

شبیه‌سازی عددی وابستگی پارامترهای خروجی تک حباب سونولومینسانسی ساکن به فشار محیطی

مرتضی پیش‌بینی*
مربی، فیزیک، دانشگاه پیام نور

تاریخ دریافت: 1395/02/06 تاریخ پذیرش: 1395/09/14

Numerical Simulation of Ambient Pressure Dependence of Output Parameters in Static Single Bubble Sonoluminescence

M. Pishbini*

Instructor, Physics, Payame Noor University

Received: 2016/04/25 Accepted: 2016/12/04

Abstract

In this investigation by using a hydrochemical simulation the effect of the ambient pressure on the output parameters in Ar single bubble sonoluminescence in water at room temperature has been studied. By considering three dominant instabilities including diffusion, shape and Bjerknes in the phase diagram the initial conditions for stable bubble are considered. In addition the intensity of light emission at the moment of collapse is numerically calculated by electron-atom bremsstrahlung, electron-ion bremsstrahlung and radiative recombination. Calculation shows that in good agreement with previous observed evidence the expansion ratio, maximum temperature and emission light intensity are remarkably higher for lower ambient pressure and difference between the maximum and minimum temperature and intensity are about 4000K and 12 orders of magnitude respectively.

Keywords

Bremsstrahlung Radiation, Hydrochemical Simulation, Single Bubble Sonoluminescence.

چکیده

در این تحقیق با استفاده از مدل هیدروشیمیایی به بررسی تحول درونی حباب و شبیه‌سازی عددی وابستگی مشخصه‌های تک حباب ساکن سونولومینسانسی گاز نجیب آرگون حل شده در سیال آب به فشار محیطی در دمای اتاق پرداختیم. با بررسی سه ناپایداری انتشاری، شکلی و مکانی از طریق نمودار فاز شرایط اولیه را برای داشتن حباب سونولومینسانسی پایدار به دست آورده و برای محاسبه شدت تابش گسیلی در لحظه فروریزش از سه مکانیسم تابش برم اشتراک‌نگ الکترون - اتم، برم اشتراک‌نگ الکترون - یون و بازترکیب تابشی استفاده کرده‌ایم. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در انطباق با نتایج تجربی، کاهش فشار محیطی منجر به افزایش نسبت بسط، پیشینه دما و شدت تابش گسیلی گاز آرگون در لحظه فروریزش می‌شود و اختلاف دما و شدت بین کمینه و پیشینه فشار محیطی به ترتیب حدود 4000K و 12 مرتبه دامنه است.

واژگان کلیدی

تابش برم اشتراک‌نگ، مدل هیدروشیمیایی، تک حباب سونولومینسانسی.

مقدمه

از زمان اولین مشاهده گسیل نور از یک تک حباب پایدار سونولومینسانسی به دام افتاده در آنتی نود یک میدان قوی صوتی، پیشرفت‌های زیادی در زمینه سونولومینسانس انجام شده است [1-2]. پارامترهای مختلف حباب از جمله شعاع، فشار، دما و شدت تابش گسیلی به صورت تئوری [3] و تجربی [4] مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع این حباب کوچک تبدیل به یک میکرووسیله بسیار سودمند برای آزمایش ویژگی‌های گازهای مختلف به ویژه گازهای کمیاب در دماهای بسیار بالا، که به وسیله گرم کننده‌های معمولی قابل دسترس نیست، شده است [5].

تولید دماهایی در حد چندین هزار درجه پژوهشگران را بر آن داشته که از این سیستم برای سونوفیوژن نیز استفاده کنند [6]. انواع پدیده سونولومینسانس شامل سونولومینسانس تک حبابی [7-8] و چند حبابی [9-10] است که سونولومینسانس تک حبابی به دلیل پایداری بیشتر، ایزوله بودن و داشتن دما و شدت بالاتر در لحظه فروریزش بیشتر مورد توجه و بررسی دانشمندان قرار گرفته است [5]. آب یک سیال مناسب در پدیده سونولومینسانس است و خصوصیات فیزیکی مناسبی برای تولید حباب نوسان‌کننده پایدار دارد.

افزایش دما و شدت تابش گسیلی در لحظه فروریزش یکی از اهداف اصلی مطالعات انجام شده بر روی پدیده سونولومینسانس در سال‌های اخیر است و تحقیقات گسترده‌ای بر روی تأثیر عوامل محیطی مختلف از جمله نوع سیال [11-12]، فشار محیطی [13،14]، نوع گاز نجیب حل شده در سیال [15،16] و دامنه فشار آکوستیکی [17] انجام شده است و تأثیر هر یک از این عوامل به صورت تئوری یا تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است.

در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی عددی و با مدل هیدروشیمیایی به بررسی تأثیر فشار محیطی بر مشخصه‌های خروجی تک حباب سونولومینسانسی گاز نجیب آرگون در سیال آب پرداخته شده است.

برای محاسبه شدت تابش در لحظه فروریزش نیز از سه فرآیند اصلی مکانیسم برم اشتراک‌نگ حرارتی استفاده شده است.

مدل

در این پدیده، مرز کروی، دیواره حباب متحرک است و دینامیک شعاعی غیر خطی آن می‌تواند از طریق معادله ریلی - پلست بیان شود [18]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{R}{C_1} \frac{\partial \dot{R}}{\partial t} \right) + \frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{R}{C_1} \dot{R} \right) - \frac{R}{3C_1} \frac{\partial \dot{R}}{\partial t} \dot{R}^2 = \frac{R}{rC} \frac{d}{dt} (P_1 - P_a) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{R}{C_1} \dot{P}_1 - P_a - P_0 \right) \quad (1)$$

در مدل هیدروشیمیایی فشار مایع (P_l) و فشار گاز درون حباب (P_g) از طریق روابط زیر بیان می‌شوند [19]:

$$P_l = P_g - 4 \frac{m\dot{R}}{R} - 2 \frac{s}{R} \quad (2)$$

$$P_g(t) = \frac{N_{tot}(t) k_B T_g}{V - N_{tot}(t) B} \quad (3)$$

که R شعاع حباب، \dot{R} و \ddot{R} مشتقات زمانی آن هستند. r ، m ، s ، C_1 نیز به ترتیب سرعت موج صوتی درون سیال، کشش سطحی سیال، ویسکوزیته سیال و چگالی سیال هستند.

P_0 ، P_1 ، P_a ، P_g نیز به ترتیب فشار گاز، دامنه فشار آکوستیکی، فشار سیال و فشار محیطی می‌باشند. N_{tot} ، T_g ، B ، k_B نیز به ترتیب ثابت بولتزمن، پارامتر هسته سخت، دمای گاز درون حباب و تعداد کل ذرات هستند.

در مدل هیدروشیمیایی فرض بر این است که در ابتدای هر سیکل، حباب سونولومینسانسی تنها حاوی مولکول‌های گاز نجیب آرگون و بخار آب است و واکنش‌های شیمیایی در لحظه فروریزش بین مولکول‌های موجود برقرار می‌شود [20،21]. در این مدل تغییر در تعداد گونه‌های مختلف ذرات با رابطه زیر داده می‌شود:

در این معادلات \dot{E}_{chem} نسبت تغییر در انرژی شیمیایی حباب در اثر واکنش‌های شیمیایی و $e_{th,j}$ انرژی حرارتی مولکول با $Q_{j,i}$ مشخصه دمای نوسانی ذره است. علاوه بر این $h_{w,j}$ آنتالپی مولکولی ذره (j) در دمای دیواره حباب T_g و f_j درجه آزادی چرخشی بعلاوه انتقالی است. در این تحقیق شدت گسیلی از حباب در لحظه فروریزش با محاسبه عددی سه فرآیند برم اشترلانگ الکترون - اتم، برم اشترلانگ الکترون - یون و بازترکیب تابشی محاسبه شده است [23]:

$$I = (r_r h\bar{n} + P_{Br,ion} + P_{Br,atom}) r_e \quad (9)$$

که

$$P_{Br,atom} = 4.6 \cdot 10^{-44} q N^2 T_g \frac{\pi^2}{3} \rho R^3 \frac{\dot{\theta}}{\theta} \quad (10)$$

$$P_{Br,ion} = 1.57 \cdot 10^{-40} q^2 N^2 T_g^{1/2} \frac{\pi^2}{3} \rho R^3 \frac{\dot{\theta}}{\theta} \quad (11)$$

که r_r ، r_e ، N ، q ، ρ ، T_g و $P_{Br,atom}$ و $P_{Br,ion}$ به ترتیب نسبت فرار فوتون‌های گسیلی از حباب، نسبت بازترکیب تابشی، درجه یونیزاسیون، چگالی عددی اتم‌ها، توان تابشی برم اشترلانگ الکترون - اتم و برم اشترلانگ الکترون - یون هستند. $h\bar{n}$ انرژی میانگین فوتون گسیلی در فرآیند بازترکیب تابشی است.

علاوه بر این، مدل هیدروشیمیایی سه ناپایداری اصلی شامل ناپایداری شکلی، انتشاری و مکانی را برای داشتن حباب سونولومینسانسی پایدار در مقابل نوسانات تکرار شونده با استفاده از نمودار فاز در نظر می‌گیرد [24].

نتایج شبیه‌سازی عددی

در سال 1998 کوندیک و همکارانش نتایج آزمایشگاهی تأثیر فشار محیطی بر پارامترهای خروجی تک‌حباب سونولومینسانسی را منتشر کردند [14]. در این آزمایش برای داشتن تک‌حباب سونولومینسانسی پایدار، شعاع اولیه حباب در فشار محیطی 1atm مقدار $R_0=7/3 \mu m$ و در فشار محیطی 0/9atm مقدار $R_0=9 \mu m$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد

$$\dot{N}_i^{tot} = \dot{N}_i^d + \dot{N}_i^c + \dot{N}_i^{cv} \quad (4)$$

که \dot{N}_i^d ، \dot{N}_i^c ، \dot{N}_i^{cv} به ترتیب تغییر در تعداد ذرات به دلیل تبخیر و انجماد، واکنش‌های شیمیایی و انتشار جرم است.

در این مدل برای بررسی انتقال حرارت بین حباب سونولومینسانسی و سیال اطراف آن از فرمولبندی لایه مرزی استفاده شده است. [22]:

$$\dot{Q} = 4\rho R^2 k \frac{T_0 - T}{l_{th}} \quad (5)$$

$$l_{th} = \min\left(\sqrt{\frac{RC}{R}}, \frac{R}{P}\right)$$

که در این رابطه \dot{Q} ، C ، l_{th} ، k به ترتیب نسبت انتقال حرارت در دیواره حباب، ضریب انتشار حرارتی محتوای حباب، که با رابطه $C = \frac{k}{c_p}$ داده می‌شود، ضخامت لایه مرزی حرارتی و ضریب رسانندگی حرارتی گاز نجیب درون حباب هستند. برای محاسبه تحول زمانی دمای گاز درون حباب نیز از معادله انرژی محتوای حباب استفاده شده است [12]:

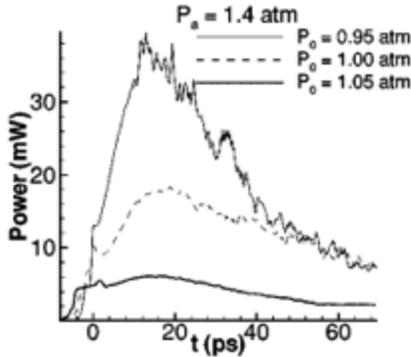
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{e_{thj}}{T_g} N_j \right) = \dot{Q}_j - P_g \dot{V}_j - \dot{a}_j e_{thj} N_j + \dot{E}_{chem}$$

$$+ \dot{a}_j h_{w,j} N_j^d \quad (6)$$

$$h_{w,i} = \left(1 + \frac{f_j}{2}\right) K T_0 \quad (7)$$

$$e_{th,j} = \frac{f_j}{2} K T_g + \dot{a}_j \frac{K Q_{j,i}}{\exp\left(\frac{Q_{j,i}}{T_g} - 1\right)} \quad (8)$$

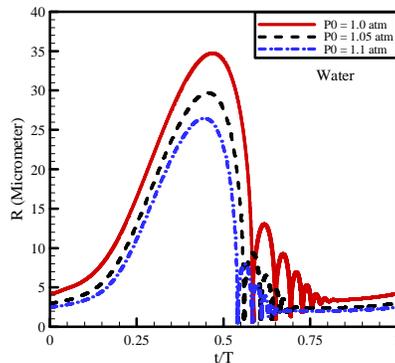
با کاهش فشار محیطی شاهد افزایش بیشینه شعاع حباب در فاز انبساط هستیم (شکل (1)). علاوه بر این بازه زمانی فروریزش حباب سونولومینسانسی نیز از خود افزایش نشان می‌دهد.



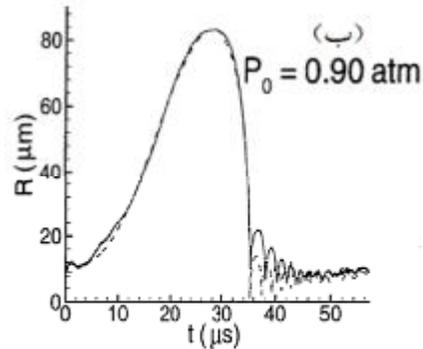
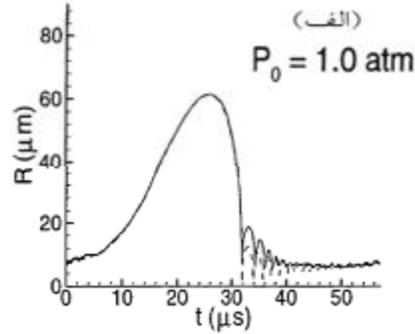
شکل 2. تحول توان حباب سونولومینسانس بر حسب زمان، در فشارهای محیطی مختلف [14]

در تمامی محاسبات فرکانس آکوستیکی 38 kHz و فشار جزئی گاز نجیب حل شده آرگون 4 تور در نظر گرفته شده است. برای داشتن حبابی پایدار، شرایط اولیه حباب شامل شعاع اولیه و دامنه فشار آکوستیکی از طریق نمودار فاز مشخص شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی تحول زمانی شعاع حباب گاز آرگون در سیال آب در سه فشار محیطی مختلف در شکل (3) آمده است. همان طور که، با توجه به نتایج تجربی، انتظار داریم مشاهده می‌شود که با افزایش فشار محیطی بیشینه شعاع حباب، نسبت بسط، $ER = \frac{R_{max}}{R_0}$ و بازه زمانی فروریزش کاهش می‌یابد.

علاوه بر این برای حفظ پایداری انتشاری، شاهد کاهش شعاع اولیه حباب هستیم.



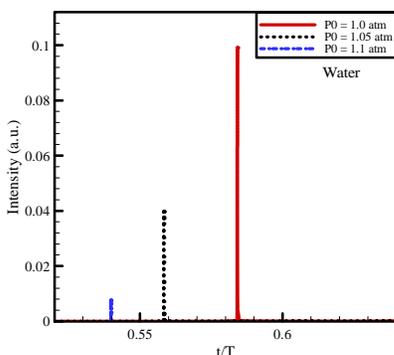
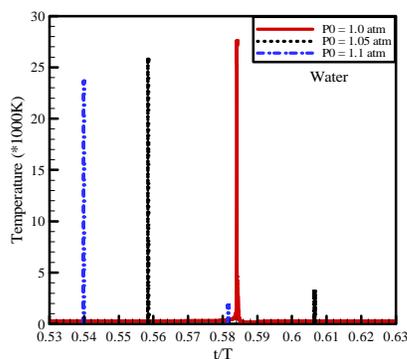
شکل 3. تحول زمانی شعاع حباب سونولومینسانسی گاز آرگون در سیال آب در سه فشار محیطی مختلف



شکل 1. نتایج آزمایشگاهی تحول زمانی شعاع حباب سونولومینسانسی در الف) فشار محیطی 1/0atm و ب) فشار محیطی 0/9atm [14]

در ادامه تحقیقات تجربی، در دامنه فشار آکوستیکی ثابت 1/4atm، توان گسیلی حباب سونولومینسانسی در سه فشار محیطی مختلف در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد که نتایج حاصل در شکل (2) نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود کاهش دامنه فشار منجر به افزایش بیشینه شدت تابش گسیلی حباب سونولومینسانسی در لحظه فروریزش می‌شود.

در این بخش با استفاده از مدل هیدروشیمیایی برای بررسی تحول گاز درون حباب و مکانیسم حرارتی برم اشتراک برای محاسبه شدت تابش گسیلی در لحظه فروریزش نتایج عددی پارامترهای خروجی تک حباب سونولومینسانسی گاز آرگون در سیال آب محاسبه شده است.



شکل 5. تحول زمانی دما و شدت تک حباب گاز آرگون در سیال آب در سه فشار محیطی مختلف

نتایج

در این مقاله تأثیر فشار محیطی بر پارامترهای خروجی تک حباب سونولومینسانسی گاز آرگون در سیال میزبان آب به صورت عددی و با استفاده از مدل هیدروشیمیایی مورد مطالعه قرار گرفته است.

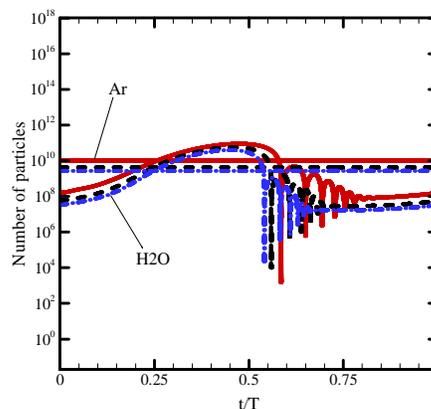
برای محاسبه شدت تابش گسیلی تک حباب آرگون در طول سیکل آکوستیکی از سه فرآیند غالب برم اشتراک‌نگ حرارتی بهره‌جسته‌ایم. محاسبات نشان می‌دهد که کاهش فشار محیطی می‌تواند منجر به افزایش بیشینه شعاع حباب نوسان‌کننده، بازه زمانی فروریزش، تعداد ذرات موجود درون حباب و شدت تابش گسیلی در لحظه فروریزش گردد که انطباق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود بین کمینه و بیشینه دما و شدت حاصل در لحظه فروریزش به ترتیب حدود 4000K و 12 مرتبه دامنه اختلاف وجود دارد که انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. منحنی پایداری انتشاری در نمودار فاز با شیب مثبت می‌تواند تعادل پایدار ایجاد کند. زمانی که

با افزایش فشار محیطی و کاهش شعاع اولیه حباب، تعداد ذرات موجود درون آن شامل مولکول‌های بخار آب و گاز نجیب آرگون نیز کاهش می‌یابد (شکل (4)). این امر منجر به کاهش درجه یونیزاسیون مولکول‌های گاز نجیب آرگون می‌شود.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی تحول زمانی دما و شدت تابش گسیلی تک حباب سونولومینسانسی گاز آرگون در سیال آب در طول یک سیکل آکوستیکی در سه فشار محیطی مختلف نیز در شکل (5) آمده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فشار محیطی شاهد کاهش بازه زمانی فروریزش حباب سونولومینسانسی و کاهش دما و شدت تابش در لحظه فروریزش هستیم که انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج تئوری در تایید نتایج تجربی نشان می‌دهد کاهش فشار محیطی می‌تواند منجر به افزایش بیشینه شعاع حباب، بازه زمانی فروریزش، دمای گاز آرگون و شدت تابش گسیلی حباب سونولومینسانسی در لحظه فروریزش شود. دلیل این امر را می‌توان کاهش شعاع اولیه حباب سونولومینسانسی با افزایش فشار محیطی دانست که منجر به کاهش ذرات موجود درون حباب، کاهش درجه یونیزاسیون و در نتیجه کاهش دما و شدت می‌گردد.



شکل 4. تحول زمانی تعداد ذرات گاز نجیب آرگون و بخار آب درون حباب سونولومینسانسی در طول یک سیکل آکوستیکی

فروریزش می‌باشد که نتایج محاسبات عددی به خوبی این مهم را نمایش می‌دهد.

فشار محیطی کاهش می‌یابد برای داشتن پایداری انتشاری مجبور به انتخاب حباب با شعاع اولیه کوچکتر هستیم که حاصل آن تعداد ذرات کمتر درون حباب، کاهش درجه یونیزاسیون و در نتیجه کاهش دما و شدت در لحظه

منابع

- [1] D. F. Gaitan and L. A. Crum, *J. Acoust. Soc. Am.* 91, (1992) 3166.
- [2] B. P. Barber, R. A. Hiller, R. Lofstedt, S. J. Putterman, and K. R. Weninger, *Phys. Rep.* 281, (1997) 65.
- [3] K. Yasui, *Phys. Rev. E.* 64, (2001) 016310.
- [4] G. E. Vazquez, and S. J. Putterman, *Phys. Rev. Lett.* 85, (2000) 14.
- [5] M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt, and D. Lohse, *Rev. Mod. Phys.* 74, (2002) 2.
- [6] R. P. Taleyarkhan, C. D. West, J. S. Cho, R. T. Lahey, Jr., R. I. Nigmatulin, and R. C. Block, *Phys. Rev. E.* 69 (2004) 036109.
- [7] Y. T. Didenko, W. B. McNamara, and K. S. Suslick, *Nature (London)*. 407, (2000) 877.
- [8] R. Sadighi-Bonabi, M. Mirheydari, N. Rezaee, and H. Ebrahimi, *Phys. Rev. E.* 84, (2011) 026301.
- [9] F. R. Young, *Cavitation*, CRC Press, Boca Raton, FL. (2005).
- [10] R. Sadighi-Bonabi, N. Rezaee, H. Ebrahimi, and M. Mirheydari, *Phys. Rev. E* 82, (2010) 016316.
- [11] A. Troia, D. M. Ripaa and R. Spagnolo. *Ultrason Sonochem.* 13(3), (2006) 278-282.
- [12] A. Moshaii, KH. Imani and M. Silatani, *Phys. Rev. E.* 80(1), (2009) 0463251-7.
- [13] G. E. Vazquez and S. J. Putterman, *Phys. Rev. Lett.* 85, (2000) 3037.
- [14] L. Kondic, C. Yuan, and C. K. Chan, *Phys. Rev. E.* 57, (1998), 32.
- [15] M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt, and D. Lohse, *Rev. Mod. Phys.* 74, (2002) 425.
- [16] S. D. Hopkins, S. J. Putterman, B. A. Kappus, K. S. Suslick, and C. G. Camara, *Phys. Rev. Lett.* 95, (2005) 254301.
- [17] M. Pishbini, A. A. Shokri, *Indian j of science & technology.* 8(29), (2015) 73896.
- [18] J. B. Keller and M. J. Miksis, *J. Acoust. Soc. Am.* 68, (1980) 628.
- [19] A. Moshaii and R. Sadighi-Bonabi, *Phys. Rev. E.* 70(1), (2004) 016304.
- [20] A. Chakravarty and et al. *Phys. Rev. E.* 69, (2004) 066317.
- [21] H. Xu, K. Suslick. *Phys Rev Lett.* 104, (2010) 244301-4.
- [22] R. Toegel, S. Hilgenfeldt and D. Lohse. *Phys. Rev. Lett.* 88, (2002) 034301.
- [23] K. Yasui, *Phys. Rev. E.* 60, (1999) 1754-1758.
- [24] R. Toegel and D. Lohse. *J. Chem. Phys.* 118, (2003) 1863-1875.