



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

교육학 석사학위논문

음향감쇠매질 내에서 초음파에 의한
온도분포의 가시화 기법에 관한 연구와
과학 교수 학습에의 적용



2013년 8월

부경대학교 교육대학원

물리교육전공

김명석

음향감쇠매질 내에서 초음파에 의한
온도분포의 가시화 기법에 관한 연구와
과학 교수 학습에의 적용

지도교수 김 무 준

이 논문을 교육학 석사 학위 청구논문으로 제출함



2013년 8월

부경대학교 교육대학원

물리교육전공

김명석

김명석의 교육학석사 학위논문을 인준함.

2013년 8월



주 심 공학박사 하 강 렬 (인)

위 원 이학박사 이 충 섭 (인)

위 원 공학박사 김 무 준 (인)

목 차

Abstract	iv
I. 서 론	1
II. 이 론	4
III. 실 험	9
III-1. 음향 감쇠 매질 제작	9
III-2. 감온 필름 제작	10
III-3. 실험 방법	11
IV. 결 과	13
IV-1. 설탕농도에 따른 온도분포의 변화	13
IV-2. 설탕농도에 따른 음장계산결과	28
V. 중등교육에서의 교수-학습에의 적용	31
V-1. 중등 과학과 교육과정 중 물리와 본 연구의 관련된 부분	31
V-2. 중등 과학과 교육과정 중 화학 I 과 본 연구의 관련된 부분	33
V-3. 중등 과학과 교육과정 중 생명과학II와 본 연구의 관련된 부분 ...	34
VI. 결 론	36
참고문헌	38

표 목 차

표 III-1. 설탕 농도를 변화시키기 위해 사용한 설탕의 양	10
표 III-2. 설탕 농도에 따른 감쇠계수, 밀도, 음속	12
표 V-1. 중등 과학과 교육과정 중 물리와 본 연구의 관련 부분	33
표 V-2. 중등 과학과 교육과정 중 화학 I 과 본 연구의 관련 부분 ...	34
표 V-3. 중등 과학과 교육과정 중 생명과학II와 본 연구의 관련된 부분 ...	35



그 립 목 차

그림 II-1. 집속초음파 트랜스듀서의 모식도	8
그림 III-1. 실험 장치의 구성	11
그림 IV-1. 설탕농도 25%인 경우 시간에 따른 변색영역 변화의 실험결과 및 시뮬레이션 결과	16
그림 IV-2. 설탕농도 25%인 경우 초음파 구동시간에 따른 변색영역의 면적 변화 비교	18
그림 IV-3. 설탕농도 30%인 경우 시간에 따른 변색영역 변화의 실험결과 및 시뮬레이션 결과	19
그림 IV-4. 설탕농도 30%인 경우 초음파 구동시간에 따른 변색영역의 면적 변화 비교	21
그림 IV-5. 설탕농도 35%인 경우 시간에 따른 변색영역 변화의 실험결과 및 시뮬레이션 결과	22
그림 IV-6. 설탕농도 35%인 경우 초음파 구동시간에 따른 변색영역의 면적 변화 비교	24
그림 IV-7. 설탕농도 40%인 경우 시간에 따른 변색영역 변화의 실험결과 및 시뮬레이션 결과	25
그림 IV-8. 설탕농도 40%인 경우 초음파 구동시간에 따른 변색영역의 면적 변화 비교	27
그림 IV-9. 설탕 농도에 따른 음장분포의 변화	28

Study on Visualization Method of Thermal Distribution in Dissipative Acoustic Medium and Application to Teaching and Learning of Science Education

Myoung-Seok Kim

*Graduate School of Education
Pukyong National University*

Abstract

The temperature change due to ultrasonic energy in dissipative acoustic medium is very important because it provides us much information. However, unlike liquid, it is difficult to measure the temperature distribution inside of the dissipative acoustic medium such as gel or living body. It is hard to measure the temperature exactly because a thermometer would damage the medium when it is fixed and moves in the medium. Therefore, we need a method to measure it non-invasively. To measure the temperature change inside of the dissipative acoustic medium non-invasively, we adopt a temperature sensitive film which has thermochromic particles. As a dissipative acoustic medium, agar layer is chosen in the study. The temperature change due to the ultrasound was

measured depending on the concentration of the sugar in the agar layer. The color change on the film due to the ultrasound was investigated when the concentration of sugar was from 25% to 40%. To compare the results with theoretical ones, a simulator was used.

As the result, there were rapid increases of discolored area on the film within 2~5 second after the ultrasound driving and the increasing rates decreased after the period. In the simulation results, the discolored areas linearly increased from start to 10 seconds. The reason of the differences between the experimental results and simulated ones is that the change of thermal conductivity and heat capacity of the medium were not considered in the simulation program.

In addition, we investigated the application possibility of this study to science education in the secondary school. We confirmed that the results of this study could be applied to several parts of science education course as a teaching material, and we can expect that this study is useful demonstration to understand some natural phenomena.

I. 서론

음향감쇠매질 내에서 집속 초음파 에너지에 의한 온도상승에 대한 연구는 매우 많은 연구자들에 의해 수행되어져 왔다[1~4]. 그것은 생체매질과 같이 음향감쇠가 있는 매질 내에 초음파 에너지가 방사될 때 형성되는 온도분포의 변화를 파악하는 것은 의료용 진단 및 치료 분야에서 매우 중요한 정보를 제공할 수 있기 때문이다[5~8]. 특히 초음파 에너지가 태아에게 미치는 영향은 의견이 분분하다. 초음파 검사는 태아로부터 반사된 음파를 분석해 태아의 모습을 영상으로 보여주는 원리이기 때문에 방사선을 이용하는 X-선 검사와는 달리 부작용이 없고 위험하지 않다고 주장되어졌다. 하지만 초음파에 장시간 노출되었을 때 인체 피부나 조직 내 세포에 열이 오랫동안 흡수되었을 때 문제를 일으킬 수도 있기에 더 자세한 연구를 필요로 한다. 그래서 액체와는 달리 생체 매질 혹은 젤이나 겔 상태의 음향 매질 내부의 온도분포를 비침습적으로 측정하는 방법에 대한 연구가 필요하다[9~10]. 온도를 측정할 수 있는 온도센서를 매질 내에 고정하기 위해서는 매질의 일부가 손상되어야 하며 또 고정된 온도센서는 음파의 진행에 매우 큰 영향을 주기 때문에 정확한 측정이 불가능하다. 현재 비침습적인 온도 측정 방법으로는 높은 해상도와 정확성을 가지고 있는 자기공명장치(MRI)를 사용하고 있으나 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 이러한 점을 고려하여 집속 초음파 에너지의 온도분포에 대한 가시화 연구가 필요하다. 초음파의 가시화에 대한 연구는 많이 수행 되어 왔다. Debye-Sears 효과, 슈리렌 법, 파면 영상법 등이 있으나 온도분포의 가시화에 대해서는 적용할 수 없다.

많은 음향 감쇠 매질 중 HIFU Gel은 주요 재질이 젤라틴으로써 보관

기간이 짧으나 초음파를 가하면 투명한 매질이 하얗게 변하게 됨으로써 초음파의 음장을 알아 볼 수 있다. HIFU Gel은 원래 가역반응이나 돌아오는 시간이 너무 오래 걸려 1회용이라 봐도 무방하다. 하지만 초음파의 진행여부는 관찰이 가능하지만 온도분포에 대한 가시화는 어렵다. 그래서 본 연구는 한천을 이용한 음향 감쇠 매질을 제작하여 이용하였다. 한천은 적은 비용으로 구입이 가능하며 제작과정도 어렵지 않다.

본 연구에서는 한천으로 제작된 음향감쇠매질에 설탕의 농도를 변화시켜 음속, 밀도 및 음향감쇠계수 등 음향 특성이 다른 몇 가지 감쇠매질을 제작하고 이 매질에 곡면의 초음파 트랜스듀서를 이용한 집속초음파 음장을 형성시켜 매질내의 온도분포를 초음파의 조사시간에 따라 조사하였다. 이 때 온도분포의 변화를 조사하기 위하여, 온도의 변화에 따라 변색되는 감온 필름을 제작하여 트랜스듀서의 음축면에 삽입한 후 집속 초음파에 의해 형성되는 감쇠 매질 내의 온도 분포 변화를 가시화하고 시뮬레이션 결과와 비교하여 그 유효성을 검토하였다.

근대에서 현대로 넘어오면서 환원주의에 의해 다양한 학제로 나뉘어졌던 과학은 서서히 다시 융합되기 시작하였다. 20세기 말에서 21세기에는 본격적으로 학문 간의 통합의 개념이 시작되었다. 서로 별개라고 여겨졌던 다양한 학문들 간에 물리적, 개념적으로 공통 법칙들이 존재한다는 사실이 발견되었고 이는 학문 간의 연계를 가져왔다. 또한 과학혁명 이후로 시작된 과학과 기술 간의 융합이 현대에 들어서 유기화학과 같은 과학과 기술이 융합된 새로운 학문의 탄생을 이끌었다. 이로써 과학의 발달은 새로운 국면으로 접어들었다. 이와 같은 학문의 발달은 학문 간의 융합이 없이는 불가능 하였고 그 이전까지 진행되었던 세분화의 경향을 넘어서며 학문 간의 융합이 이루어지기 시작하였다[11]. 이런 추세에 2009 개정 교육과정의 과학 교육은 창의성과 인성을 두루 갖춘 인재양성을 목표로 하여 학생들에게 인위적인 학제 간 구분의 벽을 뛰어넘는 융

합 과학을 통해 창의적 교육을 추구하고자 한다. (교육과학기술부 고시 제 2011-361호)

한천과 설탕을 이용해 만든 음향 감쇠 매질 층 사이에 감온필름을 적층하여 초음파를 방사하였을 때 온도 분포를 가시화 할 수 있는 본 연구 결과를 통해 눈에 보이지 않는 추상적인 초음파의 개념을 가시화를 통하여 구체적으로 이해해서 2009개정 7차 교육과정의 과학과 교육과정에서 물리의 파동과 에너지의 전달 개념, 화학의 화학 결합 개념, 생명과학의 생명공학으로의 발전 개념을 익히고 각 학제 간 개념을 융합하여 학습할 수 있도록 한다. 그리고 과학에 재미와 흥미를 느끼고 학습의 효과를 높일 수 있도록 교수-학습에 적용을 할 수 있도록 한다.



II. 이 론

음향 매질 내에 초음파가 진행할 때 초음파 감쇠 및 초음파 에너지 흡수가 일어난다. 흡수에 의해 잃어버린 초음파 에너지는 열에너지로 변화하여 매질을 가열하게 된다. 가열 응고 요법이나 초음파 온열용법과 같은 치료기술은 이러한 초음파에 의한 가열작용에 의한 것이다[12~16]. 초음파의 열적작용은 치료기술 외에도 음향매질 상수의 측정에 응용되고 있다. 흡수된 초음파는 열로 변화하고 그 발열량은 초음파 흡수계수에 의존한다. 그 때문에 초음파 흡수에 기인하는 온도변화는 매질특유의 성질이다[17~20]. 더욱이 매질의 특성과 상수의 추정온도변화의 해석에 의해 가능하게 된다. 따라서 매질내의 초음파 흡수에 기인하는 온도상승의 해석은 흡수매질내의 초음파의 효과에 대한 해명과 매질의 물질상수의 추정에 있어서 매우 중요한 해석대상이 될 수 있다. 흡수매질 내에서 진행하는 초음파의 거동을 해석하기 위해서는 다음과 같은 음향 기초방정식을 사용할 수 있다[12~15].

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -K \nabla \cdot v, \quad (1)$$

$$-\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \nabla p + \eta v, \quad (2)$$

여기서 p 는 음압, $v(v_x, v_y, v_z)$ 는 입자속도, K 는 체적 탄성율, ρ 는 밀도이며, η 는 입자속도에 비례하는 감쇠파라미터[18~19]로 다음과 같이 주어진다.

$$\eta = \frac{2k\alpha\rho c}{\sqrt{k^2 - \alpha^2}} , \quad (3)$$

여기서 k 는 파수, α 는 흡수계수, c 는 음속 이다.

또한 음파의 비선형성을 표현하기 위해 다음 식으로 주어지는 Westervelt방정식을 사용하여야 한다[12~15].

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\delta}{c^4} \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} + \frac{\beta}{\rho c^4} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 , \quad (4)$$

단, δ 는 음향확산 계수로 다음과 같이 알려져 있다.

$$\delta = \frac{2c^3\alpha}{\omega^2} , \quad (5)$$

여기서 ω 는 각주파수이며 $\beta = 1 + B/2A$ 는 매질의 비선형 파라미터인 B/A 항을 갖는 비선형 계수이다[23]. 식 (4)에 있어서 제 1항과 제 2항은 선형 무손실 전파를 나타내며 제 3항과 제 4항은 각각 손실항과 비선형 항을 나타내고 있다.

열전도 방정식과 초음파에 의한 내부 발열 H 는 다음과 같이 알려져 있다[4].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T + \frac{H}{\rho C} , \quad (6)$$

$$H = 2\alpha I , \quad (7)$$

여기서 T 는 온도, C 는 비열, κ 는 열 확산율로 다음과 같다.

$$\kappa = \frac{\gamma}{\rho C} \quad , \quad (8)$$

단, γ 는 열전도율이다. 식 (7)에서 I 는 초음파 강도로 다음과 같이 정의된다[20].

$$I_x = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} p(t) v_x(t) dt = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} \frac{p^2(t)}{\rho c} dt \quad , \quad (9)$$

여기서 I_x 는 초음파의 전파방향인 x 방향에 대한 음향강도, T_p 는 측정 시간으로 초음파의 1주기의 정수배를 사용한다. 임의의 시간으로 평균을 취한 초음파 강도는 식 (7)에 대입하여 내부발열을 계산할 수 있다.

본 연구에서 측정결과를 비교하기 위해 사용하는 시뮬레이션 프로그램은 미국 FDA(Food and Drug Administration)에서 개발된 것으로 FDTD(Finite difference time domain) 법을 사용한 것으로 다음과 같은 알고리즘을 사용하고 있다[20~21].

식 (6)을 2차원 편미분 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \gamma \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + H \quad . \quad (10)$$

FDTD법을 사용하여 극한시간 간격에 대한 과거, 현재, 미래를 각각 $t - \Delta t$, t , $t + \Delta t$ 라 표현하면 식 (10)은 다음과 같이 표현가능하다.

$$\begin{aligned}
& \rho C \left\{ \frac{T(x, y, t + \Delta t) - T(x, y, t)}{\Delta t} \right\} \\
& = \gamma \left[\frac{\left\{ \frac{T(x + \Delta x, y, t) - T(x, y, t)}{\Delta x} - \frac{T(x, y, t) - T(x - \Delta x, y, t)}{\Delta x} \right\}}{\Delta x} \right. \\
& \quad \left. + \frac{\left\{ \frac{T(x, y + \Delta y, t) - T(x, y, t)}{\Delta y} - \frac{T(x, y, t) - T(x, y - \Delta y, t)}{\Delta y} \right\}}{\Delta y} \right] + H
\end{aligned} \tag{11}$$

이것을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
T(x, y, t + \Delta t) = & \frac{\gamma \Delta t}{\rho C \Delta x^2} \{ T(x + \Delta x, y, t) + T(x - \Delta x, y, t) - 2T(x, y, t) \} \\
& + \frac{\gamma \Delta t}{\rho C \Delta y^2} \{ T(x, y + \Delta y, t) + T(x, y - \Delta y, t) - 2T(x, y, t) \} \\
& + T(x, y, t) + \frac{H}{\rho C} \Delta t.
\end{aligned} \tag{12}$$

여기서 내부발열 H 를 구하기 위해서는 식 (7)에 나타낸 바와 같이 트랜스듀서로부터 방사되는 음향강도 I 를 알아야 하며 그러기 위해서는 집속된 초음파의 음압을 계산하여야만 한다. 즉 상술한 식 (4)의 비선형 방정식의 해를 수치 해석적으로 구하여야 하며 이에 대한 알고리즘은 생략한다.

음향손실매질에 있어서의 해석적인 음장계산방법으로는 S. Saito 등에 의해 제안된 다음의 음장 표현식을 사용하여 구할 수 있다[23]. 그림 II-1과 같이 반지름 r_1 이고 곡률반경 D 인 concave형 집속초음파 트랜스듀서로부터 방사된 음압 $p_1(r, z)$ 은 아래와 같다.

$$p_1(r, z) = -j \frac{k_w p_0}{z} \exp(-\alpha_w z - j\psi) \exp\left(j \frac{k_w r r'}{z}\right) \int_0^{r_1} \exp\left[j \frac{k_w}{2} \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{D}\right) r'^2\right] J_0\left(\frac{k_w r r'}{z}\right) r' dr' . \quad (13)$$

이 때, p_0 은 표면음압, α_w 는 감쇠계수, k_w 는 파수, ψ 는 초기 위상차, J_0 는 1종 0차 베셀함수이다.

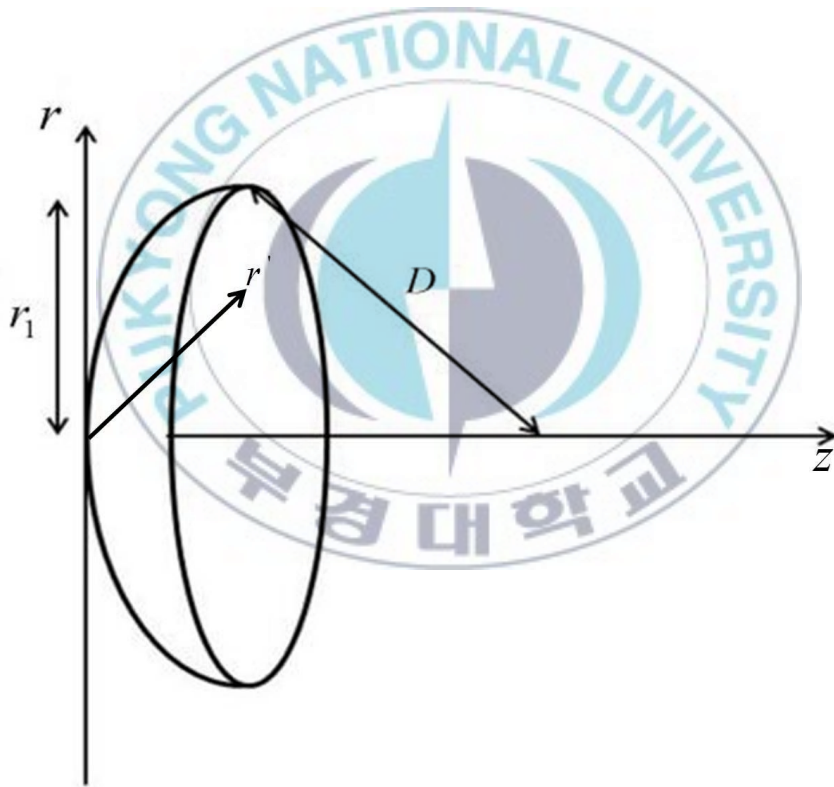


그림 II-1. 집속초음파 트랜스듀서의 모식도

Ⅲ. 실험

Ⅲ-1. 음향 감쇠 매질 제작

한천으로 제작할 음향 감쇠 매질은 한천이 굳을 수 있는 농도가 정해져 있기 때문에 일정량 이상 한천을 사용해야 한다. 또한 한천은 굳은 뒤에는 매우 불투명하다는 단점이 있어서 초음파에 의한 내부온도의 변화를 확인하기란 매우 어렵다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 설탕의 농도에 변화를 주어 한천과 함께 섞어서 굳혀 제작하였다. 설탕을 섞게 되면 편광회전현상이 일어나게 되는데 설탕 내에 Sucrose가 D-Glucose와 F-Fluctose로 변화하는 과정에서 투명도가 높아지는 효과가 있다[25]. 이 원리를 이용함으로써 한천 자체의 불투명한 성질과 음향 감쇠 매질 제작에 있어서 한정된 음향 파라미터들을 가진다는 한계점을 함께 해결하였다.

실험을 위해 설탕의 농도는 25%부터 5%씩 증가하여 40%까지 설정하였다. 각 음향 감쇠 매질의 농도별 설탕의 사용량은 표 Ⅲ-1에 나타내었다. 음향 감쇠 매질의 제작방법은 먼저 1000 cc 물을 완전히 끓여 분말 한천 8 g을 넣고 충분히 잘 섞는다, 그 뒤 일정량의 설탕을 넣어서 잘 섞은 후 틀에 부어 약 6시간 굳혀준다. 급속 냉각을 시키면 안쪽에는 안 굳을 수 있으니 충분히 시간을 주어 상온에서 식혀서 굳힌다.

집속초음파에 의한 온도변화를 비침습적으로 측정하기 위해 같은 성질의 음향 감쇠 매질 두 개 사이에 감온 필름을 삽입하여 적층한다.

표 III-1. 설탕 농도를 변화시키기 위해 사용한 설탕의 양

설탕의 농도 한천 4 g 물 1000 cc	25%	30%	35%	40%
설탕의 양 g	333.3	428.6	538.5	666.7

III-2. 감온 필름 제작

시온 안료는 일정한 온도가 되면 색이 변하는 안료를 써서 만든 특수 도료로서 기본적으로 Microcapsule 물질로 이루어져 있다. 그 크기는 약 1~10 μm 이며 이 캡슐이 파괴되면 그 성질을 잃게 되어 사용 시 고압, 고진공, 전자레인지 등의 고주파 가열 등에는 사용하지 말아야 한다. 시온안료는 Electron donor와 Electron acceptor의 결합으로 구성되어 있다. 열이 가해지면 이 결합이 끊어져 색이 변하는데 이 때 결합이 끊어지는 온도를 임계온도라고 한다. 열이 식을 때, donor와 acceptor가 다시 결합하는가 안하는가에 따라 가역성, 비가역성 시온안료로 나눌 수 있다. 시온안료는 실생활에서 상용화가 많이 되어있지 않으나 만져보지 않아도 온도를 가시화하여 측정할 수 있는 특징이 있기에 앞으로 많은 이용이 기대된다.

시온 안료를 이용한 감온 필름의 제작 과정은 다음과 같다. A4용지에 롤러로 시온 안료 잉크의 밀도가 일정하게 되도록 얇게 펴 바른다. 최대한 적은 횟수로 신속히 도포하여야 용지에 잉크의 기포가 적고, 밀도가 일정할 수 있다. 건조 시간은 약 3 시간 가량 소요된다. 같은 방법으로 양면을 모두 도포한다. 처음에 감온 필름을 한천으로 제작한 음향 감쇠

매질에 부착 시 위층 음향 감쇠 매질을 만들기 위해 준비한 한천 용액을 소량 덜어내어 얇게 발라 감온 필름을 붙인다. 이 때 미술용 붓을 이용하면 얇게 잘 바를 수 있다. 설탕에 의해 높아진 점성으로 감온 필름이 아래층 음향 감쇠 매질의 위 표면에 잘 붙는 것을 볼 수 있다. 매질과도 같은 성질이기 때문에 음파 전달에도 아무런 영향을 미치지 않는다. 감온 필름이 부착 후 위층 음향 감쇠 매질을 만들어 굳힌다. 위층과 아래층의 경계와 감온필름 사이에 기포가 생기지 않도록 주의해야 한다. 기포는 음파를 반사, 굴절, 산란 시킬 수 있기에 제거해야 한다.

Ⅲ-3. 실험 방법

본 연구에서 사용하는 장치들의 전체적인 구성은 그림 Ⅲ-1과 같다.

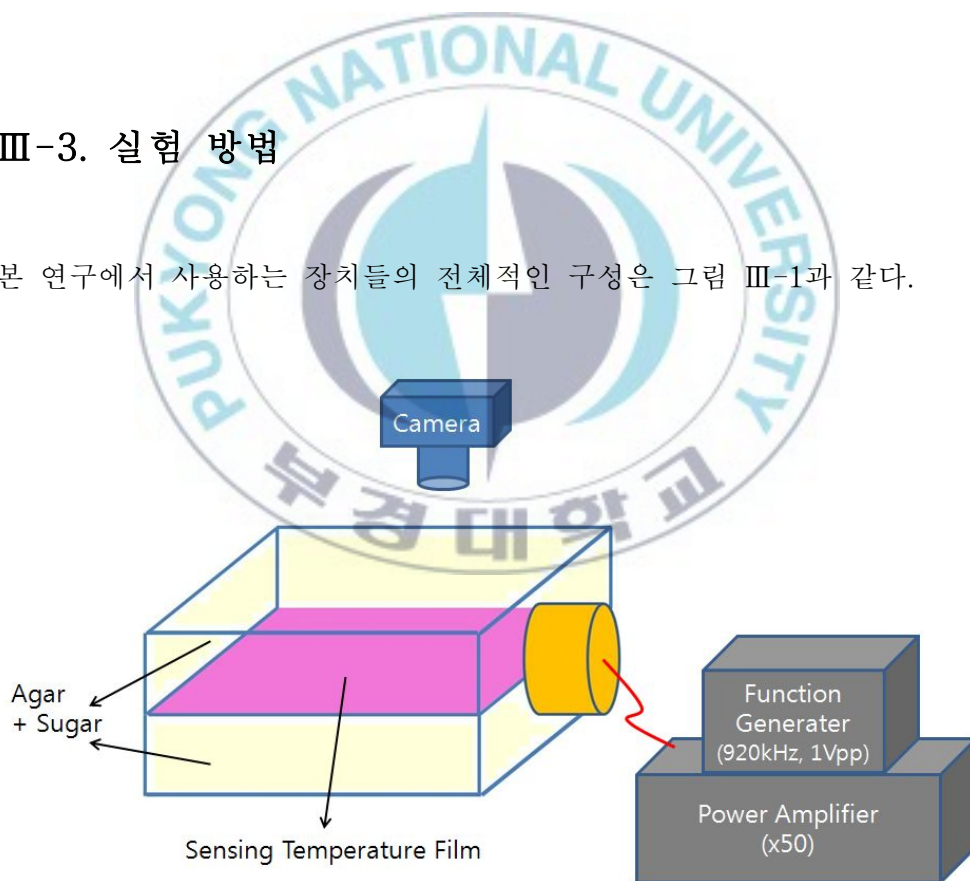


그림 Ⅲ-1. 실험 장치의 구성

함수발생기를 이용하여 1 V_{pp}, 920 kHz,의 연속파를 만들어 증폭기에 입력한다. 증폭기에 입력된 신호는 50배 증폭되어 집속형 트랜스듀서를 구동하게 되며, 이 때 형성된 집속 음장에 의해 매질 내의 온도 변화가 발생한다. 이 온도 변화는 카메라에 의해 관찰되고 결과는 컴퓨터에 저장하여 분석되었다. 온도변화를 관찰하기 위한 촬영은 신호 발생 후 180 초 동안 0.36 초 간격으로 촬영하였고 그 후 1320 초 동안(신호 발생 후 1500 초 후)까지 1 초 간격으로 촬영하였고 그 후 3000 초까지 10 분 간격으로 촬영했다.

이 실험 장치에서 가장 중요한 부분은 감온 필름을 트랜스듀서의 정중앙에 음측면에 일치시킬 수 있는가이다. 감온 필름의 위치가 중앙에서 벗어난다면 정확한 데이터를 얻을 수 없으니 유의하도록 한다. 데이터와 시뮬레이션을 비교하기 위해 시뮬레이션에 대입할 각 농도별 감쇠계수, 밀도, 음속을 표 III-2에 나타내었다.

표 III-2. 설탕 농도에 따른 감쇠계수, 밀도, 음속

음향특성 설탕농도	감쇠계수 [dB/m/MHz]	밀도 [kg/m ³]	음속 [m/s]
25%	143.87	1142.03	1563.39
30%	150.22	1163.81	1589.9
35%	156.57	1185.59	1616.56
40%	162.92	1207.37	1643.14

IV. 결 과

IV-1. 설탕농도에 따른 온도분포의 변화

설탕농도를 25%로 한 경우 집속초음파에 의해 초점부근에서 상승되는 온도변화를 그림 IV-1에 나타내었다. Concave형 집속 초음파 트랜스듀서의 음측면에 위치한 감온필름의 온도에 따른 색변화를 관찰하여 시물레이션 결과와 비교할 수 있도록 하였으며 본 연구에서는 시물레이션 프로그램을 수정하여 감온 필름의 임계온도인 31 °C 미만의 온도분포는 표시하지 않도록 하여 실험 결과와의 비교를 용이하게 하였다. 그림 IV-1(a)에 나타낸 바와 같이 트랜스듀서의 구동 후 0.72 초 후 초점부근의 색상변화는 매우 작은 영역이지만 육안으로 구별할 수 있을 정도의 변화를 나타내었으며 그 모양은 음측 방향으로의 장축이 4.6 mm, 단축이 약 0.4 mm인 타원형을 나타내었으며 우측에 나타낸 시물레이션 결과와 유사한 결과를 나타내고 있다. 구동 후 1.44 초 후의 색상변화에 대한 결과를 그림 IV-1(b)에 나타내었다. 앞서 나타낸 그림 IV-1(a)의 결과로부터 0.72 초의 비교적 짧은 시간의 구동시간의 경과에도 불구하고 초점부근의 변색영역은 큰 증가를 보이고 있다. 변색 영역의 면적은 약 5.7 mm^2 으로 $7.04 \text{ mm}^2/\text{s}$ 의 면적 증가율을 보이고 있다. 집속초음파가 3.24 초 동안 방사되어 초점부근에 상승시킨 온도에 의해 변색된 영역은 그림 IV-1(c)에 보인 것과 같이 장축이 약 15.0 mm, 단축이 2.8 mm인 타원형의 모양을 나타내고 있으며 1.44 초와 3.24 초 사이의 변색면적 증가율은 약 $4.2 \text{ mm}^2/\text{s}$ 로 앞서 나타낸 0.72 초와 1.44 초 사이의 면적증가율보다 줄어

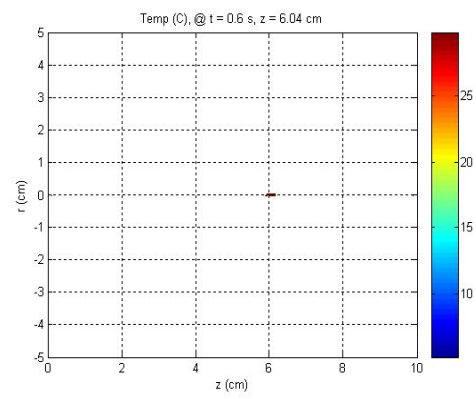
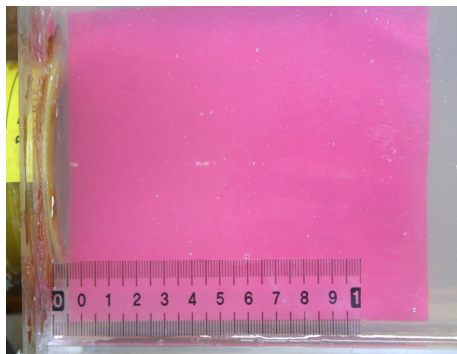
든 결과를 보이고 있다. 그림 IV-1의 시뮬레이션 결과를 보면 가장 큰 타원을 그리는 31 ℃의 영역 내부에 그보다 고온인 등온선을 몇 가지 다른 종류의 색으로 표시하여 나타내고 있으나 실험결과의 경우 감온 필름의 임계온도인 31 ℃이상의 온도 분포는 표시할 수 없다. 상술한 방법에 따라 초음파의 구동시간에 따른 감온 필름의 변색영역의 면적 변화를 구하여 초음파 트랜스듀서의 구동 후 10 초까지의 변화를 시뮬레이션 결과와 함께 그림 IV-2에 나타내었다. 이 결과를 보면 시간에 따른 변색온도의 영역변화경향은 시뮬레이션 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 확인 할 수 있으며, 그림 IV-1의 결과에서 예측하였듯이 구동 후 약 2.5 초까지는 매우 급한 면적 증가를 보이다가 그 이후 시간에 따라 면적의 증가는 완만한 증가를 보이고 있다.

설탕농도를 30%로 제작한 음향손실매질에 대한 측정결과를 시뮬레이션 결과와 함께 그림 IV-3에 나타내었다. 이 결과를 보면 집속초음파로 인한 온도상승의 결과로 나타나는 감온필름의 변색 영역은 초음파의 방사시간에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으나 상술한 그림 IV-1의 경우와는 달리 측정결과에서 나타나는 변색영역은 정형화된 타원의 형태를 나타내지 않았다. 이는 시뮬레이션 수행 시 설탕농도 변화에 따른 손실매질의 열용량 및 열전도율의 변화를 고려하지 않았기 때문으로 생각된다. 설탕농도가 30%인 한천을 손실매질로 하여 집속초음파의 구동시간에 따른 초점부근의 감온 필름의 변색영역변화를 그림 IV-4에 나타내었다. 이 결과도 설탕농도 25%의 결과인 그림 IV-2에서와 같이 구동시간에 따라 변색영역의 면적이 증가하는 경향을 보이고 있으며 약 2.5 초이후부터는 그 증가율이 둔화됨을 보이고 있다. 시뮬레이션을 통해 구한 타원의 면적 변화 역시 유사한 증가 경향을 보이고 있음을 확인 할 수 있다.

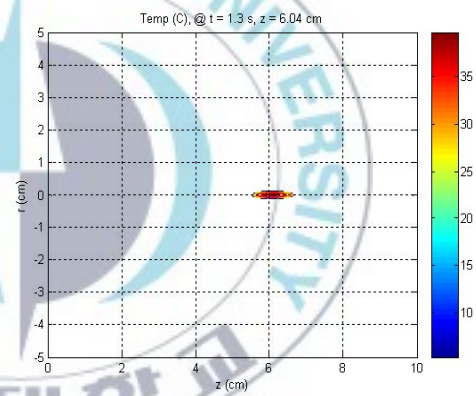
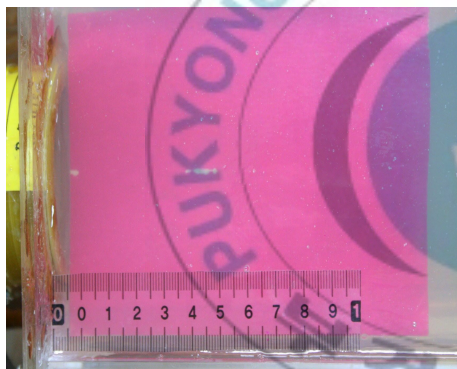
같은 방법으로 설탕농도가 35% 및 40%인 한천을 이용하여 제작한 음

향손실매질에 집속초음파를 가하여 나타나는 온도변화영역에 대한 실험 결과 및 시뮬레이션 결과를 그림 IV-5 ~ 그림 IV-8에 나타내었다. 초음파의 구동시간에 따라 감온 필름 상의 변색 영역은 상술한 두 경우와 유사하게 증가하는 경향을 나타내고 있으며 실험 결과에 있어서는 설탕농도가 증가함에 따라 같은 시간에 도달하는 변색면적의 넓이가 증가하는 경향을 나타내었다. 이에 대해 시뮬레이션 결과의 경우 초음파의 방사시간에 따라 변색면적의 넓이 변화는 대체적으로 선형적인 변화를 보이고 있었으며 이러한 경향은 설탕농도의 변화에 따라 큰 변화를 보이지 않았다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 시뮬레이션 수행 시 고려하지 않은 설탕농도에 따른 열용량 및 열전도도의 변화가 초음파에 의한 온도 증가 영역의 변화 경향에 적지 않은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 또한 설탕농도에 따라 동일한 시간에 도달하는 변색면적의 증가로 볼 때 설탕농도에 따라 제작한 손실매질의 열전도도(Heat conductivity)는 증가하는 것으로 예측된다.

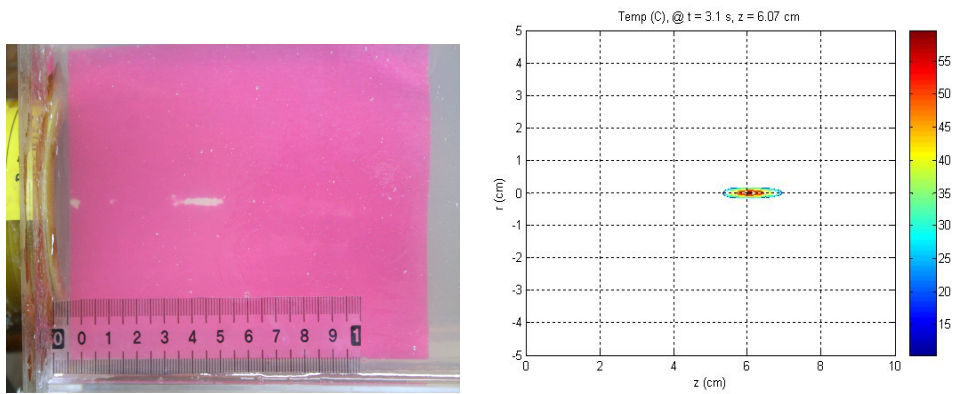
이상의 결과들은 음향 손실매질 내에서 집속초음파에 의해 특정온도(임계온도) 까지 상승하는 영역을 초음파의 방사시간에 따라 결정할 수 있도록 하는 정보를 제공할 수 있다.



(a) 0.72 s



(b) 1.44 s



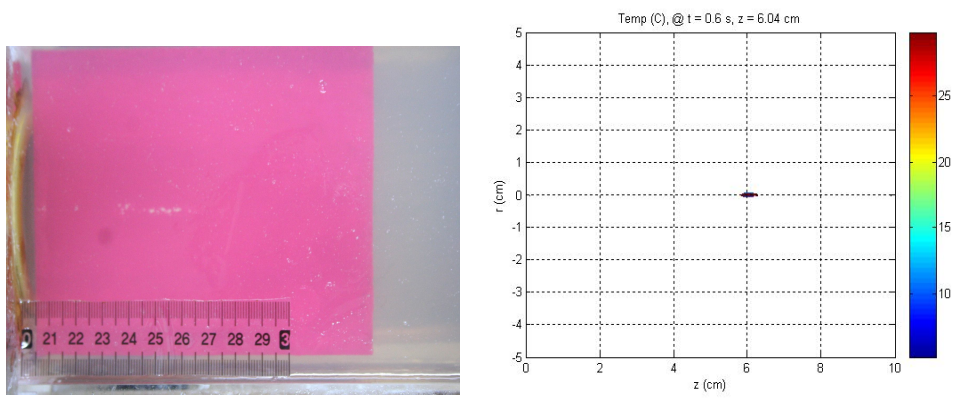
(c) 3.24 s

그림 IV-1. 설탕농도 25% 인 경우 시간에 따른 변색영역 변화의 실험결과(좌측) 및 시뮬레이션 결과(우측)

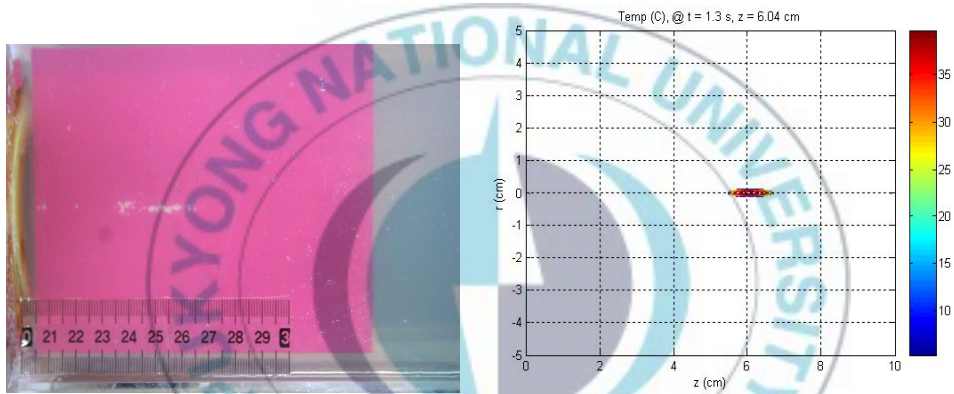


그림 IV-2. 설탕농도 25% 인 경우 초음파 구동시간에 따른 변색영역의
면적 변화 비교

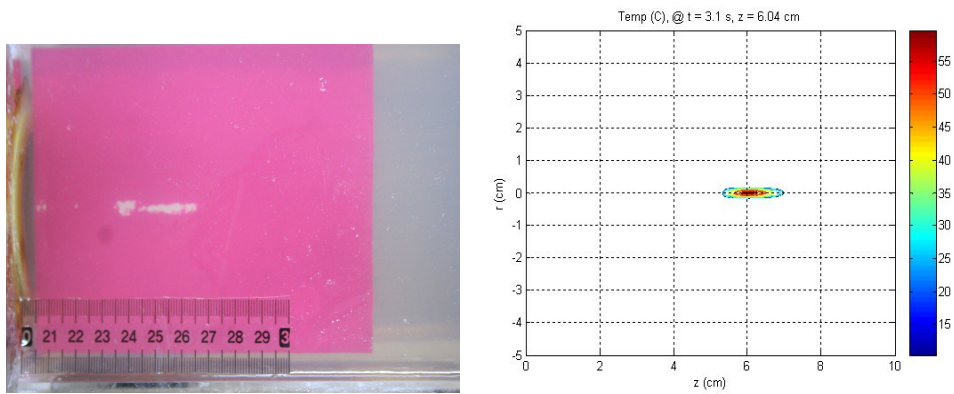




(a) 0.72 s



(b) 1.44 s

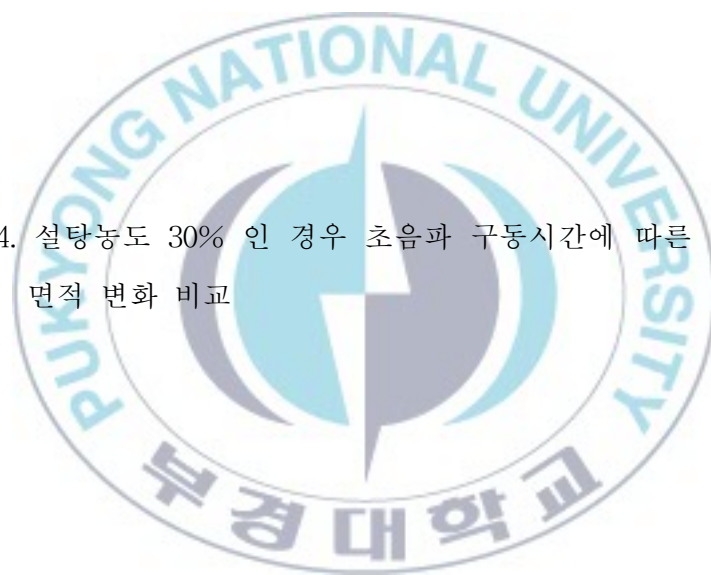


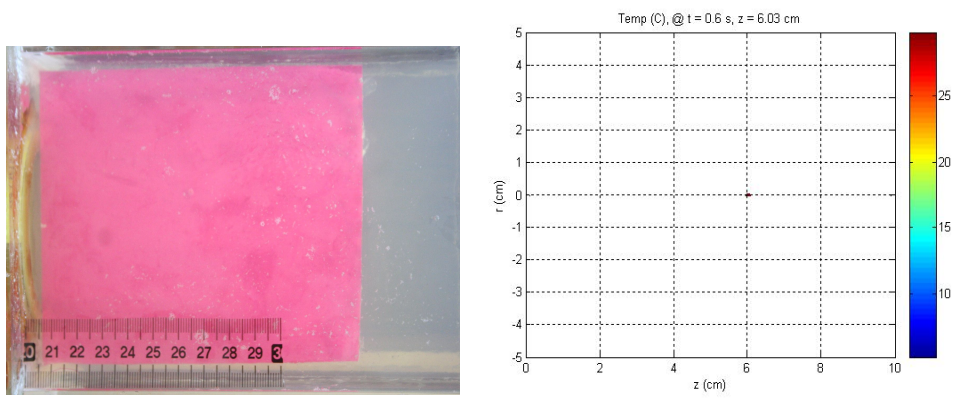
(c) 3.24 s

그림 IV-3. 설탕농도 30% 인 경우 시간에 따른 변색영역 변화의 실험결과(좌측) 및 시뮬레이션 결과(우측)

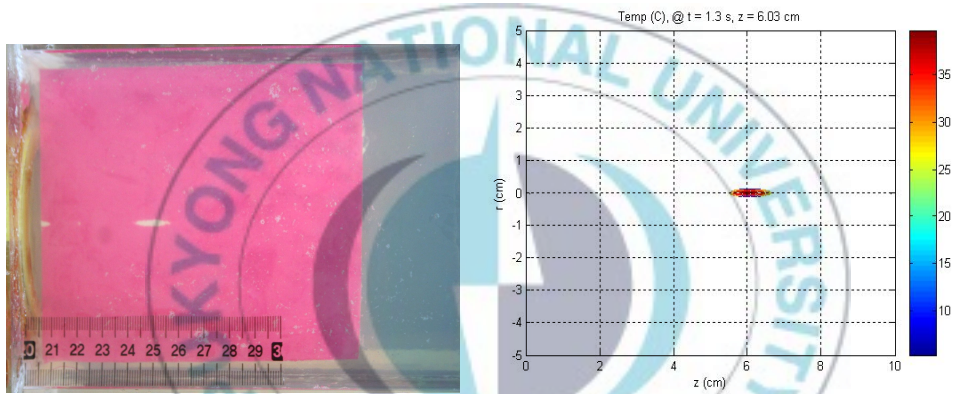


그림 IV-4. 설탕농도 30% 인 경우 초음파 구동시간에 따른 변색영역의
면적 변화 비교

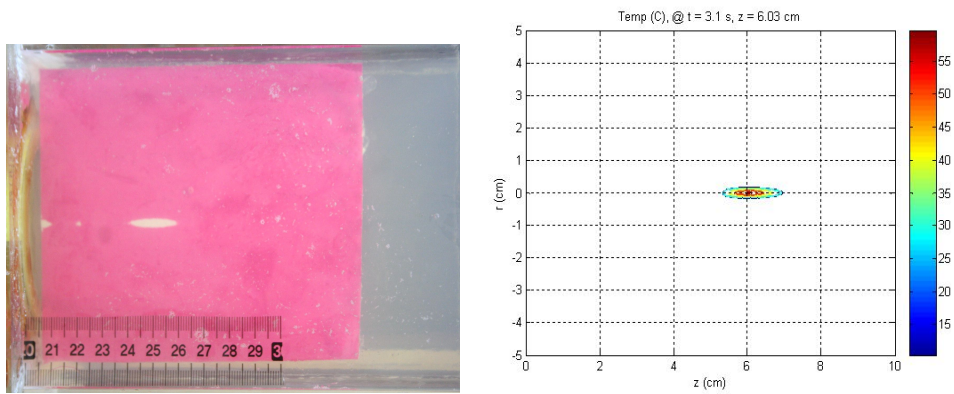




(a) 0.72 s



(b) 1.44 s



(c) 3.24 s

그림 IV-5. 설탕농도 35% 인 경우 시간에 따른 변색영역 변화의 실험결과(좌측) 및 시뮬레이션 결과(우측)

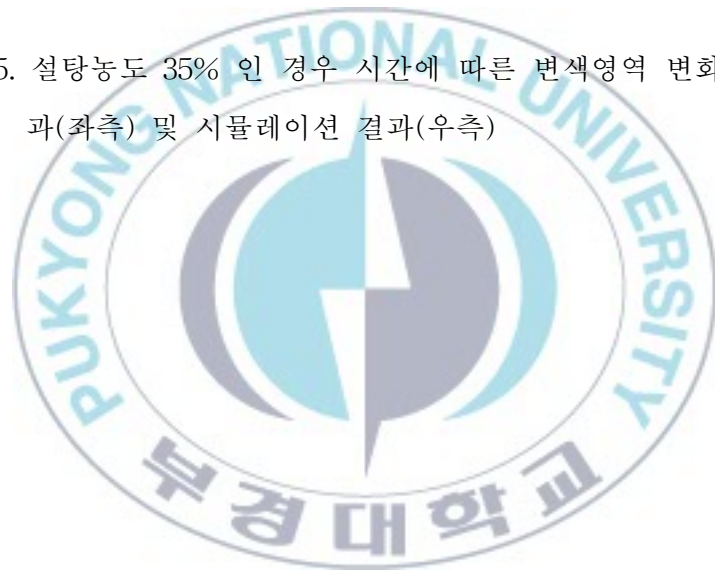
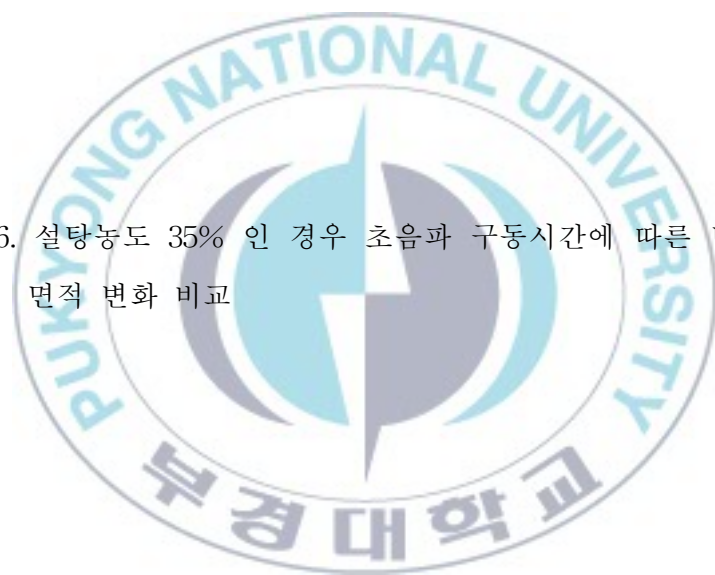
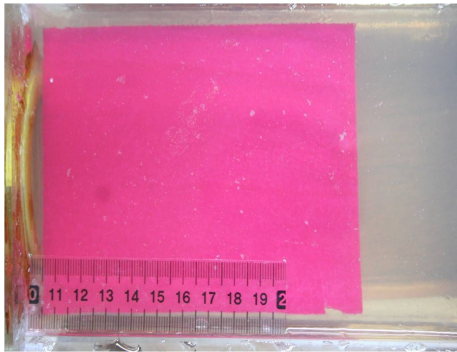
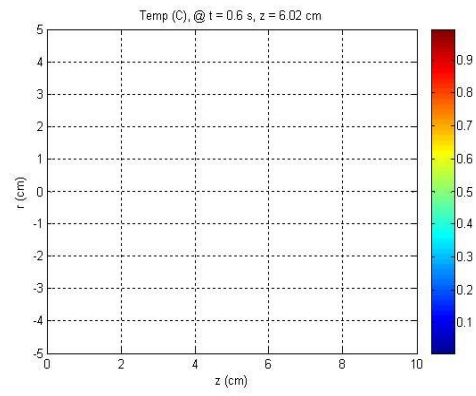


그림 IV-6. 설탕농도 35% 인 경우 초음파 구동시간에 따른 변색영역의
면적 변화 비교

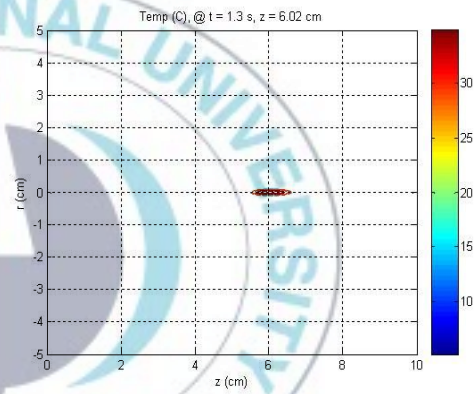


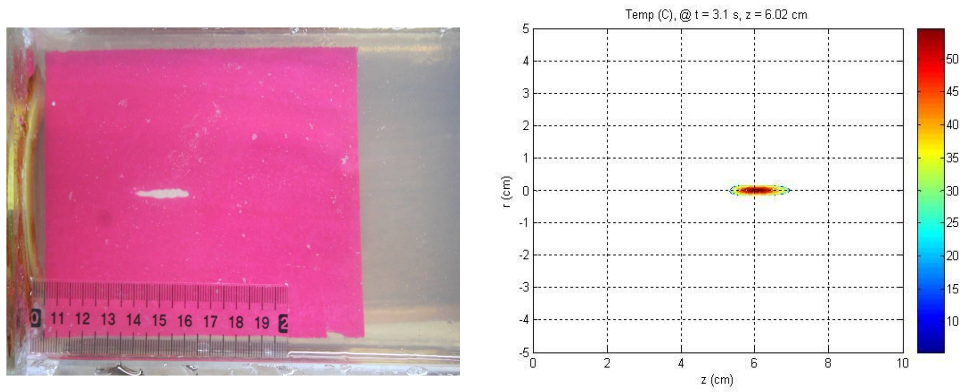


(a) 0.72 s



(b) 1.44 s





(c) 3.24 s

그림 IV-7. 설탕농도 40% 인 경우 시간에 따른 변색영역 변화의 실험결과(좌측) 및 시뮬레이션 결과(우측)

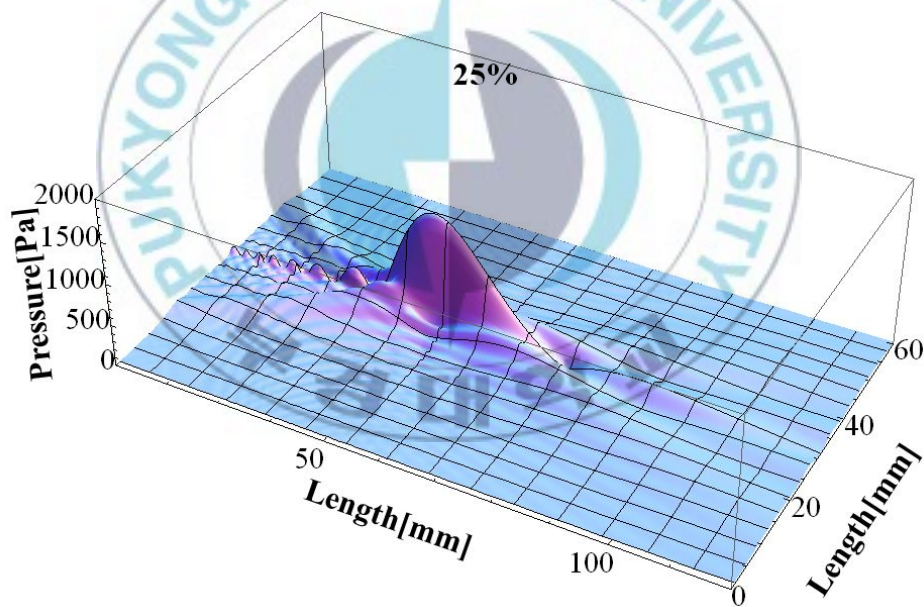


그림 IV-8. 설탕농도 40% 인 경우 초음파 구동시간에 따른 변색영역의
면적 변화 비교

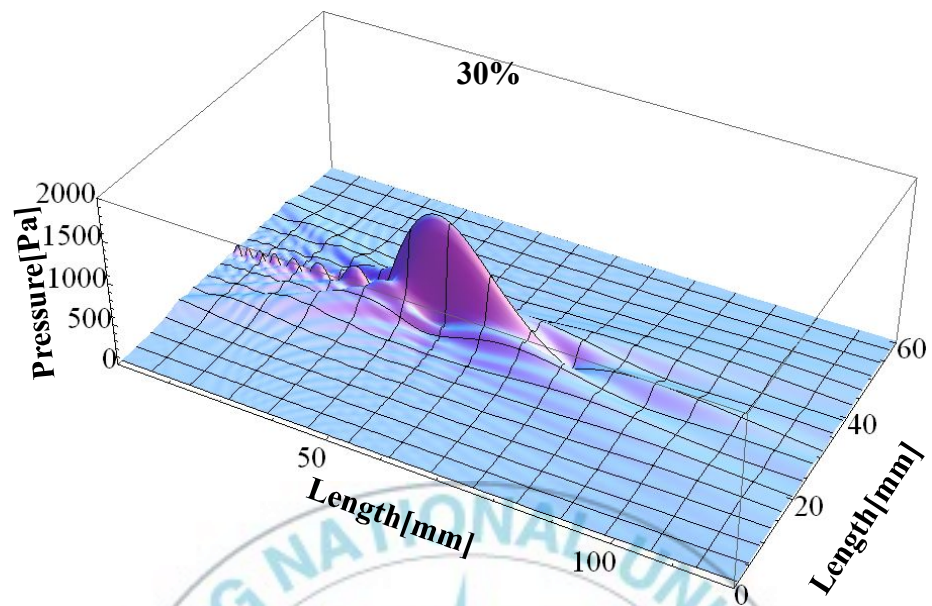


IV-2. 설탕농도에 따른 음장계산결과

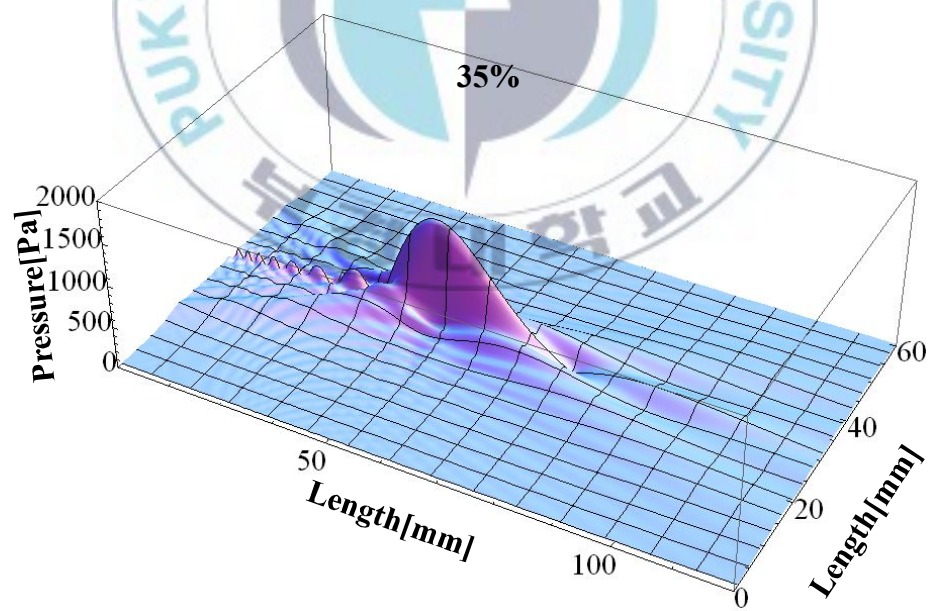
설탕농도에 의해 물성이 변하는 음향손실매질내의 음장계산을 식 (13)을 이용하여 계산하고 그 결과를 그림 IV-9에 나타내었다. 이 결과를 보면 주어진 설탕농도변화 범위 내에서는 음장변화는 큰 변화를 보이지 않았으며 상술한 온도변화에서와는 반대로 설탕농도가 증가함에 따라 초점 부근의 음압은 낮아짐을 알 수 있다. 이 결과로부터 손실매질 내에서의 온도상승 효과는 음압수준 이외에 감쇠계수 등 다른 많은 물질 요소들을 고려해야 함을 확인 할 수 있었다.



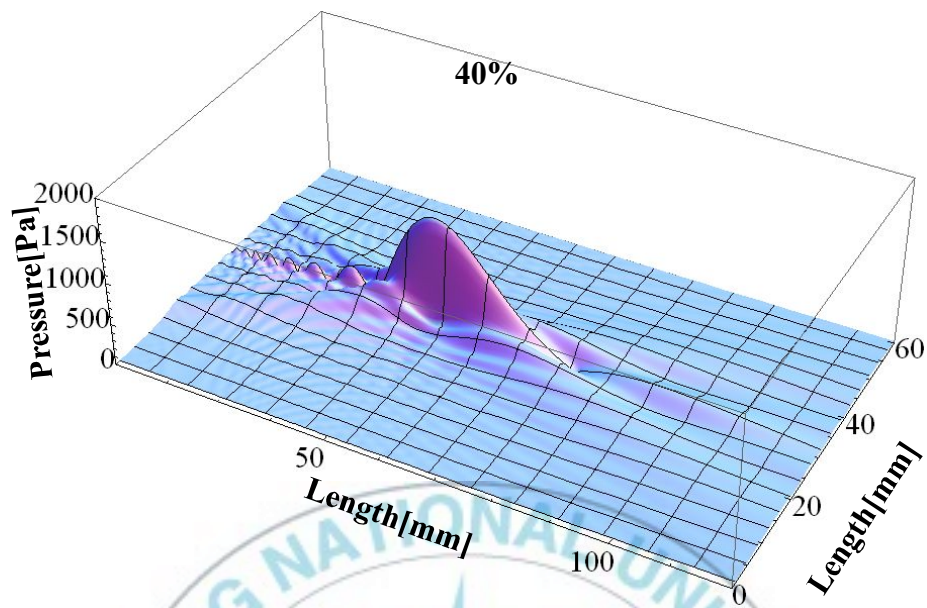
(a) 설탕 농도 25%



(b) 설탕 농도 30%



(c) 설탕 농도 35%



(d) 설탕 농도 40%

그림 IV-9. 설탕 농도에 따른 음장분포의 변화

V. 중등교육에서의 교수-학습에의 적용

2009 개정 7차 과학과 교육과정에서는 과도한 개념 중심의 교육에서 과감하게 벗어난 진정한 융합형 과학을 위해 물리, 화학, 생명 과학, 지구 과학의 기본 개념들이 적절하게 균형을 이루면서 자연스럽게 융합되도록 구성한다. 학생들이 과학에 대한 흥미를 느끼고 자연을 통합적으로 이해하는 데 필요하다면 어려운 과학 개념일지라도 적절한 수준에서 소개한다. ‘과학’을 통하여 학생들이 심화된 물리, 화학, 생명 과학, 지구 과학을 학습할 수 있는 의욕을 갖도록 하고, 관찰, 실험, 조사, 토론 등 다양한 활동을 통하여 과학적 탐구방법과 과정을 이해하게 하여, 이를 바탕으로 창의적 문제해결 능력과 시민 사회에서 합리적인 의사결정을 위한 과학적 사고력을 기르도록 구성한다(교육과학기술부 고시 제 2011-361호). 본 연구는 이러한 2009 개정 7차 과학과 교육과정의 내용 중 물리, 화학, 생명 과학에 접목시켜 연구 결과를 융합형 과학의 교수-학습에 적용시키고자 하였다.

V-1. 중등 과학과 교육과정 중 물리 I, II와 본 연구의 관련된 부분

‘물리 I’은 물리학의 기본 개념을 바탕으로 자연 현상과 첨단 과학 기술에 대한 이해를 기본 목표로 하며, 궁극적으로 민주사회의 시민으로서 갖추어야 할 물리학에 대한 소양을 함양하기 위한 과목이다. ‘물리 I’의

내용들은 물리학 이론의 개념적 구조뿐 아니라, 학생의 선행 개념과 지적 수준, 학생의 경험과 흥미, 인지적 학습과정에서 밝혀진 연구 결과 등을 반영하여 제시한다. 또 내용의 이해를 돕기 위해 다양한 학습전략과 활동들을 포함하여 능동적 학습이 이루어질 수 있도록 구성한다. 자연 현상에 대하여 흥미와 호기심을 가지고 탐구하여 물리학의 기본 개념을 이해하고, 과학적 사고력과 창의적 문제 해결력을 길러 자연 현상에 대한 이해와 문제 해결에 필요한 과학적 소양을 기른다.

‘물리Ⅱ’는 과학기술과 관련된 분야를 전공하고자 하는 학생을 대상으로, 심화된 물리 개념과 다양한 탐구 방법을 적용하여 물리 현상과 관련된 기본적인 문제를 해결하는 능력을 기르기 위한 과목이다. ‘물리Ⅱ’의 학습에서는 물리학의 기본 개념들을 구조화된 체계로서 이해하게 하고, 최근 연구 결과나 연구 동향과 관련된 물리 현상을 이용하여 학생의 흥미를 유발하고, 자기 주도적 활동을 강조하여 학생의 과학적 태도 및 창의적인 문제 해결력을 기르며, 물리적인 시각으로 자연 현상과 주변 사물을 탐구하도록 지시한다.

중등 과학과 교육과정 중 물리와 관련된 내용은 표 V-1과 같다. 학습자는 본 연구와 관련하여 물리Ⅰ의 ‘소리와 빛’ 단원과 물리Ⅱ의 ‘파동의 발생과 전달’ 단원으로 초음파가 정의와 원리를 이해하고 발생한 초음파가 어떻게 표현되는지, 진행하는지 학습할 수 있다. 또한 물리Ⅰ의 ‘힘과 에너지의 이용’ 단원으로 열역학 법칙을 정성적으로 이해하고 초음파에 의한 열전달이 에너지 전환과 이동에 의해 일어남을 학습할 수 있다. 또한 초음파에 의한 열이 전달 될 때, 음향 감쇠 매질의 열전도도와 열용량에 대해 알아보고 온도가 변화함에 따라 음향 감쇠 매질의 열전도도와 열용량은 어떻게 변하는지 생각해 볼 수 있다.

표 V-1. 중등 과학과 교육과정 중 물리와 본 연구의 관련된 부분

과목	영역		본 연구와 관련 내용
물리 I	정보와 통신	소리와 빛	음파와 초음파
	에너지	힘과 에너지의 이용	열의 이동, 열전도도, 열용량
물리 II	파동과 빛	파동의 발생과 전달	파동의 표현, 굴절과 반사, 회절과 간섭

V-2. 중등 과학과 교육과정 중 화학과 본 연구의 관련된 부분

‘화학 I’은 인류 문명의 발전에 기여하고 우리 삶과 밀접하게 관련된 화학 반응을 중심으로 하는 화학의 언어를 이해함으로써 학생들의 화학에 대해 흥미와 관심을 갖고, 화학의 기본 개념을 이해하여 기초적인 소양을 기르도록 하기 위한 과목이다. 원자와 분자 수준에서 물질 현상에 대한 기본 개념을 이해하도록 원자론, 주기율, 화학 결합, 분자의 구조, 물질의 성질 등과 같은 화학의 기초적 내용을 유기적으로 다룬다.

‘화학 II’는 화학 변화의 특성 등 심화 내용을 배우고자 하는 학생을 대상으로 화학을 포괄적으로 이해시키기 위한 과목이다. ‘화학 II’의 학습에서는 화학의 기본 개념들이 과학의 다른 분야와 유기적으로 연관되어 있는 것을 이해시키고, 관찰, 실험, 조사, 토론 등 다양한 활동을 통하여 자연 현상의 연관성에 대한 과학적 사고와 탐구 능력을 기르도록 한다. 그리고 수준 높은 화학적 개념, 원리, 법칙의 구체적인 내용을 자세하게 설명하는 대신 활용 방법을 더 강조하여 실용적인 과학적 사고에 도움이

될 수 있도록 한다.

중등 과학과 교육과정 중 화학과 관련된 내용은 표 V-2와 같다. 학습자는 본 연구와 관련하여 화학 I의 ‘아름다운 분자 세계’ 단원을 통해 시온 안료의 분자구조에 대해 조사해보고 초음파에 의해 전달되는 열이 시온안료의 분자 구조에 어떠한 영향을 미치는지 알아보는 학습자 중심의 자기 주도적 학습이 가능하다. 그리고 시온안료의 가역 반응을 실험을 통해 확인한 후 화학 II의 ‘화학 평형’ 단원을 쉽게 이해할 수 있도록 할 수 있다.

표 V-2. 중등 과학과 교육과정 중 화학과 본 연구의 관련된 부분

과목	영역		본 연구와 관련 내용
화학 I	아름다운 분자 세계	분자 세계의 건축 예술	시온 안료의 분자 구조 및 화학 결합
		화학 결합	
		분자의 구조	
화학 II	화학 평형	평형의 원리	시온 안료의 가역, 비가역 반응

V-3. 중등 과학과 교육과정 중 생명과학 II와 본 연구의 관련된 부분

‘생명과학 II’에서는 분자 수준에서의 생명 현상까지 다루어 물리, 화학적 개념과 원리를 생명 현상의 탐구에 활용하며, 탐구 대상을 자연계에 존재하는 다양한 생물로 확대하여 생명 현상을 폭 넓게 종합적으로 이해

함으로써 생명의 소중함을 인식하고 생명 과학과 인간의 미래를 올바르게 전망하도록 한다.

중등 과학과 교육과정 중 생명과학Ⅱ에 관련된 내용은 표 V-3과 같다. 현 교육 과정의 생명과학Ⅱ에서는 유전자 공학을 이용한 생명공학의 발달만을 학습할 수 있다. 허나 유전 공학 뿐만 아니라 초음파를 이용한 의료 진단 및 치료 또는 수술로서 생명 공학의 기술과 이용에 대해 학습할 수 있다. 초음파를 한 곳으로 집속시키면 신체 내부에 부분적으로 열을 가할 수 있어서 관절 부분의 통증 치료 또는 종양을 파괴하여 제거할 수 있다. 이 때, 초음파에 의한 열에너지의 위치와 크기를 제대로 알 수 있다면 치료 또는 수술의 위험을 낮출 수 있어 앞으로의 의료 산업에 긍정적인 영향을 줄 수 있다.

이상에 알아본 바와 같이, 본 연구는 2009 개정 7차 과학과 교육과정의 목표 중 하나인 물리, 화학, 생명 과학의 기본 개념들이 적절한 균형을 이루며 자연스럽게 융합되도록 실제 사례를 들어 보임으로써 학생들이 과학에 흥미를 갖고, 자기 주도적 탐구 활동을 통하여 과학적 태도 및 창의적인 문제 해결력을 기를 수 있게 될 수 있다.

표 V-3. 중등 과학과 교육과정 중 생명과학Ⅱ와 본 연구의 관련된 부분

과목	영역		본 연구와 관련 내용
생명 과학Ⅱ	유전자와 생명 공학	생명 공학	초음파 가시화 기법의 생명 공학적 기술 발전 및 이용

VI. 결 론

음향감쇠매질 내에서 초음파에너지에 의한 온도상승효과에 대한 비침습적인 조사를 위해 설탕을 포함한 한천을 음향 감쇠 매질로 사용하였다. 초음파에 의한 온도상승의 정도를 가시적으로 확인하기 위하여 시온안료를 도포하여 제작한 감온 필름을 두 층의 한천 층 사이에 삽입하고 곡면 압전 초음파 트랜스듀서를 이용하여 음측면에 형성되는 온도변화를 삽입한 감온 필름 면에서 변색에 의해 나타나도록 하였다. 한천에 포함된 설탕의 비율을 변화시켜 감쇠매질의 물성을 변화시켰으며 각 매질에 대하여 초음파 구동시간에 따른 감온 필름의 변색 면적의 변화를 관찰하여 초음파에 의한 온도상승 효과를 조사하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 임계온도 31 °C인 시온안료를 사용하여 제작한 감온 필름은 한천으로 제작한 음향감쇠매질 내에서도 임계온도 이상에서 변색되어 매질 내부의 온도변화를 관찰할 수 있었다.

2) 음향 감쇠 매질 내에 집속초음파를 방사하여 감온 필름이 변색되는 영역으로부터 초음파에 의한 매질내의 온도상승을 비침습적으로 확인할 수 있었다.

3) 음향감쇠매질 제작 시 설탕의 농도를 변화시켜 매질의 음향특성을 바꾸어 가며 초음파에 의한 온도상승 영역을 확인해 본 결과는 다음과 같았다. 설탕의 농도를 25%~40%까지 5%간격으로 증가시킨 4종류의 감쇠매질에 대해 초음파를 연속적으로 방사하여 10 초까지의 초점 부근의 변색영역을 조사 해본 결과 설탕 농도가 증가함에 따라 최대변색 면적은 약 2.3 mm²에서 3 mm²까지 증가하는 경향을 보였으며 초음파를

방사하기 시작한 후 약 2~5 초 까지는 비교적 급한 면적의 증가를 보였지만 그 후로 완만한 증가를 보였다. 그러나 시뮬레이션 결과에서는 설탕농도의 변화에 따른 변색 면적 증가경향의 변화는 크지 않았으며 시간에 따른 증가경향도 대체로 선형적인 증가 경향을 보였다. 그 이유로는 시뮬레이션 조건으로 열용량의 변화 및 열전도율의 변화를 고려하지 않았기 때문으로 생각된다.

4) 설탕농도에 따라 다른 음향특성을 갖는 음향감쇠매질에 대하여 집속초음파에 의한 음장계산을 수행한 결과 설탕농도에 의한 음장분포의 변화는 크지 않았으며 설탕농도가 증가함에 따라 초점부근의 음압수준은 오히려 낮아지는 경향을 보여 온도변색범위의 경향과는 상반되는 결과를 보였다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제안한 방법을 통해 젤 상태의 음향감쇠매질 내에서 초음파에 의해 변화하는 온도분포의 변화경향을 비침습적으로 관찰할 수 있음을 확인하였다. 이 결과는 생체매질 등 초음파에 의한 영향을 비침습적으로 관찰할 경우는 물론 고무 등 비금속 고체를 대상으로한 연구에도 활용 가능할 것으로 기대된다.

그리고 2009 개정 7차 교육과정에 맞춘 물리, 화학, 생명과학의 융합형 과학 교수-학습 모형에 맞추어서도 활용하여 많은 학습자들에게 과학의 흥미와 호기심을 불러일으키고 다양한 탐구 활동 과정 속에서 자연스럽게 창의적 사고가 활용되고 발현될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] C. Simon, P. VanBaren, and E. S. Ebbini, "Two-Dimensional Temperature Estimation Using Diagnostic Ultrasound", IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 45, No. 4, pp. 1088-1099, 1998.
- [2] J. Wu and G. Du, "Temperature Elevation Generated by a Focused Gaussian Beam of Ultrasound", Ultrasound in Medicine and Biology, Vol. 16, No. 5, pp. 489-498, 1990.
- [3] D. S. Ellis and W. D. O'Brien Jr., "The Monopole-Source Solution for Estimating Tissue Temperature Increases for Focused Ultrasound Fields", IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 43, No. 1, pp. 88-97, 1996.
- [4] W. L. Nyborg, "Heat generation by ultrasound in a relaxing medium", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 70(2), pp. 310-312, 1981.
- [5] J. A. Jensen, "A model for the propagation and scattering of ultrasound in tissue", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 89(1), pp. 182-190, 1991.
- [6] M. G. Curley, "Soft Tissue Temperature Rise Caused by Scanned, Diagnostic Ultrasound", IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 40, No. 1, pp. 59-66, 1993.
- [7] M. Pernot, M. Tanter, J. Bercoff, K. R. Waters, and M. Fink, "Temperature Estimation Using Ultrasonic Spatial Compound

- Imaging”, IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 51, No. 5, pp. 606-615, 2004.
- [8] R. Seip, and E. S. Ebbini, “Noninvasive Estimation of Tissue Temperature Response to Heating Fields Using Diagnostic Ultrasound”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 42, No. 8, pp. 828-839, 1995.
- [9] J. Kim, M. Kim, and K. Ha, “Visualization of Thermal Distribution Caused by Focused Ultrasound Field in an Agar Phantom”, J. Appl. Phys., Vol. 50, No. 7, p. 07HC08, 2011.
- [10] J. Kim, M. Kim, Y. Park, and K. Ha, “Acoustic Characteristics of a Tissue Mimicking Phantom for Visualization of Thermal Distribution”, J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 7, p. 07GB10, 2012.
- [11] 이정모, “인지과학과 학문간 융합의 원리와 실제”, 한국사회과학, 제 32권, pp. 36-37, 2010.
- [12] I. M. Hallaj, R. O. Cleveland, “FDTD simulation of finite-amplitude pressure and temperature fields for biomedical ultrasound”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 105, No. 5, pp. 7-12, 1999.
- [13] I. M. Hallaj, R. O. Cleveland, K. Hynynen, “Simulations of the thermo-acoustic lens effect during focused ultrasound surgery”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 109, No. 5, pp. 2245-2253, 2001.
- [14] J. Huang, R. G. Holt, R. O. Cleveland, and R. A. Roy, “Experimental validation of a tractable numerical model for focused ultrasound heating in flow-through tissue phantoms”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 116, No. 4, pp. 2451-2458, 2004.
- [15] J. L. Drewniak and F. Dunn, “On the Equivalence of Pulsed and Continuous illtrasound in Producing Temperature Elevations

- Resulting from Absorption”, J. Acoust. Soc. Jpn. E13, pp. 115-120, 1992.
- [16] Y. Saito, T. Ishizeki, T. Tsuchiya and N. Endoh, “Numerical Analysis of Temperature Rise in Tissue Using Ultrasound”, J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 6B, pp. 4600-4601, 2005.
- [17] H. Inoue, K. I. Carnes, F. Dunn, “Absorption of Ultrasound by Normal and Pathological Human Gonadal Tissues in vitro”, Jpn. J. Med., Vol. 20, No. 6, pp. 349-355, 1993.
- [18] 井上潜, 台国史弘, “超音波の吸収による温度分布シミュレーションの基礎検討” 日音講論, pp. 1057-1058, 2002.
- [19] 井上浩, 吉田史弘, “超音波の伝搬と吸収による温度分布シミュレーションの基礎検討”, 信學技報, pp. 13-16, 2002.
- [20] C. Yamaya, H. Inoue, “Behavior of Propagation and Heating Due to Absorption of Ultrasound in Medium”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 45, No. 5B, pp. 4429-4434, 2006.
- [21] 宇野亨, *FDTD法による電磁界およびアンテナ解析*, コロナ社, pp. 10-20, 1998.
- [22] 鎌倉友男, *非線形音響学の基礎*, 愛智出版, pp. 61-100, 1996.
- [23] S. Saito, I. Akiyama, and N. Yoshizumi, “Nonlinear acoustic field of composite-type two-frequency coaxial focusing source”, Journal of The School of Marine Science and Technology, Tokai University, Vol. 6, pp. 107-117, 2008.
- [24] 강우원, 김래영, *식품화학*, 보무각, pp 108-109, 2008.