

## 직교하는 변형된 골레이(Golay) 코드를 이용한 동시 다중 집속 기반의 초음파 영상 기법

°김배형, 정영관, 송대경  
서강대학교 공과대학 전자공학과

### Ultrasound Imaging Based On Simultaneous Multiple Transmit Focusing Using Orthogonal Modified Golay Code

°B. H. Kim, Y. K. Jeong, T. K. Song  
Department of Electronic Engineering, Sogang University

**Abstract** - A new ultrasound imaging technique based on simultaneous multiple transmit focusing using orthogonal modified Golay codes is presented. modified Golay codes are used to increase signal-to-noise-ratio(SNR) and maximize the transmit power efficiency(TPE). Conventional Golay codes consist of a pair of complementary codes with same length and can be compressed into a delta-like signal due to their complementary property. In the present work, two modified Golay codes focused at different depths are transmitted at the same time, which are mutually orthogonal. On receive, these orthogonal modified Golay codes are separately compressed into two short pulses and individually focused. These two focused beam are combined to form a frame of image with improved lateral resolution. Computer simulations are performed to verify the proposed method improves the lateral resolution of image compared with the conventional echo system.

## 1. 서 론

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]. 일반적으로 짧은 송신 신호를 이용해서 초음파 영상을 구성하는데 이 경우 감쇄로 인해 멀리 있는 반사체의 영상을 구성하기가 힘들다. 이는 신호 대 잡음비(SNR)가 제한되기 때문이다. 송신 신호의 침투 전압을 크게하여 수신 신호의 전력을 증가시킬 수 있지만 송신 신호의 침투 전압을 크게하는 데는 많은 제한이 있다. 따라서 송신 신호의 순간 전력보다는 평균 전력을 증가시켜서 SNR을 개선하는 펄스 압축 기법이 제안되었다[3]. 이는 높은 침투 전압을 가지는 짧은 송신 신호를 사용하는 대신에 상대적으로 낮은 전압을 가지는 코드화된 신호를 사용하는 것이다. 즉, 길이가 긴 코드화된 신호를 송신하고 수신된 신호를 송신 신호와 상관(correlation)시킴으로써 압축시킨다. 이렇게 압축된 신호는 송신 신호의 길이에 비례하여 SNR이 증

가하게 된다.

초음파 영상의 해상도는 어레이 변환자(array transducer)를 사용하여 수신시에 동적 집속(dynamic focusing)방법으로 모든 영상점을 실시간에 구성함으로써 향상시킬 수 있다. 하지만 실시간 영상을 위해 송신시 고정 집속 방법을 사용하기 때문에 송신 집속점에서 멀어질수록 해상도가 저하되는 문제점이 있다[4]. 송신 고정 집속의 문제점을 해결하는 방법으로 송신시의 집속점을 변화시켜 얻은 여러 영상들을 합성하여 하나의 영상을 얻는 다중 집속 기법(multizone focusing method)이 제안되었으나, 송신 집속점 개수에 따라 송신 횟수가 늘어나므로 프레임율(frame rate)이 저하되는 단점이 있다[5].

본 논문에서는 직교(orthogonal) 특성을 갖도록 설계된 골레이(golay) 코드를 사용한 동시 다중 집속 기법을 제안한다. 이때 사용된 골레이 코드는 낮은 송신 전압을 가지면서 SNR을 향상시킬 수 있으며 기존의 골레이 코드의 송신 전력 효율(Transmit Power Efficiency)을 높일 수 있도록 변형되었다. 이처럼 변형된 골레이 코드를 송신 신호로 사용하고 수신시에 상관기(correlator)를 통과하는 펄스 압축 기법을 이용해서 짧은 펄스로 압축할 수 있다. 기존의 골레이 코드는 같은 길이의 상보적인(complementary) 한 쌍의 코드로 구성되며 두 번의 송·수신 과정을 거친다. 이때 같은 프레임율로 측방향 해상도를 개선시키기 위해서 다중 집속 기법을 적용할 수 있다. 이것은 직교 특성을 갖는 두 쌍의 골레이 코드를 설계하여 동시에 두 개의 송신 집속점을 구성하는 것이다. 먼저 서로 직교 특성을 갖는 두 개의 골레이 코드를 각각 다른 집속점에 대해 송신하고, 다음에 첫 번째와 상보적인 골레이 코드를 같은 방법으로 송신한 후 각 수신과정에서 이를 분리하는 방법이다. 이렇게 하여 고정된 송신 집속점으로부터 멀어질수록 해상도가 저하되는 문제점을 해결하고 집속 깊이를 확장시킬 수 있다. 본 논문에서는 직교하는 변형된 골레이 코드의 특성을 이론적 분석을 통해 제시하고 이를 이용해 동시 다중 집속 기반의 초음파 영상 기법을 구현할 수 있음을 모사 실험을 통해 검증하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 변형된 골레이 코드

펄스압축기법은 송신 신호의 침투 전압을 증가시키는 대신에 송신 신호의 평균 전력을 증가시켜서 초음파 영

상 시스템의 신호 대 잡음비(SNR)를 향상시킬 수 있다. 이 기법은 높은 침투 전압을 가지는 짧은 송신 신호 대신에 상대적으로 낮은 전압을 가지는 긴 코드화된 신호를 송신 신호로 사용하고 수신부에서 상관기(correlator)와 같은 펄스 압축기를 이용해서 짧은 송신 신호를 이용하는 것과 같은 측방향 해상도를 얻도록 하는 방법이다. 펄스 압축 기법에서 사용될 수 있는 긴 코드 신호 중에 골레이 코드는 같은 길이를 가지는 상보적인 한 쌍의 코드로 구성되며 두 번의 송·수신 과정을 거친 후 수신시 각각을 자기상관시킨 후 더하면 델타함수와 같은 특성으로 압축된다[6]. 압축된 수신신호의 신호 대 잡음비(SNR)는 골레이 코드의 길이(L)에 비례하여 증가한다. 압축된 신호의 신호 대 잡음비 개선 비율(GSNR)은 데시벨(dB)로 다음과 같이 나타난다.[7]

$$GSNR(dB) = 10 \log_{10} L \quad (1)$$

골레이 코드의 경우에는 각각을 자기상관시킨 것을 더하고 나면 침투값이 두 배가 되므로 최종적으로 GSNR은 다음과 같다.

$$GSNR(dB) = 10 \log_{10} 2L \quad (2)$$

골레이 코드와 일반적인 짧은 펄스에서 사용하는 on-off 신호의 침투 전압을 각각  $V_g$ ,  $V_c$  라고 하면, 이론적으로 골레이 코드가 짧은 펄스를 사용할 때와 같은 SNR을 유지하면서 얼마나 작은 침투 전압을 갖는지를 알 수 있다.

$$V_g = \frac{V_c}{\sqrt{2L}} \quad (3)$$

그런데 골레이 코드는 주파수 평면에서 대역폭이 확산되어 있어서 제한된 대역폭을 가지는 초음파 변환자에 정합되지 않기 때문에 실제 GSNR은 이론적인 값보다 작다. 또한 정합되지 않은 대역의 전력이 변환자의 온도를 높게 되어 변환자를 손상시킬 수 있으며 의료용 초음파 장치에서는 가열된 변환자가 인체에 해를 입힐 수 있다. 따라서 제한된 대역폭을 가지는 변환자에 송신 신호의 주파수 성분들이 정합되도록 하는 것이 중요하다. 이러한 관계를 변환자의 입력과 출력의 전력 비율을 나타내는 송신 전력 효율(TPE)로 정의한다. 변형된 골레이 코드는 창(window) 함수를 이용해 골레이 코드를 변조하여 TPE가 최대가 되도록 하였다. 해닝(hanning) 창 함수를 이용하는 경우가 같은 길이를 가지는 기존의 골레이 코드보다 3.09dB정도 높은 TPE를 가진다[8]. 해닝 창함수로 변형시킨 골레이 코드가 TPE나 주엽의 폭, 측엽의 크기 모두에서 초음파 영상에 가장 적합하다. 하지만 해닝 창 함수로 변형시키기 위해서는 임의의 높은 전압의 파형을 만들어 내는 송신 회로가 필요한데 이는 복잡하고 비용도 많이 든다. 따라서 bi-phase rectangular 창 함수를 이용해서 변형된 골레이 코드를 만들면 TPE는 해닝 창 함수를 이용할 때보다 0.39dB정도 작지만 기존의 양극 펄서(bipolar pulser)를 이용해 간단히 송신 회로를 만들 수 있다. bi-phase rectangular 창 함수를 이용해서 변형시킨 길이가 8인 변형된 골레이 코드의 한 쌍은 그림 1과 같다.

## 2.2 직교하는 골레이 코드

( $A_i, 1 \leq i \leq p$ )를 두 종류의 원소로 구성된 유한개의 수열들(sequences)의 집합(set)이라 하고 +1과 -1은 이 수열들의 두 종류의 원소라면 수열들의 상보적인 집합(complementary sets of sequences)의 정의는 다음과 같이 주어질 수 있다[9].  $A_i$ 가 +1이나 -1들의 수

열이라고 하고,  $\Psi_{A_i, A_i}$ 를  $A_i$ 의 자기 상관 함수라고

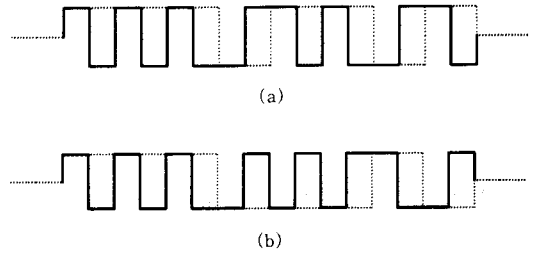


그림 1. 길이 8의 bi-phase rectangular 창 함수를 이용해 변형시킨 골레이 코드. 실선은 변형된 골레이 코드, 점선은 기존의 골레이 코드.

(a) a-type 골레이 코드 (b) b-type 골레이 코드

하자. 또,  $\Psi_{A_i, A_i}(k)$ 는  $\Psi_{A_i, A_i}$ 에서 k번째 원소라고 할 때 다음과 식 (4)와 같은 경우 수열들의 집합인 ( $A_i, 1 \leq i \leq p$ )는 상보적인 집합이라고 한다.

$$\sum_{i=1}^p \Psi_{A_i, A_i}(k) = 0, \quad k \neq 0 \quad (4)$$

$A_i$ 와  $B_i$ 가 +1과 -1들로 된 두 개의 수열이라고 하고  $\Psi_{A_i, B_i}$ 가  $A_i$ 와  $B_i$ 의 교차 상관 함수(crosscorrelation function)  $\Psi_{A_i, B_i}(k)$ 는  $\Psi_{A_i, B_i}$ 의 k번째 원소라고 하자. ( $A_i, 1 \leq i \leq p$ )가 p개 수열들로 된 상보적인 집합이라고 하면, 다음 조건을 만족하는 경우 p개 수열들의 집합인 ( $B_i, 1 \leq i \leq p$ )는 집합 ( $A_i$ )의 메이트(mate)라고 한다.

- 1)  $1 \leq i \leq p$ 에서  $A_i$ 의 길이와  $B_i$ 의 길이가 같다.
- 2) 집합  $B_i$  ( $1 \leq i \leq p$ )는 상보적인 집합이다.
- 3)  $\sum_{i=1}^p \Psi_{A_i, B_i}(k) = 0, \quad \forall k \quad (5)$

모든 k에 대해서,  $\Psi_{A_i, B_i} = \Psi_{B_i, A_i}(-k)$ 이기 때문에 집합 ( $B_i$ )가 집합 ( $A_i$ )의 메이트이면 ( $A_i$ )도 ( $B_i$ )의 메이트이다.

각각의 집합이 p개의 수열들을 포함하는 수열들의 상보적인 집합의 모임(collection)인 (( $A_i$ ), ( $B_i$ ), ..., ( $F_i$ ))가 모임안의 어떤 두 상보적인 집합들도 서로 메이트라면 그 모임은 서로 직교(mutually orthogonal)한다고 한다.

각각의 길이가 L인 상보적인 집합 ( $A_1, A_2$ )을 기저(basis)로 해서 길이가 2L인 상보적인 집합을 만들어낼 수 있다. 직교 행렬인 Hadamard 행렬  $H = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$ 로부터 ( $A_1, A_2, A_1(-A_2)$ )인 상보적인 집합을 만든다.  $A_3 = A_1, A_4 = A_1(-A_2)$ 라고 하면 ( $A_3, A_4$ )는 각 수열의 길이가 2L인 상보적인 집합이다. 이런 식으로 되풀이 해가면서 길이가  $2^n$  ( $n \geq 1$ )인 상보적인 집합을 생성할 수 있고 이 상보적인 집합은 골레이 코드로서 사용할 수 있다[10].

( $A_1, A_2$ )의 mate는 ( $A_2, -A_1$ )가 된다. 이것으로 다음과 같은 기저행렬 G를 구한다.

$$G = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{bmatrix}$$

$$(B_1 = A_2, B_2 = -A_1)$$

여기서  $A_1$ 는  $A_1$ 의 원소의 순서를 거꾸로 배열한

집합을 말한다. 이렇게 해서 열들이 서로 직교하는 상보적인 행렬을 찾을 수 있고, 각 열들은 서로 직교하는 골레이 코드가 된다.

### 2.3 송신 다중 집속 기반의 초음파 영상 기법

제한된 송신 동시 다중 집속 기반의 초음파 영상 시스템을 그림 2와 같이 구성할 수 있다[11].

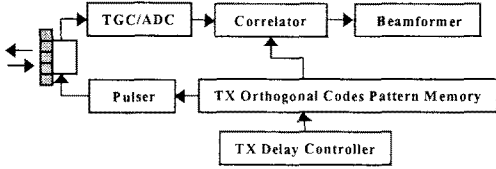


그림 2. 직교 코드를 이용한 송신 동시 다중 집속 기반의 초음파 영상 시스템

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 N개의 채널로 이루어진 펄서(pulsar)들로 전달되어 변환자(transducer)를 통해 송신된다. 송신 집속점에 따라 서로 다른 직교 코드가 사용되므로 각 직교 코드는 다른 지연 패턴을 갖게 되며 시간적으로 차이를 두고 펄서에 인가된다. 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.

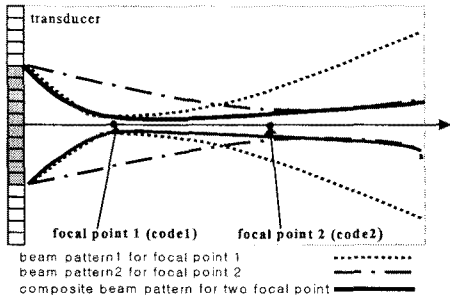


그림 3. 송신 동시 다중 집속 기법의 빔패턴

기존의 골레이 코드는 같은 길이의 상보적인 한 쌍의 코드로 구성되며 두 번의 송·수신과정을 거친 후 한 프레임의 영상을 구성한다. 기존의 골레이 코드를 사용하는 시스템에서는 송신시 하나의 집속점을 사용하므로 집속점을 벗어난 부분에서는 빔이 급격히 퍼지는 현상을 보여 측방향 해상도가 좋지 않다. 따라서 집속점의 개수를 늘려 집속점 부근의 해상도가 좋은 부분만을 합성하여 영상을 구성함으로써 해상도를 향상시킬 수 있다. 이렇게 기존의 골레이 코드를 사용한 경우보다 개선된 측방향 해상도를 얻기 위해 직교 특성을 갖는 두 쌍의 골레이 코드를 설계하여 같은 두 번의 송·수신으로 동시에 두 개의 송신 집속점을 구성할 수 있도록 하였다. 이것은 고정된 송신 집속점으로부터 멀어질수록 해상도가 저하되는 문

제점을 해결하기 위한 것이며 집속 깊이를 확장시킬 수 있다. 즉, 첫 번째 송신 과정에서 서로 직교 특성을 갖는 두 개의 골레이 코드를 각각 다른 집속점에 대해 송신하고, 두 번째 송신과정에서 첫 번째와 상보적인 골레이 코드를 같은 방법으로 송신한 후 각 수신과정에서 이를 분리하는 방법이다. 그림 3은 집속점 2개에 대해서 제한된 송신 동시 다중 집속 기법의 송신 빔패턴을 개념적으로 나타낸다.

### 2.4 모사 실험 및 결과 고찰

모사 실험을 수행하기 위해서 중심주파수가 7.5Mhz이고 -6dB 대역폭이 60%이며, 소자간의 간격이 0.2mm인 192 배열 소자를 갖는 선형 변환자를 사용했고, 64채널 시스템을 사용하였다. 길이 32의 bi-phase rectangular 창 함수를 사용해 변형시킨 골레이 신호를 사용했고, 영상은 8개의 점 반사체(point target)를 구성하였으며, 각 영상들의 동적 범위(dynamic range)를 60dB로 하여 실험하였다.

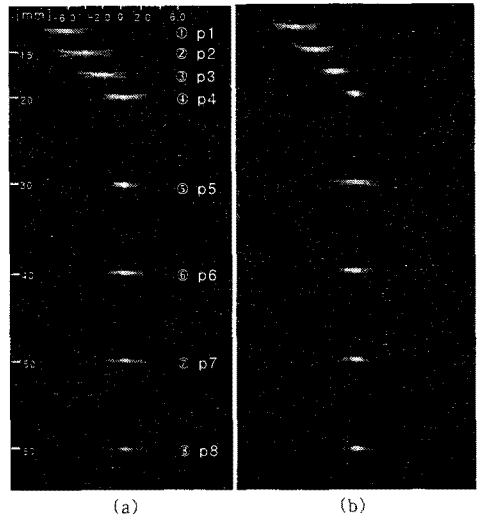


그림 4. (a) 기존의 펄스 시스템과 (b) 동시 다중 집속 시스템의 영상 비교

그림 4는 기존의 영상 방식과 제한한 동시 다중 집속 방법의 영상을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 기존의 펄스 시스템에서 얻은 영상을 나타내고, 그림 4(b)는 본 논문에서 제안한 길이가 32인 직교하는 골레이 코드를 이용한 동시 다중 집속 기법의 시스템에서 얻은 영상을 나타낸다. 그림 4(a)는 펄스를 사용하여 송신시 30mm(p5)에 집속했고, 그림 4(b)는 직교 특성을 갖는 두 쌍의 골레이 코드를 사용하여 송신시 두 곳에 집속하는데 한 쌍은 20mm(p4)에 집속하고 그와 직교하는 다른 한 쌍은 50mm(p7)에 동시에 집속했다. 그림 4(a)는 앞에서 언급했듯이 30mm(p5)의 송신 집속점을 벗어나는 측방향으로 빔폭이 퍼짐에 따라 다른 영상점들은 해상도가 좋지 않다. 그림 4(b)는 송신 집속점인 20mm(p4)와 50mm(p7)부근의 좋은 해상도만을 얻어 합성하기 때문에 측방향 해상도가 향상됨을 알 수 있다. 그림 4(b)에서 두 집속점인 20mm(p4)와 50mm(p7)를 비교해보면 측방향 해상도는 20mm(p4)가 더 좋은 것을 볼 수 있는데 이는 측방향 해상도를 결정짓는 주엽의 폭이 진행되는 깊이에 비례하는 특성을 가지기 때문이다. 또한 그림 4(b)의 경우, 그림 4(a)보다 전체적으로 밝고 뚜렷한 점 반사체의 영상을 볼 수 있다. 이는 골레이 코드와 펄스의 송신 전압은 같더라도

플레이 코드의 압축 특성으로 인해 압축된 신호의 크기가 코드의 길이에 비례해서 증가하기 때문이다. 실제로 식 (3)에서 볼 수 있듯이 길이 32인 플레이 코드를 사용한 경우 펄스를 사용한 경우보다 1/8의 송신 전압을

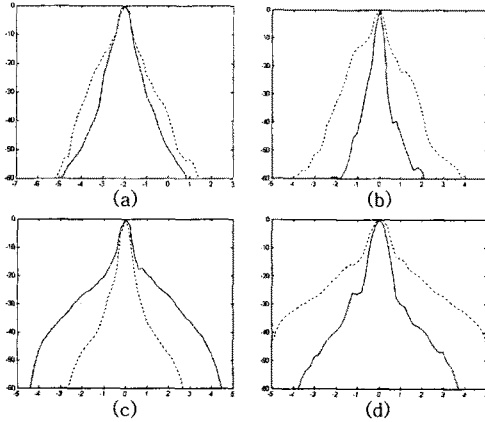


그림 5. 기존의 펄스 기법과 제안된 기법의  
 각 위치에서의 측방향 빔패턴 비교  
 (a)측방향 빔폭(p3) (b)측방향 빔폭(p4)  
 (c)측방향 빔폭(p5) (d)측방향 빔폭(p7)

점선: 기존의 펄스 시스템 / 실선: 동시 다중 집속 시스템

로도 같은 SNR과 선명도(contrast)를 유지할 수 있다. 그림 5는 그림 4(a),(b)에 나타난 영상의 측방향 빔 패턴을 비교해서 로그 스케일(dB)로 나타낸 것이다. 그림 5(a)~(d)는 그림 4의 p3, p4, p5, p7 영상점에서의 측방향 빔 패턴을 나타낸다. 여기에서 점선은 기존의 펄스 시스템을, 실선은 제안한 동시 다중 집속 기법을 나타낸다. 그림 5(c)는 기존의 펄스 시스템의 송신 집속점에서의 측방향 빔패턴을 나타내는데 이 지점을 제외한 영역에서 동시 다중 집속 기법이 더 좋은 측방향 빔패턴을 나타내는 것을 볼 수 있다. 측방향 빔패턴의 경우 제안된 기법은 압축특성으로 인해서 기존의 펄스 기법과 거의 동일하다.

### 3. 결 론

기존의 플레이 코드를 송신 신호로 사용하는 시스템은 플레이 코드의 상보적인 특성으로 인해 수신시 상관기를 이용해 짧은 펄스로 압축할 수 있다. 더욱이 압축된 신호의 SNR은 플레이 코드의 길이에 비례하여 증가시킬 수 있다. 하지만 실제 초음파 영상에서 플레이 코드는 이론적인 값보다 작은 SNR을 가지며 초음파 변환자의 대역폭에 정합되지 않아 의료용 초음파 영상 장치에 적합하지 않다. 변형된 플레이 코드는 기존의 플레이 코드를 초음파 변환자의 대역폭에 정합되도록 변조시켜서 실제 SNR을 향상시킬 수 있고 TPE를 최대로 할 수 있다.

본 논문에서 제안한 직교하는 변형된 플레이 코드를 이용한 동시 다중 집속 기반의 초음파 영상 기법은 프레임 속도의 저하없이 기존의 플레이 코드를 사용한 것보다 개선된 측방향 해상도를 제공한다. 이를 위해 직교 특성을 갖는 두 쌍의 플레이 코드를 설계하여 기존의 플레이 코드와 같은 두 번의 송·수신으로 동시에 두 개의 송신 집속점을 구성할 수 있다. 수신 과정에서 직교 특성을 갖는 플레이 코드를 분리하고 압축할 수 있으며, 송신 집속점 부근의 좋은 해상도의 영상을 합성한다. 이것은

송신시 집속할 수 있는 집속점의 개수가 증가함을 의미하며 고정된 송신 집속점으로부터 멀어질수록 해상도가 저하되는 문제점을 해결할 수 있다.

길이 32인 플레이 코드의 이론적인 GSNR은 식(2)에 의해 18.06dB이 되므로 잡음이 있는 실제 시스템에서는 기존의 펄스를 사용하는 시스템보다 해상도가 더 좋다. 제안된 기법은 기존의 펄스보다 적은 전력을 소모하면서도 더 좋은 해상도를 가질 수 있어서 전력 용량에 제한이 있는 휴대용의 이동식 초음파 시스템에 응용되어 연구가 진행중이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] A. Macovski, Medical Imaging System, Prentice-Hall, 1983.
- [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] 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, May 1992.
- [4] Tai K. Song and Song B. Park, " A new digital array system for dynamic focusing and steering with reduced sampling rate", Ultrasound Imaging, Vol. 12, pp.1~16, 1990.
- [5] Sverre Holm and Hongxia Yao, "Improved Frame rate with Synthetic Transmit Aperture Imaging Using Prefocused Subapertures", IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, vol 2, pp.1535-1538, 1997.
- [6] 유양모, 이한희, 송태경, "Modulated Golay sequences를 이용한 펄스 압축 기법", 대한의용생체공학회 제 21회 추계 학술대회 논문집, pp. 198-199, 1999.
- [7] Laurence R. Welch and Martin D. Fox, "Practical Spread Spectrum Pulse Compression for Ultrasonic Tissue Imaging", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 45, pp. 349-355, 1998.
- [8] Yang Mo Yoo, Woo-Yul Lee, Tai-Kyong Song, "A Low Voltage Portable System using a Modified Golay Sequences", IEEE-UFFC Symposium, Atlanta, October 7-10, 2001.
- [9] C.-C. TSENG, C. L. LIU, "Complementary Sets of Sequences", IEEE Trans. on Infor. Theo. Vol IT-18, no5, pp. 644-652, 1972.
- [10] Richard Y. Chiao and Lewis J. Thomas, "Synthetic Transmit Aperture Imaging Using Orthogonal Golay Coded Excitation", IEEE International Ultrasonics Symposium, Puerto Rico, October 22-25, 2000.
- [11] 정영관, 송태경, "가중된 직교 선형 FM신호를 이용한 송신 동시 다중 빔 집속 기반의 초음파 영상 기법", 대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집 4, Vol 24, No.1, pp. 155-158, 2001.