Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol.53, NO.6, June 2016 http://dx.doi.org/10.5573/ieie.2016.53.6.167
ISSN 2287-5026(Print) / ISSN 2288-159X(Online)

논문 2016-53-6-18

압축 센싱을 이용한 주파수 영역의 초음파 감쇠 지수 예측

(Estimation of Ultrasonic Attenuation Coefficients in the Frequency Domain using Compressed Sensing)

심 재 윤*, 김 형 석*

(Jaeyoon Shim and Hyungsuk Kim©)

요 약

압축 센싱은 기존의 새넌/나이키스트 이론보다 낮은 샘플링률로 신호를 샘플링 하여도 원신호로 복원할 수 있다는 이론이다. 본 논문에서는 압축 센싱을 이용하여 반향 신호의 정량적 주파수 특성을 직접 추출하여 이를 이용한 초음파 감쇠 지수 예측 방법을 제안한다. 일반적인 초음파 감쇠 지수 예측 방법들은 시간 영역에서 수집된 반향 신호를 Fourier 변환 등을 통해 주파수 영역으로 변환하는데, 제안하는 예측 방법은 압축 센싱으로 수집된 데이터를 복원하는 과정에서 적용하는 basis 행렬을 이용하여 시간 영역으로의 완전한 신호 복원 없이 반향 신호의 주파수 특성을 직접 추출하여 감쇠 지수를 예측한다. 3가지의 basis 행렬을 통해 주파수 영역에서 복원된 반향 신호에 대하여 다중 참조 신호를 이용한 Centroid Downshift 방법으로 감쇠 지수를 예측하여 각각의 예측 정확도와 실행 시간을 비교 분석하였다. 컴퓨터 모의 실험 결과 이산 코사인 변환(DCT) 행렬을 적용하는 경우, 50%의 압축률에서는 압축 센싱을 적용하지 않은 경우와 0.35% 이내의 예측 정확도를 보였으며, 압축률을 70%까지 높이는 경우에도 약 6% 이내의 평균 예측 오차를 보였다. 제안한 압축 센싱을 적용한 반향 신호의 주파수 특성 추출 방법은 향후 주파수 영역의 다른 정량적 초음파 분석 방법에 적용할 수 있다.

Abstract

Compressed Sensing(CS) is the theory that can recover signals which are sampled below the Nyquist sampling rate to original analog signals. In this paper, we propose the estimation algorithm of ultrasonic attenuation coefficients in the frequency domain using CS. While most estimation algorithms transform the time-domain signals into the frequency-domain using the Fourier transform, the proposed method directly utilize the spectral information in the recovery process by the basis matrix without the completely recovered signals in the time domain. We apply three transform bases for sparsifying and estimate the attenuation coefficients using the Centroid Downshift method with Dual-reference diffraction compensation technique. The estimation accuracy and execution time are compared for each basis matrix. Computer simulation results show that the DCT basis matrix exhibits less than 0.35% estimation error for the compressive ratio of 50% and about 6% average error for the compressive ratio of 70%. The proposed method which directly extracts frequency information from the CS signals can be extended to estimating for other ultrasonic parameters in the Quantitative Ultrasound (QUS) Analysis.

Keywords : ultrasound, attenuation, centroid downshift method, compressed sensing, basis matrix

Ⅰ. 서 론

다양한 의료 초음파 지수 중 감쇠 지수(attenuation coefficient)는 초음파 대상 조직(tissue)의 병리학적 상태와 밀접한 연관이 있고, 초음파의 속도, 반향 산란자의 크기 및 밀도, 조직의 탄성도 등 다른 의료 초음파 지수들의 분석에 있어서 중요한 정보를 제공한다[1~4]. 하지만 기존의 TGC (time-gain compensation) 방법은 단순하게 전송 깊이에 따른 반향 신호의 지수적 감쇠량만을 보상하는 방법으로 실제 조직의 감쇠 특성에 의한 enhancement 효과와 shadowing 효과 등의 단점을 피할 수 없었다[5]. 따라서 이러한 초음파 감쇠 지수의 정확한 예측을 통해 정량적 초음파 분석의 정확성을 높일 수 있는 많은 방법들이 연구되어 왔다. 지금까지 발표된 초음파 감쇠 지수 예측 방법은 크게 주파수 영역에

* 정회원, 광운대학교 전기공학과
(Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University)
© Corresponding Author (E-mail : hskim@kw.ac.kr)
Received ; April 15, 2016 Revised ; May 22, 2016
Accepted ; May 31, 2016

서의 예측방법과 시간 영역에서의 예측 방법으로 나눌 수 있다.

시간 영역에서의 감쇠 지수 예측 방법으로는 반향 신호의 주파수와 밀접한 관계가 있는 zero-crossing density를 계산하여 깊이에 따른 반향신호의 주파수 변화를 측정하거나[6], 반향신호의 envelop 부분 최고치를 이용하여 이의 감쇠에 따른 신호의 차이를 예측하는 방법[7], 인접한 반향신호의 엔트로피(entropy) 차이를 이용한 감쇠 지수 예측방법[8] 등이 발표되어 왔다.

주파수 영역에서의 감쇠 지수 예측 방법으로 Yao 등은 감쇠 특성을 미리 알고 있는 참조(reference) 신호를 이용하여 트랜스듀서의 하드웨어적인 특성과 음파의 회절 현상을 효과적으로 상쇄하는 비교적 간단하고 정확한 감쇠 지수 예측 방법을 개발하였다[9]. Kasai 등은 Hilbert 변환을 이용한 complex baseband를 활용하여 시간 영역에서 centroid를 계산하여 계산의 효율성을 높였다[10]. Fink 등이 제안한 centroid downshift method(CDM)는 초음파 반향 신호의 블록 파워 스펙트럼 centroid를 계산하여 깊이에 따른 centroid의 변화량을 이용한 방법이다[11].

이러한 감쇠 지수 예측 방법들은 측정 대상의 초음파 측정 데이터를 전부 사용하여 감쇠 지수를 예측하므로 모든 반향 신호를 저장해 놓고 있어야하기 때문에 대용량의 저장 공간이 필요하고, 의료 초음파 신호의 특성상 높은 주파수 해상도를 위해 섀넌/나이키스트 샘플링률 보다 높은 샘플링 주파수를 적용하는 경우가 일반적이다. 또한 최근 의료 초음파 진단기기 부분에서 이동이 용이하고, 간편하게 사용할 수 있는 포터블 의료기기에 대한 연구도 이루어지고 있어 소형화, 경량화에 따른 하드웨어의 크기 및 비용을 줄이는 연구의 필요성이 높아지고 있다.

최근 다양한 신호처리 분야에서 연구되고 있는 압축 센싱(compressed sensing) 기법은 섀넌/나이키스트 샘플링률 보다 적은 샘플 데이터로부터 원래의 신호를 복원할 수 있어 의료 영상 신호처리 분야를 중심으로 활발하게 적용되고 있다[12]. 의료 초음파 신호처리 분야에서도 마찬가지로 B-mode 영상 처리에 있어서 압축 센싱을 적용하여, 획득 시간을 개선하고 데이터 저장 공간을 효율적으로 사용하고자 하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[13]. 압축 센싱을 통해 초음파 데이터 측정 단계에서 샘플링 주파수를 낮추고 데이터 저장 공간을 효율적인 활용할 수 있다면 의료 초음파 신호 처리 분야의 많은 응용 분야에 상당 부분 기여할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 압축 센싱을 통해 획득한 반향 신호를 이용하여 초음파 감쇠 지수를 예측할 수 있는 알고리듬을 제안한다. 제안하는 감쇠 지수 알고리듬은 시간 영역의 반향 신호를 Fourier 변환하여 전송 깊이에 따른 파워 스펙트럼의 중심 주파수(centroid) 변화를 이용하는 CDM[11]을 기반으로 한다. 전형적인 CDM은 압축 센싱으로 수집된 적은 개수의 데이터를 복원 과정을 통해 시간 영역의 전체 신호를 복원하고 이를 Fourier 변환하여 주파수 영역에서 중심 주파수를 계산하게 된다. 하지만 본 논문에서 제안하는 방법은 압축 센싱의 복원하는 과정에 적용하는 basis 행렬을 이용하여 시간 영역으로의 완전한 신호 복원 없이 반향 신호의 주파수 특성을 직접 추출하여 중심 주파수를 계산한다. 제안하는 방법은 압축 센싱된 신호의 완전한 복원이 필요 없어 신호의 측정에서 낮은 샘플링률을 적용할 수 있을 뿐만 아니라 연산의 수행시간에서도 장점을 갖는다. 컴퓨터 모의 실험으로 3개의 basis 행렬을 적용해 감쇠 지수를 예측하고 각각의 예측 정확도와 실행 시간을 비교 분석하였다.

본 논문의 구성은 이어지는 2장에서 감쇠 지수 예측을 위한 다중 참조신호를 이용한 centroid downshift 방법을 간단히 설명하고, 압축 센싱 이론과 본 논문에서 제안하는 복원 과정의 주파수 특성 추출 방법에 대해 설명한다. 3장에서는 모의 실험을 통해 3가지 다른 basis 행렬을 적용한 감쇠 지수 예측 결과에 대해 예측 정확도와 연산 시간 관점에서 비교 분석한다. 마지막 4장에서는 정량적 초음파 분석에서의 압축 센싱 적용의 의미와 향후 응용 분야에 대해 서술한다.

Ⅱ. 본 론

1. 다중 참조신호를 이용한 감쇠 지수 예측 방법

주파수 영역에서의 감쇠 지수 예측 방법 중 spectral shift를 이용하는 방법은 초음파의 진행 깊이에 따른 중심 주파수의 변화를 통해 감쇠 지수를 예측하는 방법이다[14]. 임의의 깊이에서 반향된 초음파 신호의 파워 스펙트럼은 Gaussian 형태를 띠며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$P(z,f) = S_0 \bullet \exp\left\{-\frac{(f-f_z)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (1)$$

식 (1)에서 S_0는 초기의 전송 파워 상수이고 f_z와 σ^2는 임의의 깊이 z에서의 반향 신호의 중심 주파수와 variance를 나타낸다. 이때 σ^2를 상수로 가정하면 반향 신호의 형태는 변하지 않는다[14].

일반적인 인체 조직에서의 감쇠 특성인 선형 주파수 선택적 감쇠를 가정하면, 임의의 깊이 z_1과 z_2에서 반향 신호의 파워 스펙트럼은 서로 다른 중심 주파수를 가진 Gaussian 형태를 유지한다. 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$f_{z2} = f_{z1} - 2\sigma^2\beta(z_2 - z_1) \tag{2}$$

식 (2)에서 f_{z1}과 f_{z2}는 임의의 깊이 z_1과 z_2에서의 중심 주파수이고, β는 깊이 z_1과 z_2 사이의 감쇠 지수 (attenuation coefficient)로서 dB/cm/MHz (또는 Neper/cm/MHz) 단위로 표현할 수 있다.

Fink는 이와 같은 spectral shift 방법을 기반으로 전체 전송 깊이를 작은 segment로 나누어 주파수 특성을 예측하는 short time Fourier transform을 적용한 centroid downshift method(CDM) 방법을 제안하였다[11]. CDM을 이용하여 예측한 감쇠 지수와 중심 주파수 f_c의 관계를 식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta(dB/cm/MHz) = -\frac{8.686}{4\sigma^2} \cdot \frac{df_c(z)}{dz} \tag{3}$$

위 식에서 임의의 깊이에 따른 중심주파수의 변화량을 통해 깊이에 따른 감쇠 지수 β 값을 예측할 수 있다. 하지만 전형적인 CDM의 경우 전송 펄스의 beam focusing으로 인해 회절 효과(diffraction effect)가 발생하여 감쇠 지수의 예측 정확도를 저하시킬 수 있다. 일반적으로 회절 효과로 인해 pre-focus 부분에서 중심 주파수의 감쇠가 작게 일어나고 post-focus 부분에서 감쇠가 크게 일어나는 왜곡 현상으로 나타난다. 따라서 정확한 감쇠 지수의 예측을 위해 전송 펄스의 회절 효과를 효과적으로 보상해 줄 수 있는 Dual-Reference Diffraction Compensation(DRDC) 방법이 제안되었다[15]. 이러한 DRDC 방법은 회절 효과를 보상하기 위해 이미 감쇠 특성을 알고 있는 두 개의 참조 반향 신호를 동일한 시스템 환경에서 측정하여 왜곡을 보상하기 때문에 예측 정확도 및 정밀도를 크게 향상 시킬 수 있다.

2. 압축 센싱 이론과 basis 행렬

기존의 새넌/나이키스트 샘플링 이론에 따르면 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환할 때 디지털 신호를 다시 원 신호로 복원하기 위해서는 원 신호의 최대 주파수보다 2배 이상으로 샘플링 해야 한다. 하지만 최근에 새넌/나이키시트 샘플링률보다 작은 샘플링률로 더 적은 수의 데이터를 샘플링 하여도 일정 조건을 만족한다면 거의 완벽하게 원 신호를 복원할 수 있다는 압축 센싱 기법이 대두되어 많은 연구가 진행 되고 있다[12].

압축 센싱은 원 신호가 특정 영역에서 0이 아닌 값이 0인 값보다 현저히 적은 신호여야 한다는 조건, 즉 성긴(sparse) 신호여야 한다는 조건이 전제되어야 한다[12]. 여기서 0이 아닌 값의 개수를 K개라고 한다면 이러한 신호를 K-sparse 신호라고 말한다.

압축 센싱의 가장 핵심적인 부분은 다음 식의 해를 찾는 것이다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \tag{4}$$

식 (4)에서 $\mathbf{y}$벡터는 $M \times 1$의 압축 샘플링 된 측정 신호 벡터, $\mathbf{A}$행렬은 $N \times M$의 압축 센싱 행렬 (measurement matrix), $\mathbf{x}$벡터는 압축 센싱 대상인 $N \times 1$의 원 신호 벡터이다.

압축 센싱 행렬 $\mathbf{A}$의 경우 베르누이 랜덤 분포나 가우시안 랜덤 분포를 가진 행렬로 구성하고, M이 $M \geq O(K\log(N/K))$ 라는 조건을 만족한다면 측정 신호인 $\mathbf{y}$로부터 원 신호 $\mathbf{x}$로의 거의 완벽한 복원이 이루어 질 수 있다[16].

원 신호인 $\mathbf{x}$가 특정 영역에서는 성긴 신호가 아니지만 특정 변환을 통해 다른 영역에서는 K개의 0이 아닌 값을 가진 성긴 신호로 변환이 가능하다면 식 (4)에서 $\mathbf{x}$는 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{f} \tag{5}$$

식 (5)에서 $\mathbf{B}$행렬은 basis 행렬(basis matrix)로 역이 존재하는 $N \times N$행렬 이고, $\boldsymbol{f}$는 원 신호 $\boldsymbol{x}$에 대한 특정 변환의 계수(coefficient)를 나타낸다. 이를 통해 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{f} \tag{6}$$

여기서 식 $\mathbf{AB}^{-1}$를 행렬 $\mathbf{T}$로 나타낸다면 결국 다음 식의 $\mathbf{f}$해를 찾는 것이 압축 센싱의 핵심이 된다.

$$\mathbf{y}=\mathbf{Tf} \tag{7}$$

하지만 위의 식은 under-determined 이기 때문에 무수한 해를 갖게 된다. 고유한 해를 찾기 위해 행렬 $\mathbf{T}$가 다음의 Ristricted Isometry Property(RIP) 조건을 만족하면, 선형계획법 등의 최적화 문제를 통해 고유한 해를 구할 수 있다[16].

$$(1-\delta_{2K})\|\mathbf{f}\|_2 \le \|\mathbf{Tf}\|_2 \le (1+\delta_{2K})\|\mathbf{f}\|_2 \tag{8}$$

만일 행렬 $\mathbf{T}$가 위의 식 (8)의 RIP 조건을 만족한다면 고유 해가 존재한다는 것을 의미하고, 그 고유의 해는 l_0-minimization 방법을 통해 찾을 수 있다. 하지만 l_0-minimization 방법의 경우, K-sparse 벡터를 모두 점검해야 하는 NP-hard 문제가 되기 때문에 실용성이 적다. 반면에 다음 식 (9)의 l_1-minimization 방법의 경우 convex 최적화 문제로, 선형 문제로 치환하여 풀 수 있고 K-sparse 신호를 높은 확률로 복원할 수 있다[16].

$$\bar{\mathbf{f}}=\arg\min\|\mathbf{f}\|_1 \text{ subject to } \mathbf{Tf}=\mathbf{y} \tag{9}$$

본 논문에서는 압축 센싱 이론을 이용해 샘플링 된 초음파 신호를 통해 초음파 반향 신호의 감쇠 지수를 예측하는 알고리듬을 제안한다. 본 논문에서 사용한 압축 센싱 행렬 $\mathbf{A}$는 Gaussian 분포의 랜덤 행렬을 사용하였고, 시간 영역에서 성긴 특성이 갖지 않은 초음파 반향 신호를 성긴 특성을 갖는 신호로 변환하는 basis 행렬 $\mathbf{B}$는 이산 푸리에 변환(DFT), 이산 웨이블렛 변환(DWT), 이산 코사인 변환(DCT)을 사용하여 감쇠 지수 예측 성능과 실행 시간을 비교 분석하였다.

Ⅲ. 실 험

초음파 반향신호의 모의실험은 고전적 음파 회절 이론을 이용한 주파수 영역의 linear array 트랜스듀서 반향신호 모델을 사용하였다[17]. 128개의 직사각형(0.2mm X 10mm) piezoelectric 소자가 중첩의 원리에 의해 초음파 펄스 신호를 발생시키고, 수신 시 dynamic receive focusing과 dynamic aperture를 이용하여 F-number를 2로 고정시켰다. 전송 펄스의 중심 주파수는 5MHz이며 80% 대역폭을 적용하였고 beam focus는 40mm로 고정하였다. 모의실험에서 사용한 각 numerical phantom의 크기는 40mm X 80mm이고, 균일한 감쇠 지수와 산란 특성을 가지며, phantom 내에서의 음파 전송 속도는 1540m/s 로 가정하였다. 반향 산란자(scatterer)는 25μm 크기의 glass bead를 사용하여 입방 milimeter당 9.7개를 생성하였다. DRDC를 위한 두 개의 참조(reference) phantom의 감쇠 지수는 각각 0.3dB/MHz/cm와 0.7dB/MHz/cm이고, 측정하고자 하는 phantom은 0.5dB/MHz/cm의 감쇠 지수를 구현하였다.

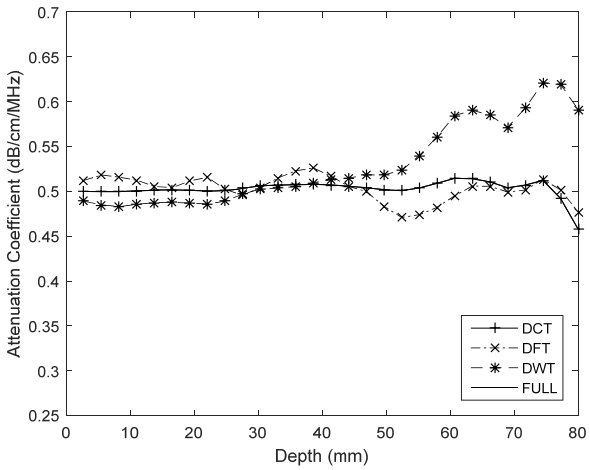
CDM 방법을 위한 center frequency 측정 시 block size는 4mm x 4mm로 75%의 비율로 중첩하였고, center frequency변화의 기울기 측정을 위한 linear fitting window는 20mm로 80%의 비율로 중첩하였다.

압축 센싱을 적용한 초음파 반향 신호는 식 (4)에 보인 바와 같이 Gaussian 랜덤 분포를 갖는 압축 센싱 행렬을 원 신호의 각 A-line 데이터에 적용하여 획득하였다. 본 논문에서는 압축률에 따른 감쇠 지수 예측 성능을 비교하기 위해 원 신호를 다양한 압축률(30%, 40%, 50%, 60%, 70%)로 압축 센싱 하였다. 압축 센싱 된 신호들에 대하여 3가지 basis 행렬들 - 이산 코사인 변환(DCT), 이산 푸리에 변환(DFT), 웨이블렛 변환(DWT) - 을 적용하여 반향 신호의 주파수 특성을 추출하였다.

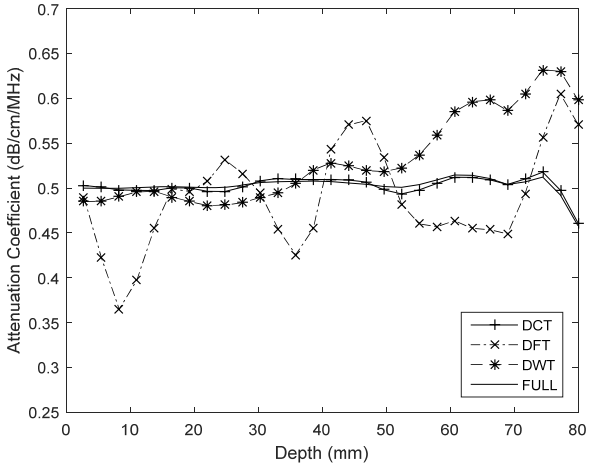
압축 센싱 신호의 복원 과정에서 식 (7)의 고유의 해를 찾기 위한 l_1-minimization 방법은 표준 내부 점법을 기반으로 한 convex 최적화 방법으로 풀어내어 원 신호로 복원하였다[16].

이를 통해 복원된 반향 신호의 주파수 특성을 이용하여 DRDC를 적용한 CDM 방법으로 초음파 감쇠 지수를 예측하였다. 압축 센싱 후 복원된 초음파 반향 신호의 깊이에 따른 블록 파워 스펙트럼의 중심주파수를 구하여, 이 값을 식(3)에 적용하여 깊이에 따른 감쇠지수 예측 값을 도출하였다. 이를 압축 센싱 하지 않은 원 초음파 반향 신호를 이용하여 동일한 방법으로 예측한 감쇠 지수 값과 비교 분석 하였다.

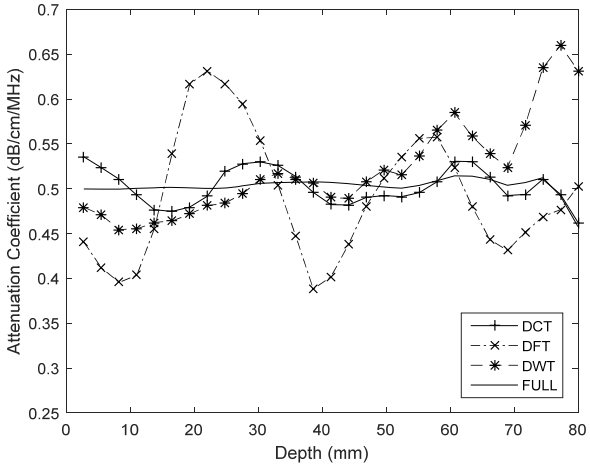
그림 1는 압축 센싱을 적용하지 않은 전체 반향 신호와 압축 센싱을 통해 샘플링 된 반향 신호를 이용하여 예측한 감쇠 지수 값을 압축률에 따라 나타낸 그림이다. 전체 반향 신호(FULL)를 이용하여 감쇠 지수를 예측한 값은 전체 전송 경로에 대해 측정 샘플의 실제 감쇠 지수인 0.5dB/MHz/cm에 가까운 값을 보이고 있다. 하지만 압축 센싱을 적용한 경우에는 압축률이 높아짐



(a) 30% 압축률



(b) 50% 압축률



(c) 70% 압축률

그림 1. 압축률에 따른 초음파 감쇠 지수 예측 결과
Fig. 1. Estimation results of Attenuation Coefficients for compressive ratios.

에 따라 예측 정확도가 크게 떨어지고, 특히 신호대 잡음비가 급격히 떨어지는 깊은 깊이에서 예측 오차가 더욱 커지는 경향을 보였다. 3개의 basis 행렬의 예측 정확도를 비교해 보면, 모든 압축률에 대하여 DCT 행렬이 가장 좋은 예측 성능을 보였으며 DFT 행렬를 적용한 경우에는 압축률이 높아짐에 따라 감쇠 지수 예측값의 변동이 매우 커짐을 볼 수 있다. DWT 행렬의 경우에는 특별히 beam focus (depth = 40mm) 이후의 깊이에서는 예측 정확도가 크게 저하되는 경향을 보였다.

표 1. 변환 행렬에 따른 압축률별 표준 오차
Table1. RMSE of estimation results for basis matrices.

	30%	40%	50%	60%	70%
DCT	0.0001	0.0002	0.0035	0.0170	0.0600
DFT	0.0143	0.0392	0.0715	0.1243	0.1833
DWT	0.0528	0.0557	0.0578	0.0680	0.1084

표 2. 변환 행렬에 따른 압축률별 상대적 연산 시간
Table2. Relative execution times for basis matrices.

	30%	40%	50%	60%	70%
DCT	2.1762	1.8826	1.5506	1.2232	1
DFT	6.6963	5.3262	3.9633	2.8366	2.0359
DWT	2.5577	1.9346	1.5592	1.2394	1.0215

표 1은 압축 센싱을 적용한 경우 예측된 감쇠 지수의 평균 표준 오차(RMSE)를 압축률 별로 나타낸 것이다. 가장 예측 성능이 좋은 DCT 행렬의 경우, 50% 이하의 압축률을 적용했을 때에는 1% 미만의 표준 오차를 보여 전체 반향 신호를 이용한 경우와 거의 일치하는 예측 정확도를 보였다. 70%의 압축률의 경우에도 전체 신호를 이용하는 경우에 비해 6%의 표준 오차를 보여 적은 측정 신호를 이용해야만 하는 응용 분야에서는 의미 있는 성능을 나타낼 수 있다고 볼 수 있다.

DFT 행렬을 적용한 경우에는 30%의 낮은 압축률에서는 1.43%의 비교적 낮은 예측 오차를 보였으나 압축률을 높여 갈수록 급격히 예측 오차가 커지는 추세를 보였다. DWT 행렬의 경우에도 beam focus 이후의 예측 오차 때문에 평균 표준 오차는 낮은 압축률에서도 5.28%로 나타났으나 압축률 증가에 따른 표준 오차의 증가 추세는 DFT 행렬의 경우보다는 완만함을 볼 수 있다.

표 2는 모의 실험을 통해 3개의 변환 행렬을 적용한 압축 센싱의 상대적인 연산 시간을 보였다. 컴퓨터 모의 실험은 Matlab 프로그램(7.11 버전)을 이용하여 인텔사의 i5-2500 (3.3GHz) 환경에서 실험하였고, 측정된 연산 시간은 제일 짧은 DCT 행렬 (70% 압축률) 연산 시간을 기준으로 상대적으로 나타내었다. 동일한 압축률을 적용했을 때 DCT 행렬이 가장 빠른 연산 속도를

보였고, DWT 행렬도 비슷한 연산 시간을 나타내였다. 하지만 DFT 행렬을 적용하는 경우는 복소수를 포함하고 있는 푸리에 변환의 특성상 연산 시간이 가장 많이 걸림을 알 수 있었다.

Ⅳ. 결 론

의료 선진국을 중심으로 현재 활발하게 연구되고 있는 정량적 초음파 분석(Quantitative Ultrasound Analysis)은 검진 대상 조직의 다양한 초음파 지수들의 정량적 정보를 제공하여 보다 정확한 병리학적 판단에 의미 있는 근거를 제공한다. 특히 의료 초음파 신호의 인체 내 감쇠 지수는 다른 초음파 지수들의 정확한 예측을 위해 선행되어야 하는 가장 중요한 정량적 정보 중의 하나이다.

본 논문에서는 최근 들어 다양한 신호처리 분야에 적용되고 있는 압축 센싱을 이용하여, 적은 양의 반향 신호에서 주파수 특성을 직접 추출하여 이를 이용한 주파수 영역의 초음파 감쇠지수를 예측 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 압축 센싱의 신호 복원 과정에 적절한 basis 행렬을 적용하여 수신된 반향 신호의 주파수 특성을 직접 추출함으로써 시간 영역의 완전한 신호 복원 없이 주파수 영역의 감쇠 지수 예측을 수행할 수 있는 장점이 있다.

DCT, DFT, DWT 행렬을 basis 변환 행렬로 적용한 각각의 감쇠 지수 예측결과를 비교 분석한 결과, DCT 행렬을 적용한 경우가 모든 압축률에서 예측 정확도와 연산 시간에서 가장 좋은 결과를 보였다. DFT 행렬의 경우에는 압축률이 높아짐에 따라 예측 정확도가 급격히 떨어졌으며 연산 시간도 가장 길었고, DWT 행렬은 beam focus 이후의 깊은 깊이에서 예측 오차가 커지는 경향을 보였다.

본 논문에서 제안한 압축 센싱을 이용한 반향 신호의 주파수 특성추출 방법은 데이터 측정 과정의 부담을 줄여 초음파 기기의 소형화, 경량화 등에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 향후 다양한 정량적 초음파 분석 응용 분야에 효율적으로 적용할 수 있다.

REFERENCES

[1] U. Techavipoo, T. Varghese, Q. Chen, T. A. Stiles, J. A. Zagzebski, G. R. Frank, “Temperature dependence of ultrasonic propagation speed and attenuation in excised canine liver tissue measured using transmitted and reflected pulses,” Journal of Acoustical Society of America, vol.115, no.6, pp.2859-2865, June 2004.

[2] Y. Levy, Y. Agnon, H. Azhari, “Measurement of speed of sound dispersion in soft tissues using a double frequency continuous wave method,” Ultrasound Med. Biol, vol.32, no.7, pp.1065-1071, July 2006.

[3] K. A. Wear, T. A. Stiles, G. R. Frank, E. L. Madsen, F. Cheng, E. J. Feleppa, C. S. Hall, B. S. Kim, P. Lee, W. D. O'Brien Jr, M. L. Oelze, B. I. Raju, K. K. Shung, T. A. Wilson, J. R. Yuan, “Interlaboratory comparison of ultrasonic backscatter coefficient measurements from 2 to 9 MHz,” J. Ultrasound Med., vol.24, no.9, pp.1235-1250, September 2005.

[4] S. L. Bridal, C. Fournier, A. Coron, I. Leguerney, P. Laugier, “Ultrasonic backscatter and attenuation (11-27 MHz) variation with collagen fiber distribution in ex vivo human dermis,” Ultrason. Imaging, vol.28, no.1, pp.23-40, January 2006.

[5] G. Treece, R. Prager, and A. Gee, “Ultrasound attenuation measurement in the presence of scatterer variation for reduction of shadowing and enhancement,” IEEE Trans. UFFC, vol.52, no.12, pp.2346-2360, December 2005.

[6] S. W. Flax, N. J. Pelc, G. H. Glover, F. D. Gutmann, and M. McLachlan, “Spectral characterization and attenuation measurements in ultrasound,” Ultrason. Imaging, vol.5, no.2, pp.95-116, April 1983.

[7] P. He, J. F. Greenleaf, “Application of stochastic-analysis to ultrasonic echoes - estimation of attenuation and tissue heterogeneity from peaks of echo envelope,” Journal of Acoustical Society of America, vol.79, no.2, pp.526-534, February1986.

[8] H. S. Jang, T. K. Song, S. B. Park, “Ultrasound attenuation estimation in soft tissue using the entropy difference of pulsed echoes between two adjacent envelope segments,” Ultrason. Imaging, vol.10, no.4, pp.248-264, October 1988.

[9] L. X. Yao, J. A. Zagzebski, and E. L. Madsen, “Backscatter coefficient measurements using a reference phantom to extract depth-dependent instrumentation factors,” Ultrason. Imaging, vol.12, no.1, pp.58-70, January 1990.

[10] C. Kasai, K. Namekawa, A. Koyano, R. Omoto, “Real-time two-dimensional blood flow imaging using an autocorrelation technique,” IEEE Trans.

Sonics and Ultrasonics, vol.32, no.3, pp.458-464, May 1985.
[11] M. Fink, F. Hottier, and J. F. Cardoso, “Ultrasonic signal processing for in vivo attenuation measurement: short time Fourier analysis,” Ultrason. Imaging, vol.5, no.2, pp.117-135, April 1983.
[12] David Donoho, “Compressed sensing,” IEEE Trans. on Information Theory, vol.52, no.4, pp.1289-1306, April 2006.
[13] C. Quinsac, A. Basarab, J. M. Girault, D. Kouamé, “Compressed sensing of ultrasound images: Sampling of spatial and frequency domains,” Proceedings of the IEEE Workshop on Signal Processing Systems, pp. 231-236, October 2010
[14] Kuc, R., Schwartz, M. and Von Micksy, L. “Parametric estimation of the acoustic attenuation coefficient slope for soft tissue,” IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, 1976
[15] J. Shim and H. Kim, “Diffraction Compensation using Dual-Reference for Estimation of Ultrasound Attenuation”, Information and Control Symposium pp.55-56, April 2011.
[16] E. J. Candes, J. Romberg, and T. Tao, “Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information,” IEEE Trans. Inform. Theory, vol.52, no.2, pp.489-509, January 2006.
[17] Y. Li and J. A. Zagzebski, “A frequency domain model for generating B-mode images with array transducers,” IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol.46, no.3, pp.690-699, May 1999.

저 자 소 개

심 재 윤(정회원)
2010년 서울산업대학교 컴퓨터 공학과 학사 졸업.
2012년 광운대학교 전기공학과 석사 졸업.
2012년～현재 광운대학교 전기 공학과 박사과정.
<주관심분야 : 신호처리, 의료초음파, 압축센싱>

김 형 석(정회원)-교신저자
1991년 한국과학기술대학 전기 전자공학부 학사 졸업.
1993년 서울대학교 전자공학과 석사 졸업.
2008년 University of Wisconsin - Madison ECE 박사 졸업.
1993년～1999년 한국통신 연구개발원 선임연구원
2008년～현재 광운대학교 전기공학과 부교수
<주관심분야 : 신호처리, 의료초음파, 영상처리>