

기포군 영상분석을 통한 초음파 캐비테이션 현상의 변화 관찰

노시철¹ · 김주영² · 김진수² · 강정훈² · 최흥호^{2,+}

Ultrasonic Cavitation Effect Observation Using Bubble Cloud Image Analysis

Si-Cheol Noh¹, Ju-Young Kim², Jin-Su Kim², Jung-Hoon Kang², and Heung-Ho Choi^{2,+}

Abstract

In this study, in order to evaluate the yield of bubble by ultrasonic cavitation in HIFU sonication, the bubble image analysis was performed. The changing phenomenon of cavitation effect according to the sonication condition was discussed by analyzing the bubble image. Especially the appearance of bubble cloud, the size of micro-bubble, and the yield of bubble were considered. The 500 KHz and 1.1 MHz concave type ultrasonic transducers were used for HIFU sonication. Computer controlled digital camera was used to obtain the bubble image, and the binary image processing(binarization coefficient : 0.15) was performed to analyze them. In results of 500 KHz and 1.1 MHz transducer, the area of bubble cloud was increased in proportion to the rise in sonication intensity(R^2 : 0.7031 and 0.811). The mean size of single microbubble was measured as 98.18 μm in 500 KHz sonication, and 63.38 μm in 1.1 MHz sonication. In addition, the amount of produced bubble was increased in proportion to sonication intensity. Through the result of this study and further study for variable image processing method, the quantitative evaluation of ultrasonic cavitation effects in HIFU operation could be possible with the linearity associated with the sonication conditions.

Keywords : Ultrasound cavitation, Bubble cloud, Cavitation yield evaluation

1. 서론

초음파 캐비테이션 현상은 일반적으로 진단 초음파 및 치료 초음파에서 지양해야할 현상으로 평가되어 왔다. 진단 초음파에서는 스펙클 잡음을 발생시켜 이미지의 질적 저하를 가져오며, 전파 속도의 오차를 유발하여 오진의 가능성을 높이고 폐 등 기포가 많은 장기에 대한 영상화를 제한하는 존재로 인식되어 왔다. 또한, ESWT(Extracorporeal Shock Wave Therapy), HIFU(High-Intensity Focused Ultrasound)와 같은 치료 초음파 기술에서는 초음파 에너지 전달 효율을 저하시키고, 집속점의 틀어짐을 유발하여 효율적인 치료를 방해하고, 치료 조건 설정을 제한하여 치료 시간을 길어지게 하며, 치료의 위험성을 높이는 것으로 판단되어 왔다. 이에 캐비테이션의 발생 유무는 치료 초음파에서 매우 중요한 관리요소로서 발생을 억제하기 위하여 최대한 노력해왔다[1]. 하지만, 초음파 기술의 발전으로 초음파 미세기포로 인하여 발생되는 스펙클 잡음으로부터 비선형 하모닉스 성분의 분석이 가능

해짐에 따라 새로운 신호원으로 인식되었다. 이러한 하모닉스 성분은 조사되는 초음파 주파수보다 고주파 성분이므로 영상의 공간 분해능을 향상시키고, 상대적으로 전파 과정에서의 감쇠 효과가 작기 때문에 심부 영상 검출에 유리하다는 장점을 갖는다[2, 3]. 이러한 특징으로 미세기포의 초음파 조영제로써 활용도가 높아지게 되었으며, 현재 다양한 크기와 기포막 재질, 내부 기체 종류가 상품화 되어 임상에서 사용되고 있다. 또한 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 기술 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[4, 5].

캐비테이션의 발생기전과 주변에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 보고되었는데, 캐비테이션의 영향을 규명하기 위하여 발생량과 수명주기, 수학적 모델링과 이를 위한 발생량 산출을 위한 많은 연구가 있다. 발생량 산출을 위한 기법으로 음향 형광, 음향 화학 반응, 주파수 분석법 등이 제시되었으며, 최근 캐비테이션과 주파수 스펙트럼과의 상관관계 및 발생 문턱치에 대한 많은 연구가 보고되고 있다. Nepiras는 1980년 캐비테이션이 발생하기 직전

¹ 한국국제대학교 방사선학과(Dept. of Radiological Science, International University of Korea)

² 인제대학교 의생명공학과(Dept. of Biomedical Engineering, Inje University)
+ Corresponding Author : hhchoi@inje.ac.kr

(Received : Dec. 7, 2010, Revised : Mar. 8, 2011, Accepted : Mar. 15, 2011)

저조파 성분의 급작스런 증가를 확인하여 문턱치에 대한 연구를 보고하였으며[6], 1994년 Leighton은 소금물을 이용하여 캐비테이션 노이즈의 발생이 스펙트럼 분석을 통하여 관찰이 가능하다고 언급하였다[7]. 이렇게 캐비테이션의 발생에 관한 연구는 지속적으로 진행되고 있지만, 캐비테이션 현상이 매우 비선형적이며, 주위 환경 및 매질에 대하여 민감하고, 기포군의 정확한 기하학적 연구가 많지 않으며, 1차적으로 발생하는 캐비테이션 현상이 2차적 발생에 미치는 영향에 대한 정량적 평가가 어렵기 때문에 정량적인 측정이 제한적이며 어렵다. 또한, 캐비테이션이 발생하는 시간과 수명 주기가 매우 짧고 발생하는 기포의 크기도 매우 작기 때문에 측정 시스템 설계에 많은 제약이 있어 발생 조건 및 제어에 대한 제한적인 연구만 수행되어져 왔다.

이에 본 연구에서는 HIFU 조사 시 발생하는 캐비테이션 발생량 확인을 위하여, 발생하는 기포군의 영상을 분석하였다. 이를 통하여 조사 강도에 따른 기포군의 형태변화와, 발생하는 미세기포의 크기, 기포 발생량 등을 측정하였으며, 상관관계를 고찰하였다.

2. 실험 재료 및 방법

본 연구에서는 초음파 조사 강도에 따른 기포 발생량을 확인하기 위하여 HIFU용 집속형(concave type) 초음파 변환기를 사용하였다. SonicConcept 사의 H-101(중심 주파수 1.1 MHz)과 H-104(중심 주파수 0.5 MHz) 모델을 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[8].

본 연구에서는 캐비테이션 영상을 이용하여 기포군의 형태 및 크기, 기포의 크기를 관찰하기 위하여 MATLAB 8.0 프로그램을 이용하여 영상처리 하였다. 디지털 카메라로 획득된 영상을 이진화 영상으로 변환한 후, 픽셀의 크기와 계산된 픽셀의 수를 이용하여 캐비테이션 발생량 및 단위 기포의 크기를 측정하였다. 영상의 처리를 위한 이진화에 있어 변환의 기준이 되는 이진화 계수의 설정은 매우 중요하다. 이러한 계수의 설정은 데이터 소실에 대한 고려, 영상 잡음으로 인한 오차에 대한 고려, 초점 심도(depth of focus) 및 피사체 심도(depth of field)에 대한 고려가 요구된다. 이에 본 연구에서는 측정된 원영상에 대하여 이진화 계수를 변화시켜 이진화 영상을 생성하고 이를 원영상과 비교함으로써 이진화 계수를 설정하였다. 또한, 각각의 영상에 대한 음영상(negative image)을 비교하여 유효 데이터의 소실을 최소화 하였다. 이진화 계수 0.1 이하의 영상에서는 수조 후면 및 변환기 지그 등의 영향이 제거되지 못하였으며, 이진화 계수 0.2 이상의 영상에서는 유효 기포 영상이 과다하게 제거되는 것으로 관찰되었다.

이진화 계수를 0.1에서 0.2 범위에서 0.01 간격으로 설정하여 기포군의 이진화 영상을 관찰하였으며, 유효기포 영상의 처리 정도와 초점심도의 영향을 고려하여 본 연구에서는 이진화 계수를 0.15로 결정하였다. Fig. 1은 기포군의 이진화 계수의 변화에 따른 영상 변화와 음영상의 변화를 보여주고 있다(500 KHz, 60 W, 버스트파 구동)

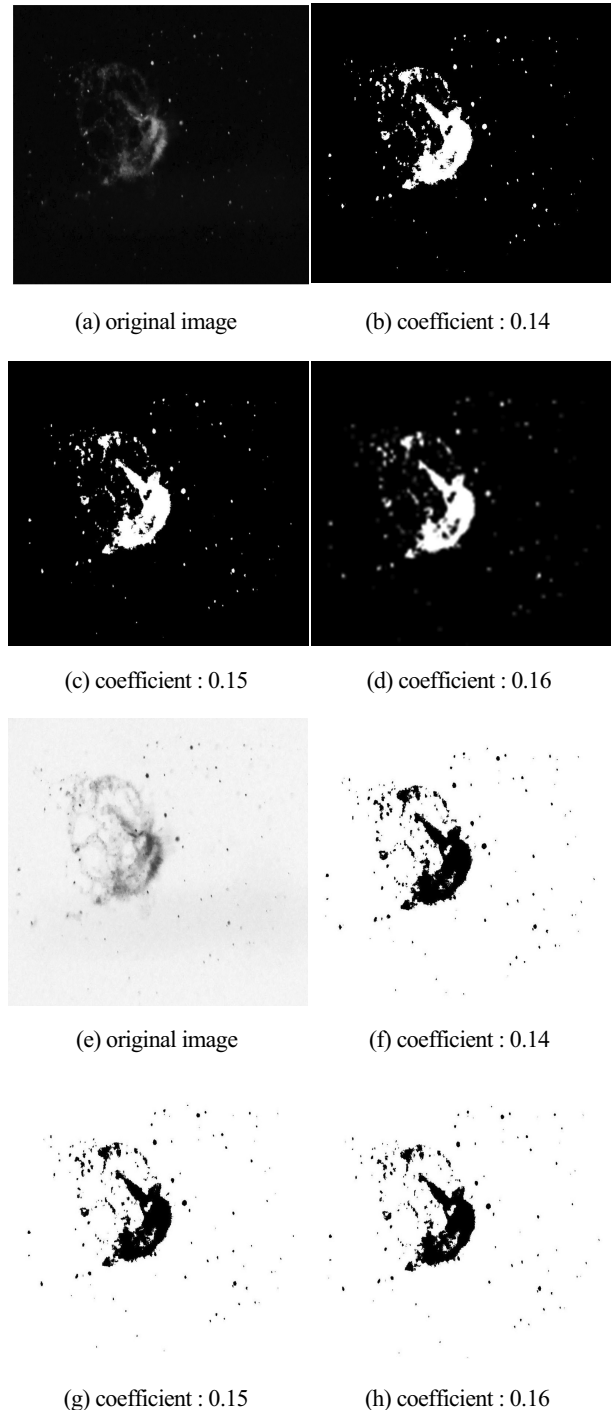


Fig. 1. Bubble cloud image with different converting coefficient at 500 KHz, 60 W(left: positive images, right: negative images).

본 연구에서는 디지털카메라 D90(Nikon, Japan)과 75PAR30/FL 모델의 75 W 할로겐 광원(General Electric, USA) 2개를 이용하여 기포군의 형태와 분포량을 관찰 하였다. 디지털 카메라의 최대 분해능은 1,230만 화소였으며, 획득된 영상의 크기는 JPEG(8 bit)의 $4,288 \times 2,048$ 로 설정하였다. 18-55 mm VR 렌즈를 사용하였으며, 조리개 설정은 F4, 셔터 스피드는 1/4,000 초, ISO 감도는 3,200으로 설정하였으며, 초당 4 프레임의 속도로 이미지를 획득하였다. 디지털 카메라의 설정 및 제어는 Nikon Camera Control Pro 2 프로그램을 이용하였으며, 촬영된 영상을 PC에 저장하였다. 단위 픽셀의 크기를 측정한 후, 2진화된 영상을 이용하여 형성된 기포군의 크기와 단일 기포의 크기를 측정하였다. 초음파 출력은 33220A(Agilent Technologies, USA) 모델의 함수발생기와 AG1016(T&C Power Conversion Inc., USA)모델의 RF 증폭기를 사용하였으며, 3.5 V_{P-P} 버스트파를 사용하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 기포 영상 측정을 위한 실험 장치의 블록도와 사진을 보여주고 있다. 측정된 영상을 이용하여 조사 강도와 구동 주파수에 따른 기포군의 형태 변화, 크기 변화를 비교하였으며, 단일 기포의 크기 변화와 구동 주파에 따른 기포 크기의 분포를 관찰 하였다. 또한, 기포군에서 형성되는 기포의 수를 측정하여 변화를 확인하였다.

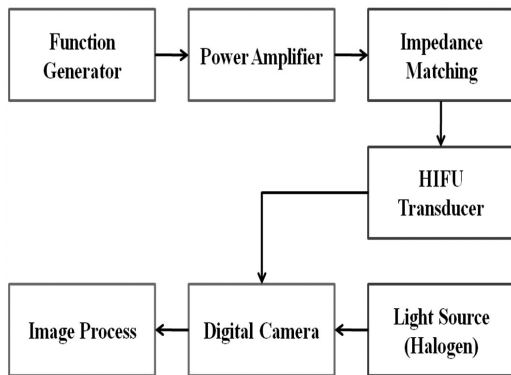


Fig. 2. Block diagram of Bubble cloud image acquisition setup.

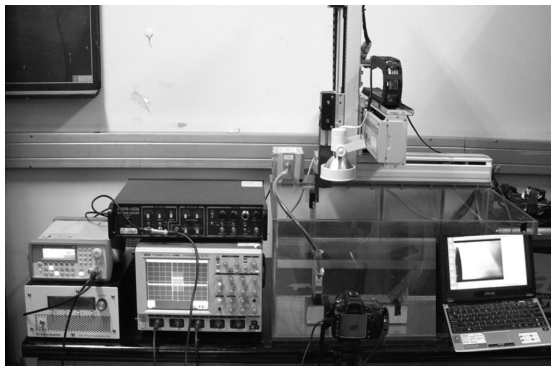


Fig. 3. Bubble cloud image acquisition setup.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 곡면형 단일 초음파 변환기의 중심 주파수와 강도 변화에 따른 기포군의 형태 및 크기, 단일 기포의 크기, 기포 크기의 분포, 발생 기포수를 측정하였다. MATLAB을 이용하여 0.15 계수로 2진화 영상을 만들었으며, 측정된 영상의 픽셀 분해능을 측정하여 계산하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 500 KHz와 1.1 MHz 곡면형 트랜스듀서를 이용하여 버스트파를 65 W 강도로 조사하였을 때 발생된 기포군의 영상을 보여주고 있다. 본 실험에서 사용된 카메라의 픽셀 분해능은 가로, 세로 모두 25 um, 단위 면적은 625 um²로 측정되었다.

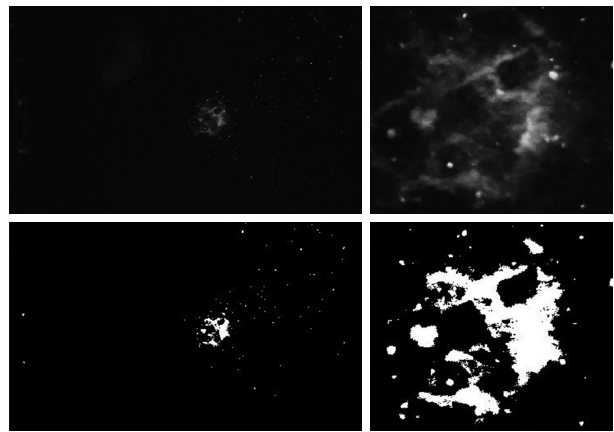


Fig. 4. Bubble cloud image at 500 KHz, 65 W.

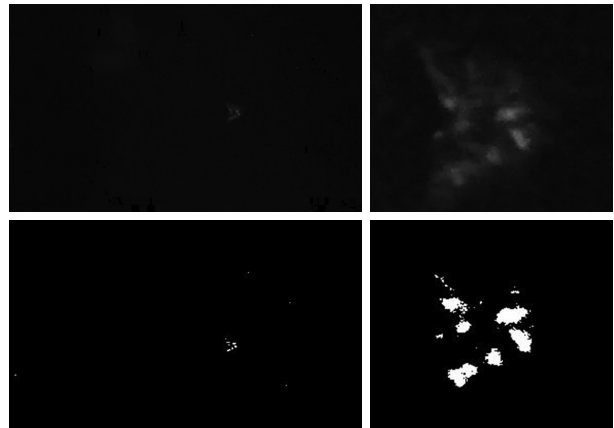


Fig. 5. Micro-bubble image at 500 KHz, 30 W(18 pixels, area : 0.0113 mm², Φ : 119.95 um).

Fig. 6과 Fig. 7은 미세기포라고 판단되는 부분을 관심영역으로 설정하여 크기를 측정하는 모습을 보여주고 있다. 측정결과 30 W 조사 시 500 KHz에서는 기포의 지름이 119.95 um로 측정되었으며, 동일 조사 조건의 1.1 MHz에서는 기포의 지름이 62.83 um로 측정되었다.

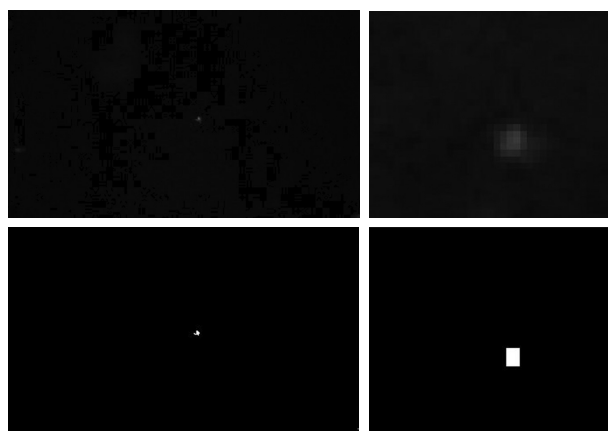


Fig. 6. Bubble cloud image at 1.1 MHz, 65 W.

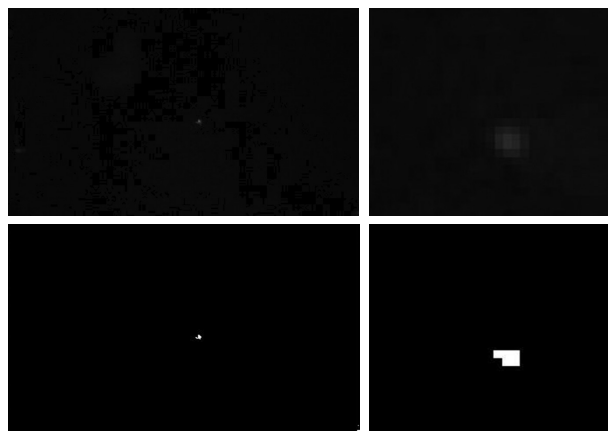


Fig. 7. Micro-bubble Image at 1.1 MHz, 30 W(5 pixels, area : 0.0031 mm², Φ : 62.83 μ m).

Fig. 8은 곡면형 단일 트랜스듀서를 이용하여 조사하였을 때 발생하는 기포군의 크기의 변화를 보여주고 있다. 500 KHz와 1.1 MHz 모두에서 조사강도와 기포군의 면적이 정비례하는 결과를 보였으며, 결정계수의 값은 0.7031과 0.811로 비교적 높은 값을 보였다. 특정 구간에서 약간의 편차가 발생하였는데, 이러한 현상은 기포군이 방사하는 형태가 동일한 밀도를 가지고 진행되는 것이 아니라, 매질(액체)의 대류와 초음파 방사력에 의하여 비선형적 운동 패턴에 의한 결과값으로 판단되었다.

또한, 영상을 획득하는 과정에서 광원의 부착 위치에 따라 조사 광량이 불균등해 발생할 수도 있을 것으로 판단되었으며, 아크릴 재질의 수조 외부에서 영상을 획득함에 따른 광학적 오차라고 판단되었다. 차후 이러한 부분에 대한 보완을 통하여 보다 정확한 상관관계를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

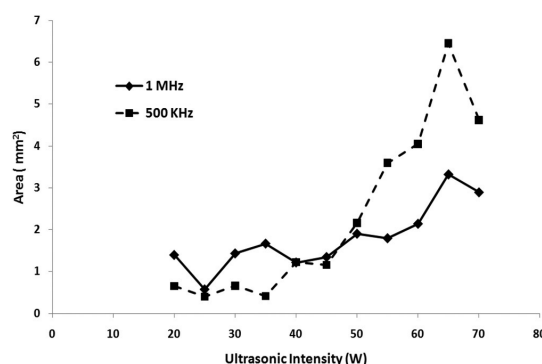


Fig. 8. Bubble area trend by ultrasonic intensity.

발생되는 기포의 크기는 조사되는 초음파의 중심주파수와 밀접한 관계가 있다. 이에 본 연구에서는 구동 주파수와 인가강도에 따른 발생기포의 크기를 측정하였다. 구동 주파수별 100개의 미세기포를 관찰하였으며, Fig. 9와 10은 조사 조건에 따른 발생 기포의 지름 변화를 측정한 결과를 보여주고 있다. 500 KHz에서 발생하는 기포의 크기는 최소 49.18 μ m, 최대 132.55 μ m, 평균 98.18 μ m로 측정되었으며, 표준편차는 17.12 μ m로 계산되었다. 1.1 MHz에서 발생하는 기포의 크기는 최소 32.79 μ m, 최대 104.78 μ m, 평균 63.38 μ m, 표준편차는 16.62 μ m로 측정되었다. 일반적으로 캐비테이션에 의한 미세기포의 크기는 조사되는 초음파 주파수와 밀접한 관계를 갖는데, 이는 음향에너지에 의한 매질의 변위 시간이 조사되는 음향에너지의 파장과 관계가 있기 때문이다. 따라서 발생하는 기포의 크기는 고주파보다 저주파 조사 시 큰 값을 갖는다. 본 연구에서도 500 KHz에서의 크기가 1.1 MHz의 크기보다 1.5 배 크게 측정되었다. 조사 강도가 증가함에 따라 기포의 크기가 증가하는 추세를 보였는데, 이는 조사 주파수의 차이 또는 조사시간에 따른 결과가 아니라, 조사 강도가 증가함에 따른 매질(탈기수)의 대류에 의하여 미세기포간의 결합에 의하여 발생하는 현상으로 판단되었다.

Fig. 11과 Fig. 12는 구동 주파수에 따른 발생기포의 크기 분포를 보여주고 있다. 500 KHz 조사 조건에서는 평균보다 큰 기포가 많은 것으로 확인되었는데, 이는 55 W 이상에서 천이형 캐비테이션이 많이 발생하여 주변에 영향을 미쳐 미세기포가 조금 크게 형성된 결과로 판단되었다. 1.1 MHz 조사조건에서 50~60 μ m 크기의 기포가 많이 관찰되는 것은 20 W 조사 조건에서의 미세기포 크기가 매우 작게 측정되었기 때문으로 사료되었는데, 이렇게 평균 크기보다 매우 작게 측정된 결과는 실제로 발생하는 기포의 크기의 변화가 아니라, 기포 영상 획득과정에서 광원 및 기타 장비의 위치, 매질 내 대류 정도, 디지털 카메라의 심도, 2진화 영상화에 따른 오차에 의한 결과로 판단되었다.

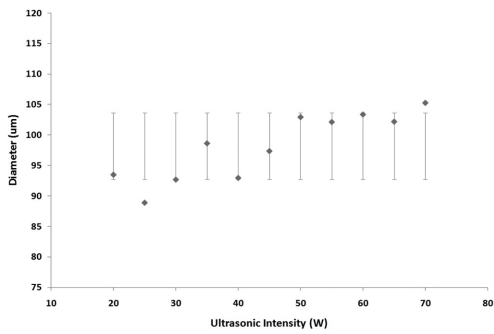


Fig. 9. Bubble diameter trend by ultrasonic intensity at 500 KHz.

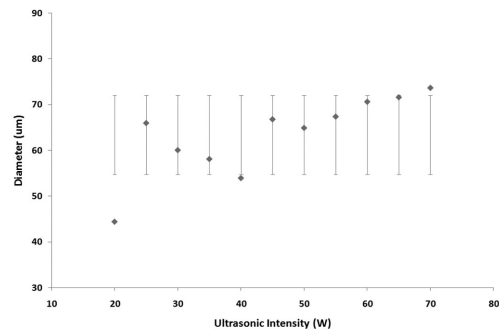


Fig. 10. Bubble diameter trend by ultrasonic intensity at 1.1 MHz.

Fig. 13은 구동 주파수와 조사 강도에 따른 발생 기포수의 변화를 보여주고 있다. 본 연구에서 측정된 기포의 평균 크기와 기포군의 크기를 이용하여 계산하였다. 측정결과 500 KHz 보다 1.1 MHz에서 발생하는 기포의 수가 많은 것으로 관찰되었는데, 이는 빠른 진동에 의하여 기포의 발생이 더욱 용이하기 때문에 판단되었다. 기포의 크기 및 기포군의 면적은 작지만, 다량의 기포를 발생시킬 수 있어 이를 이용한 활용이 가능할 것으로 판단되었다. 500 KHz에서는 조사강도가 증가함에 따라 발생하는 기포의 수가 선형적으로 증가하는 것으로 관찰되었다.

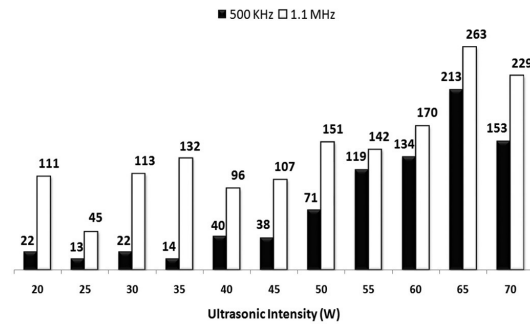


Fig. 13. Number of bubbles according to ultrasonic intensity.

4. 결론

초음파 캐비테이션 현상을 관찰하는 방법이 있어 집중지점에서의 기포군 변화 관찰은 의미가 크다. 집중지점에서의 기포군 형태는 산란과 흡음의 역할을 통하여 2차적인 캐비테이션 현상에 큰 영향을 주는데, 이러한 비선형적 열 상승 현상은 ESWT나 HIFU와 같은 고강도 치료 초음파에서 반드시 고려해야 할 사항이다. 고강도 초음파 음장 영역에서의 캐비테이션은 매우 짧은 시간에 발생하고 곧 소멸한다. 또한 기포의 수 십 µm 크기로 매우 작다. 이러한 기포 하나의 크기는 매질의 환경과 구동 주파수에 의해서 결정되며, 구동 주파수와 상관계에 의하여 고조파 또는 저조파 형태의 방사 또는 흡음체의 역할을 하게 된다. 일반적으로 액체 내에서 기포군의 형태는 집중점에서 타원형으로 형성되지만, 강한 음압 에너지로 인하여 변환기의 반대 방향으로 꼬리 모양의 형태를 갖게 된다. 기포군은 집중점에서 벗어나고 동시에 강한 음압에 의하여 급격하게 흩어지게 된다. 즉, 액체의 대류현상이 발생하여 기포는 삼각뿔 형태로 방사하게 된다[4, 9, 10]. 이러한 개략적인 기포군의 형태 변화는 조사되는 초음파 강도에 따라 달라지는데, 강한 음압일수록 집중점에서의 압력이 강하고, 뒤에 이어지는 방사 형태의 음장도 상대적으로 높은 에너지를 가지게 되어 기포군은 선명한 갈매기 모양을 갖게 된다. 따라서 기포군의 형태와 조사 강도의 상관관계를 도출하면 초음파 조사의 효율 평가 및 캐비테이션 발생 정도를 평가할 수 있다.

이에 본 연구에서는 HIFU 조사 시 발생하는 캐비테이션 발생

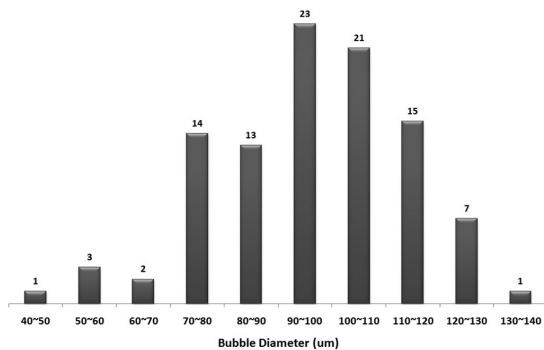


Fig. 11. Bubble diameter distributions with 500 KHz.

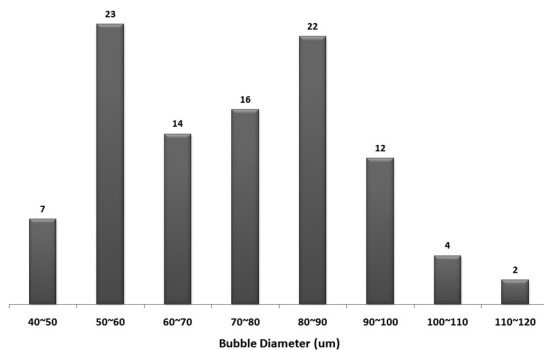


Fig. 12. Bubble diameter distributions with 1.1 MHz.

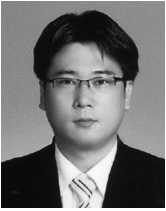
량 확인을 위하여, 발생하는 기포군의 영상을 분석하였다. 이를 통하여 조사 강도에 따른 기포군의 형태변화와, 발생하는 미세기포의 크기, 기포 발생량 등에 측정하였으며, 상관관계를 고찰하였다. 500 KHz와 1.1 MHz HIFU용 집속형 초음파 변환기를 사용하여 캐비테이션을 발생시켰으며, 디지털카메라를 이용하여 발생하는 기포군의 영상을 획득하였다. 측정된 영상의 픽셀 분해능은 가로, 세로 25 um, 단위 면적은 625 um²로 계산되었으며, MATLAB을 이용하여 2진화 영상으로 변환하였다. 조사강도에 따른 기포군의 크기는 500 KHz와 1.1 MHz 모두에서 정비례하는 결과를 보였으며, 결정계수의 값은 0.7031과 0.811로 비교적 높은 값을 보였다. 특정 구간에서 발생하는 편차는 캐비테이션 발생 환경에 의한 오차와 영상획득 과정에서의 광학적 측정오차로 판단되었는데, 차후 이러한 부분에 대한 보완을 통하여 보다 정확한 상관관계를 유도할 수 있을 것으로 사료된다. 구동 주파수에 따라 발생하는 100개의 미세기포를 관찰한 결과, 500 KHz에서 발생하는 기포의 크기는 최소 49.18 um, 최대 132.55 um, 평균 98.18 um로 측정되었으며, 표준편차는 17.12 um로 계산되었다. 1.1 MHz에서 발생하는 기포의 크기는 최소 32.79 um, 최대 104.78 um, 평균 63.38 um, 표준편차는 16.62 um로 측정되었다. 미세기포 크기는 비교적 넓은 분포를 보였는데, 조사 주파수의 차이 또는 조사시간에 따른 결과가 아니라, 조사 강도가 증가함에 따른 매질(탈기수)의 대류에 의하여 미세기포간의 결합에 의하여 발생하는 현상으로 판단되었다. 본 연구에서 측정된 미세기포의 크기와 기포군의 크기를 이용하여 구동주파수와 조사강도에 따른 발생 기포의 수를 측정해본 결과, 조사강도에 따라 발생하는 기포의 양이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 1.1 MHz 에서 보다 500 KHz에서 보다 선형적으로 증가하는 것이 관찰되었다. 이러한 선형성 및 조사 주파수와 조사 강도에 따른 변화는 차후 다양한 영상화 기법을 이용한 추가적인 평가를 통하여 캐비테이션 발생의 정량적 평가 방법으로 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한, 초음파 조사조건에 따른 캐비테이션 발생량의 상관관계는 고강도 초음파 시술 시 조사 조건에 따른 캐비테이션 발생량을 예측이 가능하게 하여 미세기포에 의한 초음파 가열 촉매 특성을 활용하는데 기초가 될 것으로 판단된다.

감사의 글

This work was supported by the Korea Science and Engineering Foundation(KOSEF) grant funded by the Korea government(MEST) (No. 20090059682), and this work was supported by grant from Inje University, 2009.

REFERENCES

- [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, pp. 437- 464, 2003.
- [2] Tinghe Yu, Shuhua Xiong, Timothy J. Mason, and Zhibiao Wang, "The use of a microbubble agent to enhance rabbit liver destruction using high intensity focused ultrasound", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 13, pp. 143-149, 2006.
- [3] Yao-Sheng Tung, Hao-Li Liu, and Win-Li Lin, "Contrast-agent-enhanced ultrasound thermal ablation", *Ultrasound in Med. & Biol.*, vol. 32, no. 7, pp. 1103-1110, 2006.
- [4] Christopher E. Brennen, *Cavitation and Bubble Dynamics*, Oxford University Press, New York, 11-13, 91-95, 1995.
- [5] 윤석왕 외, 물리음향학II, 아카넷, 서울, pp. 2-5, 26-28, 2001.
- [6] Tadeusz Gudra and Krzysztof J. Opielinski, "Applying spectrum analysis and cepstrum analysis to examine the cavitation threshold in water and in salt solution", *Ultrasonics*, vol. 42, pp. 621- 627, 2004.
- [7] T. G. Leighton, *The Acoustics Bubble*, Academic Press, San Diego, 1994.
- [8] <http://www.sonicconcepts.com>
- [9] Christopher E. Brennen, *Fundamentals of multiphase flow*, Cambridge Ltd 97-115.
- [10] Hogn Chen, Xiaojing Li, and Mingxi Wan, "The inception of cavitation bubble clouds induced by high-intensity focused ultrasound", *Ultrasonics*, vol. 44, pp. 427-429, 2006.



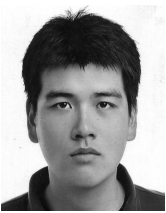
노 시 철(Si-Cheol Noh)

- 2002년 인제대학교 의용공학과 (공학사)
- 2004년 인제대학교 대학원 의용공학과 (공학석사)
- 2011년 인제대학교 대학원 의용공학과 (공학박사)
- 현재 한국국제대학교 방사선학과 교수
- 주관심분야 : 치료 초음파, 초음파 QA, cavitation 모니터링



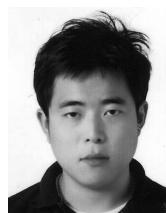
김 주 영(Ju-Young Kim)

- 2000년 인제대학교 의용공학과 (공학사)
- 2002년 인제대학교 대학원 의용공학과 (공학석사)
- 현재 인제대학교 의용공학과 연구원
- 주관심분야 : cavitation 모니터링, 초음파 조직유사 팬텀, 초음파 영상 처리



김 진 수(Jin-Su Kim)

- 2010년 인제대학교 의용공학과 (공학사)
- 현재 인제대학교 대학원 의용공학과 석사과정
- 주관심분야 : 진단 초음파, 초음파 조직유사 팬텀, 초음파 가열특성 평가



강 정 훈(Jung-Hoon Kang)

- 2010년 인제대학교 의용공학과 (공학사)
- 현재 인제대학교 대학원 의용공학과 석사과정
- 주관심분야 : 초음파 신호영상 처리, 고강도 집속 초음파 시스템, 휴대형 초음파 진단장치



최 흥 호(Heung-Ho Choi)

- 1984년 인하대학교 전자공학과 (공학사)
- 1986년 인하대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1991년 인하대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 현재 인제대학교 의용공학과 교수
- 주관심분야 : 진단 초음파, 조직 특성화, 치료 초음파, cavitation