

빛을 발산하는 기포내에서의 화학반응

강상우* · 김홍운** · 임경희** · 곽호영***

Chemical Reactions inside a Sonoluminescing Gas Bubble

Sarng Woo Kang, Hong-Un Kim, Kyung-Hee Lim and Ho-Young Kwak

Key Words: bubble dynamics(기포역학), multi-bubble sonoluminescence(다중기포 소노루미네스스), molecular transition(분자전이), chemical reaction(화학반응).

Abstract

The Multi-bubble sonoluminescence(MBSL) provides a unique environment, that is, very high temperature(5,000-20,000K) and high pressure(500~10,000 atm). However, the mechanism for the MBSL has been elusive. Recently, it has been suggested that the mechanism be continuous and also of discrete peaks that are caused by molecular transitions. In this article, this mechanism has been examined for the Ar/water system by the combined hydrodynamics and molecular transition.

1. 서 론

용매 속에 있는 수 μm 크기의 미소한 기포에 초음파를 가하여 진동시키면 기포가 성장하다가 급격히 수축하면서 레이저와 같은 빛이 나오는데 이 현상을 sonoluminescence(SL)라 한다. 이 때 수축시 기포 주변 액체의 온도는 2,000 K에 이르며 압력 또한 200 기압 정도가 된다. 이와 같은 높은 온도와 압력의 환경은 이제까지 존재하지 않았던 새로운 금속 재료의 합성^{1,2)}, 금속 촉매의 합성^{1,2)}, 금속 표면의 개질²⁾, 고분자의 합성^{3,4,5,6,7)}, 환경오염의 제거¹⁾ 등 여러 방면에 응용될 수 있어서, Marinesco와 Trillat⁸⁾가 SL을 보고한 1933년 이후 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.

연구자에 따라서 다르지만 SL에서의 기포내 가스의 온도는 높게는 40,000 K, 낮게는 5,000 K로 보고되어 있는데⁹⁾ 태양표면의 온도가 7,000 K임을 고려하면 SL 기포의 온도가 얼마나 높은가를 짐작할 수 있다. 그러므로 우리가 현실적으로 μm 크기의 수많은 "미세한 태양(microsuns)"을 가질 수 있으며, 이러한 미세 태양들을 이용한 연구와 공정은 매혹적인 것이 아닐 수 없다.

이제까지의 활발한 연구에도 불구하고 다중기

포에 의한 소노루미네스스 현상은 잘 이해되지 않고 있다. 이는 많은 기포들이 일정한 방식이 없이 자라고 깨어지기 때문이다. SL을 이해하기 위한 연구 방법으로는 단일기포(SBSL, Single-Bubble Sonoluminescence)와 다중기포(MBSL, Multi-Bubble Sonoluminescence)를 사용하는 두 가지 방법이 있다. 전자는 주로 물리학적 관점에서 본 SL 기구를, 후자는 화학반응을 시키기 위하여 많은 기포가 필요하므로 화학적 관점에서 본 SL기구의 규명을 목표로 하고 있다. MBSL은 SBSL과 달리 많은 기포가 관련되어 있어서 일정한 방식에 의하지 않은 기포의 성장과 파괴가 더욱 뚜렷하므로 SBSL에 비하여 연구하기가 매우 힘들다. 그러나 SL을 실제로 이용하려면 하나의 기포에서 나오는 에너지로는 너무 작으므로 많은 기포가 필요하며 따라서 MBSL의 중요성이 한층 높다. 이런 이유로 본 연구는 MBSL에서 일어나는 화학반응에 초점을 맞추었다.

SL의 기구에 대하여 SBSL과 MBSL은 근본적으로 다른 사항을 제시하고 있다 즉 SBSL은 SL이 안정적으로 구형을 유지하며 진동하는 단일기포에 의해서 발생되며 관찰된 스펙트라(spectra)는 연속적이라는 것이다. 이 연속 스펙트라를 제동 또는 흑체복사 이론과 비교하면 기포의 온도는 40,000 K까지 이를 수 있다고 하였다¹⁰⁾. 반면에 MBSL의 스펙트라는 연속적인 부분과 피크로 관찰된다. 이와 같은 피크는 기포 안에 들어 있는 용매분자의 전자전이에 의한 것으로 설명될 수

* 한국과학기술연구원 열·유동제어연구센터

** 중앙대학교 화학공학과

*** 중앙대학교 기계공학과

있으며 이때 온도는 5,000 K 정도라고 예측되고 있다¹¹⁾.

그러나 최근에 SL 기구에 대하여 새로운 모델이 제시되었다. 이 모델에 의하면 SBSL과 MBSL은 같은 메카니즘(mechanism)에 의한 것이며, 연속 스펙트라를 나타내는 흑체복사와 피크로 나타나는 분자전이를 결합한 새로운 모델 즉 hydrodynamics/molecular emission 메카니즘으로 설명될 수 있다는 것이다^{12,13)}. 즉 SBSL이나 MBSL에서 똑같이 제동 또는 흑체복사와 분자전이가 함께 일어나지만 SBSL에서는 기포 하나만 존재하므로 기포내부에 존재하는 화학종들에 의한 전이가 기여하는 바가 높은 온도로 빛어지는 제동 또는 흑체복사에 의한 것보다는 매우 적어서 연속 스펙트라로만 관찰된다고 설명하고 있다. 반면에 MBSL에서는 많은 기포가 관계되어 분자전이에 의한 기여가 상당하므로 제동 또는 흑체복사에 의한 연속 스펙트라와 분자 전이에 의한 피크가 함께 관찰된다는 것이다. Suslick 등은 기포가 일정하게 줄어드는 매우 단순화된 기포거동에 대해서 이 모델의 타당성을 입증하였다.

이것은 SL 연구에서의 큰 진전을 의미할 뿐만 아니라, 이제까지 서로 다른 메카니즘으로 해석되어 온 SBSL과 MBSL간의 논란에도 종지부를 찍게 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 hydrodynamics/molecular emission 메카니즘을 MBSL 하에서 기포의 실제 거동에 입각하여 연구하였다. 기존의 연구¹²⁾에서는 기포의 크기가 직선적으로 일정하게 줄어드는 단순한 기포거동에 기반을 두었으므로 실제 상황을 잘 대변하지 못하고 있다. 기포의 실제 거동은 복잡한 비선형 방정식으로 기술되며^{14,15)} 또한 여러 개의 방정식이 연결(coupled)되어 있어서 결과를 얻기가 쉽지 않지만 구대칭인 경우의 Navier-Stokes 방정식에 대한 해석적 해를 이용하여 시간의 변화에 따른 기포의 크기, 온도, 압력을 실제적인 상황에 대하여 구할 수 있었다^{14,15)}. 또한 기존의 연구와 비교하기 위하여 MBSL을 Ar/Water 계에 적용하여 분자전이에 의한 MBSL 기구 즉 hydrodynamics/molecular emission 메카니즘의 타당성 여부를 규명하고자 하였다.

2. 화학반응과정 모델

Fig 1에서와 같이 기포내에서 새로운 환경의 발생으로 여기상태인 자유 라디칼(free radical), OH*와 같은 종이 생겨나고, 이것이 기저상태로 되면서 화학 반응에 의한 전이를 나타낸다. 이 계에서 기포내의 가스는 Ar이지만 순수한 Ar뿐만 아니라 용매인 물이 증기압만큼의 수증기 상태로 기포 내부에 공존한다. 기포 내부의 높은 온도와 압력으로 인하여 이들이 서로 충돌하여 OH*가 생성된다. 이것이 Fig. 1 (b)에서와 같이 기저상태로 떨어지면서 빛이 방출된다. 그러면

실제로 Ar/water 계에서 OH*의 농도가 좁은 온도 범위에서만 존재하는지 살펴볼 필요가 있다. 또한 OH*가 생성되는 화학반응에 기포의 평형반경 크기가 어떻게 기여하는지, 또는 가진압력이 어떠한 영향을 주는지 연구할 필요가 있다. 왜냐하면 최근의 실험결과는 기포의 반경이 μm 가 아니라 mm 크기가 되었을 때, OH에 의한 스펙트럼 피크가 분명히 나타나며¹⁶⁾, 가진압력이 낮을 경우에도 분자전이에 의한 피크가 분명히 나타나기¹⁷⁾ 때문이다.

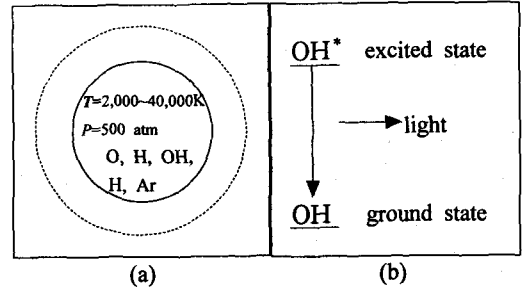
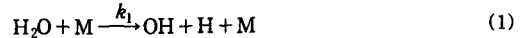


Fig. 1 (a) Environment inside the bubble for the Ar/water system
(b) Light emission caused by the transition of the OH from the excited state to the ground state.

이 계에서 화학종들의 반응은 다음과 같이 생략해 볼 수 있다¹²⁾.



위의 반응식으로부터 각각의 분자들에 대한 반응식을 구하면 다음의 식 (5)-(10)과 같다.

$$\frac{d(\text{H}_2\text{O})}{dt} = -k_1 (\text{H}_2\text{O})(\text{M}) \quad (5)$$

$$\frac{d(\text{OH})}{dt} = k_1 (\text{H}_2\text{O})(\text{M}) - k_2 (\text{OH})(\text{M}) + k_4 (\text{OH}^*)(\text{M}) \quad (6)$$

$$\frac{d(\text{O})}{dt} = k_2 (\text{OH})(\text{M}) - k_3 (\text{O})(\text{H})(\text{M}) \quad (7)$$

$$\frac{d(\text{OH}^*)}{dt} = k_3 (\text{O})(\text{H})(\text{M}) - k_4 (\text{OH}^*)(\text{M}) \quad (8)$$

$$\frac{d(\text{H})}{dt} = \frac{d(\text{OH})}{dt} + \frac{d[\text{OH}(\text{A})]}{dt} + 2 \frac{d(\text{O})}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{d(\text{M})}{dt} = -3 \frac{\rho_0}{R} \frac{dR}{dt} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \quad (10)$$

단, $k_i = A_i \left(\frac{298.15}{T} \right)^{N_i} \exp(-E_i/k_B T)$ 이다. 윗식에서 각각의 반응에 대한 A_i , N_i , E_i 등은 참고논문(18)에 실린 값들을 사용하였다.

위의 화학반응 속도식으로부터 수치적인 방법

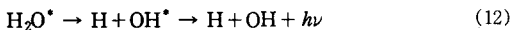
을 통하여 화학종들의 농도를 구할 수 있다. 이 때 기포의 거동을 유체역학 이론으로 기술하여 이로부터 기포 내부의 온도, 압력, 부피(즉, 기포의 반경)를 구하여야 한다. 이러한 일은 SBSL의 이론적 연구의 핵심 사항의 하나이며 이제까지 많은 연구가 행해졌다^{15,19}. 기포벽의 운동은 기포벽 주위의 운동량 보존식의 음향학적 근사인 Keller-Miksis 방정식²⁰을 추가로 사용하면 된다.

기포의 수축시 기포내 가스의 온도와 압력은 상승하게 된다. 따라서 가스 입자들의 운동 에너지의 상승은 비탄성 충돌에 의한 전자 상태의 여기를 가져와 수증기 분자가 다음과 같이 여기상태로 변할 수 있다²¹.



여기서, M은 가스 또는 수증기 분자이다.

식 (11)에 주어진 여기된 수증기 분자는 충돌에 의한 에너지 전이에 따라 7.5 eV 정도일 때 수증기 분자는 A¹B₁ 상태, 8.3 eV보다 클 경우에는 $\overline{\text{B}}\text{A}_1$, 9.9 eV일 때는 C¹B₁상태로 되며²², 다음과 같은 반응에 의하여 빛을 발산한다.



Suslick 등은 기포의 거동을 복잡하고 비선형적인 수식을 사용하지 않고, 기포의 반경이 400 m/s 씩 일정하게 줄어드는 단순화된 경우에 대하여 조사하였다. 이 때 기포내의 온도는 줄어드는 기포의 반경으로부터 부피를 계산하여 이를 Carnahan-Starling 상태방정식으로부터 온도와 압력을 구하였다. 이들이 이와 같은 단순 기포 거동으로부터 구한 화학종들의 농도분포를 알 수 있고 또한 OH*의 시간에 따른 농도를 알 수 있어 OH 라디칼에 의한 빛인지를 알 수 있다.

3. 기포거동 모델

본 연구에서는 구대칭인 경우에 기포내 가스에 대한 질량, 운동량 및 에너지 보존식을 해석적으로 얻은 결과^{14,15}를 이용하였다. 이들 보존식을 만족하는 기포내 가스에 대한 밀도 분포, 속도 분포 및 압력분포는 다음과 같이 주어진다.

$$\rho = \rho_0 + \rho_r \quad (13)$$

$$u = \frac{R_b}{R_b} r \quad (14)$$

$$P = P_0(t) - \frac{1}{2} \left(\rho_0 + \frac{1}{2} \rho_r \right) \frac{R_b}{R_b} r^2 \quad (15)$$

단, ρ_0 와 ρ_r 은 각각 기포 중심과 기포내 임의의 점에서의 가스 밀도이며 다음과 같이 주어진다.

$$\rho_0 R_b^3 = \text{const.} \quad (16)$$

$$\rho_r = \frac{ar^2}{R_b^5} \quad (17)$$

식 (17)에서 a 는 상수이며, R_b 는 임의의 시간에서 기포의 반경, \dot{R}_b 은 기포벽의 속도이다. 또한 기포내 가스의 온도분포는 다음과 같이 주어진다.

$$T(r) = T_b(r) + T_b'(r) \quad (18)$$

식 (18)에서 온도분포 $T_b(r)$ 는 기포벽의 운동에 의하여 결정되는 것이며, 본 연구에서는 기포벽에 대한 운동 방정식으로 다음과 같은 Keller-Miksis 식을 이용하였다.

$$\begin{aligned} R_b \left(1 - \frac{U_b}{C_b} \right) \frac{dU_b}{dt} + \frac{3}{2} U_b^2 \left(1 - \frac{U_b}{3C_b} \right) \\ = \frac{1}{\rho_\infty} \left(1 + \frac{U_b}{C_b} + \frac{R_b}{C_b} \frac{d}{dt} \right) [P_B(t) - P_S(t) - P_\infty] \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)에서 U_b 는 기포벽의 속도, C_b 는 기포벽에서의 액체의 음속, P_B 는 기포벽 바로 바깥쪽 액체에서의 압력이며, 기포내 가스의 압력 P_b 와 는 다음과 같이 주어진다.

$$P_B = P_b(t) - \frac{2\sigma}{R_b} - 4\mu \frac{\dot{R}_b}{R_b} \quad (20)$$

윗 식에서 σ 와 μ 는 각각 용매의 표면장력과 점도이다. 또한 기포를 가진하는 초음파의 압력은 다음과 같이 주어진다.

$$P_S = -P_A \sin \omega t \quad (21)$$

기포내 가스의 열전도도를 온도의 1차 함수로 다음과 같이 가정하였다.

$$k_g = AT + B \quad (22)$$

식 (22)를 이용하여 기포벽의 온도에 따른 기포내 가스의 온도분포를 Fourier 법칙에 적용하면 다음과 같이 얻는다¹⁴.

$$T_b(r) = \frac{B}{A} \left[-1 + \sqrt{\left(1 + \frac{A}{B} T_\infty \right)^2 - 2\eta \frac{A}{B} (T_b - T_\infty) \left(\frac{r}{R_b} \right)^2} \right] \quad (23)$$

식 (23)에서 $\eta = R_b k_l / (\delta B)$ 로 표현되는 물리변수이며, δ 는 기포벽 주위의 액체층에 대한 질량, 운동량, 에너지 보존식을 이용하여 얻을 수 있는 온도경계층의 두께이며 다음과 같이 주어진다¹⁴.

$$\begin{aligned} & \left[1 + \frac{\delta}{R_b} + \frac{3}{10} \left(\frac{\delta}{R_b} \right)^2 \right] \frac{d\delta}{dt} \\ &= \frac{6\alpha_l}{\delta} - \left[\frac{2\delta}{R_b} + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{R_b} \right)^2 \right] \frac{dR_b}{dt} \quad (24) \\ & - \delta \left[1 + \frac{\delta}{2R_b} + \frac{1}{10} \left(\frac{\delta}{R_b} \right)^2 \right] \frac{1}{T_b - T_\infty} \frac{dT_b}{dt} \end{aligned}$$

초음파의 가진에 의하여 액체내에서 진동하는 기포내 가스에 대한 질량, 운동량 및 에너지 보존식에 대한 해석적인 해는 기포 수축 전 500 ps 부터 기포벽의 가속도는 급격히 증가하여 최대 10^{12} m/s^2 이상이 된 후, 급격한 감소에 의한 "thermal spike"가 발생됨을 예측하였다¹⁵⁾. 곧바로 기포 수축시 기포벽의 가속도가 10^{12} m/s^2 이상이 된다는 것은 실험적으로 증명되었다²³⁾. 이와 같은 "thermal spike"에 의한 순간적인 온도분포, 즉 식 (18)에서의 $T_b(r)$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} T_b(r) = & -\frac{r^4}{40(\gamma-1)k_g} \left(\rho_0 + \frac{5}{21} \rho_s \right) \left[(3\gamma-2) \frac{R_b \dot{R}_b}{R_b^2} + \frac{\ddot{R}_b}{R_b} \right] \\ & + \frac{1}{20(\gamma-1)} \left[(3\gamma-2) \dot{R}_b \dot{R}_b R_b + \ddot{R}_b R_b^2 \right] \quad (25) \\ & \cdot \left[\frac{\delta}{k_l} (\rho_0 + \frac{5}{14} \rho_{r=R_b}) + \frac{R_b}{2k_g} (\rho_0 + \frac{5}{21} \rho_{r=R_b}) \right] \end{aligned}$$

식 (25)에서 k_g 는 충돌적분 방법으로 구한 가스의 열전도도이며, δ 는 기포벽의 가속도에 의한 속도분포로 인해 액체로 전달되는 열전달량을 나타내는 열경계층의 두께이다. 식 (13)으로부터 (25)까지를 이용하면 초음파장에서 진동하는 기포내 가스의 시간에 따른 밀도, 압력 및 온도분포를 구할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

Suslick 등의 단순 모델¹²⁾은 기포의 반경이 400 m/s의 속도로 줄어든다고 가정하고 모델을 세웠으나 기포의 수축지점에서 실제 기포벽의 속도는 일정한 것이 아니라 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 기포 수축시, -200 m/s에서 -700 m/s까지 비선형적으로 변하며 기포내 가스의 온도 또한 수축점 부근에서 급격히 변함을 알 수 있다. 이것의 계산은 3절에서 기술한 방법으로 평형반경 10 μm 의 기포가 가진압력 1.3 기압, 가진주파수 26.5 kHz인 초음파장에서 운동하는 경우에 수행하였다. 이를 토대로 화학반응식 (1)-(4) 및 (5)-(10)에 대한 화학종의 농도를 시간 변화에 따라 Runge-Kutta 방법을 사용하여 컴퓨터로 계산하였다. 이 경우 기포거동에 대한 시간증분과 화학반응에 대한 시간증분을 같은 시간증분 10^{-12} s 으로 하였을 경우의 계산결과가 Fig. 3에 나와 있다. 이와 같은 시간 증분은 가스들의 병진운동에

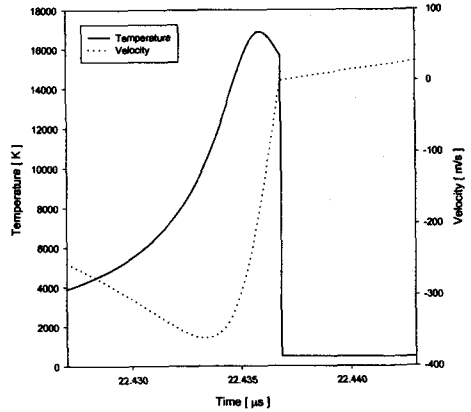


Fig. 2 Time rate change of bubble wall velocity and temperature around the collapse point for $R_0=10 \mu\text{m}$ at $P_A=1.3 \text{ atm}$ and $f=26.5 \text{ kHz}$.

대한 완화시간 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ s}$ 보다 짧은 시간이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 온도의 증가에 따른 반응분자들의 농도변화 즉, H_2O , OH , O , H , OH^* 들의 농도변화는 Suslick 등이 계산한 결과와는 상당히 차이남을 알 수 있다. 즉, 5,000 K 이상에서 H_2O 분자는 H와 OH로 분해됨을 알 수 있으며, OH 라디칼은 8,000 K 이상부터 생성됨을 알 수 있다. 따라서 기포 수축시 분자들의 충돌에 의하여 수증기 분자가 여기된 상태로 전이되고, 이 여기된 상태의 수증기 분자가 H 및 OH로 분해되며, 발산하는 스펙트럼은 기포내 가스의 온도가 최소한 8,000 K 이상일 때 관찰이 가능함을 알 수 있다. 평형반경이 10 μm 일 때, 기포내 수증기 분자는 물의 온도가 20°C라 할 때 2.34×10^9 개가 된다. 따라서 수증기 분자가 A^1B_1 의 여기상태가 되는 확률이 볼츠만 통계를 따른

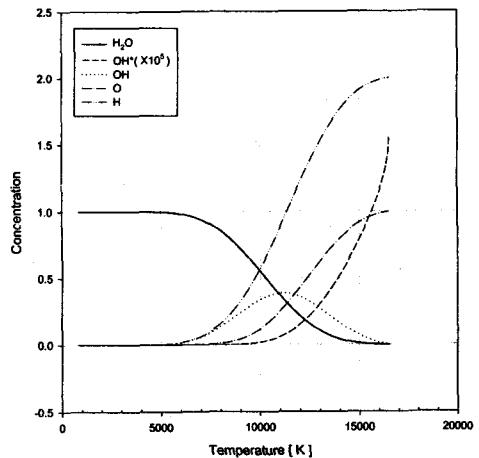


Fig. 3 Concentration of the chemical species vs. temperature inside bubble for the Ar/water system shown in Fig. 2.

다고 하면²¹⁾ 5,000 K일 때, 이 상태가 되는 수증기 분자의 수는 65 개 정도가 되며, 8,000 K일 때는 4.8×10^4 개가 된다. 물론 기포내 가스의 온도가 10,000 K일 때는 에너지가 8.3 eV 이상인 $\overline{B}A_1$ 과 9.9 eV 이상인 $C'B_1$ 의 여기된 상태에 달하는 수증기 분자도 각각 1.54×10^5 개 및 2.34×10^4 개가 되어, Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 10,000 K일 때 OH 라디칼 분자수는 500 개 정도로 훨씬 작다. 이와 같이 열적평형상태로 가정하여 OH 라디칼의 수를 계산한 경우보다 훨씬 작은 이유는 화학반응이 5 ns 동안 급격히 변화하는 기포거동에 따라 전형적으로 비평형상태에서 일어나기 때문이다. 따라서 Fig. 2에 보여지는 것처럼 단일기포에 의한 소노루미네스스 현상이 가능한 물리적 변수의 범위 내(예를 들면 초음파의 가진압력이 1.3 atm 이상인 경우)에서는 OH 라디칼에 의한 스펙트럼 피크는 제동복사에 의한 스펙트럼에 가려져 나타나지 않게 된다. 따라서 Suslick 등의 계산결과는 반응속도가 100 배 정도 빠른 경우에 얻을 수 있음이 확인되었다.

Fig. 4에 기포 수축시 기포내 가스의 온도가 최고 9,600 K에 달하는 경우의 시간에 따른 기포벽의 속도와 온도가 나타나 있다. 이 경우는 초음파의 가진압력이 1.2 기압, 가진주파수는 26.5 kHz인 경우이다. 이 때 기포벽의 속도는 최대 350 m/s 정도이며, 그 변화 또한 완만함을 알 수 있다. 이 경우에 OH 라디칼의 온도에 따른 변화가 Fig. 5에 나타나 있는데, 이와 같이 가진압력이 낮을 경우에는 오히려 OH 라디칼의 농도가 증가하여 9,000 K에서 OH 라디칼의 분자수는 7×10^3 개로 스펙트럼에 기여하는 기포수가 10~100 개 정도라면 충분히 OH 라디칼에 의한 스펙트럼 피크를 관찰할 수 있다. 이와 같이 가진압력이 낮은 경우, OH 라디칼의 분자수가 증가하는 것은 기포벽 속도의 완만한 변화에 기인한다고 볼 수 있다.

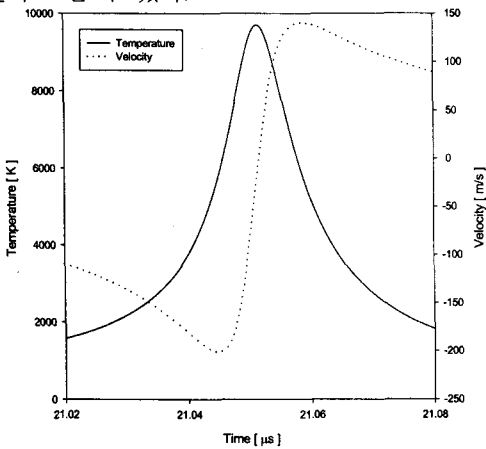


Fig. 4 Time rate change of bubble wall velocity and temperature around the collapse point for $R_0 = 10 \mu\text{m}$ at $P_A = 1.2 \text{ atm}$ and $f = 26.5 \text{ kHz}$.

Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 기포의 평형반경이 커졌을 때에도 OH 라디칼의 농도 또한 증가하며, 기포내의 수증기 분자수도 부피에 비례하여 증가하기 때문에 OH 스펙트럼 피크의 관찰은 기포의 평형반경이 커면서¹⁶⁾ 가진압력이 작은 경우¹⁷⁾에 가능성이 더 많음을 알 수 있다. 왜냐하면 가진압력이 낮을 경우, 기포 수축시 기포내 가스 온도가 낮아 제동복사에 의한 스펙트럼 강도는 몇 자리수 낮아지는데 비하여, OH 라디칼에 의한 스펙트럼 강도는 조금 커지기 때문에 스펙트럼 피크가 확연히 나타날 수 있다. 또한 MBSL의 경우는 기포가 100~1,000 개 정도가 SL에 참여하기 때문에 그만큼 스펙트럼의 강도가 SBSL의 스펙트럼 강도보다 클 것으로 예상된다.

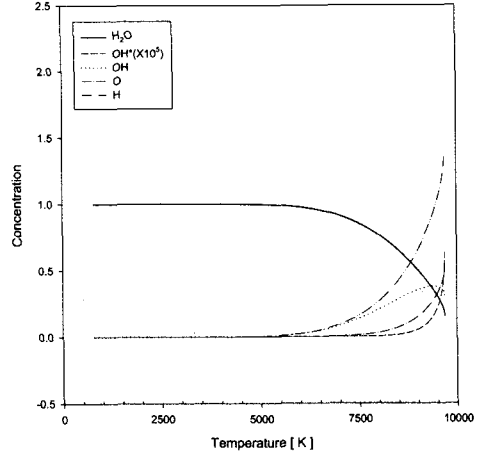


Fig. 5 Concentration of the chemical species vs. temperature inside bubble for the Ar/water system shown in Fig. 4.

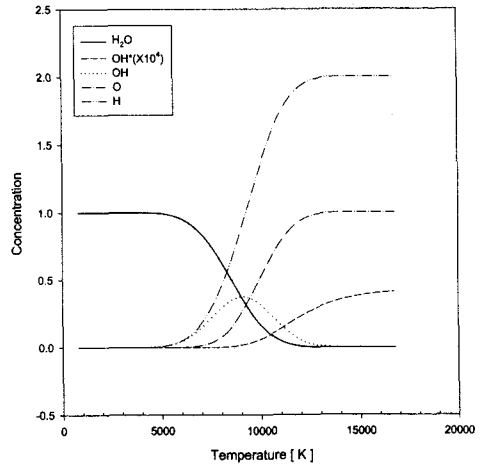


Fig. 6 Concentration of the chemical species vs. temperature inside bubble for the Ar/water system in case of $R_0 = 50 \mu\text{m}$ at $P_A = 1.2 \text{ atm}$ and $f = 26.5 \text{ kHz}$.

5. 결론

초음파장에서 진동하는 기포의 수축시 기포내 가스의 온도는 기포 붕괴전 5 ns 내에서 급격히 상승하게 된다. 이와 같이 급격히 온도가 변화하는 가스 내에서 전형적인 비선형 방정식인 화학 반응식을 풀어 다중기포에 의한 소노루미네스스의 경우 실험적으로 관찰된 OH 라디칼에 의한 스펙트럼 피크를 이론적으로 모사하였다. 평형반경이 10 μm 일 때, 기포내 가스의 최고 온도가 9,000 K가 될 경우, OH 라디칼에 의한 스펙트럼 피크는 가능한 것임이 밝혀졌다. 하지만 기포내 가스의 온도가 높아지게 되면 제동복사에 의하여 발생하는 빛의 강도가 커져 OH 라디칼에 의한 스펙트럼 피크는 관찰할 수 없음을 알았다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특장목적연구비의 지원(과제번호 1999-1-304-002-5)으로 행해진 연구임.

참고문헌

- (1) Suslick, K.S., 1990, "Sonochemistry", Science, Vol. 247, p. 1439-1445.
- (2) Crum, L.A., 1994, "Sonoluminescence", Physics Today, pp. 22-29.
- (3) Sasabe, H. and Wada, T. in Comprehensive Polymer Science, J. C. Bevington and G. Allen, 1987, Eds. Pergamon, Vol. 7. Ch. 6., pp. 1989.
- (4) Akbulut, U., Toppare, L. and Yurttas, B., 1986, "Electroinitiated copolymerization of α -methylstyrene and isoprene in the presence and absence of ultrasound", Polymer, Vol. 27, pp. 803-806.
- (5) Mason, T.J., Lorimer, J.P. and Walton, D.J., 1990, "Sonochemistry", Ultrasonics, Vol. 28, pp. 333-337.
- (6) Allen, K.W., Davidson, R.S. and Zhang, H.S., "Sonochemistry", British Patent ppl. 90177544.
- (7) Allen, K.W., Davidson, R.S. and Zhang, H.S., 1991, Proceedings of "Radtech Europe" Conference, Edinburgh.
- (8) Marinesco, N. and Trillat, J., 1933, "Achon des ultrasons sur les plaques photographiques", J. C.R. Acad. Sci. Paris, Vol. 196, pp. 858.
- (9) Crum, L.A., 1994, "Sonoluminescence, sonochemistry, and sonophysics", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 95, pp. 559-562.
- (10) Hiller, R., Putterman, S.J. and Barber, B.P., 1992, "Spectrum of Synchronous Picosecond

- Sonoluminescence", Phys. Rev. Lett., Vol. 69, pp. 1182-1184.
- (11) Suslick, K.S., Hammerton, D.A. and Cline, R.E., 1986, "The sonochemical hot spot", J. Am. Chem. Soc., Vol. 108, pp. 5641-5642.
- (12) Bernstein, L.S. Zakin, M.R., Flint, E.B. and Suslick, K.S., 1996, "Cavitation Thermometry Using Molecular and Continuum Sonoluminescence", J. Phys. Chem., Vol. 100, pp. 6612-6619.
- (13) Bernstein, L. S. and Zakin, M. R., 1995, "Confined electron model for single-bubble sonoluminescence", J. Phys. Chem., Vol. 99, pp. 14619-14627.
- (14) Kwak, H. and Yang, H., 1995, "An aspect of sonoluminescence from hydrodynamic theory," J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 64, pp. 1980-1992.
- (15) Kwak, H. and Na, J., 1996, "Hydrodynamic solutions for a sonoluminescing gas bubble," Phys. Rev. Lett., Vol. 77, pp. 4454-4457.
- (16) Baghdassarian, O., Chu., H., Tabbert, B. and Williams, G.A., "Spectrum of Luminescence from Laser-Created Bubbles in Water", Phys. Rev. Lett., Vol 86, pp. 4934-4937, 2001.
- (17) Giri, A. and Arakeri, H., 1998, "Measured pulse width of sonoluminescence flashes in the form of resonance radiation", Phys. Rev. E., Vol 58, pp. R2713-R2716.
- (18) Westley, F., Herron, J.T., Cvetanovic, R.J., Hampson, R.F. and Mallard, W.G., 1990, Eds. NIST Chemical Kinetics Data Base, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C..
- (19) Barber, B.P., Hiller, R.A., Löfstedt, R., Putterman, S.J. and Weninger, K.R., 1997, "Defining the unknowns of sonoluminescence", Phys. Report, Vol. 281, pp. 65-143.
- (20) Keller, J.B. and Miksis, M., 1980, "Bubble oscillations of large amplitude," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 68, pp. 628-633.
- (21) Engel, V., Staemmler, V., Vander Wal, R.L., Crim, F.F., Sension, R.J. Hudson, B., Anderson, P., Hennig, S., Weide, K. and Schinke, R., 1992, "Photodissociation of water in the first absorption band : A prototype for dissociation on a repulsive potential energy surface", J. Phys. Chem., Vol. 96, pp. 3201-3213.
- (22) Didenko, Y.T. and Pugach, S.P., 1994, "Spectra of water sonoluminescence", J. Phys. Chem. Vol. 98, pp 9742-9749.
- (23) Weninger, K.R., Barber, B.P. and Putterman, S.J., 1997, "Pulsed Mie scattering measurements of the collapse of a sonoluminescing bubble", Phys. Rev. Lett., Vol. 78, pp. 1799-1802.