

기포운 내 초음파의 감쇠 및 분산에 관한 연구

Study of Attenuation and Dispersion of Ultrasound in Bubbly Liquids

최영수*, 엄원석*
(Youngsoo Choi*, Won-Suk Ohm*)

*연세대학교 기계공학부

(접수일자: 2010년 3월 2일; 수정일자: 2010년 4월 1일; 채택일자: 2010년 4월 15일)

본 논문에서는 액체 매질 내 기포운에 의한 초음파의 감쇠 및 분산 특성을 다룬다. 액체 내 기포운은 다양한 기작에 의해 발생되며 이에 따라 기포운을 구성하는 기포들의 크기와 분포가 다양한 양상을 가지게 된다. 따라서 기포들의 크기와 분포에 따라 기포운의 감쇠와 분산 특성이 어떻게 변화하는지에 중점을 둔다. 특히 아직 보고된 바 없는 나노 기포운의 감쇠 및 분산 특성에 대하여 조명하고자 한다. 수치해석 결과, 기포운의 음향 감쇠 및 분산 특성은 구성 기포들의 침에도에 따라 크게 변화하는 것으로 나타났다. 본 연구는 기포운 내 음향 전파의 심도 있는 이해에 일조할 것으로 기대한다.

핵심어: 초음파, 기포운, 감쇠, 분산, 위상 속도

투고분야: 물리음향 및 광음향 분야 (9.4)

This paper deals with the attenuation and dispersion of ultrasound in bubbly liquids. Bubble clouds in liquid are formed by a variety of mechanisms, leading to different bubble sizes and spectra. Our aim is to investigate how bubble sizes and spectra affect the attenuation and dispersion characteristics of bubbly liquids. Especially, we highlight the attenuation and dispersion behaviors of nano-bubbles, which have not been reported elsewhere. Computations show that the attenuation and dispersion characteristics of bubbly liquids depend heavily on the quality factors of constituent bubbles. The present study is expected to facilitate in-depth understanding of sound propagation in bubbly liquids.

Keywords: Ultrasound, Bubble Cloud, Attenuation, Dispersion, Phase Velocity

ASK subject classification: Physical Acoustics and Photo-Acoustics (9.4)

I. 서론

음파의 전파 양상은 일반적으로 매질이 가지고 있는 감쇠 및 분산 특성에 큰 영향을 받는다. 따라서 매질의 감쇠 및 분산 특성을 파악하는 것은 음파를 연구함에 있어 필수적이다. 본 논문에서는 기포운을 포함하고 있는 액체 매질 (물)에서의 감쇠 및 분산 특성에 대해 알아보고자 한다. 수중에서의 기포운은 수중 소음의 원인이자, 매질의 음향학적 특성을 변화시켜 음파의 굴절, 산란, 흡수 및 분산을 유발한다 [1]. 해양에서의 파도, 빗방울에 의한 충돌이나, 선박 등의 프로펠러에서 발생하는 밀리미터 크기 기포운으로부터 작게는 초음파 영상 진단에 사용되

는 미세 기포운으로 대별될 수 있다.

의료용 초음파 분야에서 초음파 영상의 선명도를 높이기 위해 사용되는 조영제 (ultrasound contrast agents) 는 일반적으로 $2\ \mu\text{m} \sim 8\ \mu\text{m}$ 정도 크기의 마이크로 기포들로 구성되어 있다 [2]. 기존 마이크로 기포 조영제는 여러 가지 질병을 발견할 수 있는 혈관내피 연락부 (endothelial junction) 틈 사이로의 유입이 불가능하다 [3]. 많은 종양 (tumour models)의 경우, 혈관내부 연락부의 입구의 유입가능 크기는 적어도 $0.2\ \mu\text{m} \sim 1.2\ \mu\text{m}$ 이 된다고 보고되어져 있다 [4]. 또한 마이크로 기포 조영제는 다수의 병리학적 세포 (pathologic cells)를 발견할 수 있는 림프 혈관 (lymphatic vessels)으로의 유입도 불가능하다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 최근에는 나노 기포 조영제에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 바 [5], 이에 나노 기포운 내 음향 전파 특성을 이해하는 것은

매우 중요하다. 그러나 현재까지 나노 기포운의 감쇠 및 분산에 대한 연구 결과는 보고된 바 없다. 기포 함유 유체 내에서 음파의 감쇠 및 분산 특성은 기포운의 크기 분포 (bubble spectrum)와 총 부피분율 (volumetric void fraction)에 의해 달라진다. 따라서 본 논문에서는 기포운을 구성 기포들의 크기 분포에 따라 밀리미터 기포운, 마이크로 기포운, 나노 기포운의 3가지로 대별하여 그 감쇠 및 분산 특성을 비교 분석하고, 특히 그 음향학적 특성이 알려진 바 없는 나노 기포운을 집중 조명하고자 한다.

II. 이론

2.1. 지배 방정식

기포운의 감쇠 및 분산 특성에 대한 이론적 전개는 참고문헌 [6]을 따르도록 한다. 일반적으로 액체매질 내 기포를 포함하게 되면 압축률의 증가와 기포의 공진에 의해 음파의 전파 속도가 변하게 되며 음파의 감쇠에 영향을 준다. 이런 기포를 포함한 용액에서의 음향 전파를 기술하기 위하여 편의상 단일 크기의 기포운을 가정한다. 이 때 평형 상태에서 혼합 매질의 밀도 ρ_0 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_0 = NV_0\rho_{g0} + (1 - NV_0)\rho_{l0}. \quad (1)$$

여기서 N 은 평형상태에서 단위부피당 기포의 개수를 나타내고 V_0 는 기포의 부피, ρ_{g0}, ρ_{l0} 은 각각 기체와 액체의 평형 상태의 밀도를 나타낸다. 기포운의 부피분율 (volume fraction)을 나타내는 NV_0 가 매우 작을 경우 ($\rho_0 \approx \rho_{l0} \gg \rho_{g0}$) 상태 방정식과 결합하여 위 식 (1)은

$$\frac{\rho'}{\rho_0} = \frac{p}{\rho_0 c_0^2} - Nv. \quad (2)$$

으로 나타내진다. 여기서 ρ' 은 혼합 매질 밀도의 미소 변화량, p 는 음압, c_0 는 액체 내 선형 음속, 그리고 v 는 기포 부피의 미소 변화량을 나타낸다. 식 (2)를 연속 방정식과 운동량 보존 방정식을 이용하여 파동 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\rho_0 N \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}. \quad (3)$$

여기서 우변이 0일 때 식 (3)은 감쇠와 분산이 없을 경우의 파동 방정식이 되며, 따라서 우변은 기포운이 유발하는 감쇠 및 분산에 관한 항을 나타낸다.

이 식의 해를 얻기 위해서는 추가적으로 p 와 v 의 관계식을 필요로 하며 그 연관식은 기포의 거동방정식으로부터 얻을 수 있다. 이 때 기포는 상호간에 영향을 끼치지 않으며 단극자 진동 (monopole oscillation)을 한다고 가정한다. 단일 기포의 운동이 기포 주변의 비압축성 유체 질량에 의존한다고 가정하고 표면 장력, 열전도도에 의한 영향을 무시할 경우 기포는 다음과 같이 Rayleigh-Plesset 방정식으로 표현된다.

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + 4v\frac{\dot{R}}{R} = \frac{P_g - P}{\rho_l}. \quad (4)$$

여기서 R 은 기포의 반지름, $\dot{}$ 은 시간에 대한 미분, v 는 동적 점성도, P_g 와 P 는 각각 기포 내 기체압력과 혼합 매질의 총 압력을 나타낸다. 관성 공동현상 (inertial cavitation)이나 음향발광 (sonoluminescence)과 같이 급격한 반지름의 변화를 수반하는 경우를 제외하면, Rayleigh-Plesset 방정식은 나노 스케일 기포에도 비교적 잘 적용이 된다고 알려져 있다 [7,8]. 기포 안에 있는 기체를 단일 기체로 간주하여 단일 기체 상태 방정식을 위 식 (4)에 넣고 v 에 관해 2차항까지 정리하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{v} + \delta\omega_0 \dot{v} + \omega_0^2 v + \gamma p = 0, \quad (5)$$

본 연구에서 다루는 감쇠 및 분산 특성은 선형 특성이기 때문에 위 식 (5)에서 비선형항은 소거하였다. 여기서 $\delta = 4\nu/\omega_0 R_0^2$ 는 점성 감쇠 계수, $\omega_0^2 = 3\gamma P_0/\rho_0 R_0^2$ 는 기포의 공진 주파수, $\eta = 4\pi R_0/\rho_0$ 이며, R_0, γ, P_0 은 각각 평형 상태에서의 기포 반지름, 단일 기체 비열비, 대기압을 의미한다. 위 식 (5)는 외부 힘 (p)에 의하여 가진되는 조화진동자의 형태를 이루고 있다. 그리고 위 진동자에서의 첨예도 (quality factor) Q 는 $1/\delta$ 로 표현이 된다. 공진 주파수와 첨예도는 진동계를 특징짓는 핵심 변수이며, 평형상태에서의 기포 반지름 R_0 의 함수이다. 물속의 공기 기포의 경우 $P_0 = 1 \text{ atm}$, $\gamma = 1.4$, $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 그리고 $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ 를 바탕으로 공진 주파수와 첨예도를 기포 반지름 R_0 의 함수로서 나타내면 그림 1과 같다.

그림 1 (a)는 기포 반지름의 증가에 따른 기포의 공진

주파수의 변화를 나타내는 그래프로써 반지름의 크기가 커질수록 공진 주파수가 점점 작아지는 것을 확인할 수 있다. 반면 그림 1 (b)는 기포 반지름의 증가에 따른 첨예도의 변화를 나타내는 그래프로써 기포 반지름의 크기가 커질수록 첨예도가 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 반지름 변화에 따른 공진 주파수의 변화 정도는 반지름의 크기가 작은 영역 ($0.1 \mu\text{m}$ 이하)에서 큰 변화폭을 가지고 있다.

2.2. 감쇠 계수 및 위상 속도

위 식 (3), (5)의 선형해를 구하기 위하여 p, v 를 아래와 같이 표현한다.

$$p = \frac{1}{2} p_1 e^{jct} + c.c., \tag{6}$$

$$v = \frac{1}{2} v_1 e^{jct} + c.c. \tag{7}$$

여기서 c.c.는 complex conjugate를 의미한다. 위 식 (6), (7)을 (3), (5)에 대입하여 얻은 식을 결합하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{\bar{c}^2} \right) p_1 = 0. \tag{8}$$

이 때 복소수의 음속 \bar{c} 은 다음과 같이 정의된다.

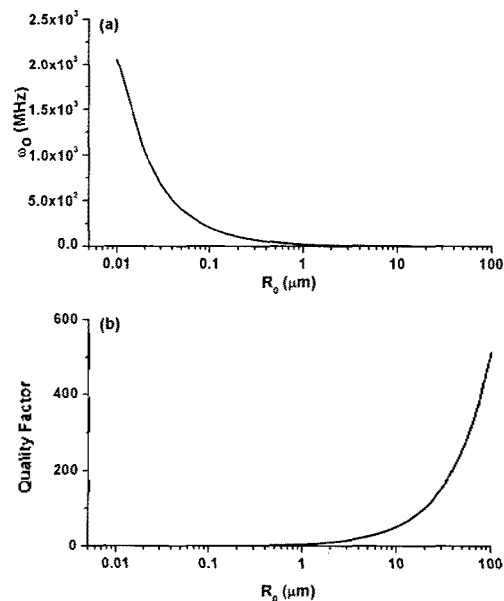


그림 1. (a) 공진 주파수, (b) 첨예도
Fig. 1. (a) Resonance frequency, (b) Quality factor.

$$\frac{\bar{c}_0^2}{\bar{c}^2} = 1 + \frac{\mu C}{1 - \omega^2/\omega_0^2 + j\delta\omega/\omega_0}. \tag{9}$$

여기서 $\mu = NV_0$ 는 평형 상태에서의 부피분율 (volumetric void fraction)을 나타내며, $C = \rho_0 c_0^2 / \gamma P_0$ 는 액체와 단열 기체의 압축률의 비로서 대기압에서 물속의 공기 기포의 경우 1.54×10^4 의 값을 가진다. 식 (9)를 이용하여 다음과 같이 감쇠 계수 α 와 위상 속도 c 를 분리한다. 이때 감쇠 계수 α 는 기포가 있음으로서 추가적으로 발생되는 감쇠를 나타낸다.

$$\alpha(\omega) = -\omega \text{Im}(\bar{c})^{-1}, \quad c(\omega) = 1/\text{Re}(\bar{c})^{-1}. \tag{10}$$

III. 단일 크기 기포운

본 장에서는 거포운이 단일 크기의 기포들로 구성되어 있을 경우 그 감쇠 및 분산을 앞 장의 이론적 모델에 이용하여 계산하였다.

3.1. 감쇠 특성

기포운의 종류에 따른 감쇠 및 분산 특성을 비교 분석하기 위해 $\mu C = 1$ = 상수의 조건으로 액체 내 포함된 기체의 총량은 일정하게 유지하면서 밀리미터 기포운 ($R_0 = 1 \text{ mm}$), 마이크로 기포운 ($R_0 = 4 \mu\text{m}$), 나노 기포운 ($R_0 = 50 \text{ nm}$)의 경우를 고려하였다. 각각의 기포운에 대한 감쇠계수를 나타내면 아래 그림 2와 같다.

그림 2를 보면 기포 크기에 따른 감쇠 계수 α 의 변화 추이를 확인할 수 있다. 먼저 기포 반경 1 mm 인 밀리미터

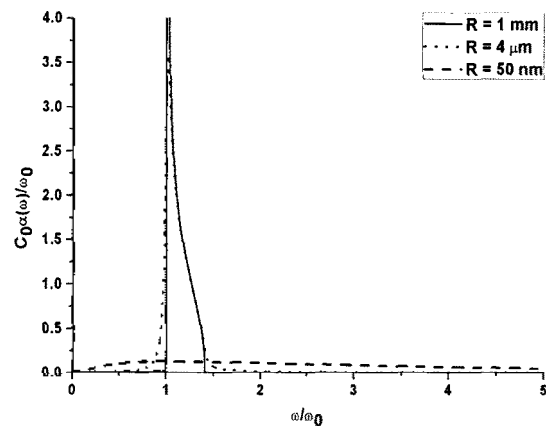


그림 2. 단일 크기 기포운의 감쇠 계수
Fig. 2. Attenuation coefficient for a bubbly liquid with uniform bubble size.

터 기포운의 경우 첨예도의 값은 5123.5이며, $\mu C=1$ 이므로 단위 부피당 포함된 기포의 개수는 15502개이다. 기포 반경 $4 \mu m$ 인 마이크로 기포운의 경우 첨예도의 값은 20.5, 포함된 기포의 개수는 2.4222×10^{11} 개이며, 기포 반경 $50 nm$ 인 나노 기포운의 경우 첨예도는 0.256, 기포의 개수는 1.2402×10^{17} 개이다. 그림 2에서 밀리미터 기포운의 경우 기포의 공진 주파수에서 매우 큰 감쇠 계수를 가지며 뾰족한 형태를 가진다. 이런 결과는 위에서 언급한 기포 진동계의 첨예도에서 찾을 수 있다. 그림 1 (b)에서 보듯이 밀리미터 기포운은 첨예도가 매우 큰 ($Q=5123.5$) 효과적인 진동계이다. 즉, 외부에서 공진 주파수에 해당하는 초음파가 인가되었을 때 적극적으로 응답하여 음향 에너지가 기포의 공진 운동 에너지로 대폭 전환되며, 따라서 큰 음향 감쇠 계수를 지니게 된다. 그러나 기포의 크기가 작아지면서 점차 감쇠 계수가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 기포의 크기가 작아지면 첨예도가 감소하고 따라서 좋은 진동계가 아니기 때문에 공진 주파수에 해당하는 초음파를 인가하여도 효과적인 응답이 이루어지지 못하고 작은 감쇠 계수를 가지면서 넓게 퍼진 형태를 취하게 된다.

3.2. 분산 특성

위상 속도의 주파수에 따른 변화, 즉 분산 곡선 (dispersion curve)을 위에서 언급한 세 종류의 기포운에 대하여 각각 나타내면 그림 3과 같다.

기포의 크기가 상대적으로 큰 경우 (수 mm), 첨예도가 매우 크기 때문에 기포의 공진 주파수에 해당하는 초음파의 위상 속도의 변화가 매우 커짐을 확인할 수 있었

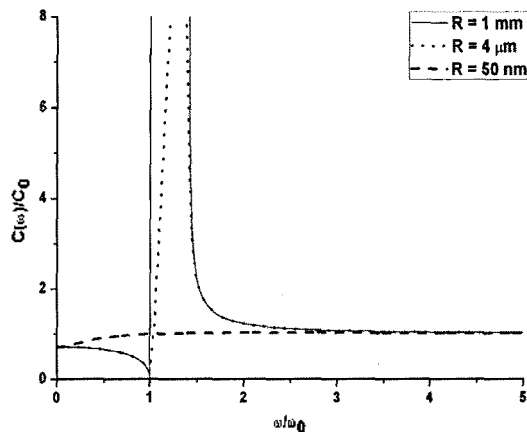


그림 3. 단일 크기 기포운의 위상 속도
Fig. 3. Phase velocity for a bubbly liquid with uniform bubble size.

다. 하지만 기포의 크기가 작아짐에 따라 첨예도가 작아지고 기포들이 공진 주파수에서 효과적으로 반응하지 못해 위상 속도의 변화가 작아짐을 확인할 수 있다. 일반적으로 기포운을 포함하는 액체는 분산 효과가 큰 매질로 알려져 있으나, 그림 3은 구성 기포의 크기에 따라 분산 효과의 정도가 크게 달라짐을 보여주고 있다. 특히 나노 기포운의 경우 분산 효과가 상대적으로 미미함을 알 수 있다. 그림 3에서 분산 곡선들의 시작점이 같은 것을 확인할 수 있는데 이는 가진 주파수가 기포의 공진 주파수에 비하여 작을 경우 ($\frac{\omega}{\omega_0} \ll 1$), 분산 특성이 기포 반경에 관계없이 액체 내 포함된 기체의 부피분율에 의해 결정되기 때문이다.

IV. 크기 분포를 갖는 기포운

실제 기포운은 단일 크기의 기포들로 구성되어 있지 않기 때문에 본 장에서는 기포운을 구성하는 기포들이 크기 분포를 가지고 있을 경우에 대해 고찰하고자 한다.

4.1. 감쇠 특성

기포운이 단일 크기의 기포들로 이루어져 있지 않고 어떤 크기 분포를 가진다면, 기포들의 크기 분포를 $N(R_0) dR_0$ 으로 나타낼 수 있으며, 여기서 $N(R_0)$ 는 각각의 평형상태 기포 반경에 해당하는 기포의 수를 의미한다. 이를 반영하면 위 식 (9)는 다음과 같이 기술된다.

$$\frac{c_0^2}{c^2} = 1 + \frac{4\pi}{3} C \int_0^\infty \frac{N(R_0) R_0^3 dR_0}{1 - \omega^2/\omega_0^2 + j\delta\omega/\omega_0} \quad (11)$$

이때 기포 전체의 부피를 일정하게 유지하면서 밀리미터 (그림 4), 마이크로 (그림 5), 나노 (그림 6) 기포운이 가우시안 분포 (Gaussian distribution), 직사각형 분포 (rectangular distribution) 그리고 단일 크기 분포 (delta function distribution)를 가질 경우에 대해 각각 감쇠 및 분산 특성을 비교 분석 하였다.

여기서 σ 는 가우시안 분포의 표준편차, Δw 는 직사각형 분포에서 해당 기포운을 구성하는 기포들의 크기 범위, 그리고 그림 4 (a), 그림 5 (a), 그림 6 (a)의 delta 함수 (점선 화살표로 도사)는 단일 크기의 기포운을 의미한다. 그림 4 (a)는 동일한 총 부피의 기체를 가정하였을 때의 가우시안, 직사각형, 델타 분포를 갖는 기포운을 각

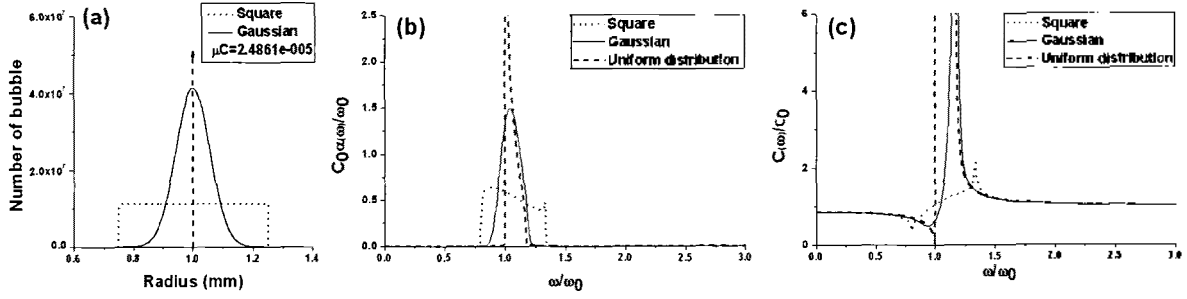


그림 4. 밀리미터 기포운의 감쇠 계수 및 위상 속도 (중심 크기 : 1 mm, $\Delta w = 0.5 \text{ mm}$, $\sigma = 0.008 \times 10^{-3}$)
 (a) 기포 분포 (가우시안, 직사각형, 델타) (b) 감쇠 계수 (c) 위상 속도

Fig. 4. Attenuation coefficient and phase velocity for millimeter-bubble clouds (mean radius : 1 mm, $\Delta w = 0.5 \text{ mm}$, $\sigma = 0.008 \times 10^{-3}$).
 (a) Bubble spectra (Gaussian, rectangular, delta). (b) Attenuation coefficients. (c) Phase velocities.

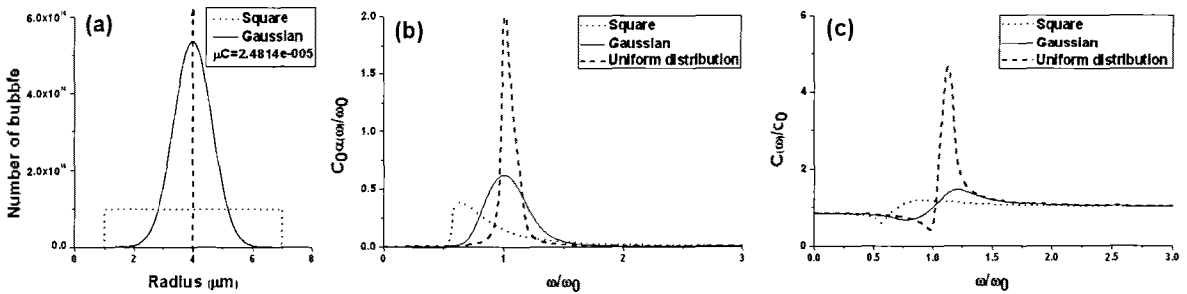


그림 5. 마이크로 기포운의 감쇠 계수 및 위상 속도 (중심 크기 : 4 μm, $\Delta w = 6 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.9 \times 10^{-6}$)
 (a) 기포 분포 (가우시안, 직사각형, 델타) (b) 감쇠 계수 (c) 위상 속도

Fig. 5. Attenuation coefficient and phase velocity for micro-bubble clouds (mean radius : 4 μm, $\Delta w = 6 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.9 \times 10^{-6}$).
 (a) Bubble spectra (Gaussian, rectangular, delta). (b) Attenuation coefficients. (c) Phase velocities.

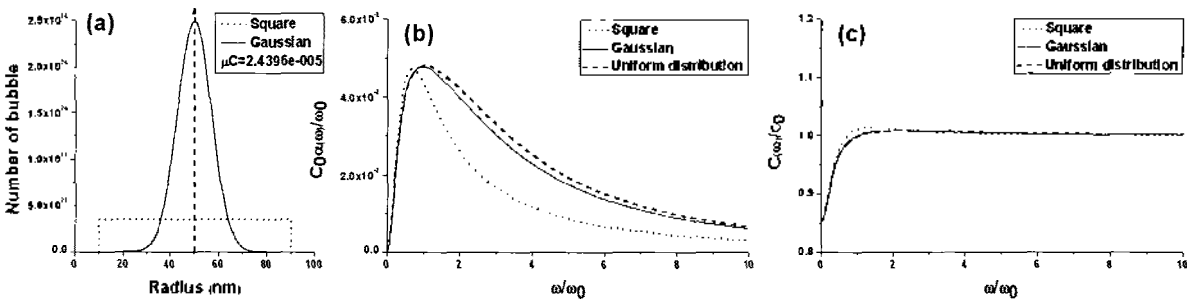


그림 6. 나노 기포운의 감쇠 계수 및 위상 속도 (중심 크기 : 50 nm, $\Delta w = 80 \text{ nm}$, $\sigma = 1 \times 10^{-8}$)
 (a) 기포 분포 (가우시안, 직사각형, 델타) (b) 감쇠 계수 (c) 위상 속도

Fig. 6. Attenuation coefficient and phase velocity for nano-bubble clouds (mean radius : 50 nm, $\Delta w = 80 \text{ nm}$, $\sigma = 1 \times 10^{-8}$).
 (a) Bubble spectra (Gaussian, rectangular, delta). (b) Attenuation coefficients. (c) Phase velocities.

각 나타낸 것이다. 그림 4 (b)는 각 분포에 해당하는 감쇠 계수를 나타낸 것으로 기포 크기가 가우시안 분포를 가질 경우 감쇠 계수도 가우시안의 형태를 이루는 것을 확인할 수 있다. 또한 직사각형 형태의 분포를 가질 때에는 감쇠 계수도 비교적 직사각형과 유사한 형태를 취하였다. 이는 밀리미터 기포운의 경우 그림 1에서 보았듯 침예도가 매우 큰 진동계이기 때문이다. 그러나 마이크로 [그림 5

(b)와 나노 기포운 [그림 6 (b)]의 경우 그 양상이 달라진다. 일반적으로 단일 크기의 기포운과 비교하여 크기 분포를 갖는 기포운의 경우 감쇠계수의 형태는 더 넓어지는 것으로 알려져 있다 [9]. 그러나 그림 6 (b)의 나노 기포운의 경우에는 크기 분포가 있음에 따라 오히려 감쇠 계수의 퍼지는 정도가 줄어들게 된다. 마이크로, 나노 기포운의 경우 상대적으로 큰 침예도를 갖는 기포들에 의해 감

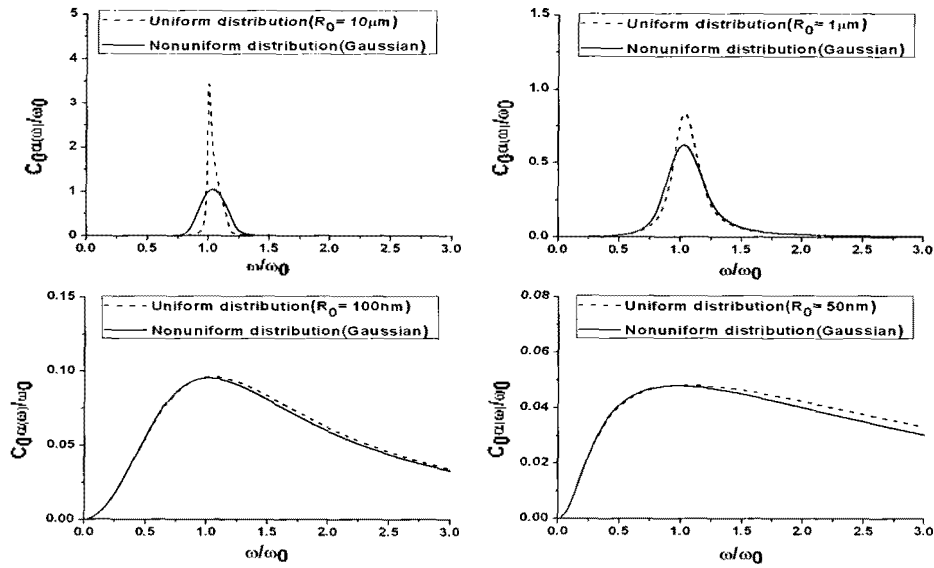


그림 7. 마이크로 기포운과 나노 기포운의 감쇠 계수
Fig. 7. Attenuation coefficients for micro- and nano-bubble clouds.

쇠 및 분산의 효과가 지배되는데 이들이 상대적으로 낮은 공진주파수를 가짐으로써 그림 5 (b)와 그림 6 (b)에서 감쇠 곡선의 최대점이 단일 기포운의 그것에 비해 낮은 주파수로 이동하게 된다.

4.2. 분산 특성

식 (11)을 이용하여 분산 특성에 대해 알아보기 위해 위상 속도를 밀리미터, 마이크로, 나노 기포운 별로 나타내면 위 그림 4 (c), 그림 5 (c), 그림 6 (c)와 같다. 그림 4 (c)에서 위상 속도는 기포운이 가우시안 분포와 직사각형 분포를 가지게 되면 점점 넓게 퍼지는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 그림 6 (c)의 나노 기포운의 경우 기포운의 크기 분포가 가우시안에서 직사각형 분포로 넓어질수록 분산곡선의 폭이 오히려 좁아지는 양상이 그림 6 (b)의 감쇠 곡선의 그것과 같음을 확인 할 수 있다. 그림 5 (c)와 그림 6 (c)에서도 그림 5 (b), 그림 6 (b)와 마찬가지로 최대점이 낮은 주파수로 이동하는 것을 알 수 있다. 위상 속도의 크기 측면에서 보면 그림 5 (c)에서 단일 크기의 마이크로 기포운의 경우 약 500 % (점선)에 육박하는 변화폭을 보이지만, 분포를 갖는 기포운의 경우 20 % (실선) 정도로 그 변화폭이 매우 줄어든다. 또한 그림 6 (c)의 나노 기포운의 경우 크기 분포와는 상관없이 위상 속도의 차이가 없으므로 분산 효과가 사실상 미미하다고 볼 수 있다. 우리는 이런 결과를 통해 기포운이 (기체 부피분율이 같아도 불구하고) 구성 기포들의 중심 크기 및 크기 분포에 따라 매우 상이한 음향 특성을 가질 수 있음을

확인하였다.

4.3. 마이크로 기포운과 나노 기포운의 비교

그림 5와 그림 6의 비교에서 알 수 있듯이 마이크로 기포운과 나노 기포운은 근본적으로 상이한 음향학적 특성을 갖고 있다. 구성 기포의 크기가 마이크로에서 나노 영역으로 작아질 시 음향학적 특성의 변화 추이를 살펴보기 위하여 구성 기포들의 중심 크기가 각각 10 μm , 1 μm , 100 nm , 50 nm 인 경우에 대하여 그 감쇠 곡선을 그림 7에 도시하였다.

그림 7은 각각의 중심 크기에 대하여 단일 크기 기포운과 가우시안 분포를 갖는 기포운의 감쇠를 나타내고 있다. 여기서 비교 분석을 위하여 모든 경우의 부피분율은 2.44×10^{-5} 로 고정하였다. 앞서 언급한 바와 같이 구성 기포의 중심 크기가 작아짐에 따라 해당 침예도도 작아지면서 감쇠 계수가 약 1/100배 정도로 대폭 감소함을 확인할 수 있다. 감쇠 곡선의 폭에 대하여서는, 기포의 중심 크기가 10 μm 일 때 기포운보다 가우시안 분포의 경우가 그 폭이 더 큰 것을 볼 수 있다. 그러나 중심 크기가 100 nm 이하로 작아지면서 가우시안 분포의 경우에 오히려 폭이 다소 좁아지는 양상을 보이고 있다.

V. 결론

본 논문에서는 기포운을 포함한 액체 매질의 음향학적

특성 중 감쇠 계수와 위상 속도에 대해 알아보았다. 수 밀리미터 크기의 기포에서부터 초음파 영상 진단에 사용되는 마이크로 기포, 그리고 최근 주목받고 있는 나노 기포를 두루 아우르는 포괄적 parametric study를 수행하였다. 일반적으로 크기 분포를 갖는 기포운은 그 감쇠 계수나 분산 특성이 단일 크기 기포운의 그것에 비해 더 넓다고 알려져 있으나 나노 기포운 영역에서는 오히려 반대의 경향이 나타남을 확인하였다. 특히 나노 기포운의 경우 구성 기포들의 낮은 침예도에 기인하여 매우 작은 음향 감쇠와 분산 효과를 가지게 된다. 즉, 기포운의 감쇠 및 분산 특성을 결정짓는데 있어 구성 기포의 크기에 따른 침예도가 매우 중요한 영향 인자임을 알 수 있었다. 본 연구 결과는 추후 다양한 크기 분포를 갖는 기포운 내 음향 전파 현상을 예측 분석하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 한국연구재단 지원 (2009-0077588)을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 윤석왕, 김호철, 김민근, 서상준, 김영환, *물리음향학*, 아카넷, 2001.
2. S. H. Bloch, P. A. Dayton and K. W. Ferrara, "Targeted imaging using ultrasound contrast agents," *IEEE Eng. Med. Biol.*, vol. 23, pp. 18-27, 2004.
3. H. Zheng, O. Mukdadi, R. Shandas, "Theoretical predictions

of harmonic generation from submicron ultrasound contrast agents for nonlinear biomedical ultrasound imaging," *Phys. Med. Biol.*, vol. 51, pp. 557-573, 2006.

4. S. K. Hobbs, W. L. Monsky, F. Yuan, W. G. Roberts, L. Griffith, "Regulation of transport pathways in tumor vessels: role of tumor type and microenvironment," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, vol. 95, pp. 4607-4612, 1998.
5. D. N. Patel, S. H. Bloch, P. A. Dayton and K. W. Ferrara, "Acoustic signatures of submicron contrast agents," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.*, vol. 51, pp. 293-301, 2004.
6. M. F. Hamilton, D. T. Blackstock, *Nonlinear Acoustics*, Acoustical Society of America, 2008.
7. M. Matsumoto, "How can molecular simulations contribute to thermal engineering?," *Journal of Thermal.*, vol. 3, pp. 309-318, 2008.
8. H. Okumura, N. Ito, "Nonequilibrium molecular dynamics simulations of a bubble," *Phys. Rev. E.*, vol. 67, no. 045301, pp. 453011-453014, 2003.
9. K. W. Commander, A. Prosperetti, "Linear pressure waves in bubbly liquids: Comparison between theory and experiment," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 85, pp.732-746, 1989.

저자 약력

•최영수 (Youngsoo Choi)

2008년 8월: 연세대학교 물리학과, 기계공학과 (이,공학사)
2008년 9월~현재: 연세대학교 기계공학과 (공학석사)

•엄원석 (Won-Suk Ohm)

1994년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학사)
2001년 12월: 텍사스 주립대 기계공학과 (공학박사)
2002년 4월~2005년 12월: 캐나다 표준과학연구원 (NRC-INMS) 객원연구원
2006년 2월~2008년 2월: (주) 메디슨 선임연구원
2008년 3월~현재: 연세대학교 기계공학부 조교수