

음압 초점제어를 위한 초음파 위상배열의 전원 장치

정형준* · 김의영** · 유범재*** · 최익****

Power Supply of Ultrasonic Phased Array for Focus Control of Acoustic Pressure

Hyung-Jon Jung* · Ui-Young Kim** · Bum-Jae You*** · Ick Choy****

요약

다수의 초음파 트랜스듀서를 이용한 초음파 위상 배열은 초점제어에 의해 인체 내 종양을 치료하는 목적 등으로 사용되고 있다. 초점제어에 의해 결정된 각 초음파 트랜스듀서 표면음압의 크기와 위상은 각 초음파 트랜스듀서에 인가되는 전압의 크기와 위상을 제어하여 구현 가능하다. 본 논문에서는 초음파 트랜스듀서의 인가전압과 표면음압 사이의 관계를 모델링하고, 요구되는 초음파 트랜스듀서의 표면음압을 생성하기 위한 인가전압을 PWM 기법으로 제어하는 방법을 제안한다. 제안한 방법의 타당성은 61개의 초음파 트랜스듀서로 구성된 초음파 위상배열의 초점제어를 예로 들어 시뮬레이션으로 검증하였다.

ABSTRACT

The ultrasonic phased arrays are used for treating tumors in the human body by the focus control of the acoustic pressure at the desired position. The magnitude and phase of the surface acoustic pressure in each ultrasonic transducer is controlled by the magnitude and phase of the applied voltage to it. In this paper, the relationship between the applied voltage and the surface acoustic pressure of the ultrasound transducer is modelled, and the desired voltage is realized by PWM technique. The validity of the proposed method is verified by computer simulation of the focus control of a ultrasonic phased array composed of 61 ultrasonic transducers.

키워드

Ultrasonic Phased Array, Ultrasonic Transducer Model, PWM Method, Focus Control of Acoustic Pressure
초음파 위상 배열, 초음파 트랜스듀서 모델, PWM 방법, 음압 초점 제어

1. 서론

초음파 Hyperthermia는 생체 내로 전파되는 초음파 에너지로 치료 부위를 가열하는 열 치료법이다. 0.4~1 MHz 주파수의 초음파는 신체 깊숙이 침투할 수 있으며, 초음파 위상배열을 사용하여 초음파 에너

지를 치료 부위에 쉽게 집중시킬 수 있다[1]. 이러한 열 치료법에서 중요한 점은 다중 초점제어에 의해 치료 부위 주변의 정상 세포에 열적 손상을 주지 않도록 치료 부위에만 생체 내 가열패턴에 맞게 초음파 에너지를 집중시키는 것이다.

초음파 위상배열은 다수의 초음파 트랜스듀서를 배

* 광운대 로봇학부(wjgudwhs12@naver.com)

** 광운대 로봇학부(nuyoi@naver.com)

*** 한국과학기술연구원(ybj@kist.re.kr)

**** 교신저자 : 광운대 로봇학부

• 접수일 : 2018. 10. 15

• 수정완료일 : 2018. 12. 15

• 게재확정일 : 2019. 02. 15

• Received : Oct. 15, 2018, Revised : Dec. 15, 2018, Accepted : Feb. 15, 2019

• Corresponding Author : Ick Choy

School of Robotics, Kwangwoon University,

Email : ickchoy@kw.ac.kr

열하고, 각 트랜스듀서 표면음압의 크기와 위상을 제어하여 원하는 목표 지점에 초음파 에너지를 집중시킨다. 이때 원하는 음압 패턴 생성을 위한 각 트랜스듀서의 표면음압은 Pseudo Inverse 방법을 통해 구할 수 있다[2]. 계산된 표면음압은 트랜스듀서에 인가되는 전압의 크기와 위상에 의해 결정된다. 현재 상업적으로 사용하는 초음파 구동 장치의 경우 높은 출력 임피던스(50Ω)를 가지고 있고, 임피던스 매칭회로를 사용하여 시스템의 비용이 증가하고 부피가 커진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 스위칭 소자를 사용하여 작은 출력 임피던스(0.3Ω 이하)를 가진 구동 장치가 제안되었다[3].

본 논문에서는 초음파 트랜스듀서의 인가전압과 표면음압 사이의 관계식을 모델링하고 원하는 표면음압을 출력하기 위한 인가전압을 스위칭 소자를 PWM 방식으로 제어하여 구현하는 방법을 제안하고 시물레이션을 통해 검증한다.

II. 초점 생성

2.1 초점에서의 음압

N 개로 구성된 초음파 위상배열을 사용하여 M 개 초점($M \leq N$)을 생성할 때 m 번째 초점에서의 음압 p_m ($m=1, \dots, M$)은 N 개의 초음파 트랜스듀서에 의해 생성된 음압의 합으로 표현된다.

트랜스듀서에서 발생한 음압을 time-harmonic field라 가정한다면, n 번째 트랜스듀서의 표면음압 p_{sn} ($n=1, \dots, N$)은 크기 $|p_{sn}|$ 과 위상 ϕ_n 으로 나타낼 수 있으며, $p_{sn} = |p_{sn}|e^{i\phi_n}$ 이다. 따라서 m 번째 초점에 생성된 음압 p_m 은 원판형 트랜스듀서의 원거리장 모델을 사용하면 식 (1)과 같이 표현된다.

$$p_m = \sum_{n=1}^N p_{sn} \frac{J_0(ka \sin \theta_n)}{|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|} e^{ik|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|} \quad (1)$$

여기서,

\mathbf{r}_m : m 번째 초점의 위치 벡터

\mathbf{r}_n : n 번째 트랜스듀서의 위치 벡터

$|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|$: m 번째 초점과 n 번째 트랜스듀서 중심 사이의 거리

$J_0(\cdot)$: 제1종 0차 베셀 함수 (트랜스듀서에서 발

생한 초음파의 방향성 함수)

k : wave number (단위 길이 당 위상 변화량)

θ_n : n 번째 트랜스듀서의 중심축과 $\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n$ 사이의 각

a : 트랜스듀서의 반지름

이다.

M 개 초점의 음압은 $M \times 1$ 벡터로 식 (2)와 같이 표현되며, N 개 트랜스듀서 배열의 표면음압은 식 (3)과 같이 $N \times 1$ 벡터로 표현된다.

$$\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_M]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{p}_s = [p_{s1}, p_{s2}, \dots, p_{sN}]^T \quad (3)$$

N 개 트랜스듀서 배열의 표면음압 \mathbf{p}_s 와 M 개 다중 초점에서의 음압 \mathbf{p} 를 식 (4)와 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{p} = \mathbf{H}\mathbf{p}_s \quad (4)$$

이때, \mathbf{H} 행렬은 초음파의 전파를 나타내는 행렬로 각 요소는 식 (5)와 같다.

$$H(m, n) = \frac{J_0(ka \sin \theta_n)}{|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|} e^{ik|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|} \quad (5)$$

원하는 음압 패턴 \mathbf{p}^* 생성을 위한 트랜스듀서 배열의 표면음압 \mathbf{p}_s 는 \mathbf{H} 행렬의 Pseudo Inverse (\mathbf{H}^+) 계산으로 식 (6)과 같이 구할 수 있다.[2]

$$\mathbf{p}_s = \mathbf{H}^+ \mathbf{p}^* \quad (6)$$

2.2 초음파 위상배열을 이용한 초점 생성 예

효과적인 초음파 집속을 위한 초음파 위상배열 구조 몇 가지(Cylindrical Section Array[4], Spherical Section Array[5])가 제안되었다. 본 논문에서는 초점 생성 시물레이션을 수행하기 위해 HSSA(Hexagonal Spherical Section Array) 구조를 사용하였다. HSSA 구조는 구 표면에 일정 간격의 위도로 층을 나누어 각 층에 트랜스듀서를 배열한 구조이다.

그림 1은 총 61개의 트랜스듀서를 반지름이 100 [mm]인 구 표면 일부분에 8.6° 위도 간격으로 층을 나누어 표 1과 같이 배열한 HSSA 구조를 보인 것이며 그림 2는 각 트랜스듀서의 인식번호를 나타낸 것이다. 사용한 초음파 위상배열 중심의 좌표는 (0, 0, 0)이다.

초점 좌표 (0.03, 0.03, 0.03)에 10 [kN/m^2]의 음압

을 생성하는 경우($M=1$)를 예로 들어, 식(6)으로부터 계산된 각 트랜스듀서 표면음압의 크기와 위상은 그림 3과 같다. 위상은 1번 트랜스듀서를 기준으로 표시하였으며 각 트랜스듀서 표면음압의 크기와 위상이 모두 다른 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 계산된 표면음압이 각 트랜스듀서에 생성된 경우, 초점을 중심으로 각 축 상의 음압 분포를 나타낸 그래프이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 초점에 원하는 음압이 생성되었음을 확인할 수 있다. 초점 이외의 지점에서 허용치 이상의 음압이 형성되는 경우, 그 지점을 새로운 초점으로 추가하고($M > 1$) 음압 목표치를 허용치 이하로 설정하여 식(6) 계산을 반복함으로써 해결할 수 있다.

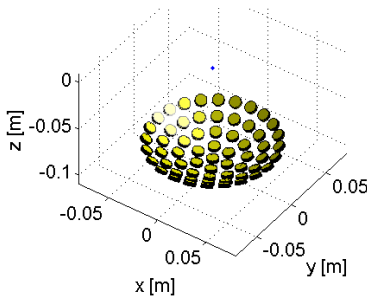


그림 1. HSSA의 구조
Fig. 1 Structure of HSSA

표 1. 층당 트랜스듀서 개수
Table 1. Number of Transducer per floor

| floor | latitude | number of transducer |
|-------|----------|----------------------|
| 1 | 0° | 1 |
| 2 | 8.6° | 6 |
| 3 | 17.2° | 12 |
| 4 | 25.8° | 18 |
| 5 | 34.4° | 24 |

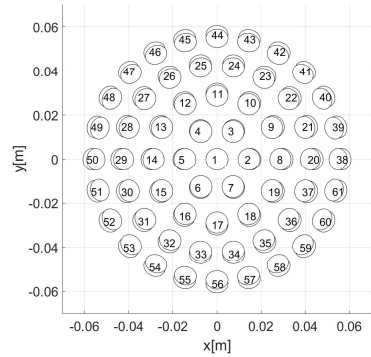


그림 2. 각 트랜스듀서 번호
Fig. 2 ID number of each transducer

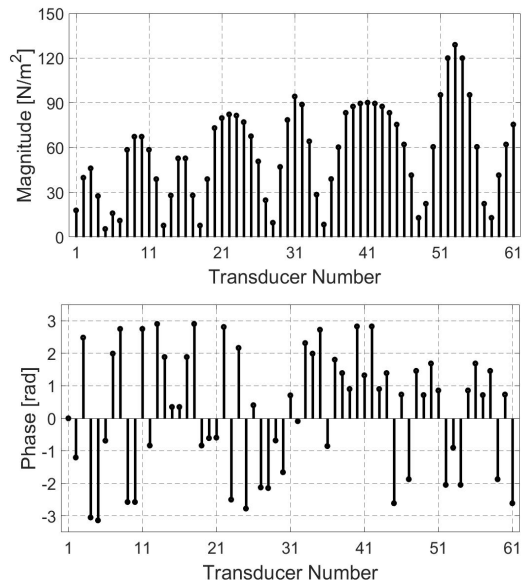


그림 3. 각 트랜스듀서 표면음압의 크기와 위상
Fig. 3 Magnitude and phase of surface acoustic pressure of each transducer

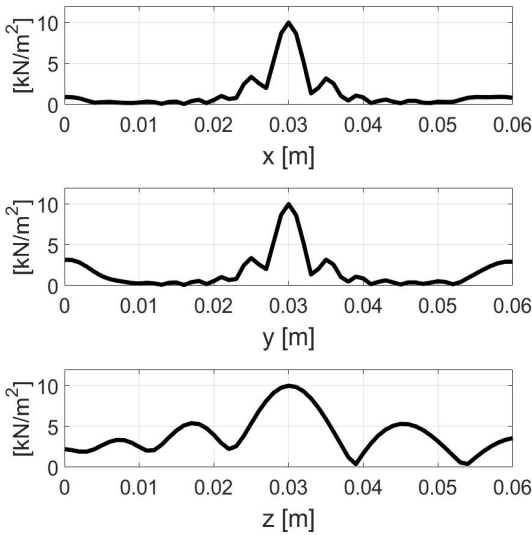


그림 4. 초점 주변의 음압분포
Fig.4 Distribution of acoustic pressure around the focus position

III. PWM 전압 제어 방법

각 트랜스듀서의 표면음압은 인가된 전압에 의해 결정된다. 따라서 식 (6)으로부터 계산된 표면음압을 얻기 위해선 대응하는 크기와 위상을 갖는 전압을 각 트랜스듀서에 인가해야 한다. 트랜스듀서에 인가되는 전압과 그 결과 발생하는 표면음압의 관계를 구하기 위해 다음과 같이 트랜스듀서 모델을 해석하였다.

3.1 초음파 트랜스듀서 모델

그림 5는 초음파 트랜스듀서 모델을 나타낸 것이다.[6,7,8,9]

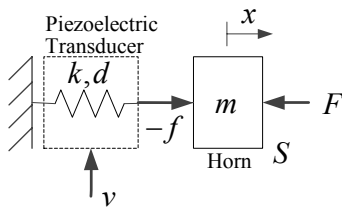


그림 5. 초음파 트랜스듀서 모델
Fig. 5 Ultrasonic transducer model

압전소자에 전압 v 가 인가될 때 horn에 가해지는 힘 f 와 horn의 표면음압 p_s 및 매질로부터 horn에 가해지는 힘 F 는 식 (7)~(9)와 같다.

$$f = k(dv - x) \tag{7}$$

$$p_s = \rho c \dot{x} \tag{8}$$

$$F = Sp_s = S\rho c \dot{x} \tag{9}$$

여기서

k : Piezoelectric 트랜스듀서의 스프링 상수

d : Piezoelectric 상수

v : Piezoelectric 트랜스듀서에 인가되는 전압

x : Horn의 변위

ρ : 매질 밀도

c : 음속

S : Horn의 표면적

m : Horn의 질량

이다.

식 (7), (9)로 부터 Horn의 운동방정식은 다음 식 (11)과 같이 주어진다.

$$kdv = m\ddot{x} + S\rho c\dot{x} + kx \tag{10}$$

식 (8)과 식 (10)으로부터 트랜스듀서에 인가되는 전압 v 에 대한 Horn의 표면음압 p_s 의 전달 함수는 식(11)과 같이 2차 시스템으로 표현된다.

$$\frac{P_s(s)}{V(s)} = \frac{Ks}{s^2 + 2\sigma s + \omega_n^2} \tag{11}$$

여기서

$$K = \frac{kd\rho c}{m}, \quad \sigma = \zeta\omega_n = \frac{S\rho c}{2m}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

이다. 일반적으로 초음파 트랜스듀서의 감쇠비 ζ 는 0.02 ~ 0.2 사이의 값을 가진다.

식(11)로부터 감쇠비 $\zeta \ll 1$ 인 경우, 식(12)와 같이 고유 각주파수 ω_n 를 갖는 정현파 전압을 인가할 때 표면음압은 식 (13)과 같이 근사화 되며 정상상태에서 식(14)의 결과를 얻을 수 있다.[8]

$$v = V_m \sin \omega_n t \tag{12}$$

$$p_s \approx \frac{kd}{S} V_m (1 - e^{-\sigma t}) \sin \omega_n t \tag{13}$$

$$p_s = \frac{kd}{S} V_m \sin \omega_n t \tag{14}$$

식 (14)로부터 정현파 인가전압에 의해 발생된 표면 음압은 정상상태에서 인가전압과 동상이며 kd/S 의 이득을 가짐을 알 수 있다.

3.2 전압 제어 방법

요구되는 각 트랜스듀서의 표면음압 p_s 의 크기를 생성하기 위한 정현파 전압 v 의 크기 V_m 은 식(14)로부터 식 (15)와 같이 계산할 수 있으며 전압의 위상은 요구되는 표면음압의 위상과 일치시키면 된다.

$$|v| = V_m = \frac{S}{kd} |p_s| \quad (15)$$

식(15)와 같은 크기를 갖는 정현파 전압 v 를 생성하기 위해서는 초음파 트랜스듀서를 구동하는 전원 장치가 필요하다. 하지만 서론에서 언급한 바와 같이 기존의 구동 장치는 부피가 크고 비용이 많이 드는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 해결하기 위해 스위칭 소자를 조합하여 PWM 방식으로 트랜스듀서 인가 전압을 생성한다. PWM 주파수를 올림으로써 낮은 저차 고조파 성분을 갖는 전압을 생성할 수 있지만, 스위칭 소자의 동작주파수 한계와 손실을 고려해서 그림 6과 같이 초음파 트랜스듀서의 구동 주파수와 같은 스위칭 주파수를 사용한 PWM 패턴으로 직류전압 V_{dc} 을 변조하여 인가전압 v_{pwm} 을 생성한다. 위상은 PWM 패턴을 지연하는 방식으로 적용하면 된다.

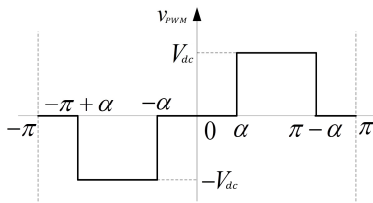


그림 6. PWM 패턴
Fig. 6 PWM pattern

구간별 트랜스듀서 인가전압은 식 (16)과 같다.

$$v_{pwm}(t) = \begin{cases} V_{dc} & \alpha \leq \omega_n t \leq \pi - \alpha \\ -V_{dc} & -\pi + \alpha \leq \omega_n t \leq -\alpha \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

여기서 α 는 점화각(firing angle)이며 α 를 변경시켜 전압의 PWM duty D 를 결정한다. D 와 α 는 식

(17)의 관계를 가진다.

$$D = 1 - \frac{2\alpha}{\pi} \quad (17)$$

전압 고조파 성분을 분석하기 위해 식 (16)을 푸리에 급수로 전개하면 식 (18)의 결과를 얻을 수 있다.

$$v_{pwm}(t) = \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos(n\alpha) \sin(n\omega_n t) \quad (18)$$

전압 v_{pwm} 은 기본파 성분과 홀수 고조파 성분만 포함하며, 각각의 크기는 식 (19), 식 (20)과 같다.

$$V_1 = \frac{4V_{dc}}{\pi} \cos \alpha \quad (19)$$

$$V_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos n\alpha \quad (n=3, 5, 7, \dots) \quad (20)$$

식 (19)로부터 트랜스듀서에 인가되는 기본파 전압의 최대치는 점화각 $\alpha = 0$ 일 때 $4V_{dc}/\pi$ 이며 α 에 의해 기본파 전압이 제어 가능함을 알 수 있다. 요구되는 표면음압의 최대치를 $|p_s|_{\max}$ 라고 할 때 직류전압 V_{dc} 는 식 (15) 및 식 (19)로부터 식 (21)의 조건을 만족하여야 한다.

$$V_{dc} \geq \frac{\pi S}{4kd} |p_s|_{\max} \quad (21)$$

식 (15)에 의해 계산된 V_m 을 출력하기 위한 점화각은 변조지수 m 을 식 (22)와 같이 정의 할 때 식 (23)과 같이 계산할 수 있다.

$$m = \frac{V_m}{4V_{dc}/\pi} \quad (22)$$

$$\alpha = \cos^{-1} m \quad (23)$$

그림 7과 그림 8은 각각 변조지수에 대한 점화각과 인가전압 v_{pwm} 의 기본파/고조파 성분의 크기를 기본파 최대 크기($4V_{dc}/\pi$)로 정규화 하여 보인 것이다.

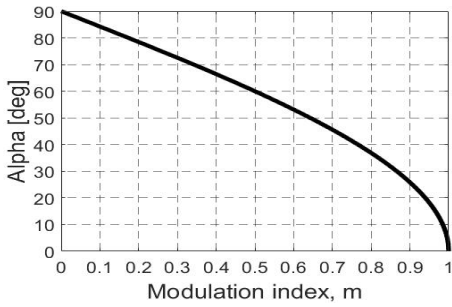


그림 7. 변조 지수에 대한 점화각
Fig. 7 Firing angle vs. modulation index

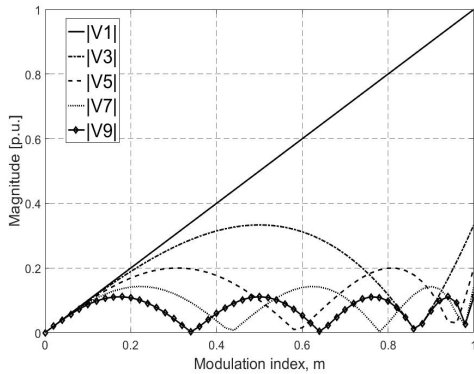


그림 8. 변조지수에 대한 v_{pwm} 고조파 크기
Fig. 8 Harmonic component of v_{pwm} vs. modulation index

그림 8에 보인 바와 같이 변조지수 m 이 작아질수록 고조파 성분이 차지하는 비중이 커지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 초음파 트랜스듀서가 기본파 주파수에서 공진하며 동작하기 때문에 고조파에 대한 임피던스가 증가하여 고조파에 의한 표면음압의 영향이 크게 줄어들 것으로 예상할 수 있다.

PWM에 의해 발생한 고조파 전압 성분이 표면음압에 미치는 영향은 초음파 트랜스듀서 모델인 식 (11)의 주파수 응답에 의해 해석할 수 있다. 그림 9는 감쇠비 ζ 에 따라서, 각 고조파 전압 성분에 대한 표면음압의 입출력 이득을 기본파 전압에 대한 표면음압의 입출력 이득으로 정규화 하여 보인 것이다.

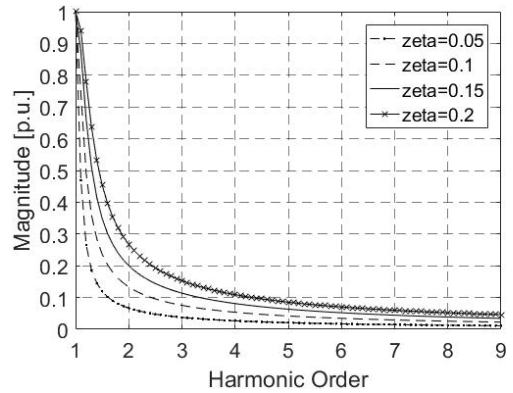


그림 9. 고조파 전압성분에 대한 표면음압 이득
Fig. 9 Harmonic voltage to surface pressure gain

그림 10은 감쇠비에 대하여, 식 (24)로 정의된 표면음압의 전 고조파 왜곡 THD (Total Harmonic Distortion)를 변조지수 m 에 대하여 보인 것이다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=3, \text{odd}}^{\infty} (p_{sn})^2}}{p_{s1}} \quad (24)$$

변조 지수 m 이 작을 때 표면음압의 THD가 높게 나오지만 $m > 0.5$ 영역에서 10% 이내임을 볼 수 있다. 또한 초점에서의 음압은 각 트랜스듀서에 의한 음압의 합으로 나타나기 때문에 변조지수가 작은 트랜스듀서의 영향이 줄어들 것으로 예상된다.

3.3 시뮬레이션

그림 11은 감쇠비 $\zeta = 0.1$ 인 조건에서 변조지수 m 에 따라 정현파 전압 v 와 대응하는 v_{pwm} 전압을 인가한 경우 발생하는 표면음압을 $|p_s|_{\max}$ 로 정규화 하여 비교한 것이다. 변조지수가 감소함에 따라 표면음압의 왜곡현상이 나타나나 그 영향은 미미하며 위상의 변화도 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

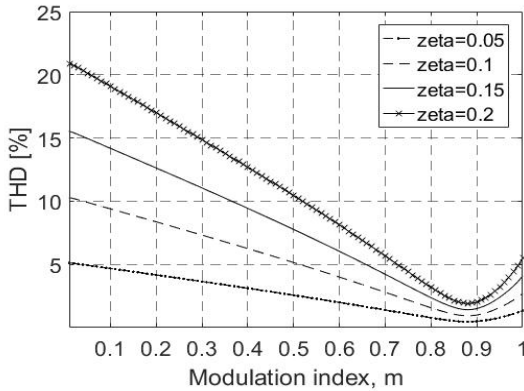


그림 10. 변조 지수에 따른 표면음압의 THD
Fig. 10 THD of surface pressure vs. modulation index

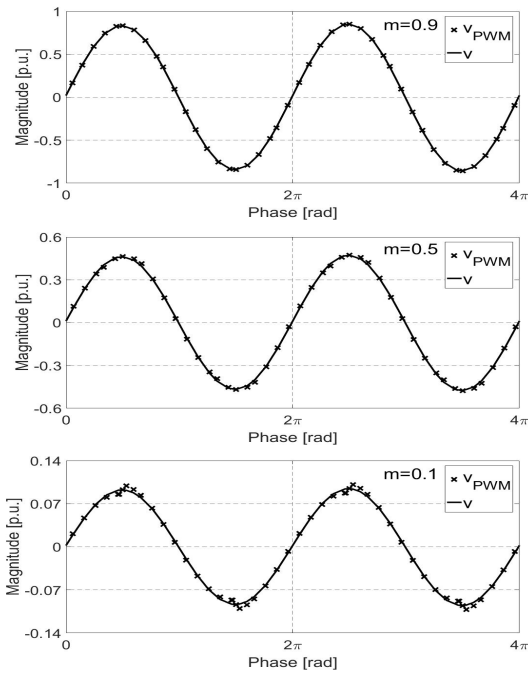


그림 11. v 와 v_{pwm} 에 의한 표면음압 비교
Fig. 11 Comparison of surface pressure between v and v_{pwm}

그림 12는 그림 4에서 보인 정현파와 전압 v 에 의해 생성된 초점 주위 음압분포와 대응하는 v_{pwm} 에 의해 생성된 초점 주위 음압분포를 비교한 것이다. 그림 12에서 보듯이 두 방식 간에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

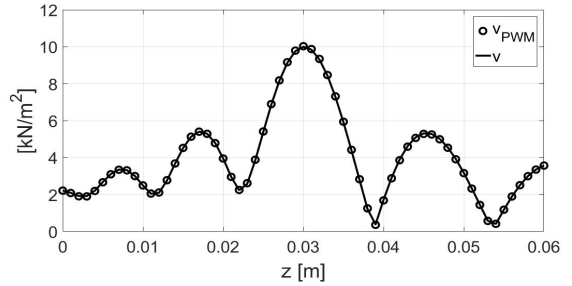
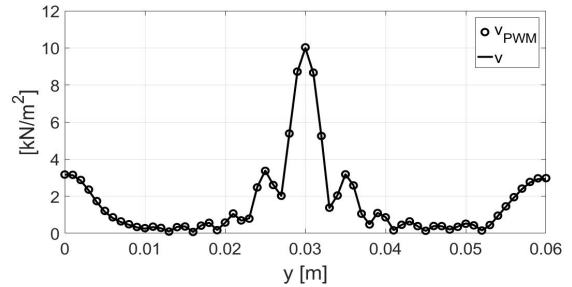
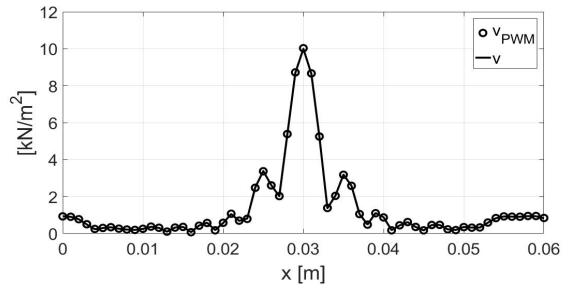


그림 12. v 와 v_{pwm} 에 의한 초점 주변 음압 비교
Fig. 12 Comparison of acoustic pressure around the focus position between v and v_{pwm}

IV. 결 론

본 논문은 PWM 방법을 이용하여 초음파 위상배열의 초점제어에 필요한 각 트랜스듀서의 입력전압을 생성하는 방법에 대해 기술 하고 있다.

트랜스듀서의 입력전압과 표면음압 사이의 전달함수를 유도하고 PWM 방식에 의해 발생한 입력전압의 고조파 성분이 기본파 성분과 비교하여 표면음압 생성에 끼치는 영향이 작다는 것을 확인하고 시뮬레이션으로 검증하였다.

본 논문에서 제안한 방법으로 트랜스듀서의 표면음

압을 생성하는 경우 변조 지수 m 이 작을 경우 정상 상태에서 목표음압과 약간의 오차를 보이지만 감쇠비 $\zeta = 0.1$ 이하에서 표면음압의 THD가 10% 미만이며 초음파 위상배열에 의해 초점부근에서 생성된 음압의 분포가 정현파 입력전압을 인가한 경우와 거의 일치함을 보였다.

이러한 결과는 PWM 전압제어 방식이 초점 음압 생성에 유효함을 나타내며, 앞으로 초음파 위상배열의 초점제어를 위한 전원으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

[1] R. J. Dickinson, "An ultrasound system for local hyperthermia using scanned focused transducers," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 31, no. 1, 1984, pp. 120-125.

[2] E. S. Ebbini and C. A. Cain, "Multiple-focus ultrasound phased array pattern synthesis : optimal driving-signal distribution for hyperthermia," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, vol. 36, no. 5, 1989, pp. 540-548.

[3] G. K. Lewis Jr. and W. L. Olbricht, "Development of a portable therapeutic and high intensity ultrasound system for military, medical, and research use," *Review of Scientific Instruments*, vol. 79, no. 11, 2008, pp. 1-7.

[4] E. S. Ebbini, S. I. Umemura, M. Ibbini, and C. A. Cain, "A cylindrical-section ultrasound phased-array applicator for hyperthermia cancer therapy," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, vol. 35, no. 5, 1988, pp. 561-572.

[5] E. S. Ebbini and C. A. Cain, "A Spherical-Section Ultrasound Phased Array Applicator for Deep Localized Hyperthermia," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 38, no. 7, 1991, pp. 634-642.

[6] A. Preumont, *Mechatronics: Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems*,

Dordrecht: Springer, 2006.

[7] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of acoustics*, New York: John Wiley and Sons, 2000.

[8] J. Choe, K. Lee, I. Choy, and W. Cho, "Ultrasonic Distance Measurement Method by Using the Envelope Model of Received Signal Based on System Dynamic Model of Ultrasonic Transducers," *J. of Electrical Engineering & Technology*, vol. 13, no. 2, 2018, pp. 981-988.

[9] J. Choe, W. Cho, and I. Choy, "Ultrasonic Distance Measurement Method Based on Received Signal Model," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 1, 2017, pp. 53-60.

저자 소개

정형준(Hyung-Jon Jung)



2017년 광운대학교 로봇학부 졸업(공학사)
2017년 ~ 현재 광운대학교 대학원 로봇학과 석사과정

※ 관심분야 : 전력전자, 무선충전, 제어

김의영(Ui-Young Kim)



2016년 광운대학교 로봇학부 졸업(공학사)
2016년 ~ 현재 광운대학교 대학원 로봇학과 졸업(공학석사)

※ 관심분야 : 전력전자, 초음파 응용, 제어



유범재(Bum-Jae You)

1985년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(공학사)
1987년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학석사)

1991년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학박사)
1994년 ~ 현재 KIST 지능로봇연구단 책임연구원
2010년 ~ 현재 (재)실감교류인체감응솔루션연구단 연구단장

※ 관심분야 : 로봇틱스, 휴먼-컴퓨터-휴먼 인터랙션, 임베디드 시스템



최 익(Ick Choy)

1979년 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1981년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1990년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
1982년 ~ 2003년 한국과학기술연구원 책임연구원
2003년 ~ 현재 광운대학교 로봇학부 교수

※ 관심분야 : 서보제어, 전력전자, 전동기제어

