

# 폴리비닐알코올 젤의 집속초음파에 의한 온도분포 변화

## Thermal distribution change in polyvinyl alcohol gel caused by focused ultrasound

김정순,<sup>1</sup> 김무준<sup>2†</sup>

(Jungsoon Kim<sup>1</sup> and Moojoon Kim<sup>2†</sup>)

<sup>1</sup>동명대학교 전기공학과, <sup>2</sup>부경대학교 물리학과

(Received August 20, 2020; revised October 5, 2020; accepted October 13, 2020)

**초 록:** 폴리비닐알코올(polyvinyl alcohol, PVA) 젤을 온도가시화용 생체모의매질로 사용하기 위한 기초적인 정보를 얻기 위하여, PVA의 농도를 바꾸어가며 집속초음파에 의한 온도변화 특성을 조사하였다. 기본적인 음향 특성을 조사하기 위하여 PVA 농도에 따른 음속, 감쇠계수, 밀도 등이 측정되었고 열역학적 특성인 열전도도, 열용량이 측정되었다. 30 °C 이상에서 변색되는 시온필름을 사용하여 집속초음파에 의해 상승되는 초점부근의 온도 변화의 범위를 관찰하였으며 기록된 이미지의 화상처리를 통하여 변색범위의 면적을 도출하였다. PVA의 농도가 2 wt% ~ 16 wt%의 범위에서 증가할수록 젤 내부에서 30 °C 이상으로 상승하는 영역은 선형적으로 증가함을 보였고 집속초음파 트랜스듀서에 인가하는 파워가 증가할수록 변색영역이 증가함을 확인하였다. 이들 결과는 유한요소법을 사용한 시뮬레이션 결과와도 좋은 일치치를 보였다.

**핵심용어:** 집속초음파, 폴리비닐알코올 젤, 온도분포, 시온필름, 초음파 트랜스듀서, 온도가시화

**ABSTRACT:** In order to obtain basic information for using polyvinyl alcohol (PVA) gel as a tissue mimicking phantom for temperature visualization, the temperature change characteristics due to the focused ultrasound were examined for different concentration of PVA. To obtain the basic acoustic characteristics, the speed of sound, the attenuation coefficient, and the density depending on the PVA concentration were measured, and the thermodynamic characteristics, such as thermal conductivity and heat capacity, were measured. The range of temperature rising in the vicinity of the focal point due to the focused ultrasound was observed using a thermochromic film that changes color at 30 degree or more, and the discolored area was obtained by image processing of the recorded image. As the concentration of PVA increases in the given range of 2 wt% ~ 16 wt%, the area that rises above 30 degree inside the gel increases linearly. It is confirmed that the discolored area increases as the power applied to the focused ultrasonic transducer increases. These results showed good agreement with the simulation results using the finite element method.

**Keywords:** Focused ultrasound, Polyvinyl alcohol gel, Thermal distribution, Thermochromic film, Ultrasonic transducer, Temperature visualization

**PACS numbers:** 43.58.Fm, 43.38.Hz

## 1. 서 론

폴리비닐 알코올(Polyvinyl alcohol, PVA) 젤은 분자 내에 다수의 수산기를 갖고 있어 물과 유사한 극

성구조를 갖기 때문에 수용성이다. 그러나 완전 경화된 PVA는 수소결합에 의해 강건한 결정구조를 갖기 때문에 상온 이하의 차가운 물에서는 녹지 않는 성질을 가진다. 이에 반해 결정구조가 부분적으로

†Corresponding author: Moojoon Kim (kimmj@pknu.ac.kr)

Department of Physics, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-Gu, Busan 48513, Republic of Korea

(Tel: 82--51-629-5572, Fax: 82-51-629-5549)



Copyright©2020 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

붕괴된 부분경화 상태에서는 상온이하의 물에서도 용해되어 초산기가 소수기, 수산기가 친수기로 작용하여 일종의 고분자 계면활성제의 역할을 하기도 한다. 따라서 수용액은 표면장력의 저하를 가져와 뛰어난 보호 콜로이드의 특성을 발휘하기도 한다. 그 외에도 투명도가 매우 뛰어나며 중합도와 경화도가 높을수록 기계적 성질이 향상되는 특성이 있다. 일반적으로 PVA는 경화도와 중합도라는 두 개의 인자에 의해 특성이 결정된다.<sup>[1]</sup> 또한 젤상태의 용융점이 8%~14%의 농도에서 188°C~198°C로 비교적 높은 것으로 알려져 있다.<sup>[2]</sup> 이러한 특성을 활용하여 섬유 가공, 제지가공 등 공업분야 뿐만 아니라 제약 및 생명공학 분야에서도 많이 활용되고 있다.<sup>[3,4]</sup>

최근 동물의 혈류 해석에 있어서 초음파 계측용합 시뮬레이션을 사용하는 방법이 제안되어 순환기계 질환의 기전을 이해하는 수단이 되고 있다.<sup>[5]</sup> 이 때 이 방법의 유효성 및 성능평가를 위해서 투명하며 음향적으로는 생체 연조직과 유사한 특성을 지닌 PVA 젤을 사용한 연구가 보고되고 있다.<sup>[6]</sup> 모의 생체 매질로의 활용과 함께 초음파 트랜스듀서와 피부조직과의 사이에서 음향 커플러로서의 활용도 보고되고 있으며 이를 위한 PVA의 비선형 특성이 측정되어 보고되고 있다.<sup>[7,8]</sup>

치료용 집속초음파의 개발에 따라 강한 집속 음장에 의한 생체매질내의 온도 상승효과를 가시화 할 수 있는 생체 모의 매질에 대한 요구가 높아지고 있으며 이에 대한 많은 연구가 보고되고 있다.<sup>[9-11]</sup> 본 연구팀은 시온안료 및 시온필름 등을 사용하여 다양한 생체 모의매질 내에서 강한 초음파 음장에 의한 온도분포의 변화를 가시화하여 해석하는 방법을 제안해 왔다.<sup>[12-17]</sup> 본 연구에서는 집속된 초음파 음장에 의해 PVA 젤 내부에서 발생하는 온도상승 효과 및 열전달 특성을 실험적으로 해석하고 수치해석적인 시뮬레이션 결과와 비교하여, PVA 젤을 생체모의매질에 활용하기 위한 기초적인 정보를 제공하는 것을 목적으로 한다.

## II. 수치시뮬레이션 모델

본 연구에서는 초음파에 의한 온도 상승효과를 가

시화 할 수 있는 생체 모의 매질로 PVA의 활용가능성을 조사하기 위해 초음파에 의한 온도 분포 및 전달 특성을 확인한다. 따라서 매우 한정된 공간에 집중되는 높은 온도의 분포를 관찰하는 것보다 넓은 영역에 걸쳐 변화하는 비교적 낮은 온도의 분포변화가 관찰이 용이하다. 일반적으로 30°C~40°C의 온도상승 범위에 대해서는 비선형 효과를 무시할 수 있으므로,<sup>[18]</sup> 본 연구의 시뮬레이션에 있어서는 매질 중의 비선형 현상 및 횡모드를 무시하여 다음 식으로 주어지는 2차원 축대칭 헬름홀츠 방정식으로 음장을 구한다.<sup>[19]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ -\frac{r}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial r} \right) \right] + r \frac{\partial}{\partial z} \left[ -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) \right] - \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \frac{rp}{\rho} = 0, \tag{1}$$

여기서  $r$ 과  $z$ 는 원통좌표의 좌표축이며  $p$ ,  $\omega$ ,  $\rho$  및  $c$ 는 각각 음압, 각주파수, 매질내에서의 밀도 및 음속이다.

초음파에 의해 매질내에 발생하는 온도분포는 Pennes' Bioheat Transfer equation으로 알려진 다음 식에 의해 표현될 수 있다.<sup>[20]</sup>

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (-k \nabla T) + Q, \tag{2}$$

여기서  $T$ 는 온도,  $C_p$ 는 비열, 그리고  $k$ 는 열전도도이다. 또 열원  $Q$ 는 평면파 한계에서 다음 식으로 쓸 수 있다.<sup>[21]</sup>

$$Q = 2\alpha I, \tag{3}$$

여기서  $\alpha$ 는 음향감쇠계수,  $I$ 는 음향강도이며 Eq. (1)로부터 구해진다.

## III. PVA 젤의 제작 및 특성측정

PVA 젤을 만들기 위하여, 증류수에 적당량의 PVA 파우더(CP, 대정화금, 한국)를 넣고 80°C 이하의 온도에서 잘 교반하면서 녹인다. 제작된 PVA젤의 음속 및 감쇠계수를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 장

치를 구성하여 사용하였다. 그림에서 아크릴로 제작된 수조(160 mm × 70 mm × 45 mm)에 PVA 젤을 채우고 슬라이더의 한쪽 끝에 고정된 초음파 트랜스듀서(A112S, Panametrics, Japan)로부터 7.2 MHz의 burst pulse를 방사한다. 송신용 트랜스듀서와 특성이 동일한 수신용 트랜스듀서는 슬라이더에 의해 음속을 따라 이동할 수 있게 되어 있어 송신용 트랜스듀서와의 거리를 1/50mm의 정도로 정밀하게 조절할 수 있게 되어 있다. 두 트랜스듀서 사이의 거리  $l$ 을 변화시켜 가며 수신 트랜스듀서로부터 수신되는 전압을 측정하여 매질의 감쇠계수를 측정한다. 즉 두 트랜스듀서 사이의 거리가  $l_1$  및  $l_2$ 일 때 수신전압이 각각  $V_1$  및  $V_2$ 이라고 하면 감쇠량은 다음 식으로 구할 수 있다.<sup>[22]</sup>

$$\alpha_p = \frac{\ln \frac{V_1}{V_2}}{(l_2 - l_1)}, \quad (4)$$

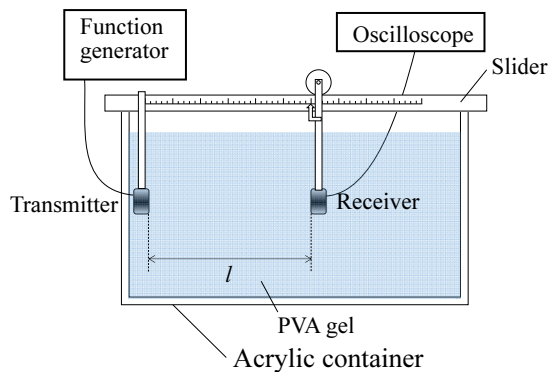


Fig. 1. (Color available online) Experimental setup for measurement of acoustic characteristics.

본 연구에서는  $l_1 = 5 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 50 \text{ mm}$ 로 정하여 측정하였다. 음속의 경우 송수신 펄스의 시간 간격을 오실로스코프(Tektronix, MDO3012, USA)로 측정하여 구하였다. PVA의 농도가 2 wt% ~ 16 wt%인 젤에 대한 음향감쇠계수  $\alpha$  [Np/m] 및 음속  $c$  [m/s]의 측정 결과를 Table 1에 나타내었다. 이 결과를 보면 음향감쇠계수 및 음속은 PVA의 농도가 증가할수록 선형적으로 증가함을 알 수 있다. Table 1에 나타낸 열전도도  $k$  [W/m·°K], 열용량  $C_p$  [J/kg·°K] 및 밀도  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]는 열분석 장치(LFA 467, NETSCH, Germany)를 사용하여 측정하였으며, 각각 10회 측정하여 평균한 값이다. 열전도도 및 밀도의 경우 표준편차를 각각  $\sigma_k$  및  $\sigma_\rho$ 로 제시하였고, 그 외 파라미터들의 표준편차는 유효숫자 범위내에서 0이므로 표기를 생략하였다.

#### IV. 실험 장치 및 초음파 트랜스듀서의 특성

PVA 젤에 집속 초음파를 방사하기 위한 초음파 트랜스듀서의 제작을 위해 Fig. 2에 나타낸 것과 같은 요면 압전 진동자를 사용하였다. 이 트랜스듀서의 방사면의 면적은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$S = -2\pi r^2(\cos \theta - 1), \quad (5)$$

여기서 곡률반경  $r$ 은 18 mm,  $\theta = 30^\circ$ 이므로 방사면적은  $S = 272.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 로 계산된다.

요면 압전 진동자의 두께는 0.3 mm이며 PZT-4 계열의 압전 세라믹으로 만들어져 있다. 제작된 트랜

Table 1. Physical properties of the PVA gel with concentration.

PVA [wt%]	$\alpha$ [Np/m]	$c$ [m/s]	$k$ [W/m·°K]	$\sigma_k$ [W/m·°K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg·°K]
2	2.61	1504.1	0.564	0.004	1010	0.1	3760
4	3.12	1504.1	0.597	0.014	1011	0.5	3861
6	3.44	1514.1	0.565	0.011	1018	1.3	3780
8	3.96	1521.6	0.517	0.019	1014	2.0	3715
10	4.75	1530.7	0.545	0.015	1023	1.4	3763
12	5.54	1539.8	0.577	0.008	1031	1.3	3750
14	6.33	1549.6	0.530	0.020	1056	1.7	3697
16	7.31	1557.3	0.785	0.024	1063	1.5	3690

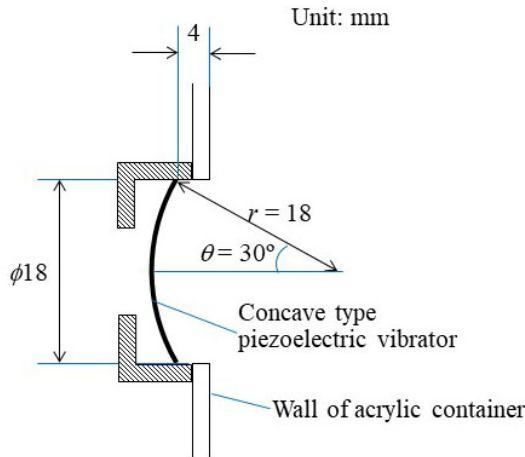


Fig. 2. (Color available online) Concave type piezoelectric vibrator used in focused ultrasonic transducer.

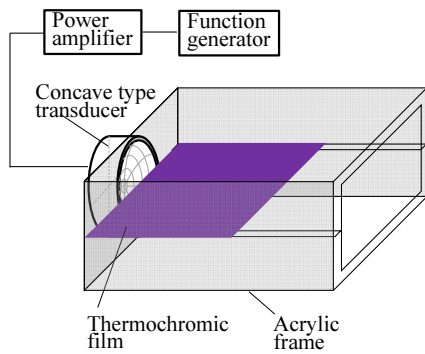


Fig. 3. (Color available online) Acrylic frame for alignment of transducer and thermochromic film.

스듀서의 공진주파수는 7.2 MHz로 측정되었다.

제작된 집속초음파 트랜스듀서는, Fig. 3에 나타난 것과 같이, 두께 3 mm의 아크릴로 제작된 틀(70 mm × 60 mm × 40 mm)에 고정되어 트랜스듀서의 음축을 포함하는 면에 시온필름(P00000PB, 아트매직스, 한국)이 위치하도록 고안하였다. 트랜스듀서의 방사면이 있는 왼쪽 면과 양 측면을 제외한 모든 면이 개방되어 있어 방사된 집속초음파가 받는 틀에 의한 영향을 최소화하였다.

Fig. 1에서 음속 및 감쇠계수를 측정하기 위해 사용하였던 트랜스듀서와 슬라이더를 제거한 PVA수조에 집속초음파 트랜스듀서와 시온필름이 고정된 아크릴 틀을 침전시켜 집속초음파에 의한 매질 내의 온도변화를 관찰한다.

신호발생기(WF1973, NF, Japan)에서 출력된 주파

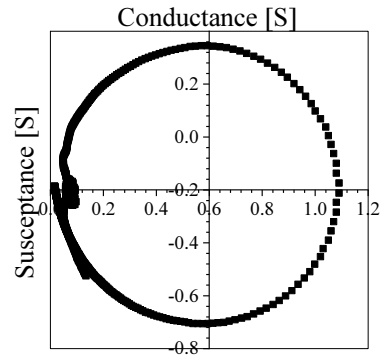


Fig. 4. Admittance locus measured in air.

수 7.2 MHz, 진폭  $V_{in}$ 인 연속파 신호는 파워 증폭기(1020 L, E&I, USA)에 의해 증폭되어 전기적인 파워  $P_E$ 를 집속초음파 트랜스듀서에 공급하게 된다. 이때 트랜스듀서의 전기음향변환효율  $\eta_{ea}$ 에 따라 음향파워  $P_A$ 로 변환되어 음파로 방사하게 된다. 전기음향변환효율은 다음 식으로 구할 수 있다.<sup>[23,24]</sup>

$$\eta_{ea} = \frac{|Y_{s,f0}|}{G_{s,f0}} \left( 1 - \frac{|Y_{s,f0}|}{|Y_{af0}|} \right), \quad (6)$$

여기서 각 변수는 다음과 같다.

$|Y_{s,f0}|$ : 매질이 있을 때 공진주파수에서의 어드미턴스의 절대값.

$G_{s,f0}$ : 매질이 있을 때 공진주파수에서의 컨덕턴스.

$|Y_{af0}|$ : 매질이 없을 때 공진주파수에서의 어드미턴스의 절대값.

공기 중에서 측정한 트랜스듀서의 어드미턴스로 커스를 Fig. 4에 나타내었다.

공기의 특성 음향임피던스를 무시하면 이 결과로부터  $|Y_{af0}| = 1.05$ 임을 알 수 있다. 어드미턴스는 음향매질에 따라 달라지므로 본 연구에서는 PVA의 농도가 2 wt%, 6 wt%, 10 wt%, 14 wt%, 및 16 wt%인 경우에 대하여 집속초음파 트랜스듀서의  $|Y_{s,f0}|$  및  $G_{s,f0}$ 를 각각 측정하고 이들로부터 각 매질에 대한 전기음향변환효율을 구하여 Table 2에 나타내었다. 각 음향매질의 특성 음향임피던스  $Z_a$ 는 Table 1에서 구한 음속 및 밀도를 이용하여 구하였다.

상술한 바와 같이 Fig. 3에 나타난 신호발생기의 출력 전압  $V_{in}$ 이 300 mV, 400 mV 및 500 mV인 세 경우

Table 2. Electro-acoustic efficiency and acoustic impedance for acoustic media with different PVA concentrations.

PVA [wt%]	$ Y_{sf0} $ [S]	$G_{sf0}$ [S]	$\eta_{ea}$	$Z_a (\times 10^6)$ [ $\Omega$ ]
2	0.039	0.047	0.80	1.52
6	0.090	0.102	0.81	1.54
10	0.041	0.050	0.79	1.57
14	0.021	0.027	0.78	1.63
16	0.021	0.027	0.77	1.66

Table 3. Acoustic power and vibration displacement of transducer by input voltage for PVA gel with different concentration.

PVA [wt%]	$V_{in}$ [mV]	$P_E$ [W]	$P_A$ [W]	$\xi$ [nm]
2	300	12	9.56	3.36
	400	21	16.78	4.45
	500	32	25.56	5.49
6	300	11	8.86	3.20
	400	20	16.10	4.33
	500	30	24.15	5.30
10	300	13	10.26	3.43
	400	23	18.16	4.56
	500	33	26.06	5.46
14	300	13	10.09	3.32
	400	23	17.85	4.42
	500	34	26.38	5.37
16	300	12	9.23	3.16
	400	21	16.15	4.18
	500	31	23.84	5.08

에 대하여 집속초음파 트랜스듀서에 인가되는 전기적 파워 및 방사되는 음향파워를 Table 3에 나타내었다. 음향파워로부터 트랜스듀서의 표면에서의 진동 변위  $\xi$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\xi = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{P_A}{Z_a S}} \quad (7)$$

각 입력전압에 대한 진동변위를 구하여 Table 3에 추가하였다.

Fig. 5는 Table 3에 나타낸 입력 전압을 트랜스듀서에 인가하여 시온필름에 나타나는 온도변화를 관찰

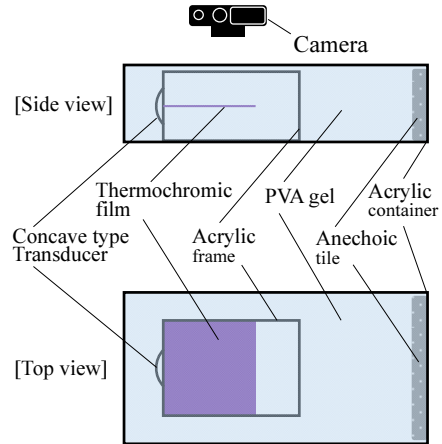


Fig. 5. (Color available online) Experimental system for observing temperature change caused by focused ultrasound.

하는 실험 장치를 나타내고 있다. 상술한 바와 같이 Fig. 3에 나타낸 집속초음파 트랜스듀서와 시온필름이 고정된 아크릴 틀을 PVA젤이 담긴 수조에 넣었으며 각 입력전압에 대하여 10초간의 초음파 구동에 의한 시온 필름표면의 색 변화를 사용 휴대폰 카메라(Galaxy A80, Samsung, Korea)로 기록하였다. 이때 Fig. 5의 오른쪽에 나타낸 것과 같이 방사된 초음파의 벽면 반사효과를 피하기 위하여 흡음타일(EUA 201A, Eastek, USA)을 사용하였다.

삽입된 시온필름은 반응속도  $1^\circ\text{C/ms}$ 의 사용제품이고, 사이즈는  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ , 두께  $0.3\text{ mm}$ 이다. 본 실험에 사용된 시온필름은  $30^\circ\text{C}$  이상이 되면 흰색으로 변색되는 특성을 가진다.

## V. 결과 및 검토

음향매질의 변화에 따른 온도상승면적 및 초음파 방사시간 변화에 따른 초점부근에서  $30^\circ\text{C}$  이상의 온도상승면적의 변화를 측정하였다. 이를 위하여 초음파 방사 후 10s 경과한 시각의 영상을 기록하였다. 시온필름의 표면이 초음파에 의한 온도상승에 의해 변색된 면적을 도출하기 위하여 Fig. 6에 나타낸 것과 같은 화상 처리를 하였다.

이 결과는 한 예로 PVA농도가 10 wt%인 경우, 신호발생기에서 400mV의 진폭을 가진 신호를 인가했을 때 얻어진 결과이다. 화상처리를 위하여 카메라

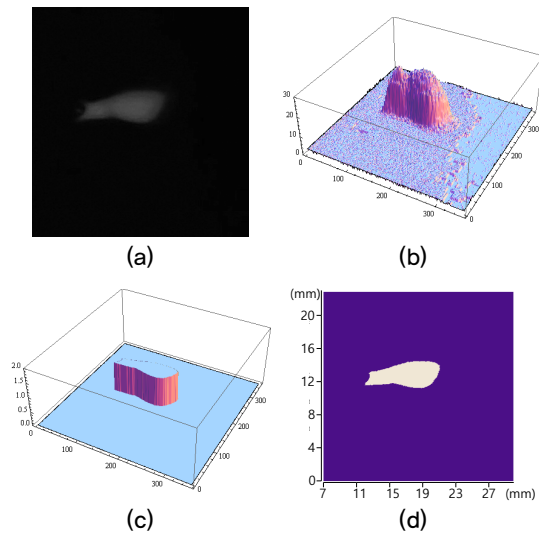


Fig. 6. (Color available online) Image processing for recorded image when PVA concentration and input voltage are 10wt% and 400 mV, respectively. (a) Discolored image (b) Image data (c) Data to obtain discolored area (d) Image after image processing.

에 기록된 화상데이터를 그레이 스케일로 변환하여 나타낸 화상을 Fig. 6(a)에 나타내었다. 집속초음파에 의해 온도가 상승하여 30 °C 이상이 된 초점 부근의 영역이 변색됨을 알 수 있다. 이 결과를 각 픽셀에 대한 화상 데이터로 변환한 결과를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 화상의 명암에 따라 피크의 높이가 상이함을 보인다. PVA의 농도변화 및 인가전력에 따른 변색면적의 변화경향을 조사하기 위하여 일정 수준의 값으로 규격화한 결과를 Fig. 6(c)에 나타내었다. 본 연구에서는 그 수준을 10으로 정하였다. 이 결과에서 화상 전체 면적(실제면적)과 화상 전체 픽셀의 수를 비교하여 한 픽셀당 실제 면적을 환산할 수 있다. 그 후 변색 영역의 화상 데이터는 1의 값을 가지므로 1의 값을 갖는 픽셀 수를 구하고 픽셀당의 면적을 곱하면 변색영역의 면적을 도출할 수 있다. 화상처리 후의 이미지를 Fig. 6(d)에 나타내었다. 여기서 횡축의 거리는 요면 압전 진동자의 가장자리를 기준으로 측정된 값을 나타내고 있다.

유한요소법을 사용한 시뮬레이션은 상용의 프로그램(COMSOL Multiphysics)를 사용하였다. Table 1에 나타낸 PVA젤의 특성과 Table 3에 나타낸 트랜스듀서 표면의 진동 변위를 사용하여 PVA의 농도 및 입력 파워에 따른 변색영역의 면적변화를 계산하였

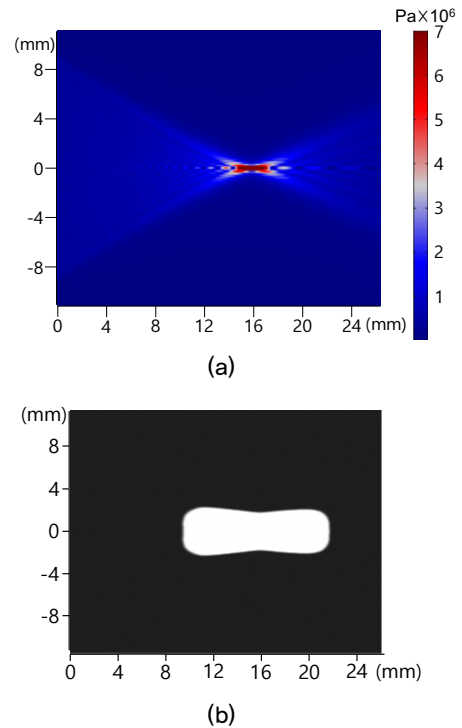


Fig. 7. (Color available online) Image of simulation result when PVA concentration and input voltage are 10wt% and 400 mV, respectively. (a) Acoustic pressure distribution and (b) thermal distribution.

다. 그 결과들에서 PVA농도가 10 wt%이고 신호발생기의 출력신호 진폭이 400 mV인 경우에 대하여 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7(a)는 음장 분포를 나타낸 것으로 결과에서 나타나는 초점영역의 중심의 위치는 온도분포의 결과에서 나타나는 것과 일치하고 있음을 보여준다. Fig. 7(b)는 실험결과로부터 얻은 30 °C 이상영역의 면적과의 비교를 위하여, 30 °C이상의 온도 영역의 면적을 단색으로 표현하여 나타내었다. Fig. 7(b) 결과는 Fig. 6의 경우와 동일한 농도 및 구동조건이기 때문에 변색면적 및 위치가 Fig. 6의 결과와 유사함을 나타내고 있다. 그러나 트랜스듀서 표면이 균일하지 못하여 방사된 음장이 음축을 기준으로 대칭적이지 않아 변색영역이 비대칭적인 Fig. 6의 결과에 비해 시뮬레이션 결과는 이론적으로 예측할 수 있듯이 정확한 대칭성을 보여주고 있다. 시뮬레이션의 경우 역시 실험 결과인 Fig. 6에서 보여준 것과 유사하게 계산된 이미지로부터 변색영역의 면적을 계산하였다.

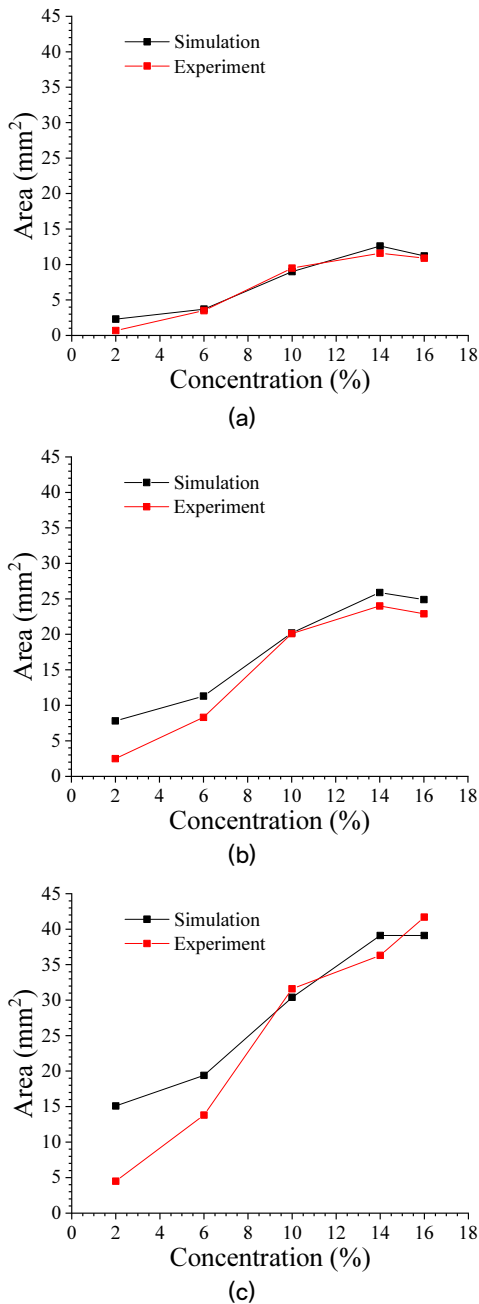


Fig. 8. (Color available online) Discolored area change with PVA concentration. Input voltage of signal generator: (a) 300 mV, (b) 400 mV, (c) 500 mV.

PVA의 농도에 따른 변색면적의 변화를 각 입력전압에 대하여 Fig. 8에 나타내었다. 이 결과를 보면 PVA농도가 증가함에 따라 변색면적이 증가함을 보이며, 6 wt% ~ 10 wt%의 경우에서 가장 급격히 증가하였다. 14 wt%에서 16 wt%로 증가하는 구간에서는 변색면적이 약간 감소하거나 유지되는 결과를 보였

다. 이에 대한 원인으로서는 다음과 같이 고찰할 수 있다. Eq. (2)에서 볼 수 있듯이, 매질 내부의 온도상승은 매질의 감쇠계수  $\alpha$  및 열전도도  $k$ 에 의존함을 알 수 있다. 감쇠계수의 경우, 매질의 점성에 관여하며 음파에 의한 매질 입자간의 마찰 등으로 인한 열에너지로의 변화에 기여하므로 온도상승에 있어서 기여도가 크다. 이에 반해 열전도도의 경우는 매질내에서 열전달의 용이성을 나타내는 양으로 매질내 국부적인 온도상승의 기여도에 있어서는 감쇠계수와는 상충되는 요소로 작용한다. 따라서 Table 1의 결과에 나타난 것과 같이, PVA농도가 증가함에 따라 감쇠계수는 꾸준히 증가하며 이는 매질내의 온도상승면적의 증가에 크게 기여하게 된다. 그러나 농도가 14 wt% ~ 16 wt%로 증가하는 구간에서는 농도 증가에 따른 감쇠계수는 증가함에도 불구하고 열전도도가 급격히 증가하여 매질내의 온도상승면적의 증가율은 완만한 결과를 초래한 것으로 보인다. 특히 이 구간에서 열전도도가 급격히 상승하는 것은, 특정 농도 이상에서는 매질의 유리화 등 결정화가 진행되는 화학적인 원인에 의한 것으로 추측된다.

입력전압에 따른 변색영역의 면적 변화는 입력전압이 증가할수록 면적이 증가함을 보이고 있으며 입력전압이 클수록 실험결과와 시뮬레이션 결과와의 차이가 커짐을 보인다. 이는 트랜스듀서의 표면 진동 변위의 산출과정에 있어서 매질 및 압전 진동자의 비선형성 등이 고려되지 않은 결과로 생각된다.

## VI. 결 론

기존의 온도가시화용 생체모의매질의 단점을 보완할 수 있는 매질로 PVA젤을 이용한 생체모의매질을 제작하였고, 매질내의 초음파에 의한 온도분포 변화특성을 실험적으로 조사하였다. PVA에 대한 음향특성 및 열전달 특성을 측정된 결과, PVA의 농도가 증가함에 따라 음속, 감쇠계수, 특성 음향임피던스 등은 선형적으로 증가하였으며 선형성의 상관을 나타내는 Pearson's R값은 각각 0.988, 0.992, 0.958로 나타났다. 한편, 열전도도의 경우 2 wt%에서 14 wt%까지는 약 0.6 W/m<sup>2</sup>K ~ 0.5 W/m<sup>2</sup>K의 범위에 있었으나 16 wt%의 경우는 약 0.8 W/m<sup>2</sup>K로 증가함을 보였

다. 이상과 같은 특성을 갖는 PVA젤에 집속초음파를 방사하여 젤 내부에서 상승되는 온도분포를 30 °C 이상에서 변색되는 시온필름을 삽입하여 조사하였다. PVA의 농도가 2 wt% ~ 16 wt%로 변화함에 따라 시온필름 표면에서 변색되는 영역의 면적이 증가함을 확인하였으며 집속초음파 트랜스듀서에 인가하는 파워가 증가할수록 변색면적이 증가함을 확인하였다. 농도에 따른 변색영역의 증가는 인가하는 파워에 따라 상이하지만, 2 wt%일 때의 변색면적에 비해 16 wt%일 때의 그 면적은 약 10배 정도 증가함을 알 수 있었다.

본 연구에서 도출한 결과는 PVA젤을 이용한 생체 모의매질의 디자인에 기초적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대되며 화상치료법을 통한 변색면적의 도출방법 및 유한요소 시뮬레이션에 입력할 물리상수의 도출 방법은 향후 유사분야의 해석에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

### References

1. Q. Cheng, S. Wang, T. Rials, and S. Lee, "Physical and mechanical properties of polyvinyl alcohol and polypropylene composite materials reinforced with fibril aggregates isolated from regenerated cellulose fibers," *Cellulose*, **14**, 593-602 (2007).
2. S. Gupta, A. Pramanik, A. Kailath, T. Mishra, A. Guha, S. Nayar, and A. Sinha, "Composition dependent structural modulations in transparent poly(vinyl alcohol) hydrogels," *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* **74**, 186-190 (2009).
3. B. Gajra, S. Pandya, G. Vidyasagar, H. Rabari, R. Dedania, and S. Rao, "Poly vinyl alcohol hydrogel and its pharmaceutical and biomedical applications: A review," *Int. J. Pharm. Sci. Res.* **4**, 20-26 (2012).
4. K. Funamoto, T. Hayase, Y. Saijo, and T. Yambe, "Numerical experiment of transient and steady characteristics of ultrasonic-measurement-integrated simulation in three-dimensional blood flow analysis," *Ann. Biomed. Eng.* **37**, 34-49 (2009).
5. K. Funamoto, T. Hayase, Y. Saijo, and T. Yambe, "Numerical analysis of effects of measurement errors on ultrasonic-measurement-integrated simulation," *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **58**, 653-663 (2011).
6. O. Yamashita, K. Funamoto, and T. Hayase, "Development of poly (vinyl alcohol) gel with in vivo acoustic properties," *Proc. of the 21st Bioengineering Conference 2009 meeting*, 451-452 (2009).
7. K. Hayakawa, S. Takeda, K. Kawabe, and T. Shimura, "Acoustic characteristics of pva gel," *IEEE Int. Ultrason. Symp.* 969-972 (1989).
8. B. Gajra, S. Pandya, G. Vidyasagar, H. Rabari, R. Dedania, and S. Rao, "Polyvinyl alcohol hydrogel and its pharmaceutical and biomedical applications: A review," *Int. J. Pharm. Sci. Res.* **4**, 20-26 (2012).
9. M. Choi, S. Guntur, K. Lee, D. Paeng, and A. Coleman, "A tissue mimicking polyacrylamide hydrogel phantom for visualizing thermal lesions generated by high intensity focused ultrasound," *Ultrasound Med. Biol.* **39**, 439-448 (2013).
10. A. Maxwell, T. Wang, L. Yuan, A. Duryea, Z. Xu, and C. Cain, "A tissue phantom for visualization and measurement of ultrasound-induced cavitation damage," *Ultrasound Med. Biol.* **36**, 2132-2143 (2010).
11. C. Lafon, V. Zderic, M. Noble, J. Yuen, P. Kaczkowski, O. Sapozhnikov, F. Chavrier, L. Crum, and S. Vaezy, "Gel phantom for use in high-intensity focused ultrasound dosimetry," *Ultrasound Med. Biol.* **31**, 1383-1389 (2005).
12. J. Kim, M. Kim, Y. Park, and K. Ha, "Acoustic Characteristics of a tissue mimicking phantom for visualization of thermal distribution," *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 07GB10 (2012).
13. J. Kim, J. Jung, M. Kim, and K. Ha, "Experimental analysis of temperature elevation in ultrasonic beam from circular piston," *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 07KF14 (2014).
14. J. Kim, J. Jung, M. Kim, and K. Ha, "Visualization of temperature elevation due to focused ultrasound generated by tone bursts wave," *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 07KF16 (2014).
15. J. Kim, J. Jung, M. Kim, and K. Ha, "Estimation of thermal distribution in tissue mimicking phantom made of carrageenan gel," *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 07HF23 (2015).
16. J. Kim, J. Jung, M. Kim, E. Lee, and I. Lee, and K. Ha, "Distribution of temperature elevation caused by moving HIFU transducer," *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 07HF13 (2015).
17. J. Jung, J. Kim, K. Ha, M. Kim, and Y. Cao, "Tissue mimicking phantom for visualization of temperature elevation caused by ultrasound" (in Korean), *J. Acoust.*



- Soc. Kr. **33**, 291-299 (2014).
18. X. Fan and K. Hynynen, "The effect of wave reflection and refraction at soft tissue interfaces during ultrasound hyperthermia treatments," *J. Acoust. Soc. Am.* **91**, 1727-1736 (1992).
  19. R. Martinez, A. Vera, and L. Leija, "HIFU induced heating modelling by using the finite element method," *Phys. Procedia*, **63**, 127-133 (2015).
  20. S. Tanaka, K. Shimizu, S. Sakuma, T. Tsuchiya, and N. Endoh, "Experimental and numerical analysis of temperature rise in phantom caused by high-intensity focused ultrasonic irradiation," *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 07HF09 (2013).
  21. W. Nyborg, "Solutions of the bio-heat transfer equation," *Phys. Med. Bioi.* **33**, 785-792 (1988).
  22. U. Kaatz, K. Lautscham, and M. Brai, "Acoustical absorption spectroscopy of liquids between 0.15 and 3000 MHz: II. ultrasonic pulse transmission methods," *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **21**, 98-103 (1988).
  23. J. Kim, J. Kim, M. Kim, K. Ha, and A. Yamada, "Arrayed ultrasonic transducers on arc surface for plane wave synthesis," *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, 3061-3062 (2004).
  24. C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (Springer, New York, 2008), Chap. 12.

## 저자 약력

### ▶ 김 정 순 (Jungsoon Kim)



1996년 2월 : 부경대학교 물리학과 학사  
 1999년 2월 : 부경대학교 대학원 음향진동 공학과 석사  
 2002년 3월 : Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan 공학박사  
 2006년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 전기공학과 교수  
 관심분야 : 초음파 영상, 비선형음향, 초음파 분산, 의용 초음파

### ▶ 김 무 준 (Moojoon Kim)



1985년 2월 : 부경대학교 응용물리학과 학사  
 1990년 2월 : 부경대학교 대학원 응용물리학과 석사  
 1994년 3월 : Tohoku University, Japan 공학박사  
 1995년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 물리학과 교수  
 관심분야 : 초음파 트랜스듀서, 비선형음향, 초음파 분산, 수중음향