지연 패턴을 갖고 서로 더해진 후 송신된다. 구체적으로, 첫 번째 송신 과정에서 각각 다른 지점에 집속된 직교 골레이 코드  $g_{a_1}(t), g_{b_1}(t)$ 를 더하

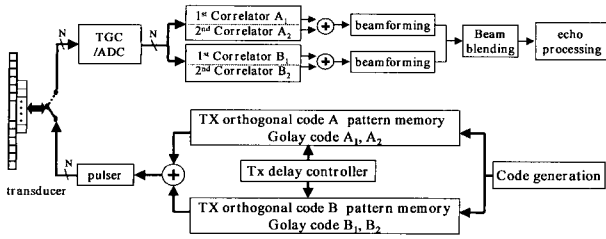


그림 10. 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기반의 초음파 영상 시스템

Fig. 10. Ultrasound imaging system for simultaneous multiple transmit focusing with modified orthogonal Golay codes

여 송신하고, 두 번째 송신과정에서 첫 번째와 상보적인 골레이 코드  $g_{a_2}(t), g_{b_2}(t)$ 를 같은 방법으로 송신한다. 첫 번째 송·수신 과정 후의 수신 신호는 식 (34)와 같이 되고 두 번째 송·수신 후의 수신 신호는 식 (35)와 같이 된다.

$$r_1(t) = g_{a_1}(t - \tau_r) + g_{b_1}(t - \tau_r) \tag{34}$$

$$r_2(t) = g_{a_2}(t - \tau_r) + g_{b_2}(t - \tau_r) \tag{35}$$

여기서  $\tau_r$ 은 수신 신호의 지연시간을 나타낸다. 수신된 신호는 식 (33)에서 살펴본 대로 직교하는 골레이 코드가 서로의 교차 상관의 합이 0이 된다는 특성을 이용해 서로 다른 지점에 송신 집속된 두 쌍의 골레이 코드로 분리되고 이렇게 분리된 두 쌍의 골레이 코드는 각각 펄스 압축 특성을 가지고 있으므로 각각의 자기상관 함수를 더하여 압축된 두 개의 빔을 얻게 된다. 다음은 수신된 신호를 분리, 압축하는 과정을 나타낸다.

첫 번째 수신된 신호  $r_1(t)$ 는 먼저 송신된 신호  $g_{a_1}(t), g_{b_1}(t)$ 와 상관되어 식 (36), (37)과 같이 되고 두 번째 수신된 신호  $r_2(t)$ 는 다음에 송신된 신호  $g_{a_2}(t), g_{b_2}(t)$ 와 상관되어 식 (38), (39)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} r_1(t) * g_{a_1}(-t) &= [g_{a_1}(t - \tau_r) + g_{b_1}(t - \tau_r)] * g_{a_1}(-t) \\ &= g_{a_1}(t - \tau_r) * g_{a_1}(-t) + g_{b_1}(t - \tau_r) * g_{a_1}(-t) \end{aligned} \tag{36}$$

$$\begin{aligned} r_1(t) * g_{b_1}(-t) &= [g_{a_1}(t - \tau_r) + g_{b_1}(t - \tau_r)] * g_{b_1}(-t) \\ &= g_{a_1}(t - \tau_r) * g_{b_1}(-t) + g_{b_1}(t - \tau_r) * g_{b_1}(-t) \end{aligned} \tag{37}$$

$$\begin{aligned} r_2(t) * g_{a_2}(-t) &= [g_{a_2}(t - \tau_r) + g_{b_2}(t - \tau_r)] * g_{a_2}(-t) \\ &= g_{a_2}(t - \tau_r) * g_{a_2}(-t) + g_{b_2}(t - \tau_r) * g_{a_2}(-t) \end{aligned} \tag{38}$$

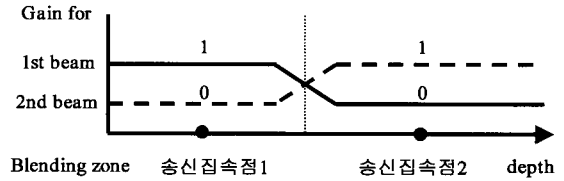


그림 11. 다중 송신 집속된 영역을 결합하기 위한 빔 블렌딩. 실선: 송신집속점1 부근의 빔패턴을 얻기 위한 첫 번째 빔의 블렌딩 이득, 점선: 송신집속점2 부근의 빔패턴을 얻기 위한 두 번째 빔의 블렌딩 이득

Fig. 11. Beam blending to combine two beam vectors for the same beam line. Solid line represents the blending gain to obtain the first zone encompassing the transmit focal point 1 and dashed line the beam blending gain to obtain the second zone

$$\begin{aligned} r_2(t) * g_{b_2}(-t) &= [g_{a_2}(t - \tau_r) + g_{b_2}(t - \tau_r)] * g_{b_2}(-t) \\ &= g_{a_2}(t - \tau_r) * g_{b_2}(-t) + g_{b_2}(t - \tau_r) * g_{b_2}(-t) \end{aligned} \tag{39}$$

여기서 식 (36)과 (38)을 더하면 상호 상관 함수의 합은 0이 되고 자기 상관 함수의 합은 식 (14)와 같이 되어 A에 송신 집속된 빔을 얻는다. 마찬가지로 식 (37)과 (39)를 더하면 B에 송신 집속된 빔을 얻게 된다. 이렇게 분리되고 압축된 신호를 각각 수신 동적 집속한 후 일반적인 다중 집속 방법과 같이 집속 위치 부근의 좁은 폭의 축방향 빔패턴을 결합하여 개선된 해상도의 영상을 구성한다.

그림 10은 본 논문에서 제안하는 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기반의 초음파 영상 시스템을 나타낸다. 사용자가 선택한 여러 송신 집속점들에 대한 지연값들이 송신 지연 제어기(Tx delay controller)에 의해 계산된 후, 직교 코드가 저장된 송신 직교 코드 패턴 메모리(Tx orthogonal code pattern memory)에서 각 송신 직교 코드들을 읽어 가산기(adder)로 보낸다. 이 때 각 직교 골레이 코드는 서로 다른 송신 집속 위치에 대한 지연 시간을 가지고 더해지고 N개의 채널로 이루어진 펄서(pulser)들로 전달되어 변환자(transducer)를 통해 송신된다. 직교 코드를 모두 포함하는 수신신호는 변환자를 통과한 후 시간 이득 보상기(TGC)와 아날로그-디지털 변환기(ADC)를 거쳐 각 채널 별로 상관기(correlator)를 통해 압축된다. 이때 사용된 상관기의 계수는 송신 신호와 정합(matching)되도록 송신 집속점에 따른 직교 코드가 사용되며, 직교 코드별로 분리되어 압축된 후 수신 동적 집속을 위해 빔포머(beamformer)로 보내진다. 직교 코드별로 수신 동적 집속된 신호들은 에코 프로세싱(echo processing)과정에서 각 송신 집속점 부근의 영역을 중심으로 깊이에 따라 영상을 합성하여 하나의 영상을 구성하게 된다. 각 송신 집속 영역을 합성할 때는 두 영역의 인접한 부분을 겹치도록 하면서 그림 11과 같이 합성이 이루어지도록 한다. 송신집



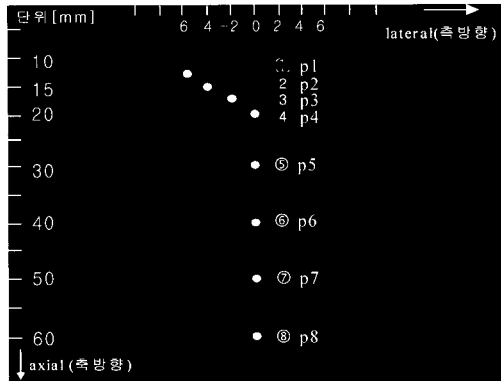


그림 12. 모사 실험에서 사용한 8개의 점 대상체에 대한 팬텀의 모형  
 Fig. 12. 8 Point-target phantom model used in computer simulations

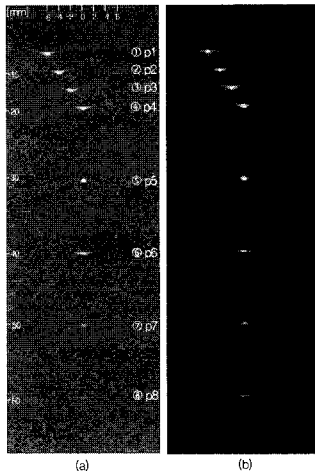


그림 14. 각 채널에 PSNR이 30dB가 되도록 잡음을 첨가했을 때 B-스캔 영상의 비교(30mm에 송신 집속): (a) 기존의 펄스 집속 방식, (b) 변형된 골레이 코드를 이용한 펄스 압축 기법(두 경우 침두 전압은 같음)

Fig. 14. Computer generated B-scan images when additive white gaussian noises are added to each channel so that PSNR is 30dB using (a) a pulse-echo technique with a short pulse focused on transmit and (b) a pulse compression technique using modified Golay codes. Each transmit peak voltage is same. Transmit focus is fixed at 30mm(p5)

속점1에 대한 집속 영역을 얻기 위해 첫 번째 빔(1st beam)의 블렌딩 이득(blending gain)을 주고 송신집속점2에 대한 집속 영역은 두 번째 빔(2nd beam)의 블렌딩 이득을 주어 두 빔을 합성한다. 이렇게 하여 결합된 블렌딩 빔은 두 집속 영역을 부드럽고 자연스럽게 합성한다.

### 실험 결과 및 고찰

#### A. 컴퓨터 모사 실험 결과 및 고찰

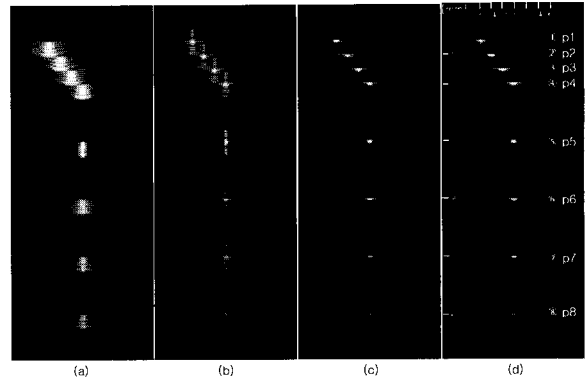


그림 13. 길이 32의 변형된 골레이 신호를 이용하였을 때, 자기상관 시키지 않고 수신된 신호만으로 얻은 영상(a), 자기상관시킨 후 얻은 영상(b), 자기상관 결과를 더한 후 얻은 영상(c)과 길이 2의 짧은 펄스를 이용하여 얻은 영상(d)의 비교

Fig. 13. Comparison of computer generated images using Golay codes((a)-(c)) and a short pulse (d). (a), (b) and (c) represent the images using uncompressed Golay codes, compressed Golay codes and sum of the compressed Golay codes, respectively

본 논문에서 제안한 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법을 검증하기 위해서 중심 주파수가 7.5MHz이고 -6dB 대역폭이 60%, 소자간의 간격이 0.2mm인 192개의 배열 소자를 갖는 선형 변환자를 사용하여 컴퓨터 모사 실험을 수행하였다. 송·수신시 64채널을 사용하는 시스템을 가정하여 기존의 펄스 집속 방식과 골레이 코드를 이용하는 송신 고정 집속 방법, 그리고 제안한 기법에 의한 초음파 영상을 구성하였으며, 모든 영상들은 60dB의 동적 범위(dynamic range)를 적용하여 나타내었다. 모사 실험에 사용된 모든 골레이 코드는 이상 사각 창 함수로 변조된 길이 32의 변형된 골레이 코드이다. 그림 12는 모사 실험에서 사용한 8개의 점 대상체(p1~p8)에 대한 팬텀의 모형을 나타낸 것이다.

먼저 본 논문에서 사용되는 길이 32의 변형된 골레이 코드의 압축 특성을 살펴보았다. 제안한 기법은 펄스 집속 방식에서 일반적으로 사용하는 길이가 2인 짧은 펄스(그림 6(a))보다 16배 길어진 변형된 골레이 코드를 송신 신호로 사용한다. 이러한 골레이 코드가 압축되어 짧은 펄스를 사용 할 때와 같은 축방향 해상도를 제공해야 한다. 그림 13은 제안한 기법에서 사용하는 변형된 골레이 코드의 펄스 압축 특성을 보여준다. 그림 13(a)는 하나의 골레이 코드를 송신하고 수신된 신호를 상관기를 통과시키지 않고 얻은 영상이고 그림 13(b)는 수신된 신호를 자기상관시킨 후 얻은 영상이며 그림 13(c)는 자기상관 결과를 더하여 펄스 압축시킨 후 얻은 영상이다. 그림 13(d)는 비교를 위해 나타낸 짧은 펄스를 이용하여 얻은 영상이다. 그림 13의 모든 경우 송신시 30mm에 고정 집속하였다. 그림을 보면 골레이 신호를 각각 자기상관시킨 후 얻은 영상의 해상도는 그렇지 않은 경우보다 향상되지만 축압값이 완전히 상쇄되지 않기 때문에 여전히 좋지 않은 해상도를 가진다. 그러나 자기상관 결과를 더한 후에는 골레이 신호의 펄스 압축 특성

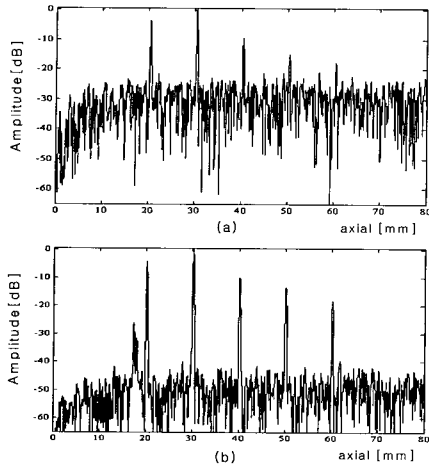


그림 15. 그림 14의 각 경우에 대한 A-스캔 영상의 비교: (a)기존의 펄스 집속 방식, (b) 변형된 골레이 코드를 이용한 펄스 압축 기법  
 Fig. 15. A-scan images of Fig. 14(a) and 14(b)

으로 인해 축압값이 완전히 상쇄되고 결과적으로 그림 13(d)의 짧은 펄스를 이용한 영상과 같은 축방향 해상도를 제공한다.

다음은 본 논문에서 제안한 변형된 골레이 코드를 이용하여 펄스 압축 기법을 적용할 때 얻게 되는 GPSNR을 알아보기 위한 모사 실험을 수행하였다. 이를 위해 짧은 펄스와 변형된 골레이 코드를 사용하는 경우의 PSNR을 비교해 보았다. 그림 14는 그림 13과 동일한 환경에서 반사체에서 돌아온 수신 신호의 신호대 잡음비가 30dB가 되도록 각 채널에 잡음을 첨가하였을 때의 영상을 보여준다. 그림 14(a)는 일반적으로 사용되는 길이가 2인 구형 펄스를 사용하여 얻은 영상이고 그림 14(b)는 길이가 32인 변형된 골레이 코드를 사용하여 얻은 영상이다. 그림 14(b)는 골레이 코드가 펄스 압축될 때 침투치가 증가하고 이로 인해 PSNR이 향상되어 그림 14(a)보다 잡음이 더 낮아 보이며 영상의 전체적인 대조도(contrast)가 훨씬 개선되었다.

각 대상체에서의 PSNR과 GPSNR을 계산하여 표 1에 나타내었다. 두 경우 모두 집속 지점에서의 집속 효과로 송신 집속점인 30mm(p5)에서 가장 큰 PSNR을 가지며 GPSNR도 가장 크다. 기존의 펄스 집속 방식은 p5에서 집속 효과로 인해 PSNR이 커지지만 전체적으로 깊이가 깊어질수록 거리에 따른 감쇠 현상으로 PSNR이 감소하는 경향을 보인다. 마찬가지로

표 1. 그림 14의 각 점 대상체에 대한 PSNR과 GPSNR 값

Table 1. The PSNR and the GPSNR for each point target of Fig. 14

점 대상체	PSNR(dB)		GPSNR(dB)
	기존의 펄스 집속 방식(그림 14(a))	골레이 코드를 이용한 펄스 압축 방식(그림 14(b))	
p1	25.43	45.87	20.44
p2	24.98	44.53	19.55
p3	24.13	43.42	19.29
p4	23.88	43.11	19.23
p5	30.96	55.62	24.66
p6	17.84	41.76	23.92
p7	14.79	36.35	21.56
p8	11.94	30.99	19.05

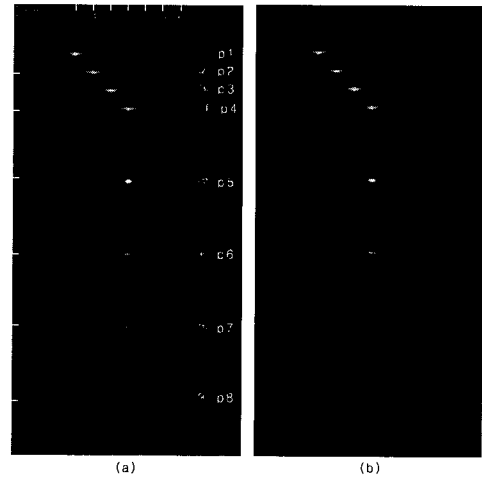


그림 16. 각 채널에 PSNR이 30dB가 되도록 잡음을 첨가했을 때, 짧은 펄스의 송신 첨두 전압을 골레이 신호의 5배한 경우의 B-스캔 영상 비교(30mm에 송신 집속): (a) 기존의 펄스 집속 방식, (b) 변형된 골레이 코드를 이용한 펄스 압축 기법

Fig. 16. Computer generated B-scan images in case of 5 times higher transmit peak voltage of a short pulse than that of modified Golay codes when additive white gaussian noises are added to each channel so that PSNR is 30dB(transmit focus is fixed at 30mm(p5)) using (a) a pulse-echo technique with a short pulse and (b) a pulse compression technique using modified Golay codes

변형된 골레이 코드를 이용한 펄스 압축 기법도 집속점(p5)을 제외하고는 거리에 따라 감소하는 경향을 보인다. 표 1을 보면 전체적으로 변형된 골레이 코드를 이용한 펄스 압축 기법이 더 큰 PSNR을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 특히 기존의 펄스 집속 방식은 집속점(p5)에서 PSNR이 30.96dB인데 변형된 골레이 코드를 이용한 펄스 압축 기법은 가장 먼 지점인 60mm(p8)에서도 PSNR이 30.99dB로 조금 더 큰 PSNR을 갖는 것을 확인할 수 있다. 기존의 펄스 집속 방식에서는 신호의 감쇠로 인해 깊은 영역으로 갈수록 PSNR이 작아져 대상체와 잡음 신호가 거의 구분이 가지 않게 되는데 변형된 골레이 코드를 사용하는 펄스 압축 기법에서는 깊은 영역에 있는 대상체도 감지할 수 있다.

이처럼 본 논문에서 제안하는 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법은 펄스 압축 기법을 기반으

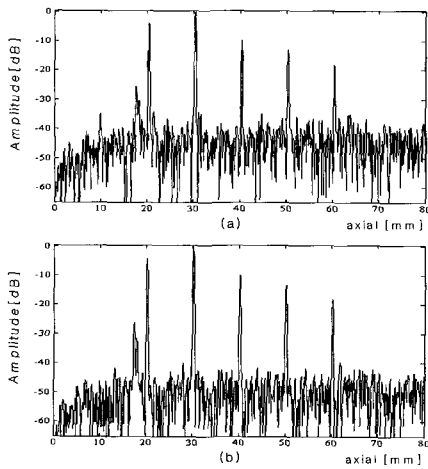


그림 17. 그림 16의 각 경우에 대한 A-스캔 영상의 비교: (a) 기존의 펄스 집속 방식, (b) 변형된 골레이 코드를 이용한 펄스 압축 기법  
Fig. 17. A-scan images of Fig. 16(a) and 16(b)

로 하므로 감지 영역(detection range) 혹은 침투도가 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 이론적으로 골레이 신호를 이용한 경우의 최소 GPSNR값은 식 (30)을 이용해 계산하면  $10\log_{10}[2 \times 32/2] = 15.05\text{dB}$ 이다. 표 1을 보면 모사 실험에서 구한 GPSNR은 집속점인 p5에서 24.66dB로 가장 큰 값을 갖는데 이는 이론적으로 계산된 최소값보다 9.6dB정도 큰 값이다. 집속점을 벗어나면 GPSNR은 감소하지만 p6~p8의 영역에서도 23.92dB, 21.56dB, 19.05dB로 큰 GPSNR을 갖는 것을 볼 수 있다.

그림 15는 그림 14의 두 영상에 대한 측방향 0mm에서의 A-스캔 영상을 나타내며 각각의 최대값으로 정규화하여 로그 스케일(dB)로 비교해서 나타내었다. 그림 15(a)는 50mm 이상에 있는 반사체의 경우에 잡음 신호의 크기와 비슷해서 분별하기가 어려운 반면에 그림 15(b)는 50mm 이상에서도 반사체와 잡음 신호간의 크기 차이가 명확하다는 것을 볼 수 있다. 그림 15(a)는 잡음 신호의 평균적인 크기가 -26.72dB이고 그림 15(b)는 잡음 신호의 평균적인 크기가 -45.14dB이다. 이처럼 A-스캔 영상을 비교해보면 잡음 신호와 반사체 신호간의 차이를 분명히 알 수 있다.

그림 16은 그림 14와 같은 환경에서 펄스 압축 기법을 이용한 저전압 초음파 영상 장치에 대한 모사 실험을 수행한 것이다. 그림 16(a)는 길이 2인 짧은 송신 신호의 크기를 5배하여 얻은 영상이고 그림 16(b)는 길이 32인 골레이 신호를 이용하여 얻은 영상이다. 식 (29)에서 확인한 것처럼 골레이 신호가 짧은 송신 신호보다  $L$ 배 긴 신호이면 다음 식과 같이 짧은 송신 신호의 침투 전압( $V_p$ )이 골레이 신호의 침투 전압( $V_g$ )보다  $\sqrt{2L}$ 배 큰 경우 두 경우의 PSNR은 같다.

$$\frac{PSNR_{golay}}{PSNR_{pulse}} = \frac{\Psi_{g_s}(0)}{\Psi_{p_s}(0)} = \frac{4LT V_g^2}{2T V_p^2} = 1 \Leftrightarrow V_p = \sqrt{2L} V_g \quad (40)$$

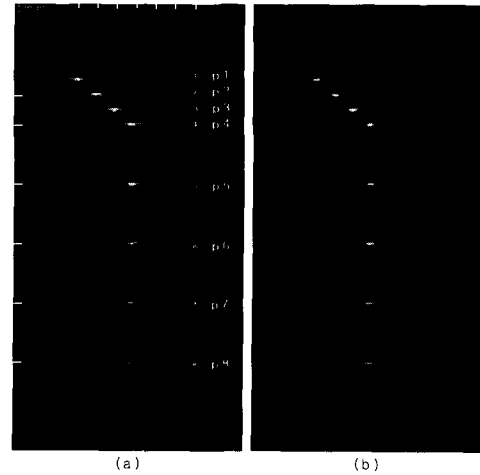


그림 18. 변형된 골레이 코드를 이용한 송신 고정 집속 기법과 제안한 방법의 B-스캔 영상 비교: (a) 변형된 골레이 코드를 사용한 송신 고정 집속기법(30mm에 집속), (b) 본 논문에서 제안한 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법(20mm와 50mm에 집속)  
Fig. 18. Comparison of computer generated B-scan images of several point targets: (a) conventional fixed transmit focusing with modified Golay codes focused at 30mm on transmit and (b) two-zone focusing with two modified orthogonal Golay codes focused respectively at 20mm and 50mm

여기서  $L=16$ 이므로  $\sqrt{2L} \approx 5.6$ 이 된다. 그림 16에서 볼 수 있듯이 골레이 코드의 송신 전압을 길이가 2인 짧은 송신 신호에 비해 1/5로 감소시켜도 좀 더 나은 해상도를 얻는다.

그림 17은 그림 16의 각 영상에 대한 A-스캔 영상을 보여준다. 그림 17(a)의 잡음 신호의 평균적인 크기는 -42.89dB로 그림 17(b)의 -44.76dB보다 약간 큰 값을 갖는다. 이는 제안된 기법의 PSNR이 여전히 크다는 것을 보여준다. 그림 16과 그림 17은 골레이 신호가 짧은 펄스의 1/5의 침투 전압으로도 더 좋은 신호대 잡음비와 해상도를 제공한다는 것을 보여준다. 이는 짧은 송신 신호를 이용하는 기존의 초음파 영상 장치의 제한된 신호대 잡음비와 침투도를 향상시키기 위한 효과적인 방법을 제시해 주며 저전력 소모를 필요로 하는 저전압 시스템에 효과적으로 사용될 수 있다.

그림 18은 골레이 코드를 사용한 기존의 송신 고정 집속 기법과 본 논문에서 제안한 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법으로 얻은 영상을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 18(a)는 골레이 코드를 사용하는 송신 고정 집속 기법에서 송신 집속 위치가 30mm일 때의 영상을 나타내고 그림 18(b)는 제안된 동시 다중 송신 집속 기법에서 직교 특성을 갖는 두 쌍의 골레이 코드를 사용하여 한 쌍은 20mm에 송신 집속하고 그와 직교하는 다른 한 쌍은 50mm에 동시에 송신 집속하여 얻은 영상을 나타낸다. 두 영상의 측방향 해상도를 비교해야 하기 때문에 잡음은 첨가하지 않았으며 기존의 펄스 집속 방식에 의해 얻은 영상은 그림 18(a)와 동일하여 생략하

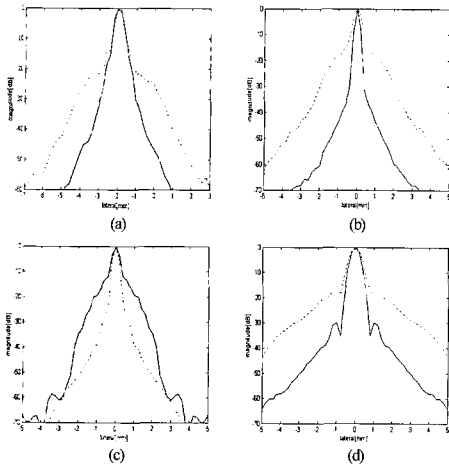


그림 19. 변형된 골레이 코드를 사용한 송신 고정 집속 기법(점선)과 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법(실선)의 측방향 빔패턴 비교: (a) p3의 측방향 빔패턴, (b) p4의 측방향 빔패턴, (c) p5의 측방향 빔패턴, (d) p7의 측방향 빔패턴  
 Fig. 19. Comparison of lateral beam patterns between the conventional focusing with modified Golay codes(dashed line) and the proposed method(solid line): (a) lateral beam pattern at p3, (b) lateral beam pattern at p4, (c) lateral beam pattern at p5, and (d) lateral beam pattern at p7

었다. 그림 18(b)는 그림 18(a)와 비교할 때 전체적으로 측방향 해상도가 개선되었음을 확인할 수 있다. 그림 18(a)는 송신 집속점인 30mm에서는 측방향 해상도가 우수하지만 송신 집속점에서 벗어날수록 측방향 빔폭이 증가하여 해상도가 저하된다. 반면에 그림 18(b)의 경우에는 30mm부근에서는 그림 18(a)에 비해 해상도가 떨어지지만 동시 송신 집속점인 20mm와 50mm부근의 좋은 해상도만을 얻어 합성하였기 때문에 두 집속점을 중심으로한 넓은 영역에서 측방향 해상도가 향상되었음을 볼 수 있다. 한편 그림 18(b)에서 두 집속점인 20mm와 50mm를 비교했을 때, 20mm의 측방향 해상도가 더 좋은 이유는 측방향 해상도를 결정짓는 주엽의 폭이 진행되는 깊이에 비례하는 특성을 가지기 때문이다.

빔 패턴은 송신 또는 수신된 빔이 일정한 시간에 측방향을 따라 나타나는 빔의 강도를 말한다. 초음파 영상에서 측방향 해상도를 정량적으로 비교하기 위해 빔 패턴의 주엽폭(main-lobe width), 측엽 수준(sidelobe level) 등이 사용된다. 그림 19는 그림 18(a)와 그림 18(b)에 나타난 영상의 점 대상체들에 대한 측방향 빔패턴을 비교해서 로그 스케일(dB)로 나타낸 것이다. 그림 19(a)-(d)는 각각 그림 12의 p3, p4, p5, p7로 표시된 점 대상체들에 대한 측방향 빔패턴을 나타낸다. 여기에서 점선은 골레이 코드를 이용한 기존의 송신 고정 집속 방식의 측방향 빔패턴을, 실선은 본 논문에서 제안한 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법의 측방향 빔패턴을 나타내고 있다. 측방향 빔패턴의 중심에서 1mm떨어진

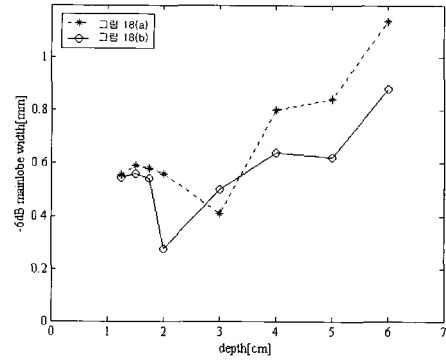


그림 20. 그림 18의 각 경우에 대한 측방향 -6dB 주엽폭  
 Fig. 20. Lateral -6dB mainlobe width at each depth of Fig. 18.

측엽의 평균값을 측정하여 비교해 보면, p5(그림 17(c))에 대해서는 골레이 코드를 이용한 송신 고정 집속 기법이 -39.1dB이고 제안한 기법은 -19.4dB로 제안한 기법이 19.7dB정도 더 큰 측엽값을 갖는다. 이는 p5지점이 골레이 코드를 이용한 송신 고정 집속 기법의 집속점이기 때문이며 그림 18에서도 이미 확인했었다. 하지만 p5지점을 제외한 영역에서는 제안한 기법이 더 작은 측엽값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 즉 p3(그림 19(a))에 대해서는 골레이 코드를 이용한 송신 고정 집속 기법이 -21.6dB이고 제안한 기법이 -31.2dB로 9.6dB정도 측엽값이 작다. 이러한 측엽값의 개선은 제안한 기법의 송신 집속점 부근인 p4와 p7에서 더욱 두드러지게 나타난다. 제안한 기법의 송신 집속점 중 하나인 p4(그림 19(b))에 대해서는 각각의 측엽값이 -18.9dB, -43.8dB로 제안한 기법이 24.9dB정도 작고, 제안한 기법의 또 다른 집속점인 p7(그림 19(d))에 대해서는 각각 -17.1dB, -30.2dB의 측엽값을 가지며 제안한 기법이 13.1dB정도 작다. 이러한 결과는 제안한 방법이 측방향 빔패턴의 측엽값을 개선시켜 초음파 영상의 질을 향상시킨다는 것을 보여주는 것이다.

그림 20은 그림 18(a), (b)의 각각의 경우에 대하여 각각의 점 대상체 영상의 측방향 -6dB 주엽폭을 비교하여 나타낸 것이다. 측방향 빔폭은 일반적으로 파장에 비례하며 구경의 크기에 반비례하고 거리에 따라 증가한다. 송신 신호의 주파수 성분이 같고 같은 구경을 사용할 경우 깊이가 얕을수록, 집속 위치에 가까울수록 빔폭은 좁아진다. 측방향 해상도는 각 거리에서의 초음파 빔폭에 의해 결정되므로 빔폭이 좁을수록 더 좋아지게 된다. 골레이 코드를 사용한 송신 고정 집속 영상(그림 18(a))의 측방향 주엽폭(그림 20의 점선)을 살펴보면 송신 집속 위치(3cm)까지는 어느 정도 일정한 빔폭을 보이다가 집속 위치에서는 측방향의 빔폭이 가장 좁아지게 되고 집속 위치를 벗어나면 빔폭이 급속히 넓어지는 것을 볼 수 있다. 초음파는 일정 거리까지는 퍼짐 없이 전파되다가 이 거리를 넘어서면 회절 현상에 의하여 빔폭이 계속 증가된다. 따라서 고정 집속점에서 멀어질수록 빔이 퍼지는 회절현상에 의해서 집속점을

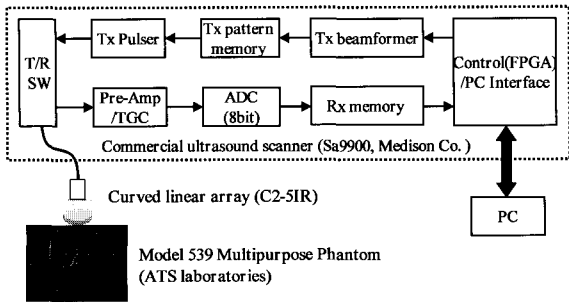


그림 21. 실제 실험에서 사용된 실험 장치의 구성도와 모조 조직 시편 Fig. 21. Experimental set-up using a modified commercial scanner

벗어난 영역에서는 해상도가 떨어지게 된다. 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 영상(그림 18(b))의 축방향 주엽폭(그림 20의 실선)은 첫 번째 집속 지점인 2cm 이후 깊이에 따라 늘어나긴 하지만 두 번째 집속 지점인 5cm 근방에서 다시 빔폭이 작아지는 것을 볼 수 있다. 5cm 이후에는 다시 빔폭이 증가하지만 송신 고정 집속의 경우(그림 19(a))보다는 그 정도가 약하다. 따라서 제안한 방법은 두 개의 송신 집속점에서의 집속 효과로 깊이가 증가할수록 빔폭이 늘어나는 것을 제한하여 전체적으로 주엽폭이 작아진 것을 확인할 수 있다. 그림 19와 그림 20에 나타난 결과로 제안한 방법은 축방향 빔패턴의 축엽값과 빔폭을 개선하여 초음파 영상의 질을 향상시킨다는 것을 확인하였다.

**B. 실제 실험 결과 및 고찰**

변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 방식의 해상도와 SNR의 개선 효과를 검증해보기 위해 신체조직을 모조한 시편(Model 539 Multipurpose Phantom, ATS Laboratory)을 사용하여 실제 실험을 수행하였다. 변형된 직교 골레이 코드를 구동하기 위해서 기존의 상용 초음파 영상 장치(SA9900, (주)메디슨, Korea)를 수정하여 사용하였고, 모든 어레이 변환자 소자들에 수신된 RF 샘플들을 주사선 별로 저장할 수 있도록 하였다. 그림 21은 실제 실험을 위해 사용된 실험 장치의 구성도이다. 변환자에서 수신된 신호를 메모리 보드를 이용해서 저장하고 이를 초음파 영상 장치에서 파일로 생성하였다. 수신된 아날로그 RF데이터는 61.6MHz로 샘플링되고, 각 샘플 데이터는 8비트로 SDRAM 메모리 보드에 저장된다. 이렇게 저장된 샘플들을 외부 컴퓨터로 전송하여 신호처리를 수행하고 영상으로 나타냈다. 실제 실험에서는 중심 주파수 3.5MHz, 192개의 배열소자, 반지름 40mm 및 진단 각도 85.256°의 곡면 배열 변환기(convex or curved linear array, C2-5IR)를 사용하여 데이터를 획득하였다.

그림 22는 실제 실험에서 얻은 모조 조직 시편의 A-스캔

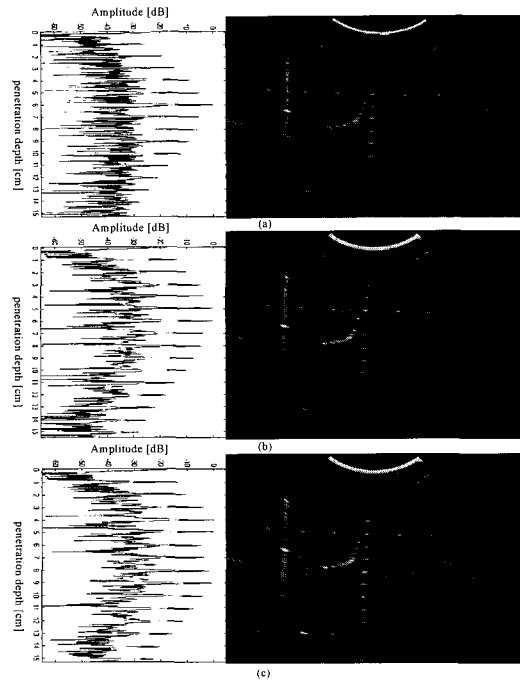


그림 22. 실제 실험에서 얻은 모조 시편의 A-스캔 영상(왼쪽)과 B-스캔 영상(오른쪽, 동적범위: 60dB)의 비교: (a) 기존의 펄스 집속 기법, (b) 골레이 코드를 이용한 송신 고정 집속 기법, (c) 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법 Fig. 22. A-scan(left) and B-scan images(right, dynamic range: 60dB) of a tissue-mimicking phantom for (a) a fixed transmit focusing(at 6cm) with the conventional pulse-echo method, (b) a fixed transmit focus at 6cm with modified Golay codes and (c) a two-zone focusing(at 4cm and 9cm) with the proposed method using modified orthogonal Golay codes

영상(왼쪽)과 B-스캔 영상(오른쪽)을 보여준다. 그림 22(a)는 짧은 펄스를 사용하는 기존의 펄스 집속 기법, 그림 22(b)는 변형된 골레이 코드를 사용한 송신 고정 집속 기법, 그림 22(c)는 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법으로 얻은 영상을 나타낸 것이다. 그림 22(a)는 일반적인 짧은 구형 펄스(0.26 μsec)를 송신 신호로 사용하였고, 그림 22(b)는 변형된 골레이 코드(L=8, 2.1 μsec)를 송신 신호로 사용하였으며, 그림 22(c)는 변형된 직교 골레이 코드(L=8, 2.1 μsec)를 송신 신호로 사용하였다. 모든 경우에 송신 첨두 전압은 10V로 같다. 그림 22(a)와 그림 22(b)는 6cm에 송신 고정 집속하고 그림 22(c)는 4cm와 9cm에 동시에 송신 집속하였는데 경우 모두 수신 동적 집속한 후 영상을 구성하였다. 모든 영상을 나타낼 때 동적 범위는 60dB로 하였다.

그림 22의 각 영상을 비교해 보면 골레이 코드를 사용하는 경우에 깊은 영역으로 갈수록 잡음 레벨이 현저하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 먼저 그림 22(a)-(c)의 A-스캔 영상을 비교해 보면, 그림 22(a)는 11cm이상의 깊이에 있는 반사체 신호들은 잡음 신호의 크기와 비슷해서 분별하기가 어려우나 그림

22(b)는 11cm이상의 깊이에서도 그 크기가 명확히 차이가 나는 것을 볼 수 있으며 그림 22(c)는 9cm에서의 송신 집속 효과로 깊은 영역으로 갈수록 다른 두 영상보다 그 차이가 더 커지는 것을 볼 수 있다.

이러한 차이는 B-스캔 영상에서도 확인할 수 있다. 그림 22(a)의 B-스캔 영상에서는 송신 집속 지점인 6cm를 지나면서 점 대상체나 시스트(cyst)의 이미지가 흐려져 10cm 부근에서부터는 시스트는 거의 안 보이게 된다. 반면 그림 22(b)의 B-스캔 영상에서는 15cm의 깊이까지 점 대상체의 이미지가 뚜렷이 보이고 시스트 이미지는 10cm 부근까지 볼 수 있으며 넓은 영역에 걸쳐 보다 뚜렷한 대상체의 이미지를 보여준다. 이는 앞에서 설명한 대로 짧은 펄스보다 L배 길어진 골레이 코드를 사용할 때 PSNR이 향상되고 관찰 영역과 침투도가 증가된다는 사실을 뒷받침 해준다. 그림 22(c)의 B-스캔 영상에서는 동시 다중 송신 집속의 효과로 인해서 그림 22(b)에서는 10cm 정도의 깊이까지만 보이던 시스트가 그림 22(c)에서는 최대 깊이 까지도 나타나며 모든 대상체들이 가장 뚜렷하게 보인다는 것을 알 수 있다.

또한 그림 22(b)와 그림 22(c)의 B-스캔 영상에서 각 점대상체들을 비교해 보면 제안한 기법의 측방향 해상도가 개선된다는 것을 확인할 수 있다. 그림 22(b)는 한 쌍의 골레이 코드를 이용하여 송신 집속 위치를 6cm로 고정하였을 때 얻은 영상이고 그림 22(c)는 제안된 동시 다중 송신 집속 기법을 적용하여 서로 직교하는 골레이 코드 두 쌍을 각각 4cm와 9cm 두 곳에 집속하여 얻은 영상이다. B-스캔 영상을 비교해 보면 그림 22(b)의 송신 집속 지점인 6cm까지는 두 영상의 점 대상체가 비슷한 측방향 해상도를 가지지만 7cm를 지나면서부터는 그림 22(b)의 측방향 해상도는 급격히 저하되고 그림 22(c)의 측방향 해상도는 거의 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다.

그림 22의 각 영상을 비교해 보면 제안한 기법을 이용해 얻은 그림 22(c)의 영상이 전체적으로 가장 밝고 선명하며 이는 대조도가 가장 좋다는 것을 의미한다. 특히 제안한 기법은 침투도가 증가되어 깊은 영역에서도 시스트와 점 대상체가 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 모사 실험에서도 확인했듯이 각 대상체들에 대한 측방향 해상도 역시 제안한 기법이 우수함을 확인할 수 있었다.

## 결 론

골레이 코드의 자기상관 함수들은 동일한 주엽을 가지고 측엽에서는 각각의 극성이 반대라는 특성을 갖는다. 따라서 두 번의 송·수신 과정을 거친 후 두 개의 자기상관 함수를 더하면 주엽의 크기는 두 배로 증가하고 측엽은 서로 상쇄되어 사라진다. 이처럼 골레이 코드를 이용한 펄스 압축 기법을 사용하면 낮은 송신 침투 전압으로도 짧은 송신 신호를 사용하는 초음파 영상 장치와 같은 해상도의 위치 정보를 제공하면서 SNR과 침투도를 효과적으로 향상된다. 그러나 골레이 코드는 상보적인 특성으로 인해 두 번의 송·수신 과정을 거쳐야 하

기 때문에 골레이 코드를 이용하여 다중 집속 기법을 적용하는 경우에는 집속점의 개수가 증가하면 송·수신 횟수도 현저히 증가하여 프레임율이 급속히 저하된다는 단점이 있다. 본 논문에서는 펄스 압축 기법을 기반으로 하는 초음파 영상 기법으로서 변형된 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 송신 집속 기법을 제안하고 실험을 통해서 그 효율성을 검증하였다. 제안한 방법은 기존의 골레이 코드를 이용하는 송신 고정 집속 방식과 같은 두 번의 송·수신으로도 직교 골레이 코드를 이용하여 동시 다중 송신 집속 기법을 적용할 수 있기 때문에 프레임 율의 저하 없이도 측방향 해상도가 향상된다.

실제 실험을 위해 기존의 골레이 코드를 이상 사각 창 함수를 이용해 변형시켜 송신 전력 효율(TPE)을 높일 수 있도록 하였고 직교 특성을 갖는 두 쌍의 골레이 코드를 설계하였다. 실험을 통해 본 논문에서 제안한 기법은 기존의 골레이 코드를 사용한 송신 고정 집속 기법보다 프레임 율의 저하 없이 개선된 측방향 해상도와 SNR을 제공한다는 것을 확인하였다. 또한 변형된 골레이 코드를 사용하는 펄스 압축 기법은 기존의 펄스 집속 방식보다 SNR과 침투도가 향상된다는 것을 확인하였으며 이는 골레이 코드를 사용하는 경우 송신 침투 전압을 효과적으로 줄일 수 있다는 것을 의미한다.

그러나 골레이 코드를 사용하는 기존의 초음파 영상 장치는 두 번의 송·수신 과정을 거쳐야하기 때문에 기존의 펄스 집속 방식보다 프레임 율(frame rate)이 1/2 감소한다. 이는 직교하는 골레이 코드를 각각 서로 다른 두 주사선을 구성하는데 사용하여 해결할 수 있다[18]. 이처럼 직교 골레이 코드를 이용한 동시 다중 주사선 집속 기법은 서로 직교하는 두 골레이 코드를 각각 다른 주사선 상에 집속하여 동시에 송·수신한다. 두 번의 송·수신 과정을 거친 후에 상관기를 이용하여 분리된 서로 다른 두 개의 주사선을 구성할 수 있다. 이 경우에는 기존의 골레이 코드를 이용한 송신 고정 집속 기법보다 프레임 율이 향상되고 기존의 펄스 집속 방식과는 같은 프레임 율을 유지하면서 보다 개선된 SNR과 침투도를 제공한다.

따라서 직교하는 골레이 코드는 동시 다중 송신 집속 기법과 동시 다중 주사선을 얻는 방법을 사용자의 목적에 따라 선택하여 사용할 수 있다. 동시 다중 송신 집속 기법은 깊이에 따라 일정한 측방향 해상도와 대조도(contrast)를 원하는 경우에, 동시 다중 주사선을 얻는 방법은 프레임 율 감소 없이 일정한 깊이에 송신 고정 집속할 경우에 사용할 수 있다. 이 두 가지 방법은 사용자의 목적에 따라 선택적으로 사용할 수 있는 시스템의 모형이 된다. 이러한 시스템은 낮은 송신 전압을 가지면서도 개선된 해상도의 영상의 제공할 수 있어서 저전력 소모를 요하는 휴대용의 이동식 초음파 시스템을 개발하는 데 효과적으로 사용될 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. A. Macovski, Medical Imaging System, Prentice-Hall, 1983, pp. 73-224

2. M.H. Lee and S.B. Park, "A new continuous dynamic focusing technique in ultrasound imaging," *Electronics Lett.*, vol. 21, no. 17, pp. 749-751, 1985
3. 송태경, "의료용 초음파 B-모드 영상을 위한 신호처리", 비파괴검사 학회지, *Journal of the Korean society for Nondestructive Testing*, vol. 20, No. 6, pp. 1-18, 2000. 12
4. M. O'Donnell, "Coded excitation system for improving the penetration of real-time phased-array imaging", *IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol 39, no.3, pp. 341-351, 1992
5. Peyton Z. Peebles, JR., *Radar Principles*, John Wiley & Sons, inc., 1998, pp. 287-349
6. M. O'Donnell, "Efficient parallel receive beam forming for phased array imaging using phase rotation", *IEEE Ultrason. Symp.*, pp. 1495-1498, 1990
7. M. O'Donnell, et al., "Real-time phased array imaging using digital beam forming and autonomous channel control", *IEEE Ultrason. Symp.*, pp. 1499-1502, 1990
8. J. H. Kim, T. K. Song, and S. B. Park, "A Pipelined Sampled Delay Focusing in Ultrasound Imaging Systems", *Ultrasound Imaging*, vol. 9, pp. 75-91, 1987
9. T.K. Song, and S.B. Park, "A New Digital Phased Array System for Dynamic Focusing with Reduced Sampling Rate", *Ultrasound Imaging*, vol. 12, pp. 1-16, 1990
10. J.A. Hossack, "Extended Focal Depth Imaging for Medical Ultrasound", *Proceeding of IEEE Ultrasonics Symposium*, vol. 2, pp. 1535-1540, 1996
11. M.J. Golay, "Complementary series," *IRE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-7, pp. 82-87, April 1961
12. Richard Y. Chiao, Lewis J. Thomas, "Synthetic transmit aperture imaging using orthogonal Golay coded excitation", *Ultrasonics Symposium 2000 IEEE*, Vol. 2, pp. 1677-1680, 2000. 10
13. Simon Haykin, *Communication Systems*, John Wiley & Sons, inc., 3rd, 1994, pp. 313-418
14. C.-C. TSENG, C.L. LIU, "Complementary Sets of Sequences", *IEEE Trans. on Infor. Theo.* Vol. IT-18, no.5, pp. 644-652, 1972
15. 김배형, 정영관, 송태경, "직교하는 변형된 골레이(Golay) 코드를 이용한 동시 다중 집속 기반의 초음파 영상 기법", 대한 전기 학회/대한 전자 공학회 시스템 및 제어분야 합동 추계학술대회 논문집, pp. 187-190, 2001.
16. 유양모, "Weighted Chirp 신호를 이용한 초음파 영상 기법", 서강대학교 대학원 전자공학과 석사학위 논문, 2000. pp. 7-17
17. Bae-Hyung Kim, Woo-Yul Lee, Tai-Kyong Song, "Multiple Transmit Focusing with Modified Orthogonal Golay Codes", *Proceedings of the International Federation for Medical and Biological Engineering*, Vol.3, part 2, pp. 956-957, EMBEC'02, Vienna, Dec. 2002
18. 김태호, 김배형, 송태경, "직교하는 변형된 골레이 코드를 이용한 동시 다중 주사선 초음파 집속 기법", 대한 의용 생체 공학회 제26회 춘계 학술대회 논문집, pp. 334-337, 2002