

Heating Characteristics Evaluation of Superposed Sonication Using Glycerol Tissue Mimic Phantom

Si-Cheol Noh*, Sang-Sik Kang*, Ji-Koon Park*, Ju-Young Kim**, Bong-Jae Jung*

*Department of Radiological Science, International University of Korea**

*Department of Biomedical Engineering, Inje University***

글리세롤 조직유사 팬텀을 이용한 초음파 중첩 조사에 따른 가열 특성 평가

*, **, *
, **, *
*, **

Abstract

In this study, we evaluated the heating characteristics of single sonication and superposed two low-intensity ultrasonic sonication. Compare the results, the superposed sonication was showed a superior thermal effect than single sonication. And the maximum temperature was increased as 120-150%. The starting time of temperature rising has been shortened in superposed sonication. In addition, the time up to the maximum temperature has been shortened, too. In generally, as the ultrasonic intensity is higher, the more surface damage is occurred. However, in the case of superposed sonication, the same thermal effect had be confirmed without surface damage. Through the results of the study, we thought that the superposed sonication will be able to reduce the intensity of the ultrasonic treatment. And, by using the low-intensity, the more safe and more effect therapy will be possible in therapeutic ultrasound application.

Key Words : superposed sonication, heating characteristic, therapeutic ultrasound, glycerol tissue mimic phantom

요약

본 연구에서는 단일 초음파 조사와 두 개의 저강도 초음파의 중첩 조사 시 발생하는 가열 특성을 평가하였다. 비교 결과 단일 조사 조건보다 중첩 조사에서 보다 우수한 온열 효과를 보였으며 최대 상승 온도도 120-150% 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 초음파 조사에 의한 가열 개시 시간이 중첩 조사에서 짧아지며, 최대 가열 온도까지 소요되는 시간 역시 짧아짐을 확인할 수 있었다. 초음파 조사 강도가 커지면 매질의 표면 손상을 유발하는데, 저강도 중첩조사의 경우 표면의 손상없이 동일한 온도 상승 효과를 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과를 통하여 초음파 치료 시 적용 강도를 줄일 수 있을 것으로 생각되었으며, 저강도 초음파를 사용함으로써 보다 안전하고 효율적인 초음파 치료가 가능할 것으로 판단된다.

중심단어: 초음파 중첩조사, 가열 특성, 초음파 치료, 글리세롤 조직유사 팬텀

I. INTRODUCTION

집속 초음파 치료는 음향 에너지를 집속시켜 높은 에너지에 의해 발생하는 다양한 효과를 이용한다^[1]. 초음파 음향 에너지가 증가하면 매질 내에서는 미세 기포가 발생, 천이되는 캐비테이션 현상이 발생하는데, 이러한 기포군에 의한 물리적 에너지는 매우 크다. 치료 초음파 시술에서 캐비테이션 현상은 일반적으로 제약사항으로 평가되고 있지만, 캐비테이션 현상에 의해 발생하는 미세기포의 상호 간섭에 의하여 진단 영상에서는 고조파 신호량의 증가를 제공한다^[2]. 캐비테이션 발생에 대한 연구 중 서로 다른 두 개의 초음파를 교차시키면 중첩 현상에 의하여 캐비테이션 발생량이 증가하고^{[3],[4]}, 열 상승 효과도 향상된다는 다양한 연구가 보고되었는데^{[5],[6]}, 이러한 미세기포는 발생 후 천이되는 순간 848 bar 이상의 압력과 15,000 °K 이상의 온도가 발생하는 것이 보고되면서 치료 초음파의 한 분야로 부각되고 있다. 뿐만 아니라, HIFU 시술 시 매질 내부에 미세 기포가 존재하면 더욱 많은 온도 상승이 유발되며, 온도 상승에 소요되는 시간도 단축된다는 현상이 보고되면서 각종 치료 초음파에 캐비테이션을 이용하기 위한 연구가 지속적으로 증가해오는 추세이다^{[7],[8]}.

이에 본 연구에서는 단일 초음파 조사와 두 개의 저장도 초음파의 중첩 조사 시 발생하는 가열 특성을 평가하였다. 글리세롤 기반 초음파 조직유사 팬텀을 이용하여 각 조사조건에서 초음파 조사에 따른 가열 문턱치 변화, 최고 온도, 온도 상승 특성을 확인하였다.

II. MATERIAL AND METHOD

본 연구에서는 글리세롤 기반 초음파 조직 유사 팬텀을 이용하여 단일 초음파 조사와 중첩 초음파 조사에 따른 초음파 가열 특성을 평가하였다.

글리세롤 기반 초음파 조직 유사 팬텀은 IEC 60601-2-37에 명시되어 있는 초음파 연구 조직 유사 팬텀 제작 기준규격을 이용하여 제작하였다^[9]. 팬텀의 크기는 70 mm × 70 mm × 40 mm로 제작하였으며, 음속은 1,538.7 m/s, 감쇠계수는 0.56 dB/cm·MHz로 측정되었다.

Table 1은 본 연구에 사용된 글리세롤 조직유사 팬텀의 구성비를 나타내었다.

Table 1. Components of glycerol TMM phantom

Ingredient	weight ratio (%)
Glycerol	11.21
Distilled water	82.95
Benzalkoniumchloride	0.47
Silicone Carbide[SiC]	0.53
Aluminum oxide[Al2O3 (0.3 μm)]	0.88
Aluminum oxide[Al2O3 (3 μm)]	0.94
Agar	3.02
Total	100.00

초음파 가열을 위하여 중심주파수 500 kHz의 HIFU 용 집속형 변환기(SonicConcept 사 H-104 모델)를 사용하였다. 집속형 변환기의 지름은 81.8 mm, 최대 출력 400 W, 기하학적 집속 길이는 62.6 mm의 특징을 갖고 있으며, 집속점 형태는 지름 2.93 mm, 축방향 깊이 28.3 mm의 형태를 보였다. 주파수 대역폭은 ±100 kHz였다. 저장도 중첩을 이용한 가열 정도 평가를 위하여 1.5 MHz의 비집속형 변환기를 제작하여 사용하였다. 고출력 단일 초음파 변환기 제작을 위하여 이방성 특징을 지닌 하드계열의 PZT-4를 사용하였으며^[10], 흡음층으로 인한 음향 파워의 감소를 방지하기 위하여 흡음층은 부착하지 않았다. 또한, 효율적인 초음파 에너지 전달을 위하여 에폭시 수지와 산화알루미늄을 이용하여 제작된 2중의 정합층을 부착하여 제작하였다. 제작된 진동자의 직경은 20 mm, 집속점은 90.5 mm, 중심주파수는 1.48 MHz, 주파수 대역은 ±6800 kHz로 측정되었다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 집속형 변환기와 제작된 비집속형 변환기의 외형을 나타내었다.

초음파 가열을 위하여 33220A (Agilent Technologies, USA) 모델의 함수발생기와 AG1016 (T&C Power Conversion Inc., USA) 모델의 RF 증폭기를 사용하였으며, 3.5 Vp-p, 버스트 파를 사용하였다. 버스트파의 여기 간격은 100 μs, 듀티 사이클은 50 %, 주기 당 10개의 구형파를 사용하였다. 초음파 조사 강도는 0 ~ 100 W 범위에서 10 W 단위로 설정하였다. 온도 가열 특성은 팬텀 내 초음파 집속영역에 써모커플을 위치시킨 후

데이터 로거를 이용하여 0.5초 간격으로 측정하였다. Fig. 2는 초음파 가열 특성을 평가하기 위한 실험 블록도와 셋업을 나타내었다.

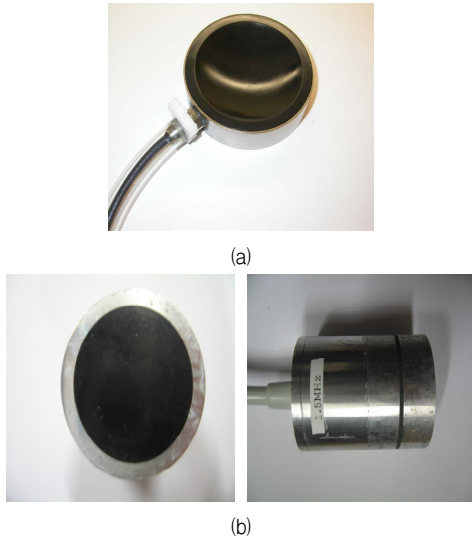


Fig. 1. Blockdiagram and experimental setup of ultrasonic heating. (a) 500 kHz transducer, (b) Fabricated single ultrasonic transducer.

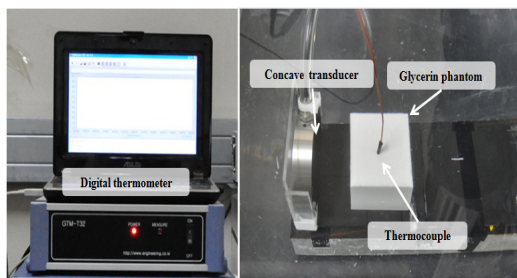
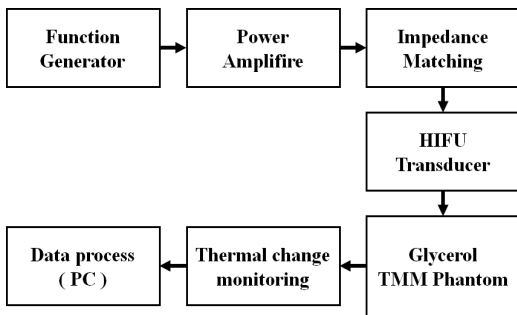


Fig. 2. Blockdiagram and experimental setup of ultrasonic heating.

중첩조사에를 위하여 1.5 MHz 비집속형 초음파 변

환기를 이용하여 30 W의 연속 초음파를 중첩시켰으며, 초음파 중첩에 의한 가열 문턱치 변화, 최고 온도, 온도 상승 특성을 확인하여 단일 조사조건과 비교 하였다. 중첩되는 1.5 MHz 초음파는 HSA4101(NF Corporation, Japan) 모델의 RF 증폭기와 동일 회사의 WF 194 3B 모델의 함수발생기를 이용하여 구동하였으며, 구동 신호는 연속 사각파, 초음파 중첩각은 45°로 설정하였다. 단일조사 및 중첩 조사 모두 60초 동안 조사하였으며, 이후 60초 동안 팬텀 내 온도 하강 특성을 측정하였다. Fig. 3은 초음파 중첩 조사에 따른 가열 특성을 평가하기 위한 실험 블록도와 셋업을 나타내었다.

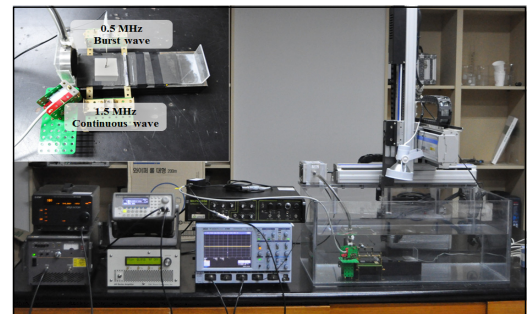
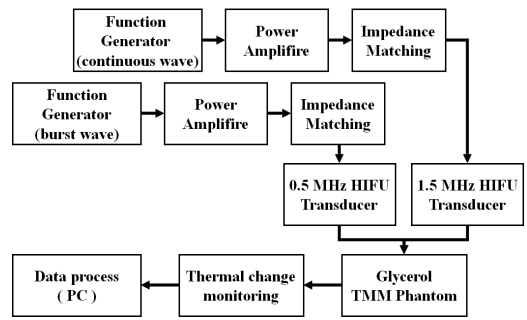


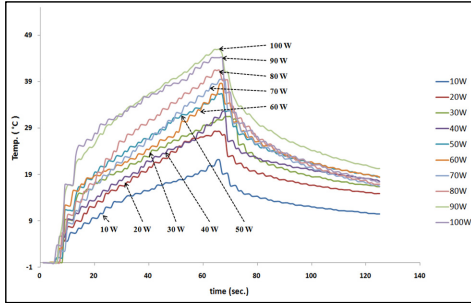
Fig. 3. Blockdiagram and experimental setup of ultrasonic heating with superposed sonication.

III. RESULT AND DISCUSSION

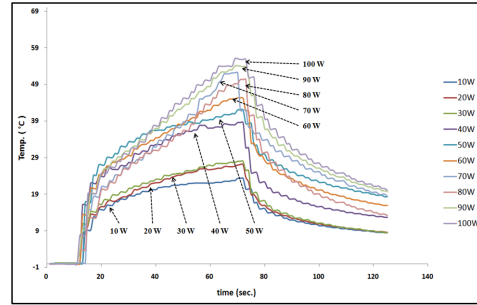
1. 단일 조사에서의 초음파 가열특성

500 kHz 곡면형 변환기를 이용하여 10 W ~ 100 W의 초음파를 조직유사 팬텀에 조사한 결과 조사 강도가 증가함에 따라 최대 상승 온도, 온도 증가폭이 증가함을 확인할 수 있었다. 초음파 조사와 동시에 순간적인 온도 상승 후 거둬제급의 형태로 온도가 상승하

는 형태를 보였으며, 조사 강도가 증가함에 따라 보다 급격한 온도상승 추세를 나타내었다. 하지만, 초음파 조사 직후에 발생하는 순간적인 온도 상승은 조사 강도에 관계없이 유사하였으며, 초음파 조사 후 발생하는 순간적인 온도 하강 및 자연냉각 추세도 조사 강도에 따른 차이점이 확인되지 않았다.



(a)



(b)

Fig. 4. Thermal increasing trends in glycerol TM phantom (a) single sonication, (b) superposed sonication.

Table 2. Results of heating test by single sonication and superposed sonication

Ultrasonic Intensity (Watt)	Single sonication				superposed sonication			
	T _{max} (°C)	T _{inc} (°C)	t _{inc} (sec.)	t _{th} (sec.)	T _{max} (°C)	T _{inc} (°C)	t _{inc} (sec.)	t _{th} (sec.)
10	45.3	22.1	40	3	42.4	23.4	23	3
20	49.4	28.3	41	3	46.1	27.1	30	2
30	53.1	31.5	39	4	49.6	28	32	2
40	55.7	32.5	48	2	55	38.6	34	2
50	57.1	36.3	39	3	61.2	42	32	3
60	61.9	38.5	47	2	62.9	45.4	45	2
70	64.1	39.5	43	2	70.6	52.2	46	3
80	64.3	41.4	40	2	74.1	50.3	46	1
90	67.3	45.9	41	2	75.6	54.15	45	1
100	68.4	44.3	36	1	80.4	56.1	44	1

- T_{max} : maximum temperature
- T_{inc} : maximum temperature increasement

- t_{inc} : turnaround time to 90 % of Tmax
- t_{th} : turnaround time to 110 % of initial temperature

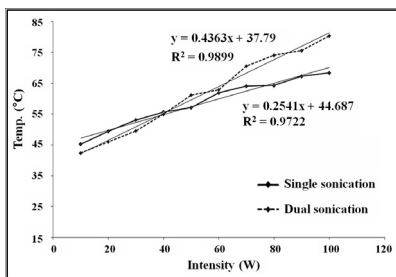
100 W 조사 강도에서 44.3 °C 증가하여 68.4 °C까지 가열되었으며, 최대 상승 온도의 90 %까지 가열되는데 소요되는 시간과 초기온도의 110 %까지 가열되는 시간(온도상승 문턱치)은 조사 강도가 증가함에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 단일 조사와 중첩 조사에서 조사 강도에 따른 팬텀 내 온도 상승 변화를 나타내었다.

2. 중첩 조사에서의 초음파 가열특성

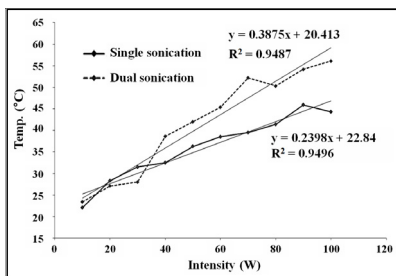
초음파 중첩 조사 조건에서의 가열 특성 측정결과 100 W 조사 강도에서 56.1 °C 증가하여 80.4 °C까지 가열되었다. 조사 강도에 따른 최대 상승 온도 추세는 0.4363(결정계수 0.9899)로 곡면형 변환기 연속과 단일 조사(증가추이 0.2541, 결정계수 0.9722)보다 약 1.7배

정도 급격하게 증가하였으며, 온도 상승폭은 약 1.6배 증가하는 것으로 확인되었다. 중첩조사 시 최대 온도는 약 118 %(100 W 기준), 온도 상승폭은 약 127 %(100 W 기준) 증가하는 것으로 관찰되었다. 표 2와 Fig. 5는 단일 초음파 조사와 중첩 조사에 따른 초음파 가열 특성을 보여주고 있다.

일반적으로 고강도 초음파 조사 시 음향임피던스 차에 의하여 매질의 표면에 손상이 발생한다. 본 연구에서는 초음파 가열에 평가에 사용된 팬텀을 이용하여 조사 강도에 따른 표면의 손상 정도를 확인하였다. 비교 결과 조사강도가 80 W 이상에서의 괴식흔은 좁고 깊은 형태가 관찰되었으며, 이하의 강도에서는 얇고 넓은 형태로 확인되었다. 또한, 조사강도가 50 W 미만에서는 표면 손상이 확인되지 않았다. 이러한 결과를 통하여 고강도 초음파 가열이 저강도 초음파 가열보다 전파매질에 더 큰 손상을 줘 위험성이 높다는 것을 확인할 수 있었다. 이에 본 연구에서 제시한 저강도 중첩 초음파 조사가 조직의 손상을 줄일 수 있으며, 동시에 온도 상승효과를 향상시킬 수 있을 것으로 판단되었다.



(a)



(b)

Fig. 5. Thermal increasing trends by ultrasonic intensity using superposed sonication. (a) Maximum temperature, (b) Increased temperature.

IV. CONCLUSION

본 연구에서는 단일 초음파 조사와 중첩 초음파 조사 조건에서의 가열 특성을 평가하기 위하여 글리세롤 조직 유사 팬텀에서의 온도 특성을 비교, 분석하였다. 비교 결과 단일 조사 조건보다 중첩 조사에서 보다 최대 상승 온도와 온도 상승 문턱 강도에서 우수한 온열 효과를 보였다. 최대 상승 온도도 120-150% 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 초음파 조사에 의한 가열 개시 시간이 중첩 조사에서 짧아지며, 최대 가열 온도까지 소요되는 시간 역시 짧아짐을 확인할 수 있었다. 초음파 조사 강도가 커짐에 따라 팬텀 표면의 손상이 심해지는 것이 확인되었는데, 중첩조사의 경우 저강도 초음파 사용이 가능해 조직의 손상 없이 동일한 온도 상승 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

본 연구의 결과를 통하여 초음파 치료 시 적용 강도를 줄일 수 있을 것으로 생각되었으며, 저강도 초음파를 사용함으로써 보다 안전하고 효율적인 초음파 치료가 가능할 것으로 판단된다. 100 W 미만의 저강도 초음파 중첩조사에 대한 관찰 및 열적 평가와 같은 본 연구의 접근은 새로운 초음파 치료 방법개발에 기초가 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 고강도 초음파 기술을 보조하는 방법으로 저강도 초음파의 활용 가능성을 보였으며 이는 치료 초음파의 효율성 향상 및 위험성을 낮출 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This work has been conducted by the Research Grant of International University of Korea in 2014.

Reference

- [1] M. R. Bailey, V. A. Khokhlova, O. A. Sapozhnikov, et al., "Physical Mechanisms of the Therapeutic Effect of Ultrasound(A Review)", *Acoustic Physics*, Vol. 49, No. 4, pp.437-464, 2003.
- [2] Sanghvi Narendra T., R. H. Hawes, "High-intensity focused ultrasound." *Gastrointest Endosc Clin N Am*, Vol. 4, No. 2, pp.383-395, 1994.
- [3] Iernetti G., Ciuti P., Dezhkunov, et al., "Enhancement of high-frequency acoustic cavitation effects by a low-frequency

- stimulation." *Ultrasonics sonochemistry*, Vol. 4, No. 3, pp.263-268, 1997.
- [4] Feng Ruo, Yiyun Zhao, Changping Zhu, et al., "Enhancement of ultrasonic cavitation yield by multi-frequency sonication." *Ultrasonics sonochemistry*, Vol. 9, No. 5, pp.231-236, 2002.
- [5] Y. S. Tung, H. L. Liu, C. C. Wu, et al., "Contrast-agent-enhanced ultrasound thermal ablation.", *Ultrasound in medicine & biology*, Vol. 32, No. 7, pp.1103-1110, 2006.
- [6] Holt, R. Glynn, Ronald A. Roy. "Measurements of bubble-enhanced heating from focused, MHz-frequency ultrasound in a tissue-mimicking material.", *Ultrasound in medicine & biology*, Vol. 27, No. 10, pp.1399-1412, 2001.
- [7] Krasovitski, Boris, Hanoch Kislev, Eitan Kimmel, "Modeling photothermal and acoustical induced microbubble generation and growth.", *Ultrasonics*, Vol. 47, No. 1, pp.90-101, 2007.
- [8] T. Yu, G. Wang, K. Hu, et al., "A microbubble agent improves the therapeutic efficiency of high intensity focused ultrasound: a rabbit kidney study", *Urol Res*. Vol. 32, pp.14-19, 2004.
- [9] J. H. Min, J. Y. Kim, S. C. Noh, et. al., "Development of Human-Head-Mimicking Phantom for Brain Treatment Using Focused Ultrasound", *J. Korean. Soc. Radiol.*, Vol. 7, No. 6, pp.433-439, 2013.
- [10] Ran Fu, Tong-Yi Zhang, "Effects of an Electric Field on the Fracture Toughness of Poled Lead Zirconate Titanate Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 83, No. 5, pp.1215-18, 2000.