

# 금속 이온이 다중기포 Sonoluminescence 스펙트럼에 미치는 영향 연구

## Color Changes of Multi-Bubble Sonoluminescence Due to Metallic Ions in Water

한 문 수\*, 이 제 욱\*, 백 승 찬\*, 백 정 환\*, 김 영 환\*

(Moon-Su Han\*, Jae-Wook Lee\*, Seung-Chan Baek\*, Jung-Hwan Baek\*, Young H. Kim\*)

\*한국과학기술원 부설 한국과학영재학교

(접수일자: 2009년 11월 17일; 수정일자: 2010년 1월 4일; 채택일자: 2010년 2월 8일)

본 연구에서는 액체 내에서 초음파에 의해 빛이 발생하는 현상인 Sono-Luminescence (이하 SL)에 대해 연구하였다. 알칼리 금속과 알칼리 토금속 화합물을 녹인 용액에서의 SL을 관찰 하였으며, 금속 이온 농도, 금속이온의 종류를 바꾸어 가며 SL에 미치는 영향을 조사하였다. 이 때 각각의 SL에서 나오는 빛을 사진으로 찍어 RGB 성분 분석을 통해 금속 이온을 녹인 용액의 SL이 증류수에서 SL과 금속 불꽃 반응 색 또는 선스펙트럼에서 강한 세기로 방출되는 색의 합성으로 표현될 수 있는지 연구하였다. 알칼리 금속의 경우 두 색의 합성으로 잘 표현되었으나 알칼리 토금속의 경우는 그렇지 않았다. 그 이유로 SL 방출시 온도가 그리 높지 않아서 알칼리 토금속의 선스펙트럼에서 에너지가 큰 단파장의 빛이 SL에서 잘 방출되지 않기 때문인 것으로 추론하였다.

**핵심용어:** Sonoluminescence, 금속이온, 불꽃반응색

**투고분야:** 물리음향 및 광음향 분야 (9.7)

Sonoluminescence (SL) is the light emitting phenomenon accompanied with ultrasonic cavitation in liquid. It attracts many interests because physics behind it remains uncertain and few applications have appeared. It has been known that the color of SL changes in solutions which include metallic ion. In the present work, colors of SL in alkali metallic and alkaline earth metallic ions were considered. RGB component was used to analyze the color of SL. By using RGB component, it was found that color of SL in metallic solution can be resolved into color of SL in pure water and flame color of metal which is different from high intensity color of line spectrum of alkaline earth metal. From this result, influence of metallic ion on SL and the temperature on violent collapsing of cavitation bubble was discussed.

**Keywords:** Sonoluminescence, Metallic Ions, Flame Color

**ASK subject classification:** Physical Acoustics and Photo-Acoustic (9.7)

### 1. 서론

빛은 발생하는 기작에 따라 복사 (radiation)와 발광 (luminescence)으로 분류할 수 있다. 복사는 가장 흔한 빛으로 불꽃이나 흑체 복사와 같이 열에 의해 발생하는 빛이다. 반면에 열을 수반하지 않는 빛은 냉광 또는 발광이라고 한다. 발광에는 그 자극의 종류에 따라서 LED (Light Emitting Diode)와 같이 전기적 자극에 의해 빛을

내는 전기발광, 루미놀의 빛이나 반딧불처럼 화학적 자극에 의해 빛을 내는 화학발광 등이 있다.

Sonoluminescence (SL)는 강한 세기의 초음파에 의해 발생하는 발광 혹은 그 현상을 의미한다. SL의 역사는 1934년 사진 현상을 촉진시키기 위해서 현상액에 초음파를 쏘여주었을 때에 액속에 기포가 발생하면서 필름에 희미한 점들이 나타난 것을 발견한 때로 거슬러 올라간다 [1]. 이 현상은 수명이 짧은 여러 개의 기포가 관련되어 있어서 다중기포 SL (multi-bubble SL; MBSL)이라 부른다. MBSL은 밝기 때문에 관측이 비교적 용이하나 기포

책임저자: 김 영 환 (youngkim@paran.com)  
614-822 부산광역시 부산진구 당감3동 899 한국과학영재학교  
(전화: 051-606-2224; 팩스: 051-606-2157)

의 수명이 짧고 여러 기포가 움직이면서 빛을 내기 때문에 본격적인 연구가 어려웠다. 1989년에 단일기포에 의한 SL (single bubble SL; SBSL)을 얻을 수 있게 되면서 본격적인 연구가 진행되었다. 하나의 기포를 정상파에 의해 포획하고 기포가 압축될 때마다 안정적인 빛을 얻을 수 있었다 [2].

초음파의 압력변화에 의해 액체 내에서 기포가 발생하고 그 크기는 초음파 음장에 따라서 진동을 하고, 기포는 비선형적인 거동을 보이는데, 적당한 크기의 기포가 격렬한 붕괴에 의해서 빛이 발생한다. 그러나 빛이 방출되는 원리를 설명하기 위한 이론으로는 Shock wave model [3], Quantum effect model [4], Microjet model [5], Ice-crystals model [6] 등이 있다. 이들 이론은 SL의 pulse 폭, Noble gas doping, 액체의 온도, 유효 가속도, 액체 특성, 관측 스펙트럼 및 온도, 파워, 비대칭성과 같은 SL특징 중에서 일부분만 설명할 수 있고 아직까지는 완벽한 이론이 정립되어 있지 않다. 특히 기포 내부의 온도와 압력은 SL의 원리를 규명하는 유력한 단서일 뿐만 아니라, 향후 응용을 위하여 많은 연구자들의 관심 대상이다. 특히 기체의 내부 온도가  $10^8$  K까지 올라간다면 상온 핵융합이 가능하리라는 기대를 불러일으키고 있고 [7], 기포 발생시 중수소-중수소 핵융합에 의한 중성자를 관측하였다는 일부 논쟁적인 보고도 있다 [8]. 이때에 기포내부의 온도가 핵융합이 일어나기에 충분한 온도인  $10^7$  K에 이를 것이라는 시뮬레이션 결과를 제시하고는 있다. 그러나, 냉정하게 연구되어 보고된 사례는 기포 내부의 예측되는 온도는 5000 K 부터 1,000,000 K까지 다양하다 [9,10].

SL의 색은 액체의 종류, 첨가물의 유무 및 종류 등 다양한 조건에 따라 변화한다. SL의 스펙트럼으로부터 기포 내부의 온도를 추정할 수 있다고 보고되었다 [11]. 금속 이온 수용액에서의 SL은 증류수에서의 SL과는 다른 색상을 나타내는데, 이러한 금속이온들이 나타내는 색은 기포 내부의 온도를 결정하는 단서가 되고 있다 [12]. 하지만 대부분의 연구가 알칼리 금속 이온에서의 SL에 대한 연구는 보고되는 반면 [13], 다른 종류의 금속 이온 수용액에서의 SL에 대해서는 깊게 연구되어있지 않은 상태이다.

본 연구에서 알칼리 금속과 알칼리 토금속 이온 수용액에서 발생하는 SL을 관찰하였다. 이 때 SL의 밝기가 매우 약하여 일반적인 스펙트로미터를 사용하여 분광하기에는 매우 어렵다. 따라서, SL의 정확한 파장보다는 겉보기 색을 비교하기 위하여 카메라로 촬영한 사진의 RGB 성분

을 추출하여 모든 색상은 R, G, B 세 성분의 벡터로 가정하여 분석하는 방법을 제안하였다.

## II. 이론적 배경

### 2.1. Sonoluminescence (SL)

SL은 정상파 상태의 액체 내에서 초음파 캐비테이션에 의해 기포가 생기고, 이 기포가 정상파의 마디에 포획되어 진동을 하게 되는데, 어느 순간 강한 압력을 받아 급격히 붕괴하며 빛을 내는 현상이다. 따라서 SL을 관측하려면 강한 세기의 초음파가 필요하며, 빛이 생길 때 높은 온도와 압력이 기포의 중심부에서 만들어지게 된다. 이 때 SL의 빛은 매우 희미하여 암실에서 맨눈으로 볼 수 있는 정도의 세기를 가지고 있다.

SL은 크게 2가지 형태로 나눌 수 있는데 우선 많은 기포들에서 동시에 빛이 발생하는 MBSL과 하나의 기포에서 빛이 발생하는 SESL로 분류할 수 있다. MBSL은 많은 기포에서 동시에 빛이 발생하기 때문에 광량이 많아 관측하기가 비교적 쉬운 편이다. 그러나 각각의 기포의 수명이 짧고 수많은 기포들의 움직임을 분석하기가 어렵기 때문에 SL의 과정을 정량적으로 분석하기는 힘들다. SBSL에서는 정상파의 마디가 점으로 만들어지도록 셀을 만들어 단일 기포가 마디에 포획되어 진동하면서 SL이 발생된다. 이 경우 기포는 안정적으로 유지되기 때문에 MBSL에 비해 실험 환경을 조작하기가 간편하다.

### 2.2. 금속 이온의 선 스펙트럼과 불꽃 반응 색

각각의 원자들은 양자화된 전자의 궤도에서 전자가 일어나면서 에너지 차에 해당하는 빛을 흡수하거나 방출한다. 이 스펙트럼은 원자에 따라서 달라지며 금속 이온들의 불꽃반응이나 선스펙트럼은 금속 이온들을 확인하기 위해 널리 쓰이는 방법이다. 고온에서 기체 상태의 금속으로부터 관측되는 스펙트럼은 몇 개의 선으로 나타나는데 전자의 에너지 준위가 양자화 되어있기 때문이다. 또한 각 스펙트럼 선은 서로 다른 세기를 가지고 있으며 이는 온도에 따라서 다르다 [14]. 불꽃 반응은 금속이나 염들을 불꽃에 넣고 불꽃 반응 색을 관찰함으로써 금속 이온의 종류를 확인하는 간단한 방법이다. 불꽃 반응색은 금속의 원자 궤도 뿐만 아니라 온도에도 관여한다. 불꽃의 온도는 선 스펙트럼의 관측하는 환경의 온도에 비해 상대적으로 매우 낮기 때문에 선 스펙트럼의 밝은 색과 불꽃 반응색은 서로 다를 수 있다.

### III. 실험 과정

본 연구에 사용한 실험장치의 구성도는 그림 1과 같다. 강한 세기의 초음파를 만들기 위하여 초음파 발진기 (KODO, NXG-M)와 BLT 형의 초음파 transducer (Kodo-F, 08-07, 38 kHz)를 사용하였다. 용액에 cavitation을 만들기 위하여 부피가 250 cm<sup>3</sup>인 비커를 공명 셀 (cell)로 사용하였다. 공명 셀 (cell)에 에폭시 접착제를 사용하여 초음파 변환기 (transducer)를 부착하였다.

SL은 음압에 따라서 밝기가 매우 달라진다. 물의 경우에는 높은 음압이 요구되지 않아 초음파 발진기는 초음파 변환기의 고조파 공진모드에 해당하는 109.6 kHz의 진동수로 공명 셀을 공명시켰다. 배진동을 사용할 경우에는 기본진동에 비해 효율이 대폭 떨어지는 것으로 알려져 있다 [15]. 그렇지만, SL은 특정 압력 범위에서만 생기며 [16], 물에서는 이 압력 범위가 비교적 낮아서 초음파 발진기의 파워만 충분하다면 3배진동이 되더라도 SL을 발생시키는 데에는 큰 문제가 없다. 하지만 3배진동의 경우 주파수가 3배이므로 cavitation bubble 및 SL의 발생빈도 수가 3배 증가하게 된다. 따라서 결과적으로 1배진동에 비해 3배진동의 경우 파워만 충분하다면 SL의 발생빈도가 3배 많아져서 더 밝은 SL을 관측할 수 있다.

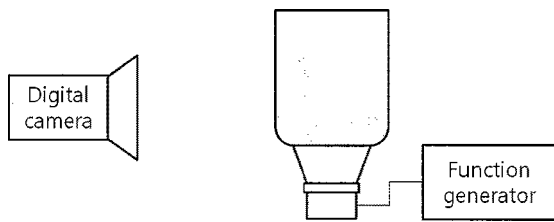


그림 1. 실험장치 구성도  
Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

증류수에서의 SL을 대조군으로 사용하였고, 금속 화합물들, LiCl, CaCl<sub>2</sub>, Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>을 사용하여 금속 이온 수용액을 만들고 실험군으로 사용하였다. 수용액의 농도는 0.5 M로 고정하였고, 온도는 22 ℃에서 26 ℃ 사이로 유지하였다. 모든 용액은 가열하여 산소를 제거하였고, 아르곤 기체를 용액에 완전히 충전하였다.

모든 SL 실험 사진은 디지털 카메라 (Canon)의 BULB F2.8 모드로 촬영하였다. 카메라와 공명 셀 사이의 거리는 전체 실험 동안 일정하게 50 cm로 유지하였다. 사진 촬영 시 암실에서 5분간의 노출을 주어 사진을 촬영하였다.

사진기의 특성에 따라서 색이 달라지는 것을 보정하기 위해서 SL 사진뿐만 아니라 금속 이온에 따른 불꽃 반응의 사진도 해당하는 금속 이온 수용액에서의 SL의 색과 비교하기 위하여 촬영하였다. SL의 스펙트럼을 분석하는 대신에 RGB 성분을 분석하여 SL의 색과 불꽃 반응 색, 선 스펙트럼 사이의 관계를 추론하였다.

### IV. 결과 및 분석

#### 4.1. 증류수에서의 SL에 대한 고찰

수용액에서 발생하는 SL을 해석하기에 앞서, 증류수에서 발생하는 SL을 먼저 고찰하였다. 증류수에서의 SL도 조건에 따라 많이 달라지는데, 용존 기체는 중요한 인자 중의 하나이다. 그림 2에 증류수를 받아온 상태와, 아르곤 가스를 충전하였을 때와 가열하여 물속에 녹아있는 기체를 제거하였을 때와 그리고 기체를 제거한 다음 아르곤 가스를 충전하였을 때 얻어지는 SL을 나타내었다. 아르곤 가스는 물의 용해도가 낮아 쉽게 캐비테이션을 발생시키기 때문에 SL 관찬을 위해 널리 사용되는 충전 가스

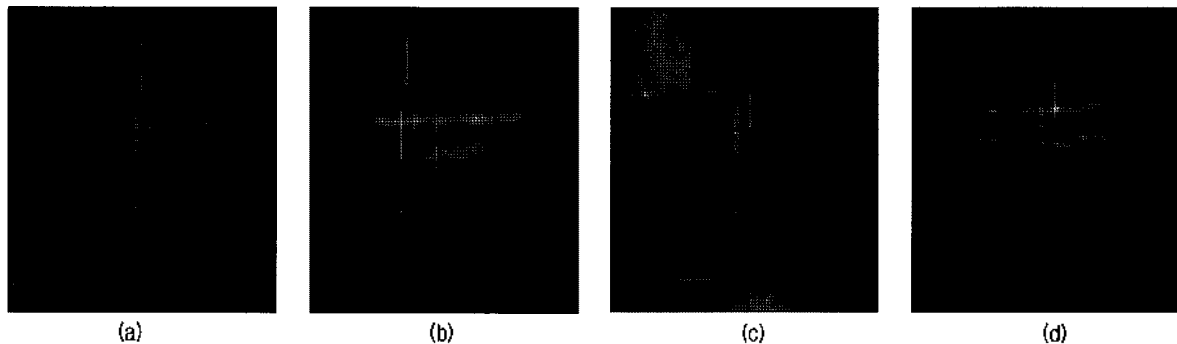


그림 2. 물에서의 SL (a) 증류수, (b) 아르곤 가스를 충전한 증류수, (c) 가스를 제거한 증류수, (d) 가스를 제거한 후에 아르곤 가스를 충전한 증류수  
Fig. 2. SL from distilled water. (a) As received, (b) argon gas charged, (c) degassed and (d) argon gas charged after degassed.

이다. 그림 2 (b)는 그림 2 (a)에 비해 좀더 밝고 푸른색이 눈에 띄는 것을 할 수 있다. 그림 2 (c)는 녹아있는 기체가 없기 때문에 캐비테이션이 잘 발생되지 않아 보다 어둡지만 분명한 공진 마디들을 관측할 수 있었다. 특히 이 경우에는 녹아있는 기체가 없어서 초음파를 잘 흡수하지 않아 공진이 잘 일어나며, 초음파의 세기가 커지면 공진이 크게 일어나 물이 튀어 오르는 것을 관측할 수 있었다. 마지막으로 그림 2 (d)는 기체를 제거한 후에 아르곤가스를 충전한 경우에 얻어지는 SL 사진이다.

**4.2. 금속 이온이 SL의 색에 미치는 영향**

금속 이온 수용액에서의 SL의 색과 불꽃 반응색의 사진을 그림 3과 그림 4에 각각 나타내었다. 이사진으로부터 금속 이온 수용액에서의 SL의 색은 그림 2 (d)의 증류수에서의 SL의 색에 대응되는 금속 이온의 불꽃 반응 색이 더해진 것으로 보인다는 것을 육안으로 알 수 있다. 금속이온에서의 SL의 색이 증류수에서의 SL색과 불꽃 반응색의 합성으로 나타내어질 수 있을 것으로 판단하였다. 이를 보다 정량적으로 검증하기 위해 금속 이온 수용액에서의 SL의 색, 증류수에서의 SL 색, 금속 이온 스펙트럼과 불꽃 반응 색을 비교하였다.

두 빛이 섞이면, 두 빛의 RGB 성분이 서로 더해진다고 가정하였다. 따라서 두 빛  $K_1$ 과  $K_2$ 이 섞여서 만들어진 빛  $P$ 는  $K_1$ 과  $K_2$ 의 선형결합으로 다음과 같이 표시된다.

$$P = K_1\alpha + K_2\beta \tag{1}$$

이 관계를 이용하여 증류수에서의 SL, 금속 이온 수용액에서의 SL, 불꽃 반응 색과 선 스펙트럼의 RGB 성분을 비교하여 금속 이온에서의 SL의 색깔 변화의 과정을 설명하였다. 각각의 이미지에서의 RGB 성분은 사진에서 5개의 점을 골라 RGB 성분을 추출하여 평균을 하여 구하였다. 그리고 선 스펙트럼에 해당하는 RGB 성분은 단색광 파장과 RGB 성분 사이의 대응 표를 이용하여 얻었다.

**4.3. 금속 이온 수용액에서의 SL의 색상 분석**

주어진 빛은 해당하는 RGB값을 성분으로 하는 하나의 벡터라 할 수 있다. 어떤 빛이 식 (1)과 같이 두 빛의 선형결합으로 표시된다면 이들 세 빛 벡터는 한 평면위에 존재해야 한다. 따라서, 두 빛이 섞여 다른 빛이 만들어진다면 가장 큰 각은 나머지 두각의 합과 같아야 한다. 그리고

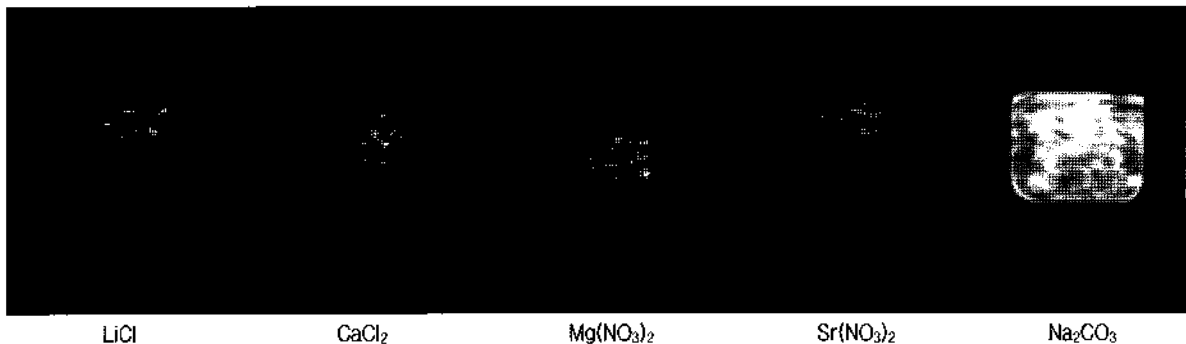


그림 3. 금속화합물 수용액에서 SL  
Fig. 3. SL from aqueous solution with metallic ions.

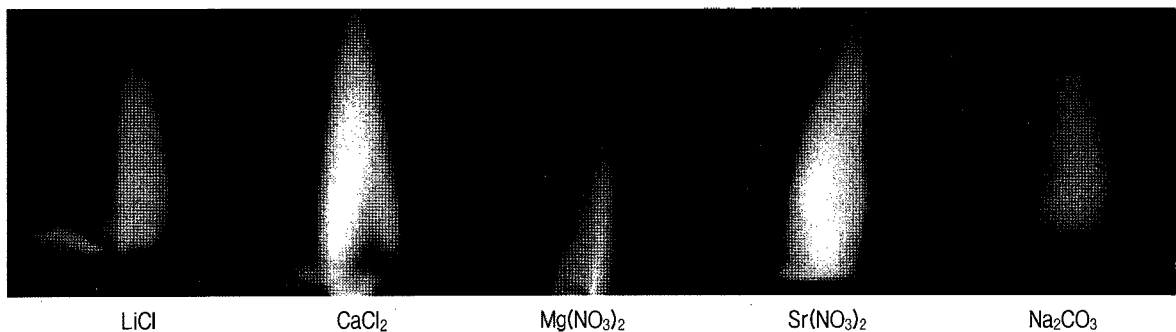


그림 4. 각 금속의 불꽃 반응 색  
Fig. 4. Flame test of metallic ions.

이렇게 각의 차이가 없을 경우 이 세 빛은 식 (1)을 만족하여 선형결합으로 표현된다.

그림 5-8은 대표적으로 리튬과 스트론튬에 대해서 각각 선스펙트럼 (L)과 불꽃반응색 (F)을 금속이온 수용액의 SL (S), 증류수의 SL (W)과 비교한 것을 나타내었다. 리튬과 선스펙트럼에 대해 각각의 각도를 정리하여 표 1과 표 2에 나타내었다. 그 결과로 리튬은 불꽃 색과 선스펙트럼 두 경우 모두가 두 각의 합이 나머지 한 각으로 일치하였지만, 스트론튬에서는 불꽃색의 경우에는 일치하지만 선스펙트럼의 경우에는 맞지 않는다는 사실을 알 수 있었다. 이것은 리튬의 SL 색이 증류수에서의 SL

색과 불꽃반응색의 선형결합으로 표현되지만 선스펙트럼에서 강한 intensity를 보이는 색과는 합성되지 않음을 나타낸다. 이것은 리튬의 경우에는 선스펙트럼 색과 불꽃 반응색이 크게 다르지 않아 둘 다 일치하는 것으로 보이고, 스트론튬의 경우에는 리튬과 달리 선스펙트럼 색과 불꽃 반응색이 달라 어느 한쪽 (불꽃 반응색)에서는 일치하나 다른 한쪽 (선스펙트럼색)에서는 일치하지 않는 것으로 볼 수 있다.

또한 다양한 종류의 금속에 대해서 분석한 결과로 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 리튬이나 나트륨과 같은 알칼리 금속 이온 수용액의 SL은 증류수의 SL과 불꽃 반응 색이나 선스펙트럼의 합성으로 표시가 가능하였다. 반면에 칼슘과 스트론튬과 같은 알칼리 토금속 이온 수용액의 SL은 증류수의 SL과 불꽃 반응 색의 합성으로 표시가 가능하였지만 선스펙트럼의 합성으로는 표시되지 않았다. 그러나 예외적으로 마그네슘의 SL의 색은 마그네슘의 선스펙트럼 색과 비슷하게 나타났는데, 이는 마그네슘의 SL의 색과 선스펙트럼 색이 둘 다 모든 색의 합성인 흰색으로 나타나기 때문일 것으로 생각된다.

이러한 현상은 SL이 발생하는 환경의 온도 때문으로

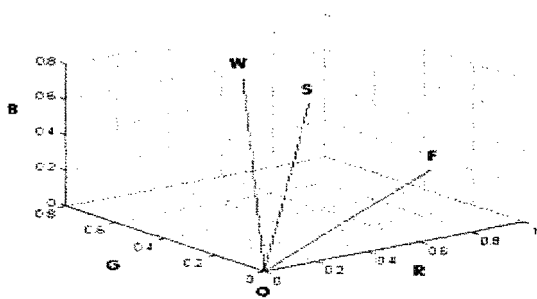


그림 5. 리튬 SL, 증류수 SL, 리튬 불꽃색 RGB 분석  
Fig. 5. RGB analysis of water SL, Lithium aqueous solution SL and Lithium flame color.

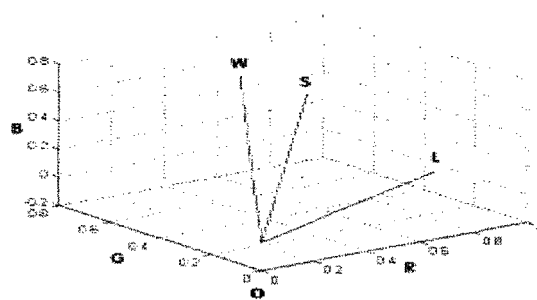


그림 6. 리튬 SL, 증류수 SL, 리튬 선스펙트럼 RGB 분석  
Fig. 6. RGB analysis of water SL, Lithium aqueous solution SL and Lithium line spectrum.

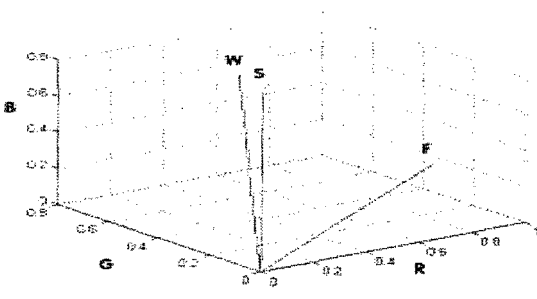


그림 7. 스트론튬 SL, 증류수 SL, 스트론튬 불꽃색 색 RGB 분석  
Fig. 7. RGB analysis of water SL, Strontium aqueous solution SL and Strontium flame color.

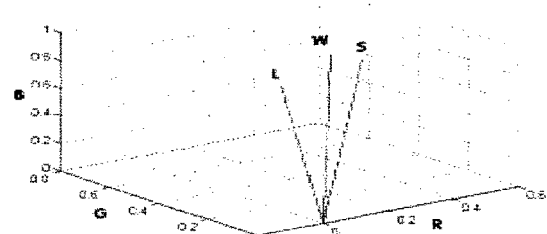


그림 8. 스트론튬 SL, 증류수 SL, 스트론튬 선스펙트럼 색 RGB 분석  
Fig. 8. RGB analysis of water SL, Strontium aqueous solution SL and Strontium line spectrum.

표 1. 리튬 RGB 벡터 사이 각  
Table 1. Angles between RGB vectors for Lithium.

	각 WOF	각 WOS	각 SOF
불꽃반응 비교	45.59°	17.93°	27.99°
선 스펙트럼 비교	54.26°	17.93°	36.36°

표 2. 스트론튬 RGB 벡터 사이 각  
Table 2. Angles between RGB vectors for Strontium.

	각 WOF	각 WOS	각 SOF
불꽃반응 비교	44.53°	36.38°	8.89°
선 스펙트럼 비교	45.66°	36.38°	54.03°

추측된다. 불꽃 반응 실험 환경의 온도는 선 스펙트럼 관측 실험 환경의 온도에 비해 상대적으로 낮기 때문에 짧은 파장의 빛은 불꽃 반응 색에서 관측되기 어렵다. 알칼리 금속의 경우는 선 스펙트럼에서 가장 밝은 색이 붉은 색 계열로 불꽃반응 색과 유사한 반면에 알칼리 토금속의 경우는 선 스펙트럼에서 가장 밝은 색이 푸른 색 계열로 불꽃 반응 실험의 붉은 색 계열과는 다르다. 이상을 종합하여 고찰하여 우리는 SL의 온도가 불꽃 반응 실험 환경과 비슷한 온도일 것이라고 추론하였고 이는 다른 연구 결과와 유사하다 [12].

## V. 결론

본 연구에서는 금속 이온 수용액에서의 SL의 색을 관찰하였다. 증류수에서의 SL의 색, 금속 이온 수용액에서의 SL의 색, 불꽃 반응 색, 선 스펙트럼의 색 사이의 관계가 연구되었다. 알칼리 금속 이온 수용액의 SL의 색상의 RGB 벡터는 증류수에서의 SL의 색상의 RGB 벡터와 불꽃 반응 색 또는 선 스펙트럼의 색의 RGB 벡터의 선형 결합으로 표현된다는 사실을 확인하였다. 그러나 알칼리 토금속 이온 수용액의 SL의 색상의 RGB 벡터는 증류수에서의 SL의 색상의 RGB 벡터와 선 스펙트럼의 색의 RGB 벡터의 선형 결합으로 표현되지 않았다. 그러므로 금속 이온 수용액에서의 SL은 금속 이온의 불꽃 반응 색과 연관된다는 것을 알 수 있다. 즉 cavitation 기포의 격렬한 붕괴는 높은 온도를 만들어내지만 선 스펙트럼을 관측할 수 있을 정도의 높은 온도를 만들어내지는 않을 것으로 추측된다. 더 정확한 정량적인 분석을 위해서는 분광기를 이용하여 발광의 파장을 측정하여야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 2008학년도 한국과학영재학교 R&E (Research and Education) 프로그램으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. H. Frenzel and H. Schultes, "Ultrasonic vibration of water", *Z. Phys. Chem. B.*, vol. 27, pp. 421-424, 1934
2. D. F. Gaitan, L. A. Crum, C. C. Church, and R. A. Roy, "Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable, cavitation bubble," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90, no. 6, pp. 3166-3183, 1992
3. S. J. Putterman, "Sonoluminescence: Sound into light," *Scientific American*, pp. 46-51, 1995
4. C. Eberlein, "Sonoluminescence as quantum vacuum radiation," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, pp. 3842, 1996
5. A. Prosperetti, "A new hypothesis on single-bubble sonoluminescence (A)," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100, no. 4, pp. 2677-2678, 1996
6. R. Hickling, "Transient, high-pressure solidification associated with cavitation in water," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 73, pp. 2853, 1994
7. J. Schwinger, "Cold fusion theory: A Brief history of mine," *Transactions of Fusion Technology*, vol. 26, no. 4T, pp. xiii-i, 1994
8. R. P. Taleyarkhan, C. D. West, J. S. Cho, R. T. Lahey Jr, R. I. Nigmatulin, R. C. Block, "Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation," *Science*, vol. 295, pp.1868-1873, 2002
9. Y. T. Didenko, W. B. McNamara III, and K. S. Suslick, "Effect of noble gases on sonoluminescence temperatures during multibubble cavitations," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 4, pp. 777-780, 2000
10. D. J. Flannigan and K. S. Suslick, "Plasma formation and temperature measurement during single-bubble cavitation," *Nature*, vol. 434, pp.52-55, 2005
11. E. B. Flint and K. S. Suslick, "The temperature of cavitation," *Science, New series*, vol. 253, Issue 5026, pp. 1397-1399, 1991
12. W. B. McNamara III, Y. T. Didenko and K. S. Suslick, "Sonoluminescence temperatures during multi-bubble cavitation," *Nature*, vol. 401, pp. 772-775, 1999
13. P. -K. Choi, S. Abe and Y. Hayashi, "Sonoluminescence of Na atom from NaCl solution doped with ethanol," *J. Phys. Chem. B*, vol. 112, pp.918-922, 2008
14. Y. T. Didenko and K. S. Suslick, "The energy efficiency of formation of photons, radicals and ions during single bubble cavitations," *Nature*, vol. 418, pp. 394-397, 2002
15. V. M. Ristic, *Principles of Acoustic Devices*, John-Wiley & Sons, 1983, New York
16. R. L. Istedt, K. Weninger, S. Putterman, and B.P. Barber, "Sonoluminescing Bubbles and Mass Diffusion" *Phys. Rev. E*, vol. 51, 4400, 1999

## 저자 약력

•한 문 수 (Moon-Su Han)



2008년 서산중학교 졸업  
 2008년-현재: 한국과학기술원부설  
 한국과학영재학교 재학중  
 ※ 관심분야: 물리학 전문아

•이 제 욱 (Jae-Wook Lee)



2008년 목일중학교 졸업  
 2008년-현재: 한국과학기술원부설  
 한국과학영재학교 재학중  
 ※ 관심분야: 수학

•백 승 찬 (Seung-Chan Baek)



2007년 경호중학교 졸업  
 2008년-현재: 한국과학기술원부설  
 한국과학영재학교 재학중  
 ※ 관심분야: 음향학, 고체물리

•백 정 환 (Jung-Hwan Baek)



2008년 해강중학교 졸업  
 2008년-현재: 한국과학기술원부설  
 한국과학영재학교 재학중  
 ※ 관심분야: 응용과학

•김 영 환 (Young H. Kim)



1979년: 서울대학교 물리교육학과 (이학사)  
 1981년: 한국과학기술원 물리학과 (이학석사)  
 1990년: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)  
 1981-1996년: 한국표준과학연구원 책임연구원  
 1996-2000년: 대한검사기술(주) 부설연구소장  
 2000-2005년: 성균관대학교 연구부교수  
 2005-현재: 한국과학기술원부설 한국과학영재학교 책  
 임교사  
 ※ 관심분야: 물리음향, 고출력 초음파