

가중된 직교 선형 FM신호를 이용한 송신 동시 다중 빔집속 기반의 초음파 영상 기법

정영관, 송태경
서강대학교 전자공학과
전화 : 02-707-3007 / 핸드폰 : 011-753-9195

Simultaneous Multiple Transmit Focusing Using Orthogonal Weighted Linear FM Chirp

Young Kwan Jeong, Tai-Kyong Song
Dept. of Electronic Engineering, Sogang University
E-mail : vin123@hanmail.net

ABSTRACT

A new method for simultaneous multiple transmit focusing using orthogonal weighted FM chirp is proposed. Weighted chirp signals focused at different depths are transmitted at the same time. These chirp signals are mutually orthogonal in the approximate sense that the autocorrelation function of each signal has a narrow mainlobe width and low sidelobe levels, and the crosscorrelation function of any pair of the signals has smaller values than the sidelobe levels of each autocorrelation function. This means that each weighted chirp signal can be separately compressed into a short pulse, focused individually and combined with other focused beams to form a frame of image. Theoretically, any two chirp signals defined in two nonoverlapped frequency bands are mutually orthogonal. In the present work, however, a fractional overlap of adjacent frequency bands, by up to 25%, were permitted to design more chirp signals within a given transducer bandwidth. The crosscorrelation values due to the frequency overlap could be reduced by alternating the direction of frequency sweep of the adjacent chirp signals. The simulation results show that this method can improve the lateral resolution of image without sacrifice in the frame rate compared with the conventional pulse system.

1. 서론

초음파 영상 장치는 다른 영상 장치에 비해서 실시간으로 영상을 구성할 수 있으며, 디지털 기술에 의한 빔집속 방식의 발달에 따라 해상도가 비약적으로 향상되어서 최근에 의료용 진단기, 음파 탐지기, 비파괴 검사기로 많이 사용되고 있다. 영상의 해상도를 증대시키기 위한 노력으로써, 1980년대에 배열 변환자를 이용한 송신 고정 집속(fixed focusing)과 수신 동적 집속(dynamic focusing) 방식이 사용되었다.

하지만 송신시 고정 집속의 영향으로 수신 집속면에서 멀어질수록 해상도가 저하되는 문제점을 지니고 있다[1]. 1990년대에는 더욱 개선된 영상을 얻기 위하여 양방향 동적 집속이 가능한 합성구경기법(synthetic aperture techniques)이 연구 개발되었다. 하지만 합성구경기법들은 한 개의 주사선을 얻기 위해 여러 번의 송·수신 과정을 거쳐야 하므로 데이터 획득 시간이 길어지게 되고, 그 결과 대상체의 움직임으로 인한 위상 왜곡(phase distortion) 현상이 나타나기 쉽다. 또한 단일 소자를 사용하여 송신할 경우 신호 대 잡음비(SNR)가 낮은 단점을 가지고 있다[2]. 송신 고정 집속의 문제점을 해결하는 다른 방법으로, 송신시의 집속점을 변화시켜 얻은 여러 영상들을 합성하여 하나의 영상을 얻는 다중 송신 집속 방법(composite zone focusing)도 제안되었으나, 그 송신 집속점 개수에 따라 송신 횟수가 늘어나므로 프레임율이 저하되는 단점이 있다[3].

본 논문에서는 프레임율의 저하없이 개선된 해상도를 얻기 위한 방법으로 송신 동시 다중 빔집속 기법(simultaneous multiple transmit focusing method)을 제안한다. 제안된 기법은 집속 위치들에 대한 각각의 지연 패턴을 갖는 여러 개의 직교 선형 FM(orthogonal linear chirp) 신호들을 동시에 송신하고, 수신시 이를 집속 위치별로 분리해서 좋은 해상도의 영상을 구성하는 방법이다. 송신시 동시에 여러 위치에 빔을 집속하기 위해서 사용된 칩(chirp) 신호들은 서로가 직교 특성(orthogonal property)을 갖도록 설계되었고, 수신된 신호는 정합 과정을 통하여 각각의 송신 집속 위치에 따라 분리된다. 더욱이 상관기를 이용한 정합 과정에서 신호가 압축되기 때문에 펄스 압축 기법에서 얻는 신호 대 잡음비를 증가시키는 이점이 있다[4]. 이러한 목적을 위하여 좋은 상관 특성(correlation property)을 갖는 직교 칩 신호를 설계하는 방법을 제시하였고, 이 신호를 이용한 초음파 영상 진단 시스템을 설계했으며, 이를 모사 실험을 통하여 기존의 방법으로 얻은 영상과 비교 검증하였다.

II. 직교 칩 신호를 이용한 송신 동시 다중 빔집속 기반의 초음파 영상 시스템

제안된 송신 동시 다중 빔집속 기반의 초음파 영상 시스템을 그림 1과 같이 구성할 수 있다. 사용자

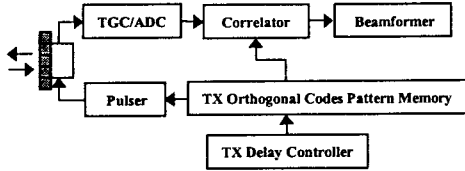


그림 1. 직교 코드를 이용한 송신 동시 다중 빔집속 기반의 초음파 영상 시스템

가 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 따라서 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 깊이 에 따라 영상을 합성하여 하나의 영상을 구성하게 된다.

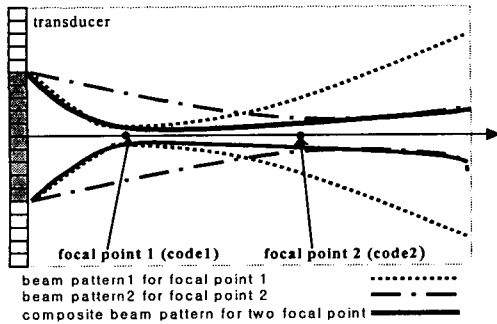


그림 2. 송신 동시 다중 빔집속 기법의 빔패턴

기존의 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. 기존의 방법으로 여러 개의 송신 집속점을 구성하기 위해서는 집속점 수만큼 송·수신 횟수가 늘어나기 때문에 프레임율이 저하된다. 만일 프레임율을 저하없이 여러 집속점에 집속된 송신 신호들을 한번에 송신하고 수신시 각 신호

들을 분리할 수 있다면 개선된 영상을 구성할 수 있을 것이다. 그림 2는 본 논문에서 제안한 송신 동시 다중 빔집속 기법의 송신 빔패턴을 집속점 2개의 예를 들어 개념적으로 설명해 주고 있다. 코드 1을 집속점 1에, 코드 2를 집속점 2에, 동시에 송신 집속하고, 직교 코드 특성을 이용하여 각각을 분리하면 빔패턴 1과 빔패턴 2를 얻을 수 있다. 각 송신 집속점 부근의 좁은 빔폭만으로 두 빔패턴을 합성하면 합성된 빔패턴이 그림 2와 같이 나타나고, 그 결과 측방향 해상도가 증대된다. 수신시 이렇게 동시에 송신했던 신호들을 분리하기 위해서는 송신 코드들이 직교 특성을 갖도록 설계되어야 하는데, 그 방법을 다음에 제시하였다.

III. 직교(orthogonal) 특성을 갖는 선형 FM 신호(chirp) 설계

칩 신호는 식 (1)에 나타난 것처럼 각 주파수 ω 가 $\omega = \omega_0 + \mu t$ 와 같이 시간에 따라 선형적으로 변하는 신호이다.

$$s(t) = Aw(t)e^{j(\omega_0 t + \frac{\mu}{2} t^2)} \quad (1)$$

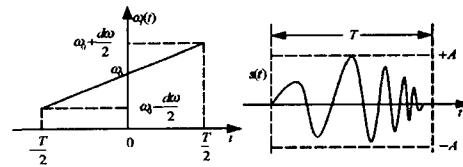


그림 3. 가중된 chirp 신호의 특성

여기에서 A는 임의의 진폭이고, ω_0 는 칩 신호의 중심 각 주파수를 나타낸다. μ 는 각 주파수의 변화량을 나타내고, $w(t)$ 는 송신되는 칩 신호의 포락선(window)을 나타내며, 시간에 따라 선형적으로 변하는 각 주파수와 윈도우로 가중된 칩 신호의 파형을 그림 3에 나타냈다. 상관기를 통과시켜 압축시킨 칩 신호의 주엽폭(mainlobe width)은 변화하는 주파수의 대역폭에 반비례하며, 주엽과 측엽(sidelobe levels)은 가중시킨 윈도우의 종류에 따라 달라지게 된다. 따라서 주파수의 대역폭과 사용된 윈도우의 선택은 신호를 설계하는데 중요한 요소가 된다[5-6].

송신시 동시에 각 집속점에 집속된 신호들을 분리하기 위해서는 사용된 신호들이 서로 직교 특성을 가져야 가능하다. 제안한 기법에서는 좋은 압축 특성과 직교 특성을 갖는 칩 신호를 송신 신호로 사용하는데, 칩 신호는 제한된 대역폭을 가지는 초음파 변환자의 주파수 스펙트럼과 잘 정합되는 특성을 가지고 있고, 원하는 주파수 대역을 갖도록 신호를 설계할 수 있는 특성이 있다. 이상적인 경우, 제안된 시스템에서 정합 과정을 통과한 신호가 아래 식 (2)와 같은 특성을 갖도록 송신 신호들을 설계해야 한다.

$$s_i(t) * s_j(-t) = \begin{cases} \delta(t), & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

where $s_i(t), s_j(t)$: 신호

가중된 직교 선형 FM신호를 이용한 송신 동시 다중 빔집속 기반의 초음파 영상 기법

실제적인 경우 정합 과정으로 상관기를 사용하는데, 칩의 자기상관(autocorrelation) 결과는 임펄스 함수 같이 표현되지는 않지만, 주파수 대역폭에 비례해서 좁은 폭의 펄스를 얻을 수 있다. 상관기를 통과한 후 칩 신호들을 분리시키기 위해서는 설계된 각 칩 신호가 서로 겹치지 않는 주파수 대역의 신호여야만 가능하다. 상관기와 수신 신호의 상관 결과는 주파수 평면에서 볼 때 두 신호의 스펙트럼의 곱으로 표현될 수 있기 때문에, 겹치지 않는 주파수 대역폭을 갖는 두 신호의 상관결과는 '0'으로 나타난다. 하지만 제한된 주파수 대역을 너무 많이 나누어 신호를 설계하게 되면 각 신호가 갖는 주파수 대역은 상대적으로 줄어들게 되고, 줄어든 주파수 대역으로 인해서

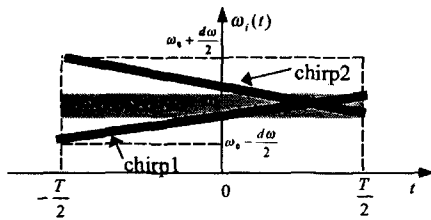


그림 4. 직교 특성을 갖는 칩 신호 설계

상관기를 거친 압축된 신호의 주엽폭이 증가하게 된다. 이는 초음파 영상의 측방향 해상도에 좋지 않은 영향을 미치므로 많은 수의 신호를 사용할 수는 없다. 그러므로 제한된 변환자 대역폭을 나누는 방법에 따라 변환자 소자 방향으로의 측방향 해상도(lateral resolution)와 깊이 방향으로의 측방향 해상도(axial resolution)가 결정된다.

따라서 신호를 설계할 때 각 신호의 대역폭을 가능한 최대로 하고, 신호간의 상관도를 최소로 하여 서로를 분리해 낼 수 있도록 하는 것이 무엇보다 중요하다. 예를 들어 두 신호를 설계하는 방법을 그림 4에 표현했다. 그림 4를 보면 변환자의 주파수 대역을 두 부분으로 나누어 두 신호 칩 1과 칩 2를 생성했는데, 각 주파수 대역을 어느 정도 겹침으로써 각이 갖는 대역폭을 증가시켰다. 이러한 대역 겹침은 교차 상관(crosscorrelation)값이 의료 영상 시스템에서 요구되는 -40dB이하의 측엽을 얻을 수 있는 한도 내에서 이루어져야 한다.

보통, 대역 겹침의 정도는 신호의 대역폭과 신호에 사용되는 윈도우에 따라 다르지만, 모사실험 결과에 의하면 각 신호 대역폭의 25%정도의 대역폭 겹침은 허용할 만 하였다. 본 논문에서는 또한 이와 같이 신호를 설계하는데 있어서 대역 겹침에 의한 측엽 상승을 억제할 수 있는 방법을 제안하였다. 그림 4에서와 같이 칩 1은 시간이 증가할수록 주파수가 저주파에서 고주파로 증가하는 신호이고, 칩 2는 시간이 증가할수록 주파수가 고주파에서 저주파로 감소하는 신호이다. 이와 같은 방법으로 주파수가 겹쳐있는 부분에서 신호간의 상관도를 줄일 수 있다.

각각의 칩 신호에 따른 집속 위치의 선택도 중요하다. 주파수 대역에 따라 측방향 해상도가 영향을 받기 때문이다[7]. 측방향 해상도를 결정짓는 주엽의 폭 ω (mainlobe null point)를 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$\omega = \frac{\lambda z}{D} = \left(\frac{v}{f}\right) \frac{z}{D} \quad (3)$$

여기에서 λ 는 파장을, z 는 진행하는 깊이를, D 는 변환자의 구경(aperture)길이를, v 는 초음파의 속도를, f 는 주파수를 각각 의미한다. 주엽폭은 주파수와 반비례하고 깊이에 비례하므로, 고주파일수록, 깊이가 얕을수록, 측방향 해상도는 더 좋아진다. 따라서 깊이에 따라 영상의 측방향 해상도의 질을 일정하게 유지하기 위해서는 저주파 성분을 얇은 지역(near field)에 고주파 성분을 깊은 지역(far field)에 집속하여 영상을 구성할 수 있는데, 이러한 방법은 기존에 고주파수에 의한 감쇄의 영향을 줄이기 위해 얇은 지역에 고주파신호를 사용하는 방법과 반대적이며, 변환자 소자가 λ 보다 클때 생기는 그레이팅 로브(grating lobe)의 제거에도 도움이 된다. 진행하는 깊이에 따라 신호가 약해지므로, 깊은 지역에서 고주파 성분의 신호에 의한 그레이팅 로브는 보이지 않게 된다. 위와는 반대로 저주파 성분을 깊은 지역에 고주파 성분을 얇은 지역에 집속하여 영상을 구성한 경우는 깊이에 따라 해상도가 나빠지는 현상을 보인다. 이러한 결과를 뒤에 모사 실험에 나타내었다.

현재의 변환자 제조 기술이나 특성을 고려한다면 2~4개의 서로 다른 직교 칩 신호를 생성하여 영상을 얻어낼 수 있다. 그러나 변환자 제조 기술의 발전으로 광대역 변환자가 가능해지면서 사용될 수 있는 칩 신호의 개수는 증가할 것이며, 그에 비례하여 영상의 해상도도 증대될 것이다.

IV. 모사 실험 및 결과 고찰

모사 실험을 수행하기 위해서 중심주파수가

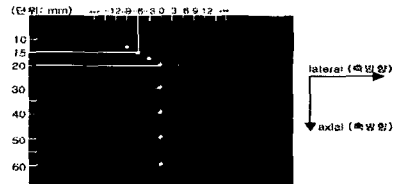


그림 5. 모사 실험 영상의 구성도

7.5Mhz이고 -6dB 대역폭이 80%이며, 소자간의 간격이 0.3mm인 128 배열 소자를 갖는 선형 변환자를 사용했고, 64채널 시스템을 사용하였다. 모든 칩 신호는 해닝(hanning) 윈도우로 가중 시켰고, 영상은 8개의 전반사체(target)를 구성하였으며, 각 영상들의 동적 범위(dynamic range)를 60dB로 하여 실험하였다. 그림 5는 모사 실험 영상의 전반사체 구성도를 나타낸 것이다.

그림 6은 각 시스템에서 얻은 영상 결과를 비교하여 나타낸 것이다. (a)는 기존의 펄스 시스템에서 얻은 영상을 나타낸다. (b), (c), (d)는 제안된 송신 동시 다중 빔집속 시스템에서 얻은 영상을 나타낸다. (a)는 펄스를 사용하여 송신시 30mm에 집속했고, (b)와 (c)는 직교 특성을 갖는 두 개의 칩 신호를 사용하여 송신시 20mm와 50mm 두 곳에 동시에 집속했다. 칩 1은 4.5Mhz~8Mhz로 주파수가 증가하는 신호이고, 칩 2는 10.5Mhz~7Mhz로 주파수가 감소하는 신호이다. (b)는 칩 1을 20mm에 칩 2를 50mm에 집속했고, (c)는 반대로 칩 1을 50mm에 칩 2를

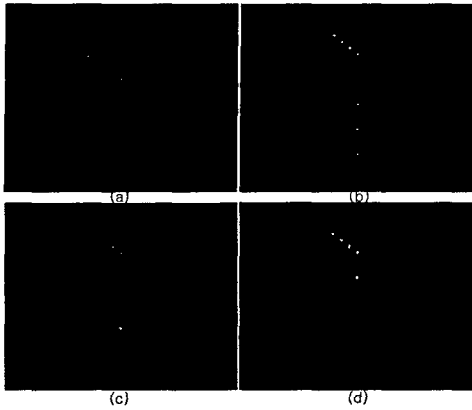


그림 6. 각 시스템의 영상 비교

(a) 기존의 펄스 시스템 (b),(c),(d) 송신 동시 다중 빔집속 시스템
 (b) high frequency : far field / low frequency : near field
 (c) high frequency : near field / low frequency : far field
 (d) high freq : far field / mid freq : middle field / low freq : near field

20mm에 집속했다. (d)는 17.5mm와 30mm와 50mm 세 곳에 칩 1(6.75Mhz~3.75Mhz)과 칩 2(6Mhz~9Mhz)와 칩 3(11.25Mhz~8.25Mhz)을 동시에 집속한 결과이다. (b)는 (a)와 비교해 볼 때, 측방향 해상도는 약간 떨어지나, 측방향 해상도는 매우 좋아졌음을 볼 수 있다. 즉, (a)는 앞에서 언급했듯이, 30mm의 송신 집속점을 벗어나서는 측방향으로 빔폭이 퍼짐에 따라 다른 영상점들은 해상도가 좋지 않다. 하지만 (b)는 송신 집속점인 20mm와 50mm 부근의 좋은 해상도만을 얻어 합성하기 때문에 측방향 해상도가

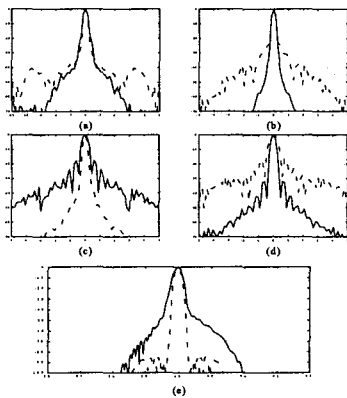


그림 7. 기존의 펄스 기법과 제안된 기법의 각 위치에서의 측방향 및 측방향 빔패턴 비교

(a) 측방향 빔 폭(-6mm, 15mm) (b) 측방향 빔 폭(0mm, 20mm)
 (c) 측방향 빔 폭(0mm, 30mm) (d) 측방향 빔 폭(0mm, 50mm)
 (e) 측방향 빔 폭(0mm, 30mm)
 점선: 기존의 펄스 시스템 실선: 송신 동시 다중 빔집속 시스템

매우 향상됨을 볼 수 있다. (b)는 앞에서 설명한 대로 깊이에 따라 측방향 해상도가 일정함을 볼 수 있지만, (c)는 앞의 쪽에서는 (b)보다 더 좋은 측방향 해상도를 보이거나 깊은 쪽으로 갈수록 해상도의 질이 나빠지는 현상을 발견할 수 있다. 게다가 (c)에서는 앞의 지역에서 그레이팅 로브가 관찰되지만, (b)에서는 제거됨을 확인할 수 있다. (d)는 송신 집속점을

세 개로 늘렸기 때문에 측방향 해상도가 더 좋아졌음을 볼 수 있으며, 물론 그에 따라 각 신호의 주파수 대역폭이 감소했으므로 측방향 해상도는 약간 떨어짐을 확인할 수 있다.

그림 7은 그림 6에 나타낸 (a), (b)영상의 측방향 빔패턴과 측방향 빔패턴을 비교해서 로그 스케일(dB)로 나타낸 것이다. 그림 7의 (a), (b), (c), (d)는 그림 5의 ②, ④, ⑤, ⑦ 영상점에서의 측방향 빔패턴을 나타내며, (e)는 ④ 영상점에서의 측방향 빔패턴을 나타낸다. 여기에서 점선은 기존의 펄스 시스템을, 실선은 제안한 송신 동시 다중 빔집속 기법을 나타낸다. 그림 7의 (c), 즉, 기존의 펄스 시스템에서의 송신 집속점을 제외한 영역에서의 측방향 빔패턴은 송신 동시 다중 빔집속 기법이 월등히 좋음을 확인할 수 있다. (e)에 나타낸 측방향 빔폭은 앞에서 언급했던 대로 늘어나 있지만, 측엽 범위 -40dB내에서는 허용할 만하다.

V. 결론

본 논문에서 제안한 새로운 초음파 영상 기법은 프레임율의 저하없이 상당히 개선된 측방향 해상도를 제공한다. 측방향 해상도에 대한 큰 손실 없이 주파수 대역을 분할하여 얻은 칩 신호로 동시에 송신 다중 집속점을 구성할 수 있다. 수신과정에서 상관기를 이용하여 직교 특성을 갖는 칩 신호를 분리하고 압축할 수 있으며, 송신 집속점 부근의 좋은 해상도의 영상을 합성하는 기법이다. 칩은 긴 코드를 송신하고 수신시 압축하는 펄스 압축 기법을 사용하기 때문에 신호 대 잡음비 관점에서도 좋은 특성을 갖는다. 또한 광대역 변환자의 사용이 가능해 진다면 사용할 수 있는 주파수 대역이 증가해 설계할 수 있는 직교 칩 신호의 개수도 증가하게 된다. 이것은 송신시 집속할 수 있는 집속점의 개수가 증가함을 의미하고, 따라서 같은 프레임율로 송신시 동적 집속에 가까운 영상을 얻을 수 있다.

제안된 기법은 프레임율의 저하없이 고도 방향 해상도(elevational resolution)를 증가시키는데 사용될 수 있으며, 현재 1.5D 배열 변환자에 적용시키는 연구가 진행중이다.

참고문헌(Reference)

- [1] T. K. Song and S. B. Park, "A new digital array system for dynamic focusing and steering with reduced sampling rate", *Ultrason. Imaging*, vol. 12, pp. 1-16, 1990.
- [2] 송태경, "초음파 선형주사 영상을 위한 합성구경 기법의 해석", 대한의공학회지, 제20권, 제4호, pp. 503-513, 1999. 8.
- [3] 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.
- [4] Matthew O'Donnell, "Coded Excitation System for Improving the Penetration of Real-Time Phased-Array Imaging", *IEEE Trans. on UFFC*, Vol 39, No.3, May 1992.
- [5] Peyton Z. Peebles, JR., "Radar Principles", Wiley Interscience Publication, 1998.
- [6] 정영관, "가중 칩 신호를 이용한 펄스 압축 방식의 초음파 영상 시스템", 제22회 대한의용생체공학회 춘계학술대회는논문집, 제22권, 제1호 pp.83-84, 2000.5.
- [7] J. A. Hossack, "Extended Focal Depth Imaging for Medical Ultrasound", *IEEE Ultrasonics Symp. Proceedings*, vol 2, pp. 1535 -1540, 1996.