

Observation of Acoustic Characteristic Change in bubble cloud by Ultrasonic Cavitation

Sicheol Noh^{*}, Juyoung Kim^{**}, Heungho Choi^{**}

Dept. of Radiological Science, International University of Korea, Jinju, 660-759, Korea^{},*

*Dept. of Biomedical Engineering, Inje University, Gimhae, 621-749, Korea^{**}*

초음파 캐비테이션에 의한 기포군에서의 음향특성 변화관찰

노시철^{*}, 김주영^{**}, 최홍호^{**}

한국국제대학교 방사선학과^{*}, 인제대학교 의용공학과^{**}

Abstract

Ultrasonic cavitation is a physical phenomenon that generates and collapses microbubbles in media (mainly fluids) under conditions of strong ultrasonic irradiation. In this study, changes in the ultrasonic acoustic characteristics of bubble clouds in relation to ultrasonic irradiation were observed by the quantitative evaluation of cavitation yields. Concave-type single ultrasonic transducers with center frequencies of 500 kHz and 1.1 MHz were used to produce cavitation, and 2.25 MHz interference ultrasonic waves that would traverse any bubble clouds generated were used to analyze the cavitation. The parameters used for the evaluation of cavitation yields (changes in the center frequency, attenuation characteristics, and the propagation time of penetrating waves) were analyzed in relation to the cavitation-generating conditions (irradiation intensity, excitation signal, and center frequency). On the basis of these results, correlations between the changes in the center frequency and irradiation intensity were identified. Although the correlation coefficient was low, notable changes were observed in the center frequency under certain irradiation conditions. Attenuation trends in the interference ultrasonic waves showed high correlations with all the irradiation conditions, and it was noted that these trends were not affected by the forms of cavitation generated. No differences in the propagation time were observed among different irradiation conditions. These findings suggest that bubble yields can be quantitatively evaluated effectively by evaluating the diverse irradiation conditions and that such a quantitative evaluation could be used to study the basic cavitation phenomenon occurring in high-intensity ultrasonic wave treatment.

Key Words: Ultrasonic Cavitation, Quantitative Evaluation, Acoustic Characteristic, Center Frequency Shift, Attenuation

요약

초음파 캐비테이션 현상이란 강한 초음파 조사 조건에서 매질(주로 유체) 내에서 미세기포를 발생시키고, 천이시키는 물리적 현상을 의미한다. 본 연구에서는 초음파 캐비테이션 발생량의 정량적 평가를 위하여 초음파 조사조건에 따른 기포군의 초음파 음향 특성변화를 관찰하였다. 중심 주파수가 500 kHz, 1.1 MHz인 곡면형 단일 초음파 변환기를

이용하여 캐비테이션 현상을 발생시켰으며, 형성되는 기포군을 가로지르는 2.25 MHz 간섭 초음파를 송/수신하여 분석하였다. 본 연구에서는 캐비테이션 발생량 평가를 위한 파라미터로 투과하는 파의 중심주파수 변화 및 감쇠 특성, 전파 시간을 제시하였으며, 캐비테이션 발생 조건(조사 강도 및 여기 신호, 중심주파수)에 따른 변화를 관찰하였다. 획득된 간섭 초음파 수신신호를 분석한 결과, 중심 주파수의 변화의 경우 상관계수는 낮지만 조사 강도에 따른 상관관계를 확인할 수 있었으며, 특정 조사 조건에서 주목할 만한 급격한 중심 주파수 변화가 관찰되었다. 조사조건에 따른 간섭 초음파의 감쇠 추세는 모든 조건에서 높은 상관관계를 보였으며, 캐비테이션 발생형태에 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다. 조사조건에 따른 전파 시간의 변화는 관찰되지 않았다. 차후 다양한 조사조건에 대한 평가를 통하여 보다 정량적인 캐비테이션 발생량 평가가 가능할 것으로 판단되며, 이러한 정량적 평가는 고강도 초음파 치료에서 발생할 수 있는 현상에 대한 기초 연구로서 활용 가능할 것으로 사료된다.

중심단어: 초음파 캐비테이션, 정량적 평가, 음향특성, 중심주파수 편향, 감쇠

I. 서론

초음파 캐비테이션 현상이란 강한 초음파 조사 조건에서 매질(주로 유체) 내에서 미세기포를 발생시키고, 천이시키는 물리적 현상을 의미한다. 캐비테이션 현상은 단일 기포 및 기포군의 생성 및 소멸, 주위환경에 미치는 영향 등의 특성이 매우 비선형적이며, 발생하는 환경에 따라 기포 생성량 및 수명주기가 민감하게 반응한다. 이러한 이유로 캐비테이션에 관한 많은 연구가 수행되에도 불구하고 발생 조건 및 제어에 대한 제한적인 연구만 수행되어져 왔다.

캐비테이션의 영향을 규명하기 위하여 발생량과 수명주기, 수학적 모델링과 이를 위한 발생량 산출을 위한 많은 연구가 수행되었는데, 특히 발생량 산출을 위한 기법으로 음향 형광, 음향 화학 반응, 주파수 분석법, 영상 분석법, 음향특성 분석법 등이 제시되었다^[1-4]. 하지만, 음향형광법, 음향 화학법, 주파수 분석법은 측정이 어렵고, 발생량을 간접적으로 측정하는 방법이다. 그 중, 음향 화학법과 음향 형광법을 이용한 측정방법은 측정을 위한 전처리 및 후처리 과정이 복잡하며, 측정 환경의 제한을 받는다는 단점이 있다. 또한, 주파수 분석법은 고조파 성분을 측정함으로써 캐비테이션 현상을 관찰하는 방법으로^[5] 측정이 간단하지만, 정확성과 재현성의 문제가 있으며, 센서의 형태에 따라 측정이 제한된다는 단점이 있다. 직접적인 평가방법으로는 영상분석법과 음향특성 분석법이 있는데, 영상 분석법은 실제로 발생되고 있는 기포의 현황

을 포착하여 분석한다는 장점이 있는 반면, 끊임없이 변하고 있는 기포 분포의 한 순간에서 획득한 영상으로 오차가 클 수밖에 없다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 초음파 캐비테이션 발생량의 정량적 평가를 위한 기초 연구로써, 강력 초음파 조사에 의하여 생성되는 기포군의 초음파 음향 특성변화를 관찰하였다. 초음파 선형이론에 따르면, 기포가 포함된 유체에서는 초음파 감쇠계수, 위상 전파 속도가 민감하게 변화하게 된다^[6]. 이에 본 연구에서는 캐비테이션 발생 영역을 가로지르는 초음파를 전파시켜 감쇠특성 및 전파속도, 중심주파수 변화를 관찰하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서는 곡면형 단일 초음파 변환기를 이용하여 캐비테이션 현상을 발생시키고 집속지점을 가로지르는 초음파를 송/수신하여, 투과하는 파의 중심주파수 변화 및 감쇠 특성, 전파시간의 변화를 관찰하였다. 초음파 캐비테이션 발생을 위하여 중심 주파수가 1.1 MHz인 H-101(SonicConcept 사, 미국) 모델과 중심 주파수 500 kHz인 H-104(SonicConcept 사, 미국) 모델의 HIFU용 집속형(concave type) 변환기를 사용하였다. 두 제품 모두 지름은 81.8 mm, 최대 출력 400 W, 기하학적 집속 길이는 62.6 mm의 특징을 갖고 있으며, 집속점 형태는 H-101의 경우 지름 1.26 mm, 축방향 깊이 11 mm, H-104의 경우 지름 2.93 mm, 축방향 깊이 28.3 mm의 형태를 보였다. 주파수 대역폭은 H-101은 ± 250 kHz, H-104는 ± 100 kHz 였다^[7].

캐비테이션을 발생시키기 위하여 함수발생기 모델 33220A(Agilent Technologies, 미국)를 이용하여 여기 신호를 만들고 AG1016(T&C Power Conversion Inc., 미국) 모델의 RF 증폭기와 임피던스 정합장치(H-101FB, H-104FB 모델, SonicConcepts, 미국)를 거쳐 변환기를 구동하였다. 초음파 여기 신호는 3.5 V_{p-p} 버스트파와 연속 구형파를 이용하였으며, 버스트파의 여기 간격은 100 μs, 듀티 싸이클은 50 %, 주기 당 10개의 구형파를 사용하였다. 초음파 조사 강도는 500 kHz, 1.1 MHz 모두 동일하게 0 ~ 100 W 범위에서 10 W 단위로 설정하였다⁸⁾.

집속지점을 가로지르는 초음파(이하 간섭파)는 2.25 MHz의 수침용 단일 트랜스듀서(AeroTech Co., 네덜란드, Φ=15 mm)와 MKPR-1030(M.K.C KOREA Inc., 한국) 모델의 초음파 송/수신장치를 이용하여 발생시켰다. 수신신호는 NHA-0400 모델(ONDA Co. Ltd., 미국)의 하이드로폰을 이용하여 검출하였으며, 디지털 오실로스코프 Wave-runner 6100을 이용하여 5 GS/s 속도로 저장하였다. 측정된 신호는 AcqKnowledge 3.2.6과 MATLAB 8.0a를 이용하여, 2.25 MHz 초음파 신호의 수신 신호에 대하여 변화를 관찰하였다. 그림 1과 2는 간섭파 측정을 위한 실험 장치의 블록도와 사진을 보여주고 있다.

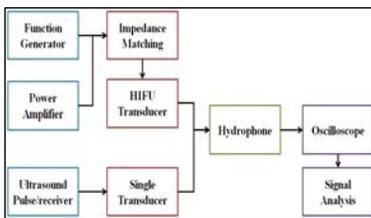


Fig. 1. Block diagram of A-mode interference measurement setup

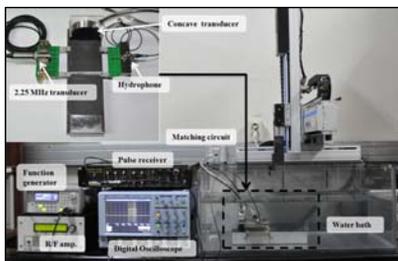
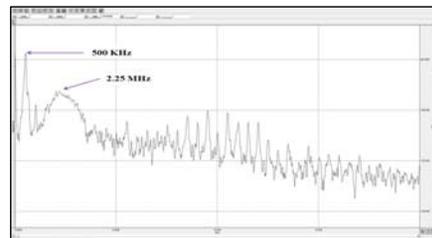


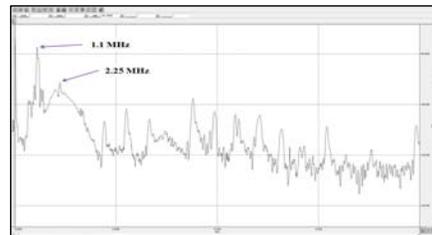
Fig. 2. Experimental setup and transducer alignment

III. 결과 및 고찰

본 연구에서는 곡면형 단일 트랜스듀서로부터 발생되는 기포가 단일 초음파 빔의 진행에 미치는 영향을 확인하고, 조사강도에 따른 기포발생량과 간섭 정도에 대한 관계를 관찰하였다. 그림 3과 그림 4는 500 kHz, 1.1 MHz 곡면형 단일 초음파 변환기를 이용하여 70 W 강도, 버스트파와 구형파를 조사하여 형성된 음장의 집속지점을 2.25 MHz 단일 초음파 빔이 가로지르도록 전파시킨 후, 하이드로폰으로 수신된 파의 주파수 스펙트럼을 보여주고 있다.

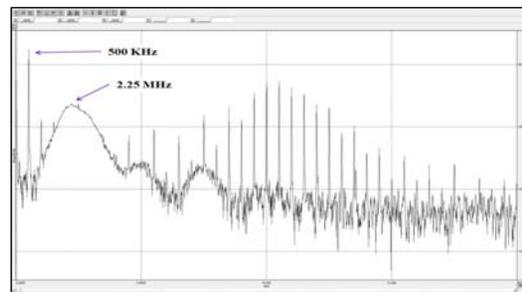


(a)

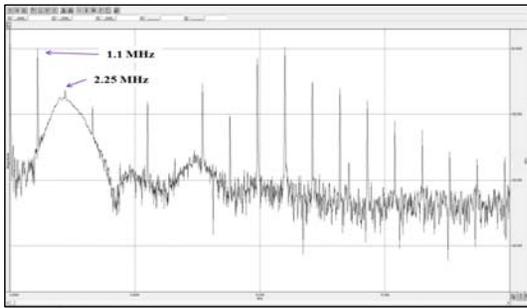


(b)

Fig. 3. Frequency spectrum of received interferences wave by using burst wave: (a) 500 kHz sonication, (b) 1.1 MHz sonication



(a)



(b)

Fig. 4. Frequency spectrum of received interference wave by using continuous square wave; (a) 500 kHz sonication, (b) 1.1 MHz sonication

획득된 신호를 분석하여 2.25 MHz 주파수 성분의 간섭정도인 중심주파수 편향 정도와 수신신호의 진폭 변화, 전파 시간 변화를 측정 한 결과, 간섭파의 중심주파수 편향 정도와 수신신호의 진폭변화는 강도와 의 상관관계가 버스트파와 구형파 모두에서 확인되었지만, 전파 거리의 변화는 확인되지 않았다.

간섭 초음파의 중심 주파수 변화 정도는 조사 강도의 변화에 따라 비교적 유의한 상관관계를 보였다. 먼저 버스트파를 이용하였을 경우 중심주파수의 변화 추이는 2차 상관관계식에 대하여 결정계수가 500 kHz 에서는 0.8274, 1.1 MHz에서 0.8185로 관찰되어 비교적 우수한 관계를 보였다. 중심 주파수의 변화는 두 가지 구동 주파수 모두 강도에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 60~70 W에서 급격한 주파수 편향이 관찰되었다. 이러한 변화추이는 강도에 따른 캐비테이션 발생량 평가 방법으로는 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 하지만, 급격한 주파수 편향이 관찰되는 조사조건에서 기포의 형태를 관찰한 결과 50 W 이상의 조사강도부터 천이형 캐비테이션이 육안으로 쉽게 관찰되며, 70 W 이상에서 매우 활발하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 캐비테이션 발생 조건이 안정형에서 천이형으로 변화하면 주파수 변화가 급격하게 나타남을 알 수 있었으며, 이러한 주파수 변화는 기포의 천이가 연속적이고 지속적으로 발생하여 강한 에너지가 발생할 수 있는 조사 조건으로 판단되었다. 따라서 이러한 주파수의 변화는 인가전압에 따른 평가로 사용될 수는 없지만 물리적 현상이 급격하게 발생하는 유효한

캐비테이션(천이형 캐비테이션) 발생의 문턱치 평가에 대한 접근으로 활용이 가능할 것으로 판단되었다. 그림 5는 버스트파를 사용하였을 때, 조사강도의 변화에 따른 간섭파 중심주파수의 변화 정도를 보여주고 있다.

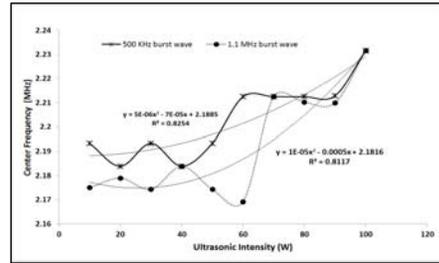


Fig. 5. Center frequency shift trend of interference wave by sonication intensity with burst wave excitement

구형의 연속파를 이용하였을 경우 2차 상관관계식에 대한 결정계수가 500 kHz에서는 0.5085, 1.1 MHz에서 0.3185로 관찰되어 추세의 유의성이 없는 것으로 판단되었다. 하지만, 버스트파를 사용하였을 경우와 유사하게 조사강도가 증가할수록 변화가 증가하는 경향을 보였으며, 주파수 변화가 급격하게 발생하는 현상이 확인되었다. 급격한 변화가 발생하는 강도는 버스트파를 이용하였을 경우에 비하여 10 W 정도 높게 관찰되었는데, 이러한 현상은 연속파 사용에 따라 발생하는 매질 내 대류현상에 기인하는 것으로 판단되었다. 이러한 현상도 스펙트럼 분석의 결과와 유사한 것으로 사료되었다. 그림 6은 구형의 연속파를 사용하였을 때, 조사강도의 변화에 따른 간섭파 중심주파수의 변화 정도를 보여주고 있다.

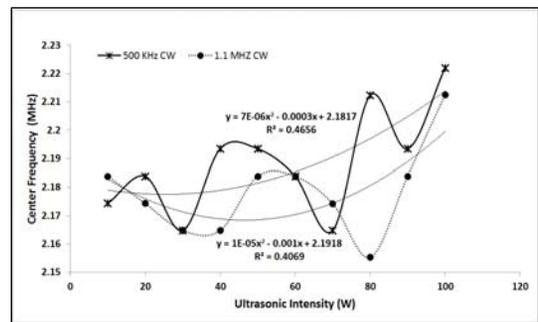


Fig. 6. Center frequency shift trend of interference wave by sonication intensity with continuous square wave excitement

두 번째로, 조사 강도에 따른 간섭파의 수신 감도 변화를 관찰하였다. 측정 결과 구동 주파수와 여기 신호의 형태에 상관없이 HIFU의 강도에 따라 간섭파 수신신호의 변화 추이는 매우 높은 상관관계를 나타내었다. 버스트파를 사용하였을 경우, 1차 선형관계식에 대하여 결정계수가 500 kHz에서는 0.7197, 1.1 MHz에서 0.8544로 측정되었다. 조사 강도의 증가에 따라 안정적인 감소 추세를 보였으며, 이러한 결과는 차후 저강도 다중 초음파를 이용한 캐비테이션 현상의 평가에 유용하게 활용될 것으로 판단되었다. 그림 7은 버스트 파를 사용하였을 때, 인가 강도의 변화에 따른 간섭파 수신신호 진폭의 감소 추세를 보여주고 있다.

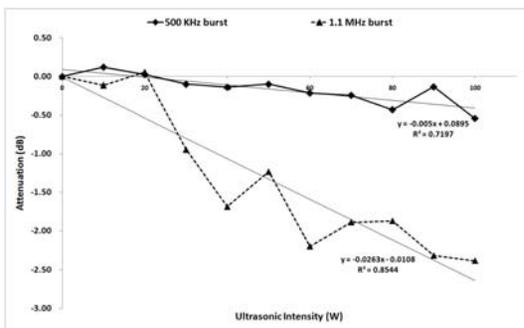


Fig. 7. Attenuation trend of received interferences wave at 500 kHz and 1.1 MHz burst wave sonication

구형의 연속파를 사용한 결과, 1차 선형관계식에 대하여 결정계수가 500 kHz에서는 0.8469, 1.1 MHz에서 0.7795로 측정되었으며, 조사 강도의 증가에 따라 안정적인 감소 추세를 보였다. 하지만, 버스트파의 경우와 비교하였을 때, 감소의 편차가 크게 관찰되었는데, 이는 연속파 사용 시 버스트파의 사용보다 대류의 현상이 많이 발생되기 때문이라고 판단되었는데, 이러한 대류 현상에 의하여 간섭파가 전파되는 경로에 위치하는 기포의 밀도 변화가 크기 때문으로 판단되었다. 이러한 현상은 버스트파를 사용하였을 때 100 W에서 관찰되는 스펙트럼 잡음의 증가, 주파수 변화의 불안정 현상과 유사한 원인으로 판단되었다. 그림 8은 연속파를 사용하였을 때, 인가 강도의 변화에 따른 간섭파 수신신호 진폭의 감소 추세를 보여주고 있다.

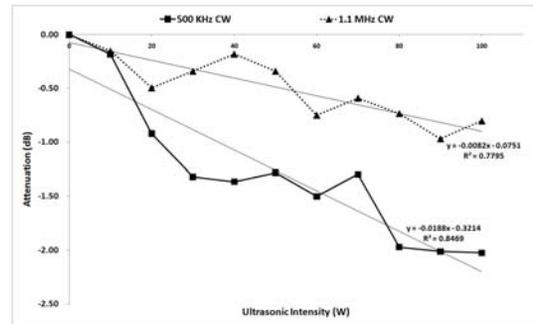


Fig. 8. Attenuation trend of received interferences wave at 500 kHz and 1.1 MHz continuous square wave sonication

일반적으로 초음파의 전파경로에 기포가 존재하면 음속의 큰 변화가 발생하는데, 이러한 물리적 현상은 Medwin(1970), Prosperetti(1985), Lu et al(1990) 등에 의해서 보고된바 있다. 이에 본 연구에서는 조사 강도에 따른 간섭파의 전파 시간의 변화를 관찰하였는데, 측정 결과 구동 주파수와 여기 신호의 형태, 조사강도의 변화에 대하여 전파 시간의 변화 추이는 상관관계는 확인되지 않았다. 이러한 현상은 간섭 초음파 변환기의 빔폭이 캐비테이션 발생영역(곡면형 단일 진동자의 집속지점)에 비하여 크기 때문에 구분이 되지 않은 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 실험 셋업 시 간섭 초음파의 전파 경로를 곡면형 단일 진동자의 집속지점을 가로지르도록 설정하였는데, 차후 집속영역보다 조금 후방의 넓게 방사되는 기포군이 넓게 분포하는 지점을 간섭파가 전파하도록 조절하면 속도의 변화는 관찰이 가능할 것으로 판단되었다. 하지만 이는 집속 지점에서의 기포군 밀도를 고려하지 못하며 비선형적으로 방사되는 캐비테이션의 발생 형태를 고려하였을 때 바람직하지 못한 측정 방법으로 판단되었다.

IV. 결론

본 연구에서는 강력 초음파 조사 시 발생하는 캐비테이션 발생량의 정량적 평가를 위하여 조사강도 변화에 따른 기포군의 초음파 음향 특성변화를 관찰하였다. 곡면형 단일 초음파 변환기를 이용하여 캐비테이션 현상을 발생시키고 형성되는 기포군을 가로지르는 간섭 초음파를 송/수신하였다. 수신된 투과 중심 주파수 변화 및 감쇠 특성, 전파시간의 변화를 관찰하

여 캐비테이션 모니터링 파라미터로 제시하였다.

획득된 간섭 초음파 수신신호를 분석하여 중심 주파수 변화와 수신신호의 진폭 변화, 전파 시간 변화를 측정된 결과, 간섭파의 중심주파수 편향 정도와 수신신호의 진폭변화는 초음파 조사강도와 상관계수가 버스트파와 구형파 모두에서 확인되었다. 하지만 전파 시간의 변화는 관찰되지 않았다. 버스트파를 이용한 실험 결과 중 조사강도 60~70 W에서 급격한 주파수 변화가 관찰되었는데, 이는 캐비테이션이 발생하는 조건이 안정형에서 천이형으로 변화하기 때문으로 판단되었다. 이러한 결과는 차후 조사조건에 따른 변화 관찰 및 문턱치 평가에 유용할 것으로 판단되었다. 연속파를 이용한 중심 주파수 실험 결과는 상관계수는 낮지만 변화의 추세는 확인할 수 있었으며, 문턱치로 판단되는 급격한 중심 주파수 변화도 확인 할 수 있었다. 연속파 조사에서는 천이형 캐비테이션이 발생하기 위한 조사강도가 조금 더 필요한 것으로 확인되었는데, 이는 조사조건에 따른 매질 내 흐름(streamling)현상의 차이에 의한 것으로 판단되었다. 조사조건에 따른 간섭 초음파의 감쇠 추세는 모든 조건에서 높은 상관관계를 보였으며, 캐비테이션 발생형태에 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다. 하지만, 조사 조건에 따른 감쇠 특징이 확연하게 구분되어 추가적인 평가를 통한 고찰이 필요할 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 조사 조건의 변화에 따른 캐비테이션 발생 현상과 그에 따른 음향 특성변화를 감쇠와 중심주파수 변화, 전파시간을 이용하여 관찰하였고, 제시한 파라미터가 캐비테이션 발생량 평가 요소로서 유용함을 확인할 수 있었다. 차후 다양한 조사조건에 대한 평가를 통하여 보다 정량적인 캐비테이션 발생량의 평가가 가능할 것으로 판단되며, 이러한 정량적 평가는 고강도 초음파 치료에서 발생할 수 있는 현상에 대한 기초 연구로서 활용 가능할 것으로 사료된다.

Reference

[1] Christopher E. Brennen, "Cavitation and Bubble Dynamics", New York: Oxford University Press Inc., pp. 113-133, 2005.
[2] E. A. Neppiras, "Acoustic cavitation thresholds and cyclic processes", Ultrasonics, vol. 18, pp. 201-209, 1980.
[3] G. Iernetti, P. Ciuti, N. V. Dezhkunov, et al, "Enhancement of

high-frequency acoustic cavitation effects by a low-frequency stimulation", Ultrasonics sonochemistry, vol. 4, pp. 263-268, 1997.

[4] Ruo Feng, Yiyun Zhao, Changping Zhu, et al, "Enhancement of ultrasonic cavitation yield by multi-frequency sonication", Ultrasonics sonochemistry, pp. 231-236, 2002.
[5] K. Wojs, T. gudra, R. redzicki, "Experimental research into the cavitation noise spectrum in water solutions of high molecular weight polymers", Ultrasonics, vol. 44, pp. 350-359, 2006.
[6] 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, pp. 437-464, 2003.
[7] <http://www.sonicconcepts.com>
[8] S. C. Noh, J. Y. Kim, J. S. Kim, et. al., "New approach for quantitative measurement of ultrasonic cavitation yields", 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 1241-1244, 2011.