

Weak Shock Theory를 이용한 초음파의 비선형 전파에 의한 온도 상승

최민주, 성광모*, 이상은**, 정병하***, 이무상***

제주대학교 의과대학 의공학교실, * 서울대학교 뉴미디어통신공동연구소,

** 서울대학교 의과대학 비뇨기과학교실, *** 연세대학교 의과대학 비뇨기과학교실

Temperature Rise due to Nonlinear Propagation of Ultrasound using Weak Shock Theory

M J Choi, K M Sung*, S E Lee**, B H Chung*** and M S Lee***

Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Cheju National University

* Institute of New Media & Communication, Seoul National University

** Department of Urology, College of Medicine, Seoul National University

*** Department of Urology, College of Medicine, Yonsei University

Abstract

The present study employs weak shock theory and bio-heat transfer function to predict the temperature rise due to nonlinear propagation of high amplitude ultrasound. The theory shows that, for the focused ultrasound which is assumed to have an gaussian beam profile and has the focal intensity of 1000 W/cm², the temperature rise of liver tissue exposed for 1 second to the energy lost during nonlinear propagation goes up to about 30 °C. This indicate that it is necessary to consider the nonlinear propagation induced heating enhancement when setting exposure condition of high intensity focused ultrasound used for cancer thermotherapy.

서론

종양 조직을 열 피사시키기 위해서는 고 압력의 초음파 (5-10 MPa)가 요구된다. 이처럼 높은 압력을 가지는 초음파는 매질을 통과하면서 비 선형 전파를 하며 파형은 점차적으로 왜곡 되어 간다. 비 선형 전파로 파형의 왜곡이 누적 되면 어느 시점에서 파형에 shock이 형성된다. 초음파의 에너지는 shock front를 통해 급속히 매질로 전달되어 초음파의 강도는 감소하게 된다. 매질로 전달된 초음파의 에너지는 대부분 매질의 온도를 상승시키는 역할을 한다. 초음파의 비 선형 전파 효과를 고려한 열 효과에 대해 아직 체계적인 연구 결과가 보고되지 않은 상태이다. 본 연구는 weak shock theory와 bio-heat transfer function을 이용하여 비 선형 전파로 손실된 초음파 에너지가 야기할 수 있는 생체 조직의 온도 상승 효과를 예측하기 위함이다.

이론

초음파 발생 위치에서 진동하는 질점의 진폭 u_0 를 가지며 주파수 f 인 사인파로 가정할 때 weak shock theory[1]를 이용한 비 손실 배절을 통과하는 평면파의 비 선형 전파 과정은 다음의 식으로 묘사된다.

$$(1) \quad u(z, t) = u_0 \sin(2\pi f \tau(z, t))$$

$$\tau(z, t) = (1 - H(t - t_s)) \left(t - \frac{z}{c_0} + \frac{\beta uz}{c_0^2} \right) +$$

$$H(t - t_s) \left(t_s - \frac{z_s}{c_0} - \frac{\beta}{2c_0^2} \int (u_s + u_b) dz + \frac{\beta uz}{c_0^2} \right)$$

여기서 z 는 전파 방향, t 는 시간, $u(z, t)$ 는 질점의 속도, c_0 는 초음파 선형 전파 속도, β 는 매질의 비 선형 변수, $\tau(z, t)$ 는 지연 시간, $H()$ 는 Heaviside's Unit Step Function, z_s 는 shock formation distance, u_s 와 u_b 는 shock front 전후의 질점 속도이다. Shock formation distance는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$(2) \quad z_s = \frac{1}{\beta \left(\frac{u_0}{c_0} \right) \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right)}$$

여기서 f 는 초음파의 주파수를 의미한다.

비 선형 전파 중 초음파의 강도는 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$(3) \quad I = \frac{1}{2\pi \rho_0 c_0} \left\{ \pi - \sigma V_b + V_b \cos(\sigma V_b) + \frac{2}{3} \sigma V_b^3 \right\}$$

$$V_b = \frac{1}{\sigma} J_0^{-1} \left(\frac{1}{\sigma} \right) H(\sigma - 1)$$

여기서 $V_b (=u_s/u_0)$ 는 shock amplitude, $J_0()$ 는 zero-th order spherical Bessel function, $\sigma (=z/z_s)$ 는 shock parameter이다.

집속형 초음파가 Gaussian 분포를 따른다고 가정할 경우, bio-heat transfer function을 이용하면 초점 위치에서 초음파에 의한 매질의 온도 상승은 아래의 식으로 표현할 수 있다[2].

$$(4) \quad \Delta T = \frac{2\alpha I R}{\rho_0 C 4D} \ln\left(1 + \frac{4Dt}{R^2}\right)$$

여기서 ρ_0 는 밀도, C는 비열, D는 열 확산 계수, α 는 초음파 흡수 계수, t는 초음파 노출 시간, R은 초점 강도의 Gaussian Variance이다. 평면파의 경우 $\alpha = -(1/2I)(dI/dz)$ 이므로 식 (4)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(5) \quad \Delta T = -\frac{2\pi\beta u_0 f dI R}{\rho_0 C c_0^2 d\sigma 4D} \ln\left(1 + \frac{4Dt}{R^2}\right)$$

결 과

그림 1은 초기에 정현파인 초음파가 비 손실 매질을 비 선형 전파할 때 강도의 변화를 보여주고 있다. 강도는 $\sigma < 1$ 구간에서 변화가 없으며, σ 의 값이 1 보다 커지면 급속히 (거의 지수 함수적으로) 감소하는 형태를 보여준다.

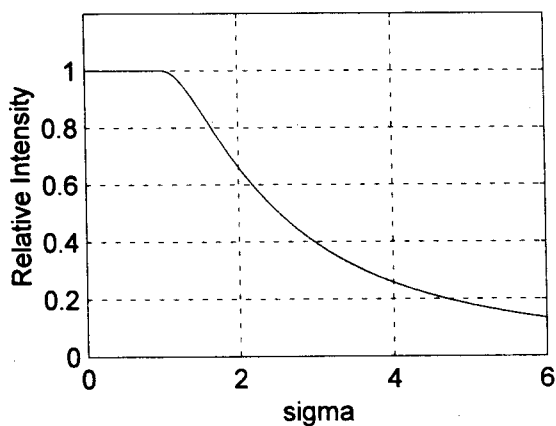


그림 1. 비 손실 매질을 비 선형 전파하는 초음파의 강도 변화.

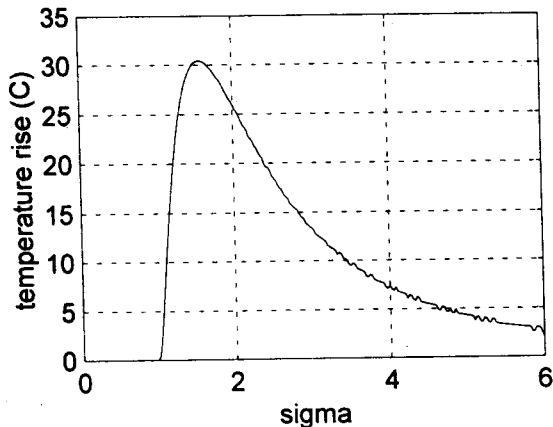


그림 2. 비 선형 전파로 손실된 초음파의 에너지에 의한 간 조직의 온도 상승

그림 2는 비 선형 전파로 손실된 초음파 에너지에 의한 간 조직($\rho_0=1050\text{kg/m}^3$, $c_0=1573\text{m/s}$, $\beta=3.85$, $C=3770\text{J/kg/}^\circ\text{C}$, $D=0.14\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ [3])의 온도 상승을 식 (5)를 이용하여 계산한 결과이다. 초점 강도는 초음파 열 치료에 전형적으로 사용하는 1000 W/cm^2 ($\sigma=0$)가 되도록 초음파의 압력($p_0=5.69\text{ MPa}$)을 설정하였다. 초음파의 기본 주파수는 1 MHz로 하였고 매질이 초음파에 노출된 시간은 1초로 하였다. R 값은 2 mm로 하였다. 그림 2로부터 비 선형 전파로 인한 간 조직의 온도 상승은 σ 값이 1보다 커지면서 급격히 상승하고, $\sigma=1.6$ 부근에서 최고치 (약 $30\text{ }^\circ\text{C}$)에 도달한 후 비교적 완만하게 감소함을 볼 수 있다.

도 의 및 결 과

초음파가 손실 매질을 비 선형 전파 할 경우, 에너지 손실은 $\sigma < 1$ 부터 발생되며, 강도 감소율 ($dI/d\sigma$)은 보다 완만할 것으로 예상된다. 초음파에 의한 온도 상승은 $dI/d\sigma$ 에 비례하므로 그림 2의 비 선형 전파로 인한 온도 상승은 실제보다 과대 평가된 것으로 볼 수 있다. 비 선형 전파로 인한 beam broadening effect는 $\sigma > 1$ 인 경우 쉽게 관찰된다[4]. 따라서 $\sigma > 1$ 경우 빔폭을 결정하는 R의 값은 보정 되어야 하며, 온도 상승은 둔화 될 것으로 예상된다. 결론적으로 그림 2에 보여주는 비 선형 전파로 인한 온도 상승은 overestimated된 결과이지만 초음파의 열 효과를 이용하는 고강도 치료용 초음파의 노출 조건 설정시 비 선형 효과에 대한 충분한 고려가 필요함을 시사하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. T. Blackstock, "Connection between the Fay and Fubini solutions for plane sound waves of finite amplitude", J. Acoust. Soc. Am., 39(6), pp.1019-1026, 1966.
- [2] K. J. Parker, "Effects of heat conduction and sample size on ultrasonic absorption measurements", J. Acoust. Soc. Am., 77, pp.719-725., 1985.
- [3] F. A. Duck, "Physical properties of tissue", Academic Press, London, 1990.
- [4] D. R. Bacon and E. L. Carstensen, "Increased heating by diagnostic ultrasound due to nonlinear propagation", J. Acoust. Soc. Am., 88(1), pp.26-34, 1990.

이 연구는 1997년도 보건복지부 G7 의료공학 기술 개발사업 연구비 (HMP-96-G-1-03)에 의해 수행되었음.