

뜸 자극용 초음파 치료기기의 음향렌즈 설계를 위한 초음파 집속 특성 연구

Study of Focusing Characteristics of Ultrasound for Designing Acoustic Lens in Ultrasonic Moxibustion Device

배재현*, 송성진*, 김학준*[†], 김기복**

Jae-Hyun Bae*, Sung-Jin Song*, Hak-Joon Kim*[†] and Ki-Bok Kim**

초 록 전통적인 뜬 요법은 시술자의 주관적이고 정성적인 치료로 인해 환자의 피부에 강한 열 자극이 가해져 심한 통증을 주거나 화상을 입히는 문제점을 갖고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 객관성과 정량화가 가능한 초음파를 활용한 뜬 자극 치료기술이 주목받고 있다. 하지만, 초음파 에너지를 열에너지로 변환하기 위해서는 초음파 치료기기의 음향렌즈에 따른 초음파 집속 특성 분석이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 초음파 집속 특성에 영향을 주는 음향렌즈의 형태(오목렌즈, 계단형 렌즈)에 따른 집속 시뮬레이션을 통해 각 렌즈의 음압 분포, 음압의 크기, 초점의 위치를 계산하였으며, 설계한 렌즈를 제작하여 음압 측정 실험을 통해 음향렌즈의 집속 성능을 검증하였다.

주요용어: 초음파, 음향렌즈, 음압 분포, 집속

Abstract Traditional moxibustion therapy can cause severe pain and leave scarring burns at the moxibustion site as it relies on the practitioner's subjective and qualitative treatment. Recently, ultrasound therapy has received attention as an alternative to moxibustion therapy owing to its objectiveness and quantitative nature. However, in order to convert ultrasound energy into heat energy, there is a need to precisely understand the ultrasound-focusing characteristics of the acoustic lens. Therefore, in this study, an FEM simulation was performed for acoustic lenses with different geometries a concave lens and zone lens as the geometry critically influences ultrasound focusing. The acoustic pressure field, amplitude, and focal point were also calculated. Furthermore, the performance of the fabricated acoustic lens was verified by a sound pressure measurement experiment.

Keywords: Ultrasonic, Acoustic Lens, Acoustic Pressure Field, Focusing

1. 서 론

한의학에서 뜬 요법은 인체의 경혈이 위치한 피부에 쑥과 같은 재료를 올려놓고 직접 연소시켜 열을 가하여 온열적 자극과 이종단백체인 히스토톡신에 의한 화학적 자극을 통해 질병을 예방 및 치료하는 자극요법이다[1]. 뜬 요법은 크게 3가지 효능을 가지고 있다. 첫 번째, 뜬의 열 자극은 세포의 움직임을 활발하게 하여 신경계에 영

향을 주어 생체반응이 일어나게 된다. 두 번째로 뜬은 피부에 작은 화상을 입혀 세포가 분해하여 나온 단백질이 혈액 내에 흡수되어 전신을 순환하며 각종 질병의 회복을 돕는다. 세 번째는 뜬이 자율신경과 호르몬 분비에 영향을 미쳐 신체의 균형을 이루는 것이다[2]. 이와 같은 뜬의 효능이 제대로 발휘되기 위해서는 일정한 자극량과 자극시간이 환부에 가해져야 하는데, 열 자극량이 강할 경우 심한 통증을 유발하며 피부에 화상

[Received: January 27, 2015, Revised: March 12, 2015, Accepted: March 12, 2015] *성균관대학교 기계공학과, **한국표준과학연구원, [†]Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea (E-mail: hjkim21c@skku.edu)

을 입히는 부작용이 발생할 수 있다[3]. 이처럼 뜸 요법에서 열 자극량을 조절하는 것이 중요하지만, 현재 시술자의 주관적이고 정성적인 방법으로 치료가 이루어지고 있어 객관성이 결여되고 정량적이지 못하여 안정성과 신뢰성에 대한 의구심이 지속적으로 제기되고 있다.

이러한 전통적인 뜸 요법의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 초음파 에너지를 이용한 뜸 치료 방법이 주목받고 있다. 미국의 경우 한국보다 한 방 관련 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 2009년 Eliaz Babaev가 초음파 에너지를 뜸 요법에 적용한 장치를 개발하였다[4]. 그러나 뜸 치료기에서 열 자극을 발생시키는데 중요한 음향렌즈에 관한 연구는 깊이 이루어지지 않았다.

따라서 본 논문에서는 뜸 요법이 가지고 있는 한계를 극복하기 위해 정확하고 효과적인 자극을 경혈에 줄 수 있는 뜸 자극용 초음파 치료기 설계에 관한 음향렌즈의 초음파 집속 특성에 대해 연구하였다. 이를 위해 이론적으로 음향렌즈를 설계한 후 시뮬레이션을 통해 음압 분포, 음압 크기, 초점 위치를 계산하였으며, 초음파 변환기에 음향렌즈를 부착하여 음압 측정 실험을 통해 렌즈의 성능을 검증하였다.

2. 음향렌즈 설계

뜸 자극용 초음파 치료기기는 전기적인 신호를 기계적인 진동으로 바꿔주는 초음파 변환기와 발생된 초음파를 하나의 초점으로 집중시키는 음향렌즈로 구성된다. 음향렌즈의 설계에 따라 초점거리, 음압 분포, 인체조직 내에서의 상승 온도가 달라지며, 이는 뜸 자극용 초음파 치료기기의 정확성과 효율에 가장 큰 영향을 준다.

렌즈의 형태나 재질을 정하기에 앞서서 몇 가지 고려해야 될 점이 있다. 우선 매질과 렌즈의 음향 임피던스 차이가 크지 않아야 한다. 만일 차이가 클 경우, 경계면에서 반사되어 많은 에너지 손실이 발생하게 된다. 또한, 빔을 집속시키기 위해서는 매질과 렌즈의 재질이 서로 다른 음속을 가져 굴절을 일으켜야 한다. 그리고 렌즈의 굴절률이 매질보다 높고, 낮은 음향계수를 가져야 초음파 에너지를 극대화할 수 있다[5].

그러나 이와 같은 조건을 만족시키는 재료는 찾기 어려우며, 가공의 용이성까지 고려했을 때

가장 적합한 재료는 PMMA(polymethyl methacrylate)나 에폭시(epoxy)이다. 금속재료에 비해 초음파 감쇠가 큰 편이지만, 음향 임피던스가 낮아 매질인 물과 차이가 상대적으로 크지 않다[6].

초음파 에너지를 집속하기 위한 렌즈 형태로는 단면 형상에 따라 원형 렌즈(spherical lens)와 계단형 렌즈(zone lens)를 적용하였다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 원형 렌즈의 경우, 오목렌즈와 볼록렌즈로 나눌 수 있다. 볼록렌즈는 오목렌즈에 비해 많은 양의 재료를 사용하며, 음향 수차 또한 크게 나타나기 때문에 오목렌즈를 선택하였다.

계단형 렌즈는 Tarnoczy가 최초로 제안한 렌즈로, 일정 간격으로 이루어져 있어 구면수차로 인해 발생하는 상쇄간섭을 보완해준다. 반면에 오목렌즈의 경우, 렌즈의 두께가 중심에서부터 곡선 형태로 증가하기 때문에 구면수차가 발생하여 집속점에서 상쇄간섭이 일부 발생한다[5]. 집속거리를 비교해 보면, Golis의 연구에서 계단형 렌즈가 오목렌즈에 비해 근거리 구간에서 집속 효율이 더 뛰어나다는 결과를 얻었으며, 원거리 구간에서는 반대로 오목렌즈의 집속 성능이 뛰어났다[7]. 주파수 측면에서는 오목렌즈의 경우 1~2 MHz보다 더 높은 주파수 용도로도 제작이 가능하지만, 계단형 렌즈는 1~2 MHz 이하에서 사용해야만 제작이 용이하다. 음압 분포의 경우, 계단형 렌즈는 오목렌즈가 하나의 초점에서 집속되는 것과 달리 다수의 집속점을 갖는 복잡한 음압 분포가 나타나는 문제점을 갖고 있다. 하지만, 정확한 렌즈 설계를 통해 다수의 집속점이 발생하는 현상을 감소시킬 수 있다.

본 논문에서는 오목렌즈와 계단형 렌즈를 선택하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

2.1. 오목렌즈 설계

오목렌즈를 설계하려면, 목표하는 초점거리를 정해야 한다. 그리고 초음파 변환기의 초점거리와 오목렌즈의 초점거리 계산을 통해 초음파 변환기와 렌즈가 결합된 시스템인 초음파 뜸 자극용 치료기기의 초점거리를 계산할 수 있다. 초음파 변환기의 초점거리는 다음과 같이 나타낸다[6].

$$F = \frac{r^2}{\lambda} \quad (1)$$

식(1)에서 F 는 초음파 변환기의 초점거리, r 은 요소소거의 반경, λ 는 매질에서의 파장을 나타낸다. 오목렌즈의 초점거리는 광학렌즈의 초점거리를 구하는 방식과 유사하며 식(2)로 나타낼 수 있다[6].

$$F = \frac{R}{1 - \left(\frac{c_3}{c_2}\right)} \quad (2)$$

식(2)에서 F 는 초음파 변환기의 초점거리, R 은 렌즈의 곡률 반경, c_3 은 매질의 음속, c_2 는 렌즈의 음속을 나타낸다. 초음파 변환기와 렌즈가 결합된 시스템, 즉 뜰 자극용 초음파 치료기기의 초점거리는 다음과 같이 구할 수 있다[5].

$$F = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2} \quad (3)$$

식(3)에서 F 는 전체 시스템의 초점거리이며, f_1 은 식(1)에서 구한 초음파 변환기의 초점거리, f_2 는 식(2)에서 구한 렌즈의 초점거리이다.

오목렌즈 설계 시 고려해야 될 중요한 부분은 투과된 음향에너지에 영향을 주는 렌즈 중앙부의 두께이다. 이를 결정하기 위해서 Fig. 1과 같은 다중 매질 구조를 투과한 음향에너지(T)는 식(4)를 이용한다[6].

$$T = \frac{4Z_3 Z_1}{(Z_3 + Z_1)^2 \cos^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2} + (Z_2 + \frac{Z_3 Z_1}{Z_2})^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}} \quad (4)$$

식(4)의 Z 는 Fig. 1에서 각 매질의 음향 임피던스를 나타내며, d_2 는 렌즈 중앙부의 두께, λ_2 는 렌즈의 파장을 의미한다.

식(4)는 식(5)와 식(6)의 조건을 만족할 때, 음향에너지(T)는 1이 되며, 초음파가 매질(물)로 최대에너지가 투과된다.

$$d = \frac{(2n - 1)\lambda}{4} \quad (5)$$

식(5)의 d 는 렌즈 중앙부 두께이며, n 은 상수, λ 는 렌즈의 파장을 나타낸다.

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \quad (6)$$

식(6)의 Z_1 은 초음파 변환기의 음향 임피던스, Z_2 는 렌즈의 음향 임피던스, Z_3 은 매질의 음향 임피던스를 의미한다.

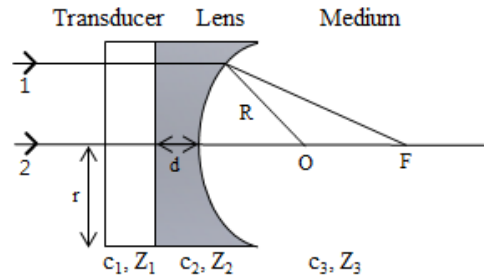


Fig. 1 Focal point of plano-concave lens with ultrasonic transducer (λ is wavelength, F is focal point)

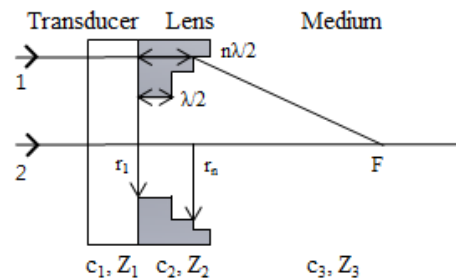


Fig. 2 Focal point of zone lens with ultrasonic transducer (λ is wavelength, F is focal point)

Fig. 1은 초음파 변환기에 오목렌즈가 결합된 시스템의 초점거리를 구하기 위한 식(1-6)을 설명해주는 그림이다.

본 논문에서는 오목렌즈 중앙부의 두께는 $\lambda/4$, $3\lambda/4$ 두 종류로 설계하였으며, 렌즈의 초점거리는 렌즈 끝 부분을 기준으로 7 mm로 정하였다.

2.2. 계단형 렌즈 설계

계단형 렌즈도 오목렌즈와 마찬가지로 초점거리를 선정 한 후에 설계가 가능하다. 그러나 오목렌즈와 달리 각각 계단의 폭인 r_n 과 계단의 높이를 계산해야 한다. Fig. 2에 1번과 2번 경로를 따라 초음파가 초점(F)까지 걸린 시간이 서로 같다는 것을 이용하여 r_n 을 구할 수 있으며 식은 다음과 같다[5].

$$r_n = \sqrt{\left(f - \frac{n\lambda}{2} \times \frac{c_3}{c_2}\right)^2 - \left(f - \frac{n\lambda}{2}\right)^2} \quad (7)$$

식(6)의 r_n 은 n 번째 원의 반경, F 는 초점거리, λ 는 렌즈의 파장, c_2 는 렌즈의 음속, c_3 은 매질의 음속을 나타낸다.

본 논문에서는 계단형 렌즈의 각 계단의 높이를 $\lambda/2$, $\lambda/4$ 두 종류로 설계하였으며, 렌즈의 초점거리는 오목렌즈와 동일하게 렌즈 끝부분을 기준으로 7 mm로 정하였다.

3. FEM 시뮬레이션

3.1. FEM 시뮬레이션 모델 형상 및 설정

설계한 오목렌즈와 계단형 렌즈를 통과한 초음파 빔의 음압 분포를 분석하기 위한 FEM 시뮬레이션 프로그램인 COMSOL Multi-physics의 Acoustics 모듈을 활용하였다. 모델은 오목렌즈 2개($\lambda/4$, $3\lambda/4$)와 계단형 렌즈 2개($\lambda/2$, $\lambda/4$)로 설정하였으며, 모델 형상은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 초음파 변환기는 0.5in 구경의 1 MHz 주파수를 이용하였으며, 렌즈의 재질은 PMMA(밀도 1190 kg/m^3 , 음속 2830 m/s)를 적용하였다. PMMA는 아크릴계 재료로, 광학적 투명도와 균질성이 좋아 광학 분야에서 렌즈용으로 많이 사용되고 있다. 주파수 영역에서 평면파를 가진하였으며, 모델의 외곽 경계 부분은 plane wave radiation 경계 조건을 주어 초음파가 전파할 때 적은 반사가 일어나도록 설정하여 관심영역인 초점에 주는 영향을 최소화 하였다. 그리고 음향렌

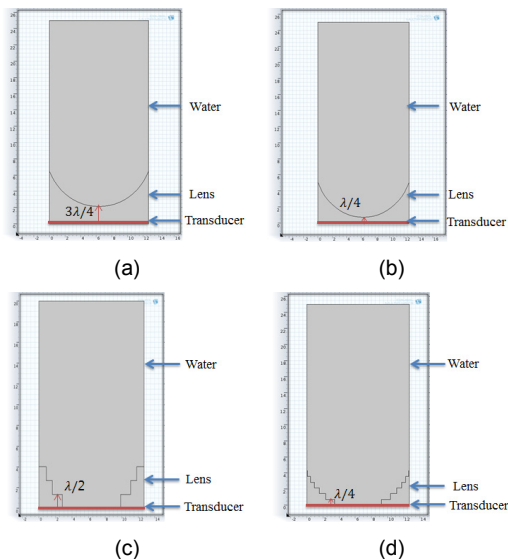


Fig. 3 Geometry of simulation model: (a) $3\lambda/4$ concave lens, (b) $\lambda/4$ concave lens, (c) $\lambda/2$ zone lens, (d) $\lambda/4$ zone lens

즈와 매질인 물의 경계면에서는 정상적으로 반사가 일어나도록 설정하였다.

3.2. FEM 시뮬레이션 결과

Fig. 4는 형태가 다른 4개의 음향렌즈를 주파수 영역에서 FEM 시뮬레이션을 수행하여 얻은 절대음압 분포를 나타낸 것이다. 각 렌즈의 최대 음압은 초점에서 나타났으며, 최대 음압은 (a)는 0.801 MPa, (b)는 0.834 MPa, (c)는 0.994 MPa, (d)는 1.079 MPa로 $\lambda/4$ 계단형 렌즈에서 가장 크게 나타났다. 2 종류의 오목렌즈 (a)와 (b)를 비교해보면 중앙부 두께가 $3\lambda/4$ 인 경우보다 $\lambda/4$ 인 경우 초점에서 음압이 높게 나타났다. $\lambda/2$ 계단형 렌즈의 경우 2개의 오목렌즈에 비해 초점에서의 음압은 높게 나타났지만, 초점 이외의 영역에서도 음압이 높은 집속점이 여러 군데 형성되었다.

Fig. 5는 시간 영역에서 펄스 신호를 가진하여 렌즈가 결합된 초음파 변환기의 중심축 상에서의 1 MHz에서의 초음파 진폭 변화 크기로 나타냈다.

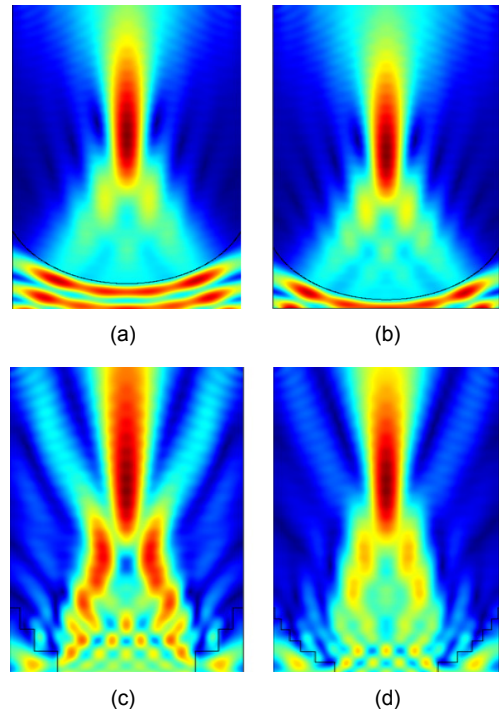


Fig. 4 Simulation results of absolute acoustic pressure distribution: (a) $3\lambda/4$ concave lens, (b) $\lambda/4$ concave lens, (c) $\lambda/2$ zone lens, (d) $\lambda/4$ zone lens

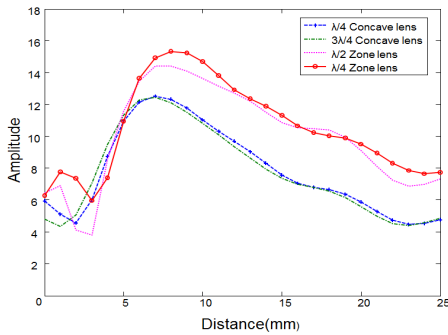


Fig. 5 Simulation results of on-axis amplitude profile at 1 MHz from the edge of the lens

그 결과 음압 분포는 4개 렌즈 모두 초점까지는 음압 크기가 가파르게 상승하였으며, 초점 이후에는 완만하게 감소하였다. 2개의 오목렌즈의 경우 표의 경향과 음압 크기에 있어서 큰 차이가 나타나지 않았다. 반면에, 계단형 렌즈의 경우 $\lambda/4$ 의 계단 높이를 사용하였을 때 $\lambda/2$ 의 계단 높이를 사용했을 때보다 음압 크기의 차이가 크게 나타났다. 각 렌즈의 최대 음압은 오목렌즈의 경우 7 mm, 계단형 렌즈의 경우 8 mm에서 나타났다.

4. 음향렌즈 집속 성능 실험

4.1. 음향렌즈 제작

시뮬레이션 결과를 토대로 음향렌즈의 집속 성능을 검증하기 위해 렌즈를 제작하였으며, 렌즈의 재질은 PMMA를 사용하였다. Fig. 6은 제작한 렌즈의 사진이며, 각 렌즈의 사양은 Fig. 7과 같다. 오목렌즈 (a)는 곡률 6.80 mm, 중앙부 두께(d)는 2.12 mm($3\lambda/4$)와 0.71 mm($\lambda/4$) 2가지 형태이며, 계단형 렌즈 (b)는 각각의 계단 높이를 1.42 mm($\lambda/2$)와 0.71 mm($\lambda/4$) 2가지 형태로 제작하였다.

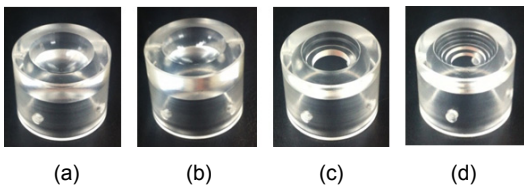


Fig. 6 Fabricated acoustic lens with PMMA: (a) $3\lambda/4$ concave lens, (b) $\lambda/4$ concave lens, (c) $\lambda/2$ zone lens, (d) $\lambda/4$ zone lens

4.2. 실험 장비

본 연구에서는 초음파 변환기와 렌즈가 결합된 시스템의 on-axis 음압 분포를 측정하기 위해 Fig. 8과 같이 실험 장비를 구축하였다.

펄서리시버(PR5800, Panametrics)를 이용하여 수침용 초음파 변환기(구경 0.5in, 1 MHz)에 펄스 신호를 발생시켰다. 음향렌즈를 통과한 초음파의 음압 측정은 렌즈가 결합된 초음파 변환기와 음압측정기(Pinducer, CTS Valpey Fisher)를 이용하였다. 서로 같은 선상에 위치시킨 후, 음압측정기를 Fig. 9의 원점 O(렌즈의 끝 부분)에서부터 X축 방향으로 1 mm씩 25 mm까지 자동스캐너로 이동하며 오실로스코프(6100A, LeCroy)로 데이터를 수집하였다.

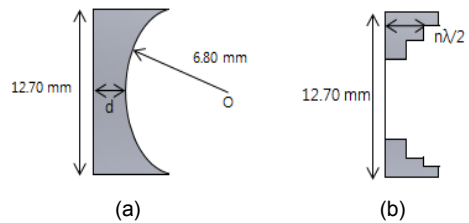


Fig. 7 Specification of fabricated acoustic lens: (a) concave lens, (b) zone lens

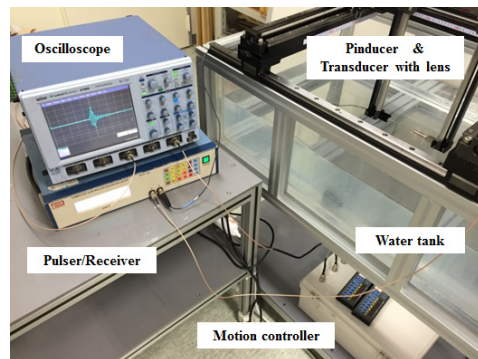


Fig. 8 Photo of acoustic pressure measurement system

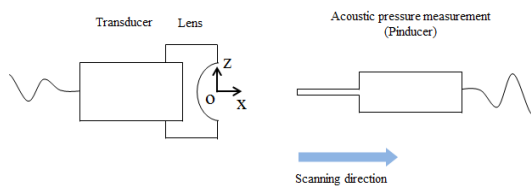


Fig. 9 Schematic diagram of acoustic pressure measurement experiment

5. 실험 결과 및 고찰

Fig. 9는 Fig. 5의 시뮬레이션 결과와 같은 방법으로 중심축 상에서 1 MHz에서의 초음파 진폭 변화 크기를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 계단형 렌즈의 집속 성능이 오목렌즈에 비해 음압이 크게 측정되었으며, $\lambda/4$ 계단형 렌즈의 음압이 가장 크게 나타나 집속 성능이 다른 렌즈에 비해 우수한 결과를 얻었다.

그러나 시뮬레이션 결과 Fig. 5와 비교하였을 때 실험 결과 Fig. 9의 차이점은 다음과 같다.

- 1) 최대 음압이 나타난 위치가 계단형 렌즈의 경우 9 mm로 시뮬레이션 결과보다 1 mm 뒤에서 측정되었다.
- 2) 시뮬레이션 결과에서는 두 개의 오목렌즈의 전체 음압 분포가 유사하였지만, 실험 결과에서는 $\lambda/4$ 오목렌즈가 $3\lambda/4$ 오목렌즈보다 최대 음압이 1.5배 이상 크게 측정되었다.

1)번의 경우, 계단형 렌즈의 최대 음압이 나타난 지점의 변화는 음향렌즈를 가공하는 과정에서 발생한 오차이다. 계단형 렌즈에서 초점거리에 영향을 주는 부분은 계단의 폭과 높이인데, 가공한 렌즈의 경우 설계한 값과 ± 0.05 mm 이내의 공차를 갖기 때문에 시뮬레이션 모델의 렌즈 형상과의 차이가 집속점의 차이로 나타났다.

2)번의 경우, $3\lambda/4$ 오목렌즈의 음압이 실험에서 크게 감소한 원인은 다른 렌즈에 비해 상대적으로 중앙부가 두껍기 때문에 렌즈를 통과한 초음파가 크게 감쇠하여 발생한 결과이다. $3\lambda/4$ 오목렌즈는 중앙부 두께가 2.12 mm이며, $\lambda/4$ 오목렌즈는 중앙부 두께가 0.71 mm이다.

음향렌즈 가공 시 오차를 줄인다면 계단형 렌즈도 시뮬레이션 결과와 같은 위치에서 최대 음압을 얻을 수 있다.

6. 결론

초음파 변환기에 렌즈가 결합된 시스템인 뜸 자극용 초음파 치료기기의 음압 분포와 초점의 위치를 FEM 시뮬레이션을 통해 예측하였으며, 음향렌즈의 집속 성능 실험을 통해 음향렌즈의 형태에 따라 음압 분포가 어떻게 달라지는지 확

인하였다. 또한, 음압 크기는 시뮬레이션과 실험 결과를 직접적으로 비교할 수는 없지만, $\lambda/4$ 계단형 렌즈의 음압이 초점에서 가장 높게 나타나 뜸 자극용 초음파 치료기기의 음향렌즈로 계단형 렌즈가 오목렌즈에 비해 효과적이었다. 이는 계단형 렌즈의 경우 일정한 높이 간격으로 이루어져 있어 집속점에서 같은 위상을 갖는 파의 집속으로 인해 오목렌즈에서의 구면수차가 발생하지 않아 적은 상쇄간섭을 일으키기 때문이다. 그러나 계단형 렌즈를 사용할 경우 음압 분포가 복잡하여 온도 분포 측정 연구를 통해 적용 가능성에 대해 추가적인 검증이 필요하다.

본 연구를 기반으로 뜸 자극용 초음파 치료기기를 인체조직 또는 인체 유사 조직에 적용하였을 때, 초점에서의 상승 온도 측정 연구가 앞으로 진행되어야 한다. 또한, 펄스파가 아닌 연속적인 정현파를 발생시킬 수 있는 시스템을 구축하여 성능 평가가 이루어진다면, 뜸 자극용 초음파 치료기기에 최적화된 음향렌즈 설계가 가능하다.

후 기

This work was supported by the Korea Research Council of Fundamental Science & Technology (KRCF) grant funded by Ministry of Science, ICT and Future Planning(MSIP) of the Korea government (P14020) and the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (No. 2012R1A1A2044423).

참고문헌

- [1] J. Y. Cha, H. S. Myoung, S. P. Cho and K. J. Lee, "Development of deep-heating stimulation system for substituting the heat effect of moxibustion," *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 46, No. 6, pp. 50-57 (2009)
- [2] N.-S. Kim, "Theory and practice of moxibustion for lifelong health," *Legitimacy Acupuncture & Moxibustion Research Institute* (Korean), pp. 15-16 (2008)
- [3] Y. B. Park and W. Huh, "A Study of the patterns of combustion temperature by toni-

- fication and sedation method on the heat," *Journal of Korean Institute of Oriental Medical Diagnostics*, Vol. 3, No. 2, pp. 82-94 (1999)
- [4] E. Babaev, "Ultrasound moxibustion method and device." U.S. Patent Application 12/024, 521 (2008)
- [5] T. Tarnoczy, "Sound focusing lenses and waveguides," *Ultrasonics*, Vol. 3, No. 3, pp. 115-127 (1965)
- [6] J. Li, C. R. Friedrich and R. S. Keynton, "Design and fabrication of a miniaturized, integrated, high-frequency acoustical lens-transducer system," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 12, No. 3, p. 219 (2002)
- [7] M. J. Golis, "An analysis of the ultrasonic zone lens," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. 15, No. 2, pp. 105-110 (1968)