

초음파트랜스듀서의 재질에 따른 실출력과 인체모사조직의 온열효과에 관한 연구

유상현 · 최원재 · 이승원[†]

삼육대학교 대학원 물리치료학과, ¹삼육대학교 물리치료학과

A Study on the Actual Output and Thermal Effect in Tissue Mimicking Phantom by the Material of the Ultrasonic Transducer

Sang-Hyun Yoo, PT, MSc, Won-Jae Choi, PT, PhD, Seung-Won Lee, PT, PhD[†]

Department of Physical Therapy, The Graduate School of Sahmyook University

¹Department of Physical Therapy, Sahmyook University

Received: January 16, 2015 / Revised: January 27, 2015 / Accepted: January 29, 2015

© 2015 J Korean Soc Phys Med

| Abstract |

PURPOSE: In this study investigated the thermal effect in tissue mimicking phantom by the material of the ultrasonic transducer in low intensity sonication.

METHODS: The material of the ultrasonic transducer was made of ceramic, stainless steel, aluminum. Korea Testing Laboratory was measured of the three kinds of materials the total output of the ultrasonic transducer. Each material was measured core temperature and the actual output depending on the type of transducer. Agarose tissue mimicking phantom and silicone tissue mimicking phantom was made. Transducers made of three kinds of materials were emitted in the phantom. It is shown as a graph about time and temperature and the surface temperature rising speed and deep

temperature rise rate was investigated.

RESULTS: Ceramic transducers were highest output. Higher than the stainless steel transducer, aluminum had the lowest total output. Deep temperature was the highest in the ceramic transducer, and the surface temperature was the highest in the stainless steel transducer. Thermal images of ceramic transducer showed that a valid output is formed deeper wider than the metal.

CONCLUSION: Ceramic transducer is confirmed the excellence than the metal transducer in deep thermal effect and the actual output of the ultrasound.

Key Words: Mimicking phantom, Transducer, Sonication, Thermal effect

[†]Corresponding Author : swlee@syu.ac.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

압전기(Piezoelectric)의 압전체는 전계의 방향을 바꾸면 일정한 방향으로 원자의 결정 배열이 바뀌어 극성

분자가 결합되도록 설계된 인공 파인세라믹 결정체이다. 이러한 압전 현상을 이용한 초음파는 초당 백만번에서 일억번까지 진동제어가 가능하여 미세한 진동효과로 인체 깊숙한 곳까지 마이크로 마사지 효과와 세균 및 박테리아의 증식을 억제하고 세포의 활동을 활성화시키고 혈액 및 림프의 흐름을 촉진시켜 면역체계를 활성화시킨다(Shanks 등, 2010). 초음파는 음파의 형태이기 때문에 금속 삽입물이 생체조직 내에 있어도 비교적 안심하고 사용할 수 있다(Kocaoglu 등, 2011). 초음파 치료에 있어서 초음파가 매질 및 인체 조직에 미치는 영향은 크게 열적 효과와 기계적 효과로 구분할 수 있다. 일과성 공동화 현상은 주로 강한 초음파 조사나 유체의 속도가 증가할 때 기포 내부의 압력이 포화증기압보다 낮은 조건에서 기화되는 현상으로 액체가 가열될 때 발생하는 비등과는 구분된다(Bader 등, 2012).

짧은 시간 동안 고온으로 유지할 때 빠르게 열에 의한 독성이 발생하고 이에 따른 응고성 과사가 비가역적으로 세포를 죽이게 된다. 이와 같은 원리로 궤양 및 암 조직에 고출력 초음파의 적용은 조직에 유착된 노폐물 제거는 물론, 세포의 치료와 파괴가 동시에 가능하다(Zhong 등, 2012). 또한, 고출력 초음파 시술 시 공동화 현상에 의해 매질 내부에 미세 기포가 존재하면 더욱 많은 온도 상승이 유발되고, 온도 상승에 소요되는 시간도 단축된다는 현상이 보고되면서 각종 치료 초음파에 공동화 현상을 이용하기 위한 연구가 지속적으로 증가하는 추세이다(Daniels 등, 2008).

금속은 양이온과 자유전자 사이의 정전기적인 인력에 의한 결합이므로 에너지를 받을 경우 격자진동과 전도 전자로 에너지를 매우 잘 흡수한다. 파인세라믹은 원자간 결합력이 강하고 금속보다 우수하여 녹는점이 2배가량 더 높고, 원자의 구조가 규칙적이고 조밀하므로 초음파에너지를 더 빠른 전달속도로 재료 내 감쇠가 없이 잘 전달할 수 있다. 또한 파인세라믹은 금속과 같은 자유전자가 없으므로 열과 전기를 잘 통하지 않아 서서히 가열된다. 금속은 원자의 음향진동을 전도 전자가 흡수해서 금속의 온도를 올리는데 사용하고, 초음파 에너지의 자체 감쇠가 커서 트랜스듀서 가열로 인한 온도상승이 발생하여 초음파 중재 시에 불편하며, 피부

화상을 입힐 확률이 높아진다.

초음파 트랜스듀서의 재질은 일반적으로 높은 동적 피로강도, 낮은 음향소실, 공동화 현상에 대한 저항, 화학적 불활성 내가지 특성이 요구된다. 보통 티타늄, 알루미늄, 스테인리스강 재질이 가장 널리 사용되고 있다. 티타늄합금은 음파의 전달률은 좋으나 단가가 비싸고, 알루미늄은 가공이 쉽고 음파 전달률은 좋으나 물과 만나면 이온화하여 산화물을 생성시킴으로써 인체에 유해한 독소를 생성되고(Verstraeten 등, 2008), 스테인리스강은 현재 널리 쓰이고는 있으나 비중이 커서 무겁고 재료의 내부 기포로 인한 음향손실이 크므로 좋은 출력을 얻기가 힘들고 전기열전도도가 높아 초음파에너지 감쇠로 인한 열발생이 많은 단점이 있다(Kabdasli 등, 2009; Ploix 등, 2014). 하지만, 파인세라믹은 가볍고 경도가 높으며, 서로 다른 물질의 경계면에서 초음파에너지의 손실을 줄이고 트랜스듀서의 음파 전달속도를 높일 수 있다. 파인세라믹은 금속도 아니고 또한 유기물도 아닌 비금속 무기고체 재료라고 말할 수 있다. 이는 지금까지 기대할 수 없었던 새로운 기능을 부여하여 전기적 기능, 자기적 기능, 기계적 기능, 열적 기능, 생체적 기능, 화학적 기능 등이 창출되기도 한다(Kharaziha과 Fathi, 2010; Tsai 등, 2009).

금속결합은 방향성이 없고, 이온결합이나 공유결합보다 결합력이 약하며, 금속 트랜스듀서는 흡수된 음파 에너지가 전도 전자에 의해 열로 바뀌고, 양도체이므로 진동자와 같이 저항값으로 작용하여 회로의 저항에 영향을 주는 단점이 있다(Soloviev과 Gedanken, 2011). 반면에, 파인세라믹 트랜스듀서는 부도체이므로 회로의 저항 값에 영향을 주지 않아 진동자가 초음파발생에 최적의 회로조건을 가질 수 있다(Sammoura 등, 2013). 파인세라믹은 화학적으로 안정적이기 때문에 내식성이 좋고, 물과 만나 이온화하지 않으므로 생체 친화성이 우수하다. 그러므로 산화물을 형성하지 않고 피부에도 안전하며, 지구상에 가장 풍부하게 존재하는 원소이므로 가격 경쟁력 또한 우수하다.

이에 본 연구에서는 파인세라믹, 스테인리스, 알루미늄으로 만든 트랜스듀서의 재질에 따른 초음파치료기 실출력 값을 측정하고 심부온열효과에 미치는 영향

에 관해 조사하여, 초음파감쇠로 인한 트랜스듀서의 재가열 손실이 적으면서 실출력이 우수한 초음파 트랜스듀서의 재질을 알아보고자 한다.

II. 연구 방법

1. 연구재료

본 연구에서는 각기 다른 재질의 초음파 트랜스듀서의 가열특성을 평가하기 위하여 한천모형, 실리콘모형을 제작하였고, 조직유사모형 내 온도 측정을 통하여 공동화 현상으로 인한 초음파 가열 특성을 관찰 하였다. 한천모형은 식물성 밀양 한천(Agapowder, Labcloud, Korea)을 이용하였고 실리콘모형은 공업용 실리콘(KE-1606, Shin Etsu, Japan)을 사용하였다. 본 연구에서는 공동화 현상에 의한 가열 특성의 평가가 목적이므로 단일 물질로 구성된 모형을 이용하였다. 모형의 제작은 가루 형태의 한천을 증류수에 용해시킨 후 경화시켜 사용하였으며, 한천모형과 실리콘모형의 크기는 가로 8 cm, 세로 11.2 cm, 높이 11.2 cm로 제작하였다. 모형의 농도는 인체 내 음향 속도인 1,540 m/s와 유사한 특성을 갖도록 설정하였는데(Li 등, 2013), 이를 위하여 한천의 농도를 3%와 10%로 제작하였다.

2. 실험방법

1) 실험방법

본 연구에서 초음파 가열 특성 관찰 실험을 위해 초음파치료기(BD-001, Sonic Tech, Korea)를 사용하였다. 주파수는 1 MHz를 사용하고, 진동자의 직경은 3 cm로 동일한 진동자를 사용하였다. 실험에 사용된 매질은 초음파겔을 사용하였고, 초음파 적용강도는 1 MHz, 3 W/cm²로 5분간 사인파를 고정법으로 연속으로 적용하였다.

2) 측정방법

초음파 치료기의 트랜스듀서 재질에 따라 정확하고 신뢰성 있는 실출력 값을 측정하고자 한국산업기술시

험원에 실험을 의뢰하였다. 파인세라믹, 스테인리스, 알루미늄 재질의 트랜스듀서를 초음파치료기에 연결하여 3가지 재질을 통과하여 나온 실출력 값을 초음파 출력측정기(UPM-DT-50SP, Ohmic Instruments Co, USA)를 사용하여 10회 측정하였다. 그리고 각 재질로 만든 트랜스듀서를 사용하여 사전에 제작된 조직유사 모형에 초음파를 조사하면서 시간에 따라 심부온도계(GT-370, Giltron, Japan)를 사용하여 표면온도와 심부온도를 측정하였다. 표면온도는 조직유사모형의 표면 온도를 측정하였고, 심부온도는 모형의 표면에서 5cm 아래를 기준으로 하여 측정하였다. 5분간 30초 마다 온도를 측정하여 기록하였으며, 이를 토대로 분당 온도의 상승속도를 구하였다.

3. 분석 방법

본 연구의 분석은 파인세라믹, 스테인리스, 알루미늄 재질의 초음파 트랜스듀서의 조사 시 발생하는 실출력을 한국산업기술시험원에 측정을 의뢰하였으며, 5분 동안 세가지 재질의 트랜스듀서를 조사하여 시간에 따른 모형의 온도 변화를 측정하여 심부온도와 표면온도의 상승속도를 구하고 시간에 따른 온도 그래프와 유효출력의 이미지를 열화상카메라로 촬영하여 분석하였다.

III. 연구 결과

1. 한국산업기술시험원의 초음파 실출력 측정시험결과

한국산업기술시험원에서 파인세라믹, 스테인리스, 알루미늄 재질의 초음파 트랜스듀서의 실출력을 측정한 결과는 다음과 같았다. 초음파치료기의 실출력 측정 방법은 최고출력으로 연속으로 조사하여 트랜스듀서마다 각각 10회 측정된 출력값의 평균을 구하였다. 측정결과 파인세라믹 트랜스듀서가 가장 실출력이 높게 나타났으며, 스테인리스 트랜스듀서, 알루미늄 트랜스듀서 순으로 출력값이 측정되었다(Table 1).

2. 초음파 조사 시 한천모형과 실리콘모형의 온도측정 각각의 트랜스듀서로 조사한 후 모형의 측정된 온도

Table 1. Ultrasonic output measurement of Korea Testing Laboratory (Unit: W)

| | Fine Ceramics | Stainless | Aluminum |
|------------|---------------|-----------|----------|
| 1 session | 13.15 | 12.80 | 10.30 |
| 2 session | 13.10 | 12.85 | 10.10 |
| 3 session | 13.05 | 12.05 | 10.40 |
| 4 session | 13.40 | 11.80 | 10.20 |
| 5 session | 12.95 | 11.70 | 10.25 |
| 6 session | 12.90 | 12.30 | 10.10 |
| 7 session | 12.85 | 11.80 | 9.95 |
| 8 session | 13.25 | 11.75 | 10.10 |
| 9 session | 12.85 | 11.60 | 10.00 |
| 10 session | 13.05 | 12.35 | 9.90 |
| Average | 13.06 | 12.10 | 10.13 |

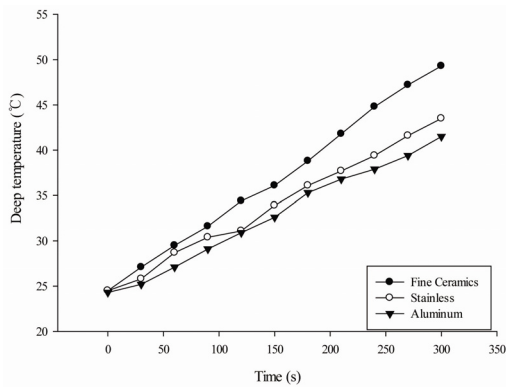


Fig. 1. Deep temperature graph of agarose tissue mimicking phantom over time

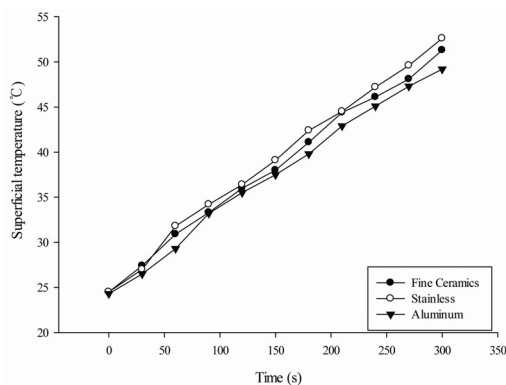


Fig. 2. Superficial temperature graph of agarose tissue mimicking phantom over time

값을 기록하고 시간에 따른 온도변화 그래프로 나타내었다. 심부온도 상승속도는 파인세라믹이 가장 크게

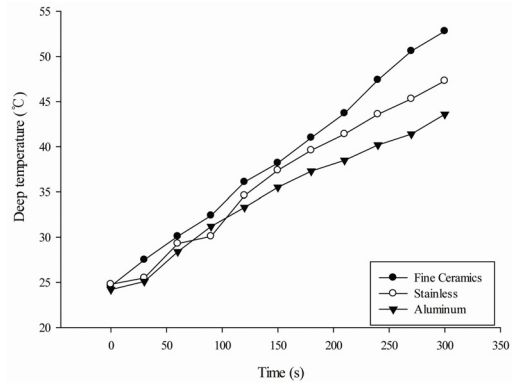


Fig. 3. Deep temperature graph of silicon tissue mimicking phantom over time

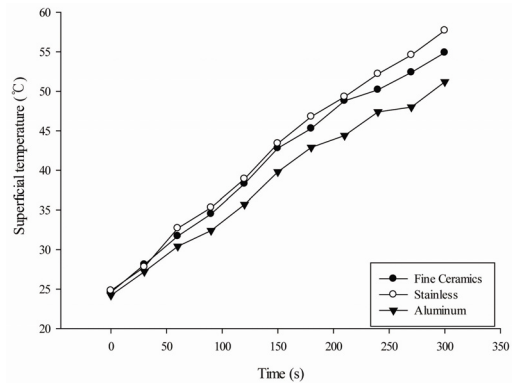


Fig. 4. Superficial temperature graph of silicon tissue mimicking phantom over time

측정되었고, 표면온도상승속도는 스테인리스가 가장 크게 측정되었다(Fig 1, 2, 3, 4).

IV. 고찰

본 연구에서는 초음파치료기의 트랜스듀서의 재질에 따른 온열효과에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다. 각각의 트랜스듀서의 조사결과 파인세라믹, 스테인리스, 알루미늄 트랜스듀서의 순으로 실출력 값의 세기가 측정되었고, 초음파 트랜스듀서의 재질에 따라서 표면온도와 심부온도 측정값에 차이가 있었으며, 평균온도 상승속도 값 또한 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서, 동일한 초음파치료기에 동일한 크기의 초

음파 압전 진동자를 사용하더라도 트랜스듀서 재질에 따라 실제 조사되어 나오는 실출력 값이 차이가 나는 것을 확인하였다. 초음파 전달속도는 분자간의 인력이 크고 입자수가 많을수록 증가하고, 비중이 클수록 감소하는 경향성을 나타낸다 (Levy 등, 2007). 한천과 실리콘 모형을 각각의 트랜스듀서로 초음파를 조사하였을 때 파인세라믹 트랜스듀서로 조사할 때의 심부온도가 가장 높고 빠르게 증가하는 것으로 측정되었다. 표면온도는 스테인리스재질의 트랜스듀서로 조사하였을 때 가장 높고 상승속도도 가장 높게 측정되었다. 따라서 파인세라믹 트랜스듀서를 사용하면 표피가 뜨거워 증재하는 불편함을 상당부분 줄이고 심부온열효과를 높이며 피부화상의 위험을 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 그리고 트랜스듀서 내의 감쇠로 인한 초음파에너지의 손실을 효과적으로 줄일 수 있을 것이다. 스테인리스 트랜스듀서 사용시에는 재질자체 감쇠로 인한 가열로 심부온열효과가 낮고, 임상 적용 시 불편하고 화상의 위험이 우려된다. 시간에 따른 모형의 온도분포에서 파인세라믹 트랜스듀서는 표면온도와 심부온도가 차이가 적고, 비슷하게 높아져가는 경향을 보이는 반면, 스테인리스 트랜스듀서는 표면온도의 증가가 심부온도의 증가보다 크게 측정되었다. 알루미늄 트랜스듀서는 출력과 온열상승효과가 가장 낮게 측정되었다. 뿐만 아니라 모형물질의 종류, 농도, 온도에 따라 초음파의 투과되는 깊이에 차이가 있을 수 있다는 것을 확인하였다.

초음파 공동화 현상은 초음파 물리 현상 중 하나로 음향학적 진동에 의해 미세기포가 발생하는 메커니즘을 뜻하며 이는 의학 분야에 적용이 가능하다. 매질 내에 강력한 초음파를 조사하면 양압과 음압이 반복적으로 발생하게 된다. 음압 주기 때 분자를 중심으로 기포가 발생한다. 이 기포는 다음 양압 주기 때에 고압으로 압축된다. 압축력 매질의 표면 장력보다 작을 때 기포는 소멸되지 않고 다음 음압 주기에서 팽창하며 기포의 반지름이 변화하게 된다. 이러한 과정이 무수히 반복되며 일정 압력이상(표면장력 이상)이 되면 미세기포는 폭발하면서 매우 큰 충격파를 일으키게 된다 (Baac 등, 2013). 선행연구를 통하여 공동화 현상으로 효과적인 온열효과를 얻을 수 있다는 것이 밝혀졌다

(Liu 등, 2006a; Liu 등, 2006b; Sokka 등, 2003). 특히 조직 괴사실험에서 공동화 현상을 이용한 경우 치료면적이 2-3배 정도 크게 나타남으로써 짧은 치료시간으로도 보다 적은 에너지를 이용하여 미세한 일과성 공동화 현상(transient cavitation)으로 만족할 만한 치료효과를 얻을 수 있다. 즉, 초음파 치료에서 공동화 현상을 이용할 경우 기존의 치료보다 보다 적은 에너지가 사용되고 치료면적이 보다 넓게 나타남으로써 공동화 현상의 제어 수행되어질 경우 국소 부위에 대한 초음파 온열 치료의 효율성을 높일 수 있다. 따라서 최근에는 트랜스듀서의 중심주파수, 초음파 강도, 조사 시간, 매질의 온도에 따른 최적화된 공동화 현상의 발생과 일과성 효과에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

본 연구를 진행하면서 고려하지 못한 사항들과 향후에 이루어져야 할 연구 요소들은 다음과 같다. 실험에 사용되었던 조직유사모형 내부의 온도 측정을 위한 온도계 표면에서 초음파 진행을 방해하는 요소로 작용하며, 또한 접촉 부위에서 온도의 상승이 일어날 수 있으므로 향후 연구에서는 초음파의 진행에 최소의 영향을 끼칠 수 있는 적절한 온도 센서가 선택되어야 할 것이다.

온도와 초음파의 음장(sound field) 측정을 수행함에 있어 중심을 정확하게 잡지 못하여 실험 측정에 어려움이 있었다. 초음파 감쇠를 고려한 조직유사모형에 의한 실험 결과와의 단순 비교로 인체에 적용하기에는 아직 미진한 단계의 실험이며, 인체의 복잡한 해부학적 구조에 대한 고려가 부족하였다.

차후에 진행되는 연구에서는 인체의 해부학적인 충분한 고려를 바탕으로 실험이 시뮬레이션 되어야 할 것이며, 다양한 인체의 해부학적 구조와 비슷한 형태의 모형을 제작하여 실험을 수행하여 정량적인 비교가 되도록 해야 할 것이다.

V. 결론

초음파는 치료하고자 하는 곳에 조사하여 공동화 현상의 역학적 에너지가 인체조직과 물분자의 공명을 통해 열로 전환되는 것으로 출력이 지나치게 높으면 조직을

손상시키는 단점이 있었다. 따라서 조직의 손상을 줄이면서 저강도로 충분한 유효출력을 내고 트랜스듀서의 자체감쇠를 줄이는 기술이 필요하였다. 기존의 금속 트랜스듀서는 바다면이 편평하여 중재 시 중심부가 피부에 닿지 않아 자체과열이 더 빨리 이루어지는 단점이 있었으나 중심부가 볼록한 파인세라믹 트랜스듀서는 중재 시에 보다 나은 피부밀착상태를 유지하여 공기층 반사로 인한 재가열을 줄이고 심부온열치료효과를 높일 수 있다.

본 연구의 실험결과 현재 주로 쓰이는 스테인리스, 알루미늄재질보다 파인세라믹 재질의 트랜스듀서로 초음파를 조사할 때 초음파의 실제출력과 심부온열효과가 더 우수함을 시험인증기관의 실험으로 확인하였다. 따라서 파인세라믹 재질의 초음파 트랜스듀서를 이용함으로써 초음파에너지의 트랜스듀서 내부감쇠로 인한 손실을 줄이고 표피의 화상위험을 낮추어 초음파 심부온열치료를 위해 효과적임을 알 수 있었다.

References

- Baac HW, Lee TGuo LJ. Micro-ultrasonic cleaving of cell clusters by laser-generated focused ultrasound and its mechanisms. *Biomed Opt Express*. 2013;4(8):1442-50.
- Bader KB, Mobley J, Church CC et al. The effect of static pressure on the strength of inertial cavitation events. *J Acoust Soc Am*. 2012;132(4):2286-91.
- Daniels MJ, Jiang JVarghese T. Ultrasound simulation of real-time temperature estimation during radiofrequency ablation using finite element models. *Ultrasonics*. 2008;48(1):40-55.
- Kabdasli I, Arslan T, Olmez-Hanci T et al. Complexing agent and heavy metal removals from metal plating effluent by electrocoagulation with stainless steel electrodes. *J Hazard Mater*. 2009;165(1-3):838-45.
- Kharaziha MFathi MH. Improvement of mechanical properties and biocompatibility of forsterite bioceramic addressed to bone tissue engineering materials. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2010;3(7):530-7.
- Kocaoglu B, Cabukoglu C, Ozeras N et al. The effect of therapeutic ultrasound on metallic implants: a study in rats. *Arch Phys Med Rehabil*. 2011;92(11):1858-62.
- Levy Y, Agnon YAzhari H. Ultrasonic speed of sound dispersion imaging. *Ultrasound Med Biol*. 2007;33(5):762-7.
- Li H, Wang J, Huang G et al. Multifunctionalized microbubbles for cancer diagnosis and therapy. *Anticancer Agents Med Chem*. 2013;13(3):403-13.
- Liu HL, Chen WS, Chen JS et al. Cavitation-enhanced ultrasound thermal therapy by combined low- and high-frequency ultrasound exposure. *Ultrasound Med Biol*. 2006a;32(5):759-67.
- Liu HL, Chen YY, Chen WS et al. Interactions between consecutive sonications for characterizing the thermal mechanism in focused ultrasound therapy. *Ultrasound Med Biol*. 2006b;32(9):1411-21.
- Ploix MA, Guy P, Chassignole B et al. Measurement of ultrasonic scattering attenuation in austenitic stainless steel welds: realistic input data for NDT numerical modeling. *Ultrasonics*. 2014;54(7):1729-36.
- Sammoura F, Smyth KKim SG. Optimizing the electrode size of circular bimorph plates with different boundary conditions for maximum deflection of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers. *Ultrasonics*. 2013;53(2):328-34.
- Shanks P, Curran M, Fletcher P et al. The effectiveness of therapeutic ultrasound for musculoskeletal conditions of the lower limb: A literature review. *Foot (Edinb)*. 2010;20(4):133-9.
- Sokka SD, King RHynynen K. MRI-guided gas bubble enhanced ultrasound heating in in vivo rabbit thigh. *Phys Med Biol*. 2003;48(2):223-41.
- Soloviev MGedanken A. Coating a stainless steel plate with silver nanoparticles by the sonochemical method. *Ultrason Sonochem*. 2011;18(1):356-62.
- Tsai CC, Chiang TKChu SY. The improvement of dynamic characteristics of ultrasonic therapeutic transducers

- using fine-grain PZT-based piezoceramics. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2009;56(1):156-66.
- Verstraeten SV, Aimo LOteiza PI. Aluminium and lead: molecular mechanisms of brain toxicity. Arch Toxicol. 2008;82(11):789-802.
- Zhong M, Ai HLi F. [Cavitation and boiling of bubbles at the focal region during high intensity focused ultrasound exposure]. Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi. 2012;29(5):983-6.