

협대역 변환기를 이용한 초음파 온도측정 Ultrasound thermometry using narrow band transducer

송성욱, *최민주, 성평모
서울대학교 전기공학부
*제주대학교 의과대학
Seong-Wook Song,

*Min-Joo Choi, Koeng-Mo Sung
School of Electrical Engineering, Seoul National University
*Department of Medicine, Che-Ju National University

요약

초음파 수신 신호의 공진주파수 변화를 이용한 온도 측정법에서 협대역 변환기를 사용한 초음파 온도측정이 가능함을 보여준다. 그리고 이를 위하여 공진주파수 변화와 온도변화간의 비례상수를 변화시켰다.

기존의 측정법은 온도변화와 기본주파수 변화와의 관계를 비례상수로 정의하였기 때문에, 최소한 3개 이상의 하모닉을 포함하는 광대역 변환기가 필요하였다. 하지만 협대역 변환기를 이용한 온도측정법에서는 비례상수를 주파수 변화비와 온도변화간의 관계로 나타내기 때문에 한 상분의 하모닉만을 측정하여도 온도측정이 가능하게 된다.

1. 서론

초음파는 공학에서 뿐 아니라 의학에서도 진단기나 치료기 등의 분야에서 널리 사용되고 있다. 초음파를 이용한 치료기에서는 주로 고강도집속 초음파를 원하는 조직에 위치시켜 가열하여 조직을 죽이는 방법을 사용한다. 만일 조직을 지나치게 가열하게 되는 경우, 원하지 않은 부위까지 가열하여 손상시킬 위험이 있고, 만대의 경우는 치료효과가 나타나지 않는다. 따라서, 이러한 초음파 치료기에서 가열부위의 온도를 피드백 받는 것이 아주 중요한 문제가 된다. 직접 가는 니들온도계를 인체에 삽입하여 온도를 측정하는 방법이 제안되었고, 실제 사용되기도 하였다. 하지만, 이 경우 환자에게 큰 고통을 주고, 더욱이 고강도집속 초음파의 초점에 온도계를 위치시키는 것이 어려운 문제였다. 이러한 이유로, 인체에 삽입하기 않고 인체의 신호로부터 온도를 측정하는 마이크로파, 또는 자기공명영상, 초음파, 임피던스 토모그래피

를 이용한 다양한 방법들이 제안되었다. 이 중에서 초음파를 이용한 온도측정법은 세척에 있어서나 사용에서 치료기와 같이 초음파 변환기를 사용하기 때문에 제작단가나 사용에 있어서 다른 방법에 비해 선호된다.

초음파를 이용한 온도 측정법에는 초음파 수신 신호의 시간지연[2]과 주파수 변환[1]을 이용한 두 가지 방법이 제안되었다. 바꿔 말하면, 각기 신호의 크기정보와 위상정보를 이용한 방법이라고 볼 수 있다.

초음파 온도 측정법은 조직의 준격자 모델 가정에서부터 출발하여, 이에 따른 하모닉 주파수들의 변화를 측정하여, 온도를 추정하는 방법이다. 주파수변화와 온도변화는 비례하고 이에 따른 비례상수는 조직의 속도 변화와 격자상수에 의하여 결정된다. 따라서 실제 이 방법이 사용되기 전에 비례상수를 실험에 의하여 측정하게 된다. 그리고, 이 비례상수는 기본주파수 변화와 온도변화를 측정하여 결정된다. 이 상수가 온도측정에 사용되기 위해서는 변환기를 통해 수신된 신호의 주파수 성분에 몇 번째 하모닉 주파수 성분인지를 알아야 한다. 이를 위해서 3개의 하모닉 주파수 성분들을 포함할 수 있는 광대역 변환기를 사용하여 신호를 얻은 후, 수신된 신호의 하모닉 주파수들간의 차를 이용하여 기본 주파수를 얻게 된다.

이 방법에서 광대역 변환기를 사용하기 때문에 제작 상에 큰 제약요인이 된다. 본 논문에서는 협대역 변환기를 사용하여도 초음파 온도측정이 가능함을 보여준다. II에서는 주파수 변화를 이용한 온도 측정법과 제안된 방법에 대하여, III에서는 모의 실험에 대하여 설명하고, IV에서 결론을 맺는다.

II. 주파수 변화를 이용한 온도 측정법

주파수 변화를 이용한 온도 측정법은 다음과 같은 가정을 전제한다.

- 1) 생체 조직과 배질은 초음파에 대하여 거리의 분산이 크지 않은 준격자로 볼 수 있다. 이 격자는 평균거리 d 의 간격으로 어떤 영역에 걸쳐 있다.
- 2) 평균 격자거리는 온도에 비례하고 그리고 이것은 조직의 열팽창계수에 의해서 결정된다.
- 3) 그리고 속도 역시 온도의 함수이다. 그리고 온도와 속도간에는 온도변화가 적은 부분에서 비례하다.[4]

따라서 위의 격자에 연관되는 기본 주파수는 $f_1 = \frac{c}{2d}$ 가 된다.

1. 초음파 수신 신호 모델

조직으로부터 반사된 신호는 각 격자의 반사파 합으로 주어진다.

$$x(t) = \sum_{i=1}^N A_i p_i(t - \frac{2z_i}{c_i}) \quad (1)$$

$$= \sum_{i=1}^N A_i p_i(t - \tau_i)$$

$$\tau_i = 2 \int_0^{z_i} \frac{dz}{c(z)} \quad (2)$$

위 신호를 주파수 영역에서 관찰하면,

$$X(f) = \sum_{i=1}^N A_i P_i(f) e^{-2\pi f \tau_i} \quad (3)$$

따라서 주파수 스펙트럼(PSD)은

$$S_x(f) = E \left[\sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^N A_i P_i(f) A_m^* P_m^*(f) e^{-2\pi f (\tau_i - \tau_m)} \right] \quad (4)$$

여기서 c_i 는 위치의 함수가 된다.

2. 주파수 스펙트럼과 평균격자 간격과의 관계

반일 측정하고자 하는 부위의 격자간의 거리와 속도가 모두 d 와 c 로 일정하다면,

$$S_x(f) = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^N E[A_i P_i(f) A_m^* P_m^*(f)] e^{-2\pi i \frac{2fd}{c} (i-m)} \quad (5)$$

따라서 주파수가 $f_k = \frac{kc}{2d}$, $k=1, 2, \dots, \infty$ 인 경우

모양 간섭하는 효과를 나타낸다. 격자간격이 규칙적인 경우에 나타나는 현상이지만, 어느 정도의 규칙성이 있으면 PSD에서의 공진주파수들은 평균 격자 간격에 의해 결정된다[3]. 그리고 평균 격자 간격의 분산이 공진주파수들의 크기와 대역폭을 결정한다[5].

따라서 격자간의 분산정도를 알게되면, 조직으로부터 나오는 신호의 모양을 모델 할 수 있다.

실제에서는 진단용 변환기가 중심주파수를 축으로 한가우시한 모양의 $P(f)$ 로 나타내지므로 변환기의 대역폭에 포함되는 하모닉들만 볼 수 있게 된다.

3. 온도와 기본주파수 간의 관계

실험에서는 f_1 은 변환기 대역폭밖에 있기 때문에 관측하기가 어렵다. 하지만 고조파들을 이용하여 f_1 을 추정할 수 있다. ($f_1 = f_{k+1} - f_k$) 따라서 변환기는 3개 이상의 하모닉을 포함하는 대역폭을 지녀야 한다.[1] 다음은 온도변화와 주파수 변화와의 관계를 나타낸다.

$$f_k(T) = \frac{kc(T)}{2d(T)}, k=1, 2, \dots, \infty \quad (6)$$

$$\frac{\partial f_k(T)}{\partial T} = \frac{k}{2} \left[\frac{\partial c(T)}{\partial T} \frac{1}{T} - \frac{\partial d(T)}{\partial T} \frac{c(T)}{d^2(T)} \right] \quad (7)$$

소신호 모델을 사용하면, 근사적으로

기준 온도 T_0 k 번째 하모닉 주파수 변화는 다음과 같다.

$$\Delta f_k(T) \approx \frac{k}{2d_0} \left[\frac{\partial c(T)}{\partial T} \Big|_{T=T_0 - \alpha_T c_0} \right] \Delta T \quad (8)$$

$$d(T) = d_0(1 + \alpha_T \Delta T) \quad (9)$$

c_0 는 기준온도(T_0)에서의 음속을 나타낸다. 그런데 속도는 온도에 따라 선형으로 변하는 것으로 알려져 있으므로 주파수 변화는 온도 변화에 비례하는 것을 알 수 있다. (8)을 다시 쓰면,

$$\Delta f_k(T) \approx k G_F \Delta T \quad (10)$$

$$G_F = \frac{1}{2d_0} \left[\frac{\partial c(T)}{\partial T} \Big|_{T=T_0 - \alpha_T c_0} \right] \quad (11)$$

여기서, G_F 는 오프라인 실험으로 측정가능하므로 변환기를 통해서 들어오는 공진주파수가 몇 번째 하모닉(k)

인가와 Δf_k 를 측정하면 온도를 추정할 수 있다.

4. 제안된 초음파 온도 측정법

위의 방법에서는 온도와 주파수 변화 관계를 비례상수 α (12) 식의하였다. 하지만, 측정된 주파수 변화에 대하여 측정 주파수를 이용하면, k 값의 정보가 측정주파수로 나타낼 수 있어서, 필요한 측정 주파수의 수를 줄여준다. 만일 초기 측정주파수 값, 즉 온도가 T_0 일 때의 k 번째 하모닉 주파수는 다음과 같다.

$$f_k(T_0) = \frac{kc(T_0)}{2d_0} \quad (12)$$

(12)를 이용하여 (8)을 나타내면,

$$\Delta f_k(T) \approx f_k(T_0) \left[\frac{1}{c_0} \frac{\partial c(T)}{\partial T} \Big|_{T=T_0} - \alpha_T \right] \Delta T \quad (13)$$

이 식을 정리하면, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta f_k(T)}{f_k(T_0)} = \alpha_F \Delta T \quad (14)$$

$$\alpha_F = \left[\frac{1}{c_0} \frac{\partial c(T)}{\partial T} \Big|_{T=T_0} - \alpha_T \right] \quad (15)$$

따라서 온도변화와 주파수변화의 관계는 (11)식과는 달리 k 값이 없는 단지 한 하모닉 성분만 측정하여 온도 변화를 얻을 수 있는 (15)의 식으로 변형된다. 또한 새로 정의된 비례상수 α_T 에 역시 k 정보가 필요하지 않으므로, 오프라인으로 측정을 더욱 쉽게 해 준다.

III. 모의실험

모의 실험에서는 사용된 초침은 $T_0 = 20.0^\circ C$ 에서 $c_0 = 1465 m/s$, $d_0 = 1.0 mm$, d_0 의 표준편차는 평균값의 10%에 해당하는 0.1mm 값을 그리고, 온도와 속도 관계로 $\frac{\partial c(T)}{\partial T} = -3.15 m/s/^\circ C$ 의 특성을 가지고 있다. 이 경우 (6)에 의한 초기 기본주파수값 $f_1 = 732.5 kHz$ 그리고 (15)의해 $\alpha_F = 2.867 \times 10^{-3}$ 값을 이론적으로 얻을 수 있다. 변환기의 경우는 중심 주파수가 6MHz, $-6dB$ 주파수 대역이 0.5MHz인

협대역 가우시안 주파수 스펙트럼의 특성을 가진 것을 사용하였다. 수신 신호의 샘플링 주파수 $f_s = 25MHz$ 로 하였다. 위의 조건에 따라 온도를 0도부터 10까지 0.5도씩증가시키며 이에 따른 초음파 수신 신호를 발생시켰다. 수신파는 하모닉의 차수 k 가 증가하면서 약 $\frac{1}{k}$ 로 크기가 감소하고, 변환기의 잡음 레벨을 $-35dB$ 가 되게 발생시켰다.

이에 따라 모의 실험에서 변환기의 통과대역에 있는 8번째 하모닉인 $f_8 = 5.86MHz$ 을 측정하여 온도를 추정하게된다. 참고문헌[1]에서 추천한 것보다 다소 높은 40차의 AR 모델과 사용하였고 윈도우 길이를 6mm, 즉 200개의 데이터로 스펙트럼을 분석하였다.

모의 실험은 온도변화에 대한 주파수를 추정하여 α_F 를 측정하는 부분과 여기서 얻은 α_F 와 추정된 주파수들이 용하여 온도를 복구하는 과정으로 이루어진다.

그림 1은 온도변화와 주파수 변화간의 선형관계를 보여준다. 이와 같은 실험을 8번 수행하여 평균을 위한 결과 $\alpha_F = -2.8369 \times 10^{-3}$ 를 얻을 수 있었다. 그림 2는 실제온도변화와 추정된 온도변화와의 관계를 보여준다. 추정된 온도변화값이 실제 온도변화값을 잘 따라가는 것을 보여준다.

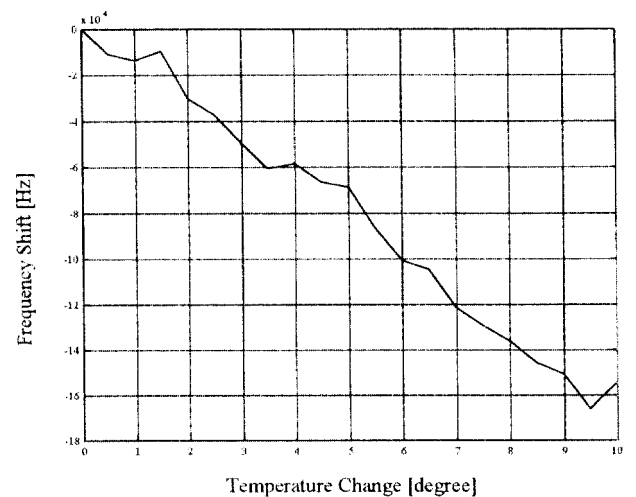


그림 1. 온도 변화와 하모닉 주파수 변화(k=8)의 관계

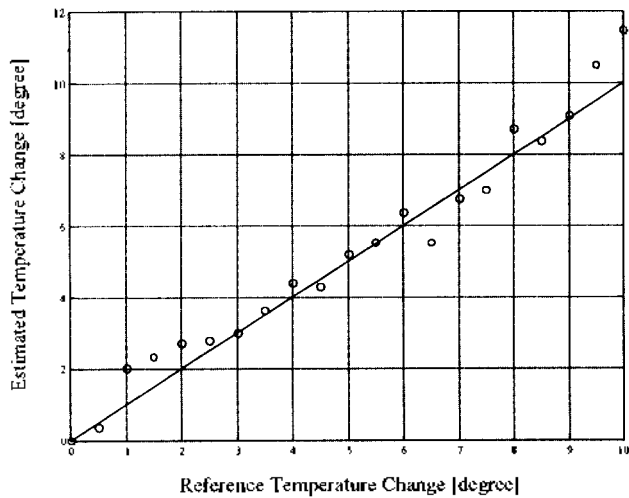


그림 2. 실제 온도 변화와 추정된 온도변화간의 관계

IV. 결론

모의 실험 결과에서 추정된 α_F 와 이론치와의 오차가 1.04%로 작은 값을 가지고, 복원된 온도가 실제 온도간의 평균 오차는 $0.34^\circ C$ 로 온도변화 추정에 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다. 이를 통하여 기존의 광대역 변환기를 이용한 온도 측정법과는 달리 제작이 쉬운 협대역 변환기를 사용하여도 온도 변화를 추정가능함을 알 수 있다. 실제 이를 적용하기 위해서는 실험을 통한 검증이 먼저 필요하겠다.

참고문헌

[1] Scip, R., and Ebbini, E. S.(1995) "Noninvasive Estimation of Tissue Temperature Response to Heating Fields Using Diagnostic Ultrasound" IEEE Trans. Biomed. Eng, Vol 42, No. 8, August 1995

[2] Maass-Moreno, R., Damianou C. A., and Sanghvi, N.T.(1996), "Noninvasive temperature estimation in tissue via ultrasound echo shifts." J. Acoust. Soc. Am. 100. 2514-2530.

[3] K.A. Wear, R. F. Wagner, M.F. Insana, and T.J. Hall, "Application of autoregressive spectral analysis to cepstral estimation of mean scatterer spacing," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec. Freq. Contr., Vol. 40, no.1, pp.50-58, Jan. 1993.

[4] Nasoni, R.L., and Bowen, T.(1987)."Ultrasonic speed as a parameter for noninvasive thermometry," Automedica 8, 269-281.

[5] Li Weng, et al,"Nonuniform Phase Distibution in Ultrasound Speckle Analysis-Part II : Parametric Expression and a Frequency Sweeping Technique to Measure Mean scatter Spacing", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec. Freq. Contr., Vol. 39, no.3, pp.360-365, May 1992.