

# 소노루미네센스 현상과 그 응용

곽 호 영

## Sonoluminescence Phenomena and Their Application

Ho-Young Kwak



●곽호영(중앙대학교 기계공학과)  
●1946년생  
●기포생성과 기포거동역학을 전공하였으며, 이 현상을 이용한 비등열 전달, 전자장치 냉각, 마이크로 액츄에이터 설계, 소노루미네센스현상, 혼돈현상과 해저에서 음파의 전파 등에 관심을 가지고 있다.

### 1. 머리말

소노루미네센스(SL)현상은 액체 내에서 초음파에 동기화되어 진동하는 미소기포( $\sim 10 \mu\text{m}$ )가 수축할 때 기포내부의 온도가 고온이 됨에 따라 기포중심으로부터 빛이 나오는 현상을 말한다. 단일기포가 초음파에 가진 될 경우 그 스펙트럼이 X선에 가까운 것임이 밝혀질 뿐더러<sup>(1)</sup> 촉매물질의 개발이나 활성화,<sup>(2)</sup> 고분자 합성<sup>(3)</sup>뿐만 아니라 용액 내에서의 불순물 제거<sup>(4)</sup> 등에 대한 응용의 가능성이 속속 발견되자, 현재 과학계뿐만 아니라 일반 매스컴에서도 화제의 대상이 되고 있다.<sup>(5~10)</sup> SL현상은 원자당  $10^{-11} \text{eV}$ 에 해당되는 초음파 에너지의 파장이  $0.19 \mu\text{m}$  이하인 X선, 즉  $6 \text{eV}$  이상의 광자에너지로 증폭됨에 따라 기포수축시 기포내 가스의 온도가 수만 도에 이르는 것, 레이저에 상응하는 광펄스 폭(50 ps)과 초음파에 동기되어 현존하는 최상의 수정시계에 필적하는 SL 펄스의 규칙성, 기포수축시의  $10^{10} \text{W/m}^2$ 에 해당되는 열의 방출과 10억분의 수 초 동안

에  $10^4 \text{K}$ 의 고온상태에서 200 K 정도의 저온상태로 바뀔 때 따른 급격한 냉각속도 등으로 특징지어질 수 있다.

현재 실험을 통하여 알려진 SL에 관한 현상의 특징과 응용에 대해 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

(1) 용액 속의 기포가 초음파에 동기화되어 팽창·수축을 거듭하여 진동할 경우 그 수축시 기포내의 가스가 고온이 됨에 따라 기포주위의 액체에 반응영역이 생겨 이 반응영역에서 일반적인 환경조건에서는 일어나기 어려우며 고온에서 가능한 화학반응이 일어날 수 있다.

(2) 기포수축시의 고온과 연이어 일어나는 기포팽창시의 저온이 급격히 이루어져 기포주위의 반응영역내에서 금속 분말이 경험하는 냉각속도는  $10^7 \sim 10^9 \text{K/s}$ 이다. 이를 이용하여 아몰포스 철을 만들 수 있는 데 이 분말 철은 Fisher - Trotsch방법에 의해 제조된 분말 철보다 10배 이상의 촉매효과가 있음이 밝혀졌다.<sup>(2)</sup>

(3) 기포수축시 압력과 또는 충격파가 기포중심으로부터 외부로 나가기 때문에 반경

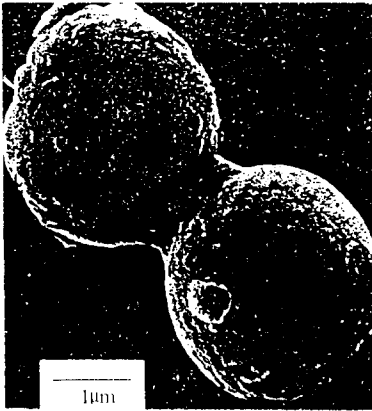


그림 1 고속충돌에 의해 용융된 후 Neck Formation이 일어난 Zn분말의 전자현미경 사진. 평균직경은  $5 \mu\text{m}$ <sup>(23)</sup>

이  $10 \mu\text{m}$  정도의 금속입자들은 서로 격렬히 충돌하여 용융된 후 뒤이은 급격한 냉각에 의하여 Neck-formation이 일어난다(그림 1 참조).

(4) 금속표면이나 반경이 큰 ( $>200 \mu\text{m}$ ) 금속입자의 주위에서 기포가 수축할 경우에는 속도가  $100 \text{ m/s}$ 의 제트가 금속표면 방향으로 발생하기 때문에 금속표면의 구조적 변화와 형상의 변화를 일으키는 물론 금속분말의 경우는 깨어지기도 한다.

(5) 기포수축시 기포내의 가스가 고온·고압이 되기 때문에 중합반응(polymerization)의 개시에 필요한 radical들이 발생된다. 또한 기포수축시의 압력파나 충격파에 의하여 큰 전단력이 발생하기 때문에 고분자의 고리(chain)를 끊기도 하고 초음파의 작용이 고분자의 모듬형성을 도와주기 때문에 고분자 분자량의 재분배를 일으키기도 한다.<sup>(3)</sup>

1993년 Frenzel과 Schultes<sup>(11)</sup>에 의하여 처음 발견된 이래 60여 년 동안 알려져 왔으나 최근에 들어서야 비로소 이 현상에 대한 이해와 응용연구가 시작된 SL에 대해 현재의 연구현황과 미해결 문제를 알아보는 것은 앞으로의 연구를 위해 중요한 일 중의 하나이다.

## 2. 소노루미네센스현상에 대한 종래의 이론 및 실험

현재 SL현상을 가장 잘 설명해주고 있는 “Hot-spot” 모델은 1950년 Noltingk와 Neppiras<sup>(12)</sup>에 의하여 제안되었다. 이 모델은 기포가 빠른 속도로 수축할 경우 기포내 가스의 온도는 단열적으로 압축되어 흑체복사에 의한 빛을 낼 수 있을 정도의 고온이 된다는 이론이다. 기포벽을 통한 외부로의 열전달현상을 무시할 경우 수축시의 기포내부의 온도는 잘 알려진 다음의 식에 의해 측정할 수 있다.

$$T_{ad} = T_{\infty} \left( \frac{R_{\max}}{R_{\min}} \right)^{3(\gamma-1)} \quad (1)$$

윗식에서  $T_{\infty}$ 는 기포가 최대 팽창했을 때의 기포내 가스의 온도,  $R_{\max}$ 과  $R_{\min}$ 는 기포가 최대로 팽창했을 때와 최소로 수축했을 때의 기포반경이며,  $\gamma$ 는 기포내 가스의 비열비이다. 단일 기포가 초음파장에서 거동할 경우, 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 초음파와의 진폭이 부압될 때 기포는 최대 팽창을 하게 되고 바로 뒤이어 그 진폭이 양압으로 변할 때 급격한 수축을 하게 된다. 하지만 이 이론은 기포내 가스 성분의 분자량이 큰 불활성가스의 경우가 작은 경우보다 SL 강도가 큰 이유를 설명해 주지는 못하고 있다. 1963년 최초로 Hickling<sup>(13)</sup>은 Hot-spot 모델이 기포수축시 외부로의 열전달을 고려하지 못함으로 인하여 야기된 실험결과와의 상위점을 설명하기 위하여 비압축성 액체 내에서 진동하는 구형기포에 대한 수치계산 결과를 발표하였다. 이 모델은 부분적으로 기포를 이루는 가스의 종류에 따른 SL 강도를 설명하는 데에는 성공하였다.

Hot-spot 모델과 같은 흑체복사에 의한 발광이론 이외에도 현재 그 사실이 확인되고 있는 이론은 1950년대 Griffing에 의해서 제안된 “Chemiluminescence” 모델(이하 CL

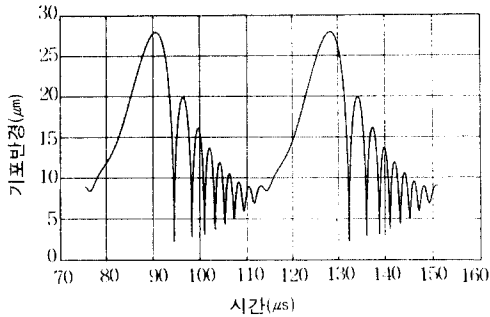


그림 2 평형상태의 반경이 8.5 μm 인 기포를 초음파의 주기가 26.5 kHz, 가진 압력 1.075 atm에서 진동을 시켰을 때의 기포반경의 변화<sup>(39)</sup>

이라 약칭함)이다.<sup>(14)</sup> 이 이론은 기포의 수축 시 기포내 가스의 온도가 고온이 됨에 따라 분자들의 열해리가 일어나 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)와 같은 산화제가 생성, 기포 주위의 액체로 용해되어 화학반응을 일으킬 때 빛이 나온다는 이론이다. 1957년 Gunter<sup>(15)</sup>는 전해질 수용액 내에서의 SL 연구로부터 흑체복사원 이외에 금속 radical에 의한 스펙트럼 선과 띠를 확인한 바 있다. 즉, Sehgal 등<sup>(16)</sup>과 Verrall 및 Sehgal<sup>(17)</sup>은 수용액 내에서의 SL

스펙트럼을 분석한 결과 강한 스펙트럼 선은 분자충돌에 의해 여기된 수산기가 H<sub>2</sub>O\* → H+OH\* → H+OH → hν의 과정에 의해 기저상태로 천이됨에 따른 것임을 확인하였다.

어떤 연구도 그러하듯이 SL현상에 대한 연구도 SL 그 자체 현상의 규명에 관한 연구보다도 이 현상을 이용한 응용연구가 먼저 미국 Illinois대의 화학자에 의하여 집중적으로 이루어졌다. 즉, Suslick 등<sup>(18)</sup>은, 금속카보닐의 알칸용액 내에서 금속카보닐의 반응물을 기포내의 농도 함수로써 측정하는 방법을 사용하여 기포내의 온도가 최대 5,200 K 정도임을 보고하였으며, 기포벽 주위의 액체 내에 1,900 K의 유효온도를 갖는 반응 영역 (reaction zone)이 존재한다고 결론지었다. 또한, Flint 및 Suslick<sup>(19,20)</sup>과, Suslick<sup>(21)</sup>은 실리콘유 용액 내에 잠겨진 직경 1cm의 티타늄 진동호온으로부터 발생되는 SL의 영상을 촬영하였으며, 이 때 천이 캐비테이션 과정 중에 기록된 발광 스펙트럼을 탄화수소로부터 여기된 상태의 2원자 탄소(C<sub>2</sub>)에 대한 이론곡선에 피팅시킴으로써 기포의 hot spot 내에 달성된 온도가 5000 K임을 추정하였다. Suslick 등<sup>(22)</sup>은 이러한 사실을 이용하여,

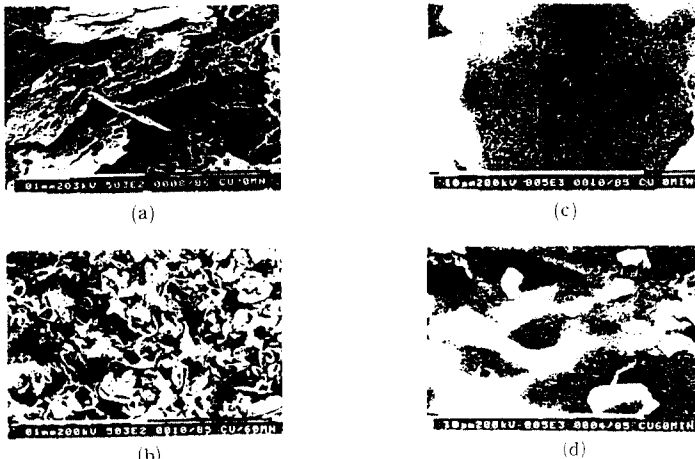


그림 3 초음파 처리를 안한 구리분말(a)과 1시간 처리한 구리분말(b), (c)와 (d)는 각각 (a)와 (b)를 확대한 사진<sup>(2)</sup>

Fe(CO)<sub>5</sub> 용액 내에 초음파를 조사하여 기포 수축시 기포내의 고온에 의한 열전달을 이용하여 CO분자를 Fe원자와 분리한 다음, 기포가 다시 팽창하여 기포내의 온도가 급강하하는 현상을 이용하여 비정질 철의 제조에 성공하였고, 이 때의 냉각속도는 10<sup>7</sup> K/s가 된다고 추산하였다.<sup>(22)</sup> 또한 Doktycz와 Suslick<sup>(23)</sup>은 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 기포수축시 발생하는 내파(implosion)에 의해 용액내의 금속미립자(Ni, Zn 등)들이 충돌한 후 결합되는 Neck-formation을 실험적으로 확인하여 초음파를 이용한 새로운 물질개발의 가능성을 제시하였다. 이와 같은 금속 물질간의 충돌은 금속분말의 표면적은 물론 형상을 바꾸어 놓을 뿐만 아니라 산화막을 깨뜨리기 때문에<sup>(24)</sup> 촉매의 재활성화에도 획기적인 효과를 줄 수 있으리라 믿는다. 그림 3에서는 초음파에 의한 SL현상이 어떻게 표면형상을 변하게 하는가를 극명하게 보여주고 있다. 이 외에도 Sonochemistry 분야<sup>(25)</sup>는 Alkane용액에서의 C-C결합 파괴에 의한 H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 등의 생성,<sup>(26)</sup> 물 내에서 오염물질의 제거 등 많은 응용분야가 연구를 기다리고 있는 상태이다.

SL현상에 대한 근본적인 연구는 1990년 Gaitan<sup>(27)</sup>에 의해 액체 내에서 시험관의 크기와 액체의 점도에 따라 초음파의 주파수를 조절하여 단일 기포를 음파의 힘으로 부상시키는 데 성공함으로써 본격적으로 시작되었다. Gaitan 등<sup>(28)</sup>은 이 방법을 이용하여 물 또는 물/글리세린 혼합용액 내에서의 단일 공기기포를 지속적으로 유지시킬 수 있는 가진(加振)압력(물: ~1.3기압, 물/글리세린: ~1.5기압)까지 그 기포의 공진 주파수 밖에서 진동시키는데 성공함으로써, 단일기포에 의한 SL현상의 정성적 해석의 발판을 마련하였다. 또한 시간에 따른 기포크기의 측정결과로부터 초음파에 의해 최대 팽창한 기포의 체적이 수 micro-second 내에 수십만분의 1의 체적으로 수축함을 관찰하였으며,

SL은 기포가 최소로 수축됨과 동시에 기포의 중심으로부터 발생됨을 확인하였다.

이와 같은 액체 내에서의 단일기포 부상 방법을 이용한 SL현상에 대한 획기적인 실험결과는 1992년 UCLA의 Putterman 그룹<sup>(29-32)</sup>에 의하여 발표되었다. 즉 이들은 초음파장에서 진동하는 단일기포로부터의 SL현상은 첫째, 기포수축시 기포중심으로부터 나오는 빛은 레이저 광선처럼 간섭성(coherent)이며, 둘째, 그 발광시간은 50ps 이내이며, 셋째, 초음파에 동기화되어 발광하는 시간 간격의 오차는 50ps 이내로 규칙적이며, 넷째, 빛의 파장은 0.19 μm 이하까지 분포되어 있음을 알 수 있어 기포중심의 온도는 수만 도에 이른다는 획기적인 실험결과를 얻었다.

생물학적인 측면에서의 SL현상은 기포의 격렬한 붕괴 시에 발생하는 고온에 의한 물 분자가 H<sup>+</sup>OH<sup>-</sup> 성분으로 해리될 수 있으며, 이때 OH<sup>-</sup>의 고반응성(반응시간은 수 nano-second 이내)으로 인하여 생체세포의 DNA가 이들 수산화기와 결합하게 되면 유전자 암호의 변형을 일으킬 가능성이 있음이 제시되고 있다.<sup>(33)</sup> 또한, Church는 기포역학의 근사모형을 사용하여 기포의 격렬한 붕괴 시에 방출될 수 있는 X-선에 의해서도 DNA의 형질변경이 일어날 수 있다는 연구결과를 제시하였다.<sup>(34)</sup>

Hickling<sup>(13)</sup>에 의하여 처음으로 시도되었던 SL현상에 대한 이론적인 연구는 Kamath 등<sup>(35)</sup>에 의하여 다시 시도되었다. 이들은 Hickling의 기포내 가스의 온도가 균일하다는 가정 대신에 기포벽의 온도가 액체의 온도와 같다는 경계조건을 사용, 가스에 대한 에너지 방정식을 수치적으로 풀어 기포내부의 온도분포를 구하였다. 이를 토대로 하여 그들은 Sehgal 등<sup>(16)</sup>의 실험결과, 즉 SL은 기포수축시 여기된 과산화기 radical들이 기저상태로 천이됨에 따라 빛을 낸다는 실험사실을 확인하였다. 하지만 기포거동에 대한

정확한 해석에 의하면 기포벽의 온도를 임의로 정할 수 없음이 밝혀졌다.<sup>(36)</sup>

최근 Wu와 Roberts<sup>(37)</sup>은 기포내 가스에 대한 Euler식을 초대형 컴퓨터를 이용하여 수치적으로 풀 결과 초음파의 진폭이 큰 경우 ( $\approx 1.5 \text{ atm}$ ) 기포수축시 기포내부에 충격파가 발생됨을 확인하였고, 이때 충격파에 의한 광펄스 간격은 1 ps, 가스의 온도는  $10^6 \text{ K}$  까지 뒀을 보여, Greenspan과 Nadim<sup>(38)</sup>에 의해 제안된 SL 원인이 기포수축시 충격파 발생에 의한 것임을 수치적으로 입증하였지만, 충격파가 발생하는 원인에 대하여는 해답을 찾지못하였다. 이에 Kwak과 Yang<sup>(39)</sup>은 그림 4에서 주어진 모델을 이용하여 기포내부의 가스에 대한 보존법칙뿐만 아니라 기포주위의 액체에 대한 보존법칙을 고려하여 초음파장에서 거동하는 기포에 대한 해석적인 해 즉 기포내 가스에 대한 밀도분포, 속도분포, 압력분포, 및 온도분포를 구하였고, 이 해석을 통하여 Suslick 등<sup>(18)</sup>이 실험적으로 유추한 반응영역(열적계층)이 존재함을 해석적으로 밝혔다. 또한, 기포수축시 기포벽 주위의 열계층을 통한 열유속은 자그마치  $47 \text{ GW/m}^2$  정도임과 용액의 온도가 낮을수록 SL 강도가 크게 나타나는 실험결과<sup>(40)</sup>를 예측할 수 있었다. 게다가 이와 같은 해석적인 결과를 토대로, 기포수축시의 충격파

발생이 기포수축시 기포벽의 속도가 음속이상으로 되지 않더라도 기포벽의 급격한 가속 때문에 일어날 수 있음을 밝혀내었다. 이 이론은 1965년 Nobel 상 수상자인 Schwinger 교수가 제안<sup>(41)</sup>한 SL현상은 유전상수가 다른 매체로 이루어지는 계면이 급속한 가속에 의해 수축될 때 일어난다는 가정<sup>(42)</sup>과 상당한 유사성을 갖고 있다.

### 3. 유체역학적 관점에서의 소노루미네센스

우선 SL현상을 보다 명확히 이해하기 위해서는 초음파장에서 진동하는 기포내 가스의 거동에 대한 엄밀한 해석과 그 이해가 필요하다. Prosperetti 등<sup>(43)</sup>이 기포내부에 대한 에너지 방정식을 수치적으로 풀어 기포내부의 온도분포를 구하기 이전의 기포거동의 연구는 잘 알려진 폴리트로픽 관계식  $P_b V_b^n = \text{const.}$ 을 사용하여 기포반경에 따른 기포내 가스의 압력을 예측해왔다. 하지만 이 관계식은 기포내부의 온도가 균일하다는 가정을 포함하고 있을 뿐더러  $P_b dV_b$  항이 완전미분이기 때문에 열전달에 의한 열적감쇄현상(thermal damping)을 기술하지는 못하고 있어 SL현상을 다루기에는 부적당하다. 이러한 사실은 Lófstedt 등<sup>(44)</sup>이 폴리트로픽 관계식을 이용  $n=1$ (등온과정)인 경우와  $n=\gamma$ (단열과정)로 계산한 값을 실험결과에서 얻은 시간에 따른 기포반경의 변화와 비교해볼 때 서로 잘 맞지 않는 것을 보아도 확인할 수 있다.

한편 Prosperetti 등<sup>(43)</sup>은 기포내부의 압력을 시간만의 함수라고 가정 연속 방정식과 에너지 보존식으로부터 기포내 가스에 대한 속도분포를 얻은 바 있다. 또한 그들은 기포벽내에서의 가스의 온도는 항상 액체의 온도와 같다는 경계조건을 사용, 에너지 보존식을 풀어 기포내 가스에 대한 온도분포를 구하였다. Kamath 등<sup>(35)</sup>은 상대적으로 낮은

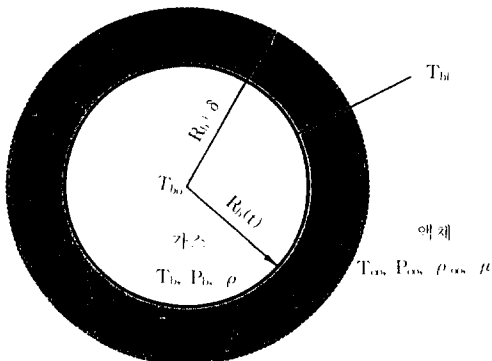


그림 4 초음파장에서 진동하는 액체내의 구형기포에 대한 모델<sup>(39)</sup>

초음파 진폭 (<1bar)의 경우 기포거동에 따른 OH radical의 농도를 구함으로써 SL현상이 OH radical에 의한 것임을 이론적으로 밝혔다. 하지만 이와 같은 낮은 진폭은 단일 기포의 경우 SL현상을 관찰할 수 없는 진폭 범위이며<sup>(40)</sup> 보다 정확한 기포거동에 대한 해석결과에 따르면 경계조건을 이들과 같이 임의로 취할 수 없음이 밝혀졌다.<sup>(36)</sup> 게다가 Prosperetti 등<sup>(45)</sup>의 기포내 압력이 균일하다는 가정으로는 기포내부의 충격파현상을 설명할 수는 없다.

이에 Wu와 Roberts<sup>(37)</sup>는 Greenspan과 Nadim<sup>(38)</sup>에 의해 제안된 SL 원인이 기포수축시 기포내부에서의 충격파 발생에 의한 것임을 Euler식과 기포벽을 통한 열전달을 고려하지 않은 에너지식을 수치적으로 풀어 확인한 바 있다. 즉 Wu와 Roberts는 초음파의 진폭이 비교적 큰 경우 ( $\geq 1.5 \text{ atm}$ ) 기포가 수축하기전 0.5 ns 전에 기포내에 밀도와 압력구배가 나타남과, 충격파의 집속시간은 1 ps, 충격파의 집속에 의한 기포중심에서의 가스 온도는  $10^6 \text{ K}$ 까지 도달함을 계산한 바 있다. 하지만 그들은 에너지식에서 열전달을 고려하지 못하였기 때문에 초기조건에 크게 좌우되는 충격파의 강도가 너무 크게 계산되

표 1 평형상태의 반경이  $8.5 \mu\text{m}$ 인 기포를 주파수 26.5 kHz, 가진압력 1.075 atm 으로 진동시켜 1차 수축 후 팽창-수축을 거듭할 때 최대 기포의 반경과 주기에 대한 계산 결과와 실험결과

기포의 팽창 및 수축회수	최대 기포 반경		기포 거동 주기	
	측정치	계산치	측정치	계산치
1	19.9	20	3.56	3.62
2	15.6	16.2	2.43	2.76
3	13	13.6	2.24	2.24
4	11.1	12.1	2.06	2.07
5	10.4	10.5	1.87	1.90
6	9.7	9.5	1.87	1.82

었는지 모른다. 또한 그들은 충격파의 발생 원인이 무엇인지는 규명하지 못하였다.

한편 Kwak과 Yang<sup>(39)</sup>은 Euler 식에 대한 해석적인 해를 발견함으로써 초음파장 내에서 거동하는 기포거동을 초대형 컴퓨터의 도움 없이도 정확히 예측할 수 있는 길을 마련하였다. 즉 Euler식의 해석적 해와 기포벽의 운동에 대한 음향 근사식(acoustic approximation)인 Keller-Miksis 식<sup>(45)</sup>을 이용, Kwak과 Yang은 기포벽의 가속에 의한 기

표 2 기포의 평형상태에서의 반경, 초음파의 가진압력, 액체의 온도에 따른 기포수축시 기포벽의 최소속도 ( $U_{b,min}$ ), 충격파 발생 후 기포중심에서의 가스온도 ( $T_c$ ), 충격파 간격 ( $t_s$ ), 충격파 반경 ( $R_s$ )에 대한 계산결과

실험에 사용된 입력변수	$R_o (\mu\text{m})$	경우 1	경우 2	경우 3
		$P_A (\text{atm})$	1.25	1.3
$T_\infty (\text{K})$	308	293	276	
계산결과	$t_s (\text{ps})$	16.6	11.6	3.9
	$T_c (\text{K})$	7,230 (0.41 $\mu\text{m}$ )	8,160 (0.36 $\mu\text{m}$ )	11,730 (0.25 $\mu\text{m}$ )
	$R_s (\mu\text{m})$	0.062	0.047	0.027
	$U_{b,min} (\text{m/s})$	-503.6	-564.5	-760.6

포내 가스의 압력구배를 무시할 경우, 기포의 거동은 물론 기포내 온도분포까지 해석적으로 구할 수 있었다.

표 1에는 초음파의 진폭이 1.075 atm인 경우 즉 물 용액 내에서 진동하는 기포로부터 SL을 관찰할 수 없는 경우에 대해 기포가 최대팽창하여 1차 수축을 하고 다시 팽창·수축을 거듭하는 경우에 대한 계산결과와 실

험결과가 함께 주어져 있다. 이 표로부터 Kwak와 Yang에 의한 해석적 해가 얼마나 정확하게 초음파장에서 거동하는 기포의 거동을 예측할 수 있는지 확인할 수 있다. 게다가 Kwak와 Yang은 해석적으로 초음파의 진폭이 커 기포가 순간적으로 수축할 경우 기포벽의 가속에 의한 압력구배가 생겨남을 밝혔다. 이 해석적 해와 충격파에 대한

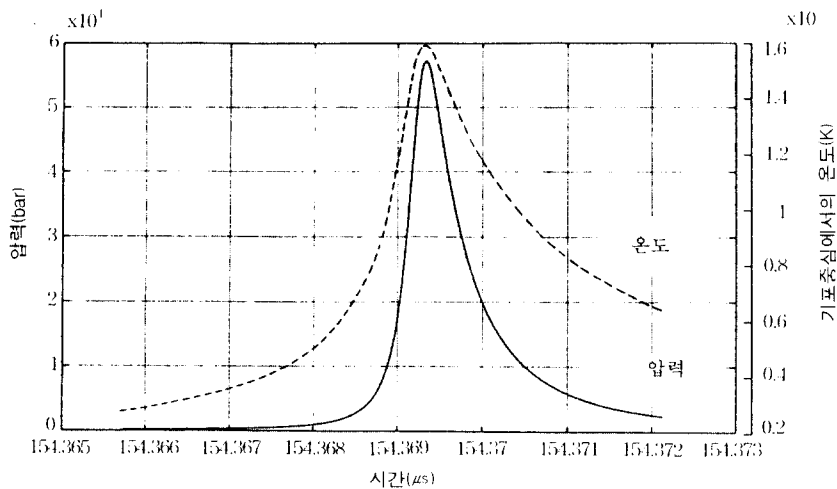


그림 5 평형상태의 반경이 15  $\mu\text{m}$ 인 기포를 물/글리세린 용액에서 주기가 23.6 kHz, 가진 압력이 1.45 atm으로 진동시켰을 때 수축점 부근에서 기포내 가스의 온도와 압력변화<sup>(39)</sup>

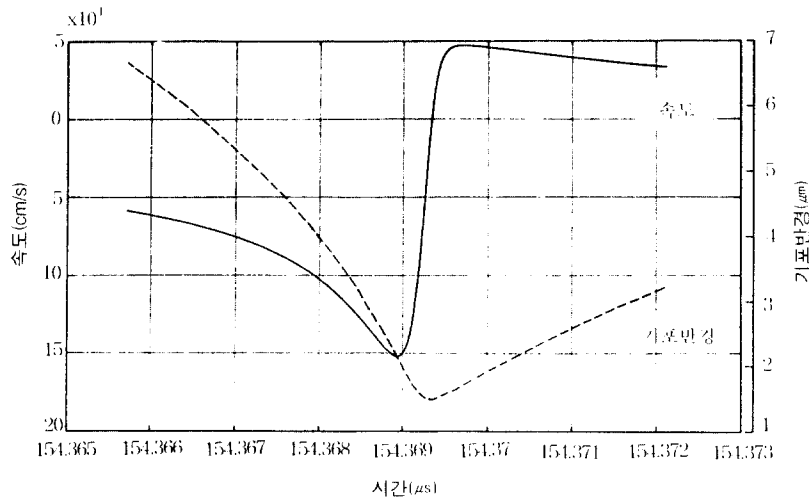


그림 6 그림 5에 나와 있는 조건에서 수축점 부근에서 기포벽의 속도와 기포반경의 변화<sup>(39)</sup>

Hugoniot 식을 이용하여 기포수축시 충격파의 속도, 반경, 충격파의 집속(focusing)에 의한 기포중심에서의 가스의 온도를 기포의 평형상태에서의 반경, 초음파의 가진 진폭과 액체의 온도에 따라 계산한 결과가 표 2에 주어져 있다. 이 표는 아직은 이해를 하지 못했던 문제중의 하나인 초음파의 가진압력이나 액체의 온도가 조금 변해도 SL 강도가 크게 변하는 사실 즉 SL의 감도(sensitivity)를 잘 보여주고 있다.

그림 5와 그림 6에는 평형상태의 반경이 15 μm인 기포를 물/글리세린 용액 내에서 주파수가 23.6 kHz, 가진압력이 1.45 atm인 초음파를 진동시킬 경우 수축시의 기포중심의 온도와 압력, 기포반경과 기포벽의 속도가 시간의 함수로 나타나 있다.<sup>(41)</sup> 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 기포벽의 속도가 0이 되는 수축점 전의 기포벽은 급격한 감속과 가속을 경험하게 되며 기포수축시의 기포 내부에서 발생하는 충격파는 기포벽의 가속에 의한 것임을 확인할 수 있다.

#### 4. 소노루미네선스 현상의 미해결 문제

위에서 언급한 바와 같이 SL현상에 대한 Hot-spot 모델이나 CL 모델은 SL현상의 실험결과를 부분적으로 설명해주고 있지만 SL현상을 포괄적으로 설명해줄 수 있는 모델은 아직은 없다. 또한, 어떤 실험결과에 대해서는 이해조차 하지 못하는 실정이다.

첫째, 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 순수하게 질소로 구성된 기포의 경우보다<sup>(46)</sup> Xe, Ar, He 같은 불활성기체가 소량(1% 정도) 첨가되었을 경우 SL 강도가 대단히 증가하는 이유는 무엇인가? 아마 소량의 불활성기체의 역할이 SL현상의 이해에 열쇠를 쥐고 있는지 모른다.

둘째, 실험결과에 의하면<sup>(47)</sup> SL 스펙트럼의 강도는 파장에 따라 다음과 같은 관계식

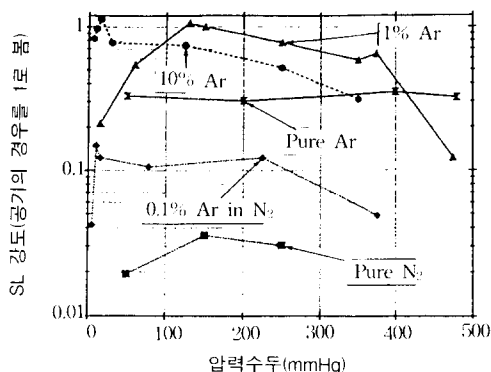


그림 7 질소로 구성된 기포내에 아르곤 첨가에 따른 SL강도의 변화<sup>(46)</sup>

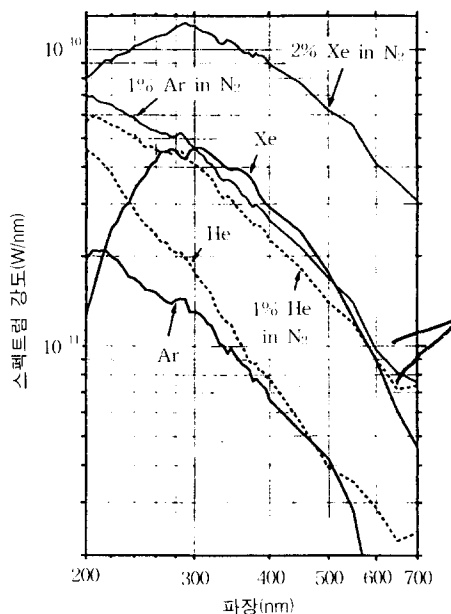


그림 8 여러가지 가스로 구성된 기포로부터의 파장에 따른 SL강도<sup>(46)</sup>

으로 주어진다. (그림 8에서 He 가스의 경우 참조). 즉, 식 (2)와 같다.

$$e(\lambda) \sim \frac{1}{\lambda^{2.5}} \quad (2)$$

하지만 SL의 근원이 흑체복사라고 가정한다면  $e(\lambda)$ 는  $1/\lambda^4$ 에 비례하며, Bremsstrahlung이라 한다면  $e(\lambda)$ 는  $1/\lambda^2$ 에 비례하고,



Schwinger 교수가 제안한 Casimir 효과<sup>(41)</sup>에 의한다면  $e(\lambda)$ 는  $1/\lambda^3$ 에 비례한다고 알려져 있다. 이로 미루어 볼 때 정말 SL의 근원이 무엇인지 아직은 명확한 규명이 이루어지지 않은 상태이다.

셋째, 단일기포를 부상시켜 초음파로 가진시켰을 때의 SL현상 즉 SBSL(single bub-

ble sonoluminescence)과 티타늄 진동호운을 이용 많은 기포가 액체 내에서 발생할 때의 SL현상 즉 MBSL(multi-bubble sonoluminescence)의 스펙트럼은 그림 9, 10에서 볼 수 있는 바와 같이 아르곤/물 시스템인 경우에는 유사하지만 공기/소금물(0.1% Na)인 경우에는 왜 상이한가?<sup>(48)</sup>

넷째, SL의 펄스 지속시간은 50 ps보다 얼마나 짧은 것인가? SL의 근원이 흑체복사라면 이 짧은 시간에 열적 평형상태가 이루어질 수 있는가? 그렇다면 이 경우 어떻게 온도를 정의할 수 있는가 등의 문제가 미해결의 상태로 남아 있다.<sup>(49)</sup>

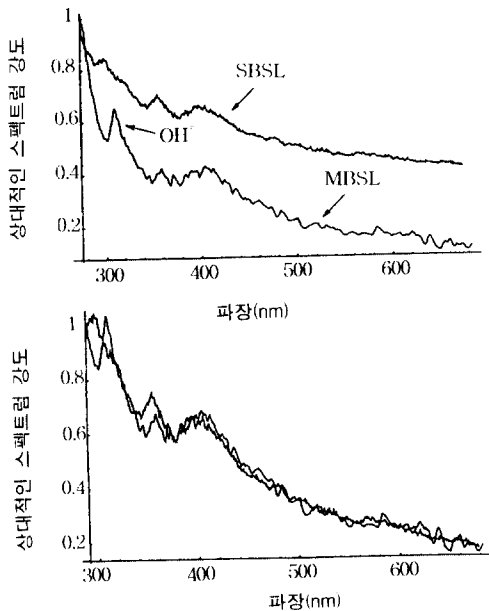


그림 9 물 내의 아르곤 기포로부터 단일기포에 의한 SL(SBSL)과 여러 개의 기포에 의한 SL(MBSL)의 비교<sup>(48)</sup>

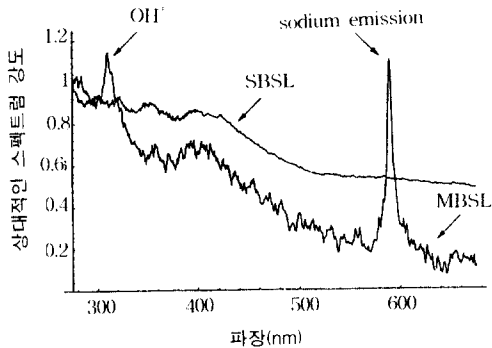


그림 10 소금물 용액 내에서 공기로 구성된 기포로부터 SBSL과 MBSL의 강도 비교<sup>(48)</sup>

## 5. 맺음말

전술한 바와 같이 단일기포에 의한 SL현상은 유체역학적 또는 화학적 측면에서 이해할 수 있는 면은 있지만 아직은 SL에 관계되는 모든 현상을 통일적으로 설명할 수 있는 이론은 없는 상태이다. 특히 질소가스로 구성된 기포내에 1%의 아르곤 가스가 첨가되었을 때의 SL 강도가 순수질소로 구성된 경우의 것보다 몇 10배 증가되는 이유를 현재는 알지 못한다. 따라서 아르곤 가스나 분자상태 또는 전자상태의 천이에 어떤 촉매역할을 하는지 밝힐 필요가 있다. 한편 소금물 용액에서 공기로 구성된 여러 개의 기포에 의한 SL(MBSL)의 경우는 단일기포에 의한 SL(SBSL)의 경우와는 달리 OH radical에 의한 스펙트럼 피크와 소듐에 의한 스펙트럼 피크가 나타나는 이유를 아직은 밝혀내지 못한 실정이다.

따라서 소노루미네센스현상의 이해는 그 자체가 학문적으로 중요할 뿐 아니라 많은 응용분야가 있기 때문에 SL현상에 대한 이론 연구와 실험연구는 신 기술 개발 및 확보 차원에서 절실히 필요한 연구분야이다. 왜냐하면 Putterman 교수 자신도 믿을 수 없었던 SL 현상이 자신의 실험으로 밝혀졌듯이

현재는 그 가능성이 희박하다고 생각되는 핵 융합 반응이 이 방법에 의해 이루어질지도 모르기 때문이다.<sup>(50)</sup>

### 참고문헌

- (1) Hiller, R., Putterman, S. J. and Barber, B. P., 1992, "Spectrum of Synchronous Picosecond Sonoluminescence," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 69, pp. 1182~1184.
- (2) Lindley, J., 1992, "Ultrasound in Catalytic and Solid Supported Reagent Reactions," in *Current Trends in Sonochemistry*, ed by G. J. Price, pp. 123~135.
- (3) Price, G. J., 1992, "Ultrasonically Assisted Polymer Synthesis," in *Current Trends in Sonochemistry*, ed by Price, G. J., pp. 87~109.
- (4) Coghlan, A., 1994, "Sound Treatment for Polluted Water," *New Scientist*, August, p. 20.
- (5) Suplee, C., 1991, "Searching for Nature's Message in a Bottle of Glowing Water," *Washington Post* 12, August, p. 3.
- (6) Bishop, J., 1991, "Flashes Might Yield Clue About Fusion," *Wall Street Journal*, October, 14, B1.
- (7) Levi, B., 1991, "Light Comes from Ultrasonic Cavitation in Picosecond Pulses," *Physics Today*, November, pp. 17~18.
- (8) White, C., 1991, "Sonoluminescence Sheds New Light on Physics," *21st Century Science and Technology*, Winter, pp. 26~29.
- (9) Everbach, E. C., 1993, "Sonoluminescence: Light from Sound," *Echoes*, Vol. 3, No. 1, pp. 3~5.
- (10) Amato, Z., 1992, "Making Light of Sound," *Science*, Vol. 255, p. 1511.
- (11) Frenzel, H. and Schultes, H., 1934, "Luminescent in Ultraschallbeschickter Wasser," *Z. Phys. Chem*, Vol. B27, pp. 421~424.
- (12) Noltingk, B. E. and Neppiras, E. A., 1950, "Cavitation Produced by Ultrasonics," *Proc. Phys. Soc.* Vol. B63, p. 674.
- (13) Hickling, R., 1963, "Effects of Thermal Conduction in Sonoluminescence," *J. Aconst. Soc. Am.*, Vol. 35, p. 967.
- (14) Griffing, V., 1950, *J. Chem. Phys.*, Vol. 18, p. 997. as Referenced by Walton et al (1984).
- (15) Gunter, P., Zeil, W., Grisar, U. and Heim, E., 1957, *Zeit.fur Elektrikem*, Vol. 61, pp. 188~. as Referenced by Walton et al(1984).
- (16) Sehgal, C., Steer, R. P., Sutherland, R. G. and Verrall, R. E., 1977, "Sonoluminescence of Aqueous Solution," *J. Phys. Chem.*, Vol. 81, pp. 2618~2620.
- (17) Sehgal, C., Sutherland, R. G. and Verrall, R. E., 1980, "Optical Spectra of Sonoluminescence from Transient and Stable Cavitation in Water Saturated with Various Gases," *J. Phys. Chem.*, Vol. 84, pp. 380~385.
- (18) Suslick, K. S., Hammerton, D. A. and Cline, R. E., 1986, "The Sonochemical Hot Spot," *Am. Chem. Soc.*, Vol. 108, pp. 5641~5642.
- (19) Flint, E. B. and Suslick, K. S., 1991, "The Temperature of Cavitation," *Science*, Vol. 253, pp. 1397~1399.
- (20) Sislick, K. S. and Flint, E. B., 1987, "Sonoluminescence from Nonaqueous Liquids," *Nature*, Vol. 330, pp. 553~555.
- (21) Suslick, K. S., 1990, "Sonochemistry," *Science*, Vol. 247, pp. 1439~1445.
- (22) Suslick, K. S., Choe, S.-B., Cichowals, A. A. and Grinstaff, M. A., *Nature*, Vol. 353, pp. 414~.

- (23) Doktycz, S. J. and Suslick, K. S., 1990, "Interparticle Collisions Driven by Ultrasound," *Science*, Vol. 247, pp. 1067~1069.
- (24) Suslick, K. S. and Doktycz, S. J., 1989, "The Sonochemistry of Zn Powder," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 111, pp. 2342~2344.
- (25) Price, G. J., Ed. 1992, *Current Trends in Sonochemistry*, Royal Society of Chemistry.
- (26) Suslick, K. S., Gawlenowski, J. J., Schubert, P. F. and Wang, R. H., 1983, "Alkane Sonochemistry," *J. Phys. Chem.*, Vol. 87, pp. 2299~2301.
- (27) Gaitan, D. F., 1990, "An Experimental Investigation of Acoustic Cavitation in Gaseous Liquids," Ph. D. Dissertation, The University of Mississippi.
- (28) Gaitan, D. F., Crum, L. A., Church, C. C. and Roy, R. A., 1992, "Sonoluminescence and Bubble Dynamics for a Single, Stable, Cavitation Bubble," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91, pp. 3126~3138.
- (29) Barber, B. P. and Putterman, S. J., 1991, "Observation of Synchronous Picosecond Sonoluminescence," *Nature*, Vol. 352, pp. 318~320.
- (30) Barber, B. P., Hiller, R., Arisaka, K., Fetterman, H. and Putterman, S. J., "Resolving the Picosecond Characteristics of Synchronous Sonoluminescence," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91, pp. 3061~3063.
- (31) Hiller, R., Putterman, S. J. and Barber, B. P., 1992, "Spectrum of Synchronous Picosecond Sonoluminescence," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 69, pp. 1182~1184.
- (32) Barber, B. P. and Putterman, S. J., 1992, "Light Scattering Measurements of the Repetitive Supersonic Implosion of a Sonoluminescing Bubble," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 69, pp. 3839~3842.
- (33) Verral, R. E. and Sehgal, C., 1988, *Sonoluminescence in Ultrasound : it's Chemical, Physical and Biological Effects*, Edited by K. S. Suslick, VCH, New York, pp. 227~286.
- (34) Everbach, E. E., 1993, "Sonoluminescence ; Light from Sound," *Echoes*, Vol. 3, pp. 3~5.
- (35) Kamath, V., Prosoeretti, A. and Ego-poulos, F. N., 1993, "A Theoretical Study of Sonoluminescence," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 94, pp. 248~260.
- (36) Kwak, H., Oh, S. and Park, C., 1995, "Bubble Dynamics on the Evolving Bubble Formed from the Droplet at the Superheat Limit," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1709~1718.
- (37) Wu, C. C. and Roberts, P. H., 1993, "Shock Wave Propagation in a Sonoluminescing Gas Bubble," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 70, pp. 1065~1067.
- (38) Greenspan, H. P. and Nadim, A., 1993, "On sonoluminescence of an Oscillating Gas Bubble," *Phys. Fluid*, Vol. A5, pp. 1065~1067.
- (39) Kwak, H. and Yang, H., 1995, "An Aspect of Sonoluminescence from Hydrodynamic Theory," Will be Published in the Journal of Physical Society of Japan, Vol. 64, No. 6, pp. 1980~1992.
- (40) Barber, B. P., Wu, C. C., L. fstedt, R., Roberts, P. H. and Putterman, S. J., 1994, "Sensitivity of Sonoluminescence to Experimental Parameters," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 72, pp. 1380~1383.
- (41) Schwinger, J., 1993, "Casimir Light : a Glimpse," *Proc. Natl. Acad. Scr.*, Vol. 90, pp. 958~959.
- (42) Holt, R. G., Gaitan, D. F., Atchley, A. A. and Holzfluss, J., 1994, "Caotic

- Sonoluminescence," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 72, pp. 1376~1379.
- (43) Prosperetti, A., Crum, L. A. and Commander, K. W., 1988, "Nonlinear Bubble Dynamics," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 83, pp. 502~514.
- (44) Löfstedt, R., Barber, B. P. and Putterman, S. J., "Toward a Hydrodynamic Theory of Sonoluminescence," *Phys. Fluids*, Vol. A5, pp. 2911~2928.
- (45) Keller, J. B. and Miksis, M., 1980, "Bubble Oscillations of Large Amplitude," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 68, p. 628.
- (46) Hiller, R., Weninger, K., Putterman, S. J. and Barber, B. P., 1994, "Effect of Noble gas Doping in Single-Bubble Sonoluminescence," *Science*, Vol. 266, pp. 248~250.
- (47) Barber, B. P., Hiller, R., Löfstedt, R., Weninger, and Putterman, S. J., 1994, "Probing the Unknowns of Sonoluminescence," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 96, pt. 2, p. 3239.
- (48) Matula, T., McNamara, W. B., Mourad, P. D., Roy, R. A. and Suslick, K. S., 1994, "Comparisons Between Multi Bubble and Single Bubble Sonoluminescence," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 96, pt2, p. 3252.
- (49) Crum, L. S., 1994, "Sonoluminescence," *Physics Today*, September, pp. 22~29.
- (50) Putterman, S. J., 1995, "Sonoluminescence: Sound into Light," *Scientific American*, Feb., pp. 32~27. 