

무선 전력전송을 위한 초음파 트랜스듀서 시스템 개발

Part 1: 송신소자 개발

Development of ultrasonic transducer system for wireless power transfer

Part 1: Transmitter development

염우섭* · 황건* · 이성규†

WooSub Youm, Gunn Hwang and Sung Q Lee

Key Words: Ultrasonic(초음파), Wireless power transfer(무선전력전송), Transducer(트랜스듀서)

ABSTRACT

Recently, wireless power transfer technology is ready to be commercialized in consumer electronics. It draws attention of not only experts but also public because of its convenience and huge market. However, previous technologies such as magnetic resonance and induction coupling have limited applications because of its short transfer distance compared to device size and magnetic intensity limitation for the safety of body exposure. As an alternative, ultrasonic wireless power transfer technology is proposed. The ultrasonic wireless power transfer system is composed of transmitter which converts electrical energy to ultrasonic energy and receiver which converts the ultrasonic energy to the electrical energy again. This paper is focused on the development of high energy conversion efficiency of ultrasonic transmitter. Optimal transfer frequency is calculated based on the acoustic radiation and damping effect. The transmitter is designed through numerical analysis, and is manufactured to match the optimal transfer frequency with the size of 100mm diameter, 12.2 mm thickness plate. The energy conversion efficiency of about 13.6% at 2m distance is obtained, experimentally. This result is quite high considered with the device size and the power transfer distance.

1. 서 론

IT 기기(휴대폰, TV, 컴퓨터 주변 기기)의 무선 전력 전송 기술은 통신신호의 무선화에 이어 케이블의 단순화 및 배선 편의를 위해서 활발히 연구되고 있다. 전력공급을 위한 전선들이 제거되어 무선으로 전력 공급이 가능하다면 그 경제적, 산업적 측면에서의 혁명적 변화가 있으리라 예상된다.⁽¹⁾

현재 무선 전력 전송의 대표적 기술에는 전자기파 방식, 자기공진 방식, 전자기 유도 방식을 들 수 있다.⁽²⁾ 이들 기술은 근거리 전송효율이 높고, 코일 형태의 소자로 구현하므로 소자비용이 적은 장점이 있어 휴대단말 응용으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만, 소자크기 대비 전송거리가 짧아 대체로 소자 지름 크기 이상의 전송거리에서는 전송효율이 급격히 줄어들며 전송거리를 높이기 위해 송신부에서 높은 전력을 방출할 경우 전계 및 자계 값이 인체 유해기준 한계를 넘어 원거리 전송이 용이치 않다.⁽²⁾

이러한 문제를 극복하는 기술적 대안으로 본 논문에서는 초음파 공진방식의 전력전송 기술을 제안한다. 초음파 공진형 전력 전송 기술은 전기 에너지를

† 교신저자: 정희원, 한국전자통신연구원(ETRI)
E-mail: Hermann@etri.re.kr

Tel: 042-860-1142, Fax: 042-860-5608

* 한국전자통신연구원(ETRI)

초음파 음향에너지로 변환하며 이를 집속하여 원거리까지 이동시키고 다시 초음파 음향에너지를 전기 에너지로 변환하는 원리로 구동된다. 초음파 공진형 무선 전력 전송기술은 전송효율이 그다지 크지는 않으나 소자크기를 감안하면 기존의 전자기 방식이나 자기공진 방식보다는 장거리에서 전송효율이 높은 특징을 가지며 특히, 인체유해성 문제로부터 자유롭다. 뿐만 아니라 무선전송의 공간이 공기 중뿐만 아니라 수중과 같이 전자기파의 진행이 어려운 환경에서도 전력전송이 가능하여 일반 산업분야에 더하여 의학분야(인체삽입용 전력전달 시스템), 군수분야(수중전력 전송 시스템)과 같이 전자기방식의 전력전송 기술이 적용될 수 없는 분야에서의 대안 기술로 연구되고 있다.

본 논문은 초음파 공진형 무선 전력전송 시스템의 구성 요소 중 송신소자의 설계, 제작 및 성능검증에 대해서 소개한다. 초음파 송신소자에서는 고효율로 전기에너지를 초음파 에너지로 변환하는 것이 중요한 기술이며, 이를 위해 2 장에서는 초음파 방사와 감쇄 효과에 기초하여 응용분야에 따른 최적 전송 주파수를 선정하는 과정을 기술하였다. 또한 초음파의 직진성을 높이기 위한 구조를 근간으로 하여 송신 소자의 공진주파수를 설정된 전송 주파수에 맞도록 수치해석을 통하여 설계하였다. 3 장에서는 설계 결과에 따라 직경 100 mm, 두께 12.2 mm 원형 플레이트형태로 송신소자를 제작하였으며 제작된 송신 소자의 성능을 평가하기 위해 제작된 소자의 공진 주파수, Q factor, 출력 음압 및 각도 별 음압 프로파일을 각각 측정 하고 최종적으로 입력 전기 에너지에 대한 출력 음압에너지를 통해 에너지 변환 효율을 도출하였다. 최종적으로 실험적으로 얻어진 에너지 변환 효율은 2m 거리에서 약 13.6%로 측정 되었으며 이러한 결과는 전력 전송거리와 전력 송신 소자의 크기를 감안할 때 상당히 높은 결과이다.

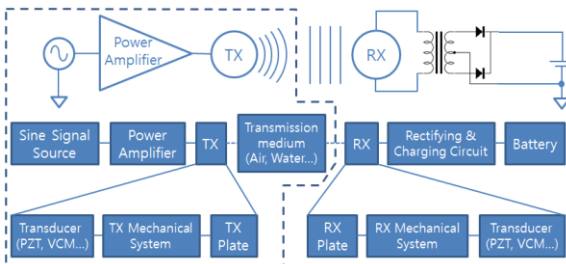


Fig. 1 Block diagram of the ultrasonic transducer system for wireless power transfer

2. 해석 및 설계

2.1 최적 초음파 전력 전송주파수 설정

공기 중에서 음파가 전달될 때 효율에 영향을 끼치는 인자는 음파의 구면확산 (spherical spreading)과 감쇄효과를 들 수 있다. 본 절에서는 음향 시뮬레이션을 통해 음파 전달 시 구면확산과 감쇄효과에 의한 영향을 해석하고, 이를 최소화하기 위한 최적 구동 주파수를 선정하고자 한다. 음향 시뮬레이션을 위해 음원은 지름 100mm의 피스톤 소스를 가진 평면으로 가정하였으며 이때 중심축을 따른 음압 분포는 아래 식(1)과 같다. 여기서 a는 피스톤의 반경을 의미한다.

$$P_{piston}(z) = P_0 e^{-\frac{z}{l_a}} \left(1 - e^{-\frac{j\omega}{c(\sqrt{z^2+a^2}-z)}} \right) \quad (1)$$

구면확산 현상은 음파의 확산현상으로 인하여 음파의 음압이 거리에 반비례하여 감소하는 현상을 말하며(두 배 거리 진행 시 6dB 감소) 일반적으로 구면 확산이 시작되는 영역은 Rayleigh distance ($R_d = \pi a^2 / \lambda$)로 정의한다.

감쇄효과는 공기 입자의 진동에 의해 열로 소모되는 에너지로서 일반적으로 주파수의 제곱에 비례하는 주파수의 함수로 계산된다. 이러한 감쇄 현상은 일반적으로 감쇄거리($l_a = 1/\alpha$) 이후로부터 명확하게 일어난다. 따라서 이러한 감쇄현상에 의한 음압감소를 최소화 하기 위해서는 감쇄거리가 구동 거리에 비해 긴, 즉 감쇄상수(α) 낮은 주파수 영역을 사용해야 한다. 하지만 10kHz 이상에서는 주파수 증가에 따라 감쇄상수도 비례하여 증가하므로 10kHz에 가깝게 설정하는 것이 유리하다⁽³⁾.

Fig. 3은 방사판을 지름 100mm의 피스톤 음원으로 가정하였을 때 주파수에 따른 중심축 음압 분포를 해석한 것이다. Rayleigh distance 이전의 영역의 경우, 근접장(Near field)의 간섭현상의 효과로 불규칙한 피크(Peak)와 널(Null)이 발생한다.

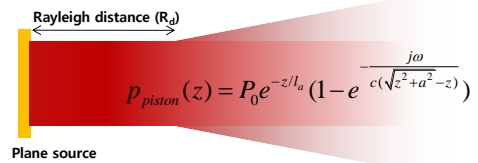


Fig. 2 Piston sound source and propagation solution

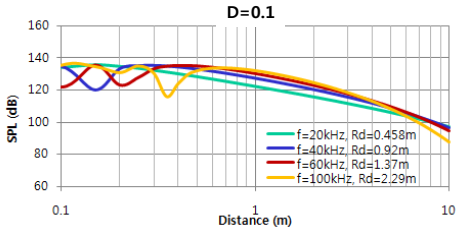


Fig. 3 Sound pressure level according to the propagation distance of the 100mm diameter piston source over several frequencies

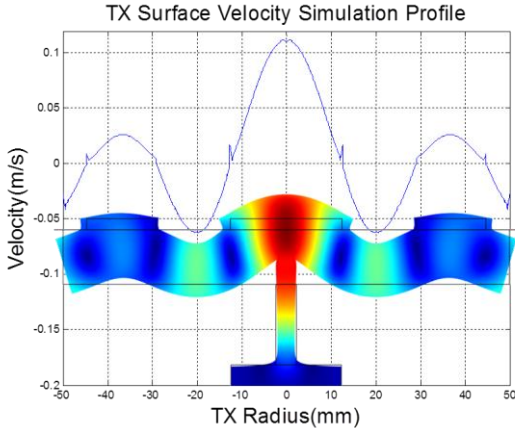


Fig. 4 TX surface velocity consol simulation profile

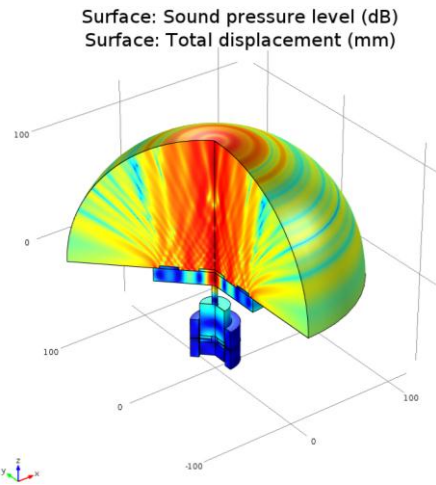


Fig. 5 TX output sound pressure level consol simulation result

반면에 Rayleigh distance 이후의 영역에는 구면확산에 의한 현상으로 음압이 지속적으로 감소함을 알 수 있다. 공기 중에서의 음향에너지 전달에서 저주파수 신호를 사용할 경우, Rayleigh distance가 너무 짧아져서 구면확산 현상이 크게

일어나고, 고주파수 신호를 이용할 경우, 높은 감쇄효과로 인해 음압이 감소하게 된다. 구면확산을 고려하면 100kHz의 경우 더 먼 거리까지 음압이 유지되므로 유리하고, 감쇄현상을 고려한다면 50kHz가 유리하다. 따라서 본 논문에서는 감쇄효과와 구면확산 현상을 함께 고려하고 구동거리 2m를 감안하여 최적의 주파수는 70kHz 정도가 되도록 소자를 설계하였다.

2.2 초음파 전력 송신소자 설계

초음파 전력 송신 소자는 1970년대에 스페인의 연구그룹 Gallego-juarez이 제안한 고효율, 고출력의 초음파 발생을 위한 스택 플레이트의 기본 원리를 사용하였다.⁽⁴⁻⁶⁾ 방사판의 높은 진동 모드를 이용하고, 피스톤 음원을 형성하기 위해서 불연속적인 위상차이가 발생하는 부분에 요철을 붙여 위상 차이를 보정하는 방사판 구조이다. 방사판에서 발생하는 음압의 위상차를 요철로 보상해 주기 위해, 발생 주파수의 파장을 λ 라고 했을 때 $\pm\lambda/2$ 의 요철을 방사판에 더해서 위상보정을 해주어야 한다. 요철의 높이는 매질에 따라 달라지며 공기의 경우는 70kHz 에서 반파장인 $\lambda/2$ 은 약 2.46mm 정도가 된다.

본 논문에서는 공기 중 감쇄와 원형방사를 고려하여 70kHz의 공진모드를 가지도록 설계를 하였다. 송신소자는 방사판과 이를 진동시키는 구동부로 나뉘게 되며 70kHz의 공진모드는 방사판 모드에 해당되도록 설계하였다. 이때 구동부와 결합 시 방사판의 주파수가 변화하므로 정확한 설계는 FEM을 통해 수행하였다. 방사판은 70kHz 주변에서 3차 공진모드가 나타나게 되며 이를 바탕으로 스택의 개수와 위치, 그리고 방사판의 두께를 변화시키면서 스택을 가진 방사판이 70kHz의 공진주파수를 가지도록 최종 설계하였다. Fig. 4는 상용프로그램인 COMSOL(Altsoft, Co)를 이용하여 스택형 플레이트를 모델링 하여 해석한 결과이다. 최종적으로 얻어진 스택형 플레이트는 지름 100mm 두께 12.2mm이며 스택은 중앙부에 하나와 도넛모양으로 형성된 하나로 구성된다. 이때 방사판 표면에서 얻어진 속도분포도 함께 공진모드를 Fig. 4에서 함께 나타내었으며 속도방향과 스택의 위치가 맞물려 잘 설계되었음을 알 수 있다.

Fig. 5는 COMSOL 해석프로그램을 통하여 구조 해석과 음향해석을 통합하여 수행한 결과이다. 구동기 내부에 있는 압전 PZT에 20V를 가했을 때 방

사판의 진동이 유도되며 방사판의 진동으로 말미암아 초음파가 발생하는 현상을 해석하였다. 방사판의 경우 스텝을 가지고 있어 음향 방사가 피스톤 방사 현상을 가지게 되며 초음파의 직진성이 좋아지는 것을 해석결과를 통하여 알 수 있다. 압전 PZT에 가해진 전압에 의해서 얻어지는 음압(SPL: Sound Pressure Level)값을 통하여 발생하는 음압에너지를 알 수 있게 된다. 이를 통하여 가장 높은 음압에너지를 발생시키도록 구동기 구조를 얻게 된다. 하지만 본 해석에서는 각 소재의 댐핑 상수 값이 부정확하고 구동기 제작 시 PZT를 고정하는 힘을 정확히 모델링 하기가 어려워 정확한 음압에너지를 해석으로 얻기는 어렵다. 다만, 경향을 파악하여 초음파 송신소자를 설계하는데 활용하였다.

3. 제작 및 성능 평가

3.1 초음파 전력 송신소자 제작

2장에서 해석 및 설계를 바탕으로 다음의 Fig. 6과 같이 초음파 전력 송신소자를 제작하였다. 공기중으로 초음파에너지를 전달하는 방사판은 2장의 진동 모드 분석 결과에 따라 제작 하였다.

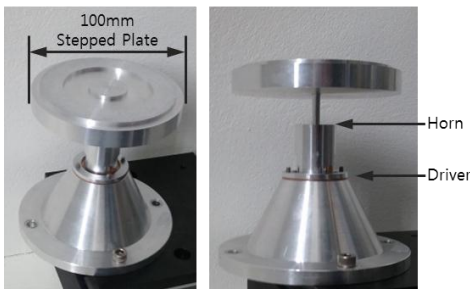


Fig. 6 Produced stepped plate transmitter (TX)

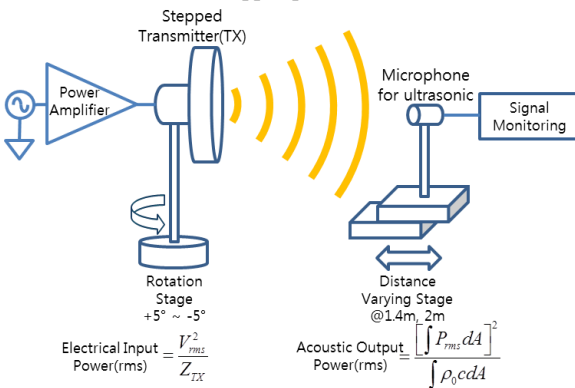


Fig. 7 Block diagram of the transmitter (TX) acoustic output power measurement system

구동기로는 링 타입의 PZT(C7 계열) 2개를 사용하였으며 이 2개의 PZT사이에 전극용 구리 판을 삽입하여 스탠드에 고정하는 구조이다. 구동기로 사용된 PZT의 변위가 작은 관계로 Fig. 6의 오른쪽과 같이 직경비가 5:1인 혼(Horn) 구조를 플레이트와 일체가 되도록 가공하여 플레이트의 변위가 PZT 변위의 25배(면적 비에 비례)가 되도록 제작하였다.

3.2 제작 송신소자 성능 평가

(1) 성능 평가용 실험 장치 구성

3.1절에서와 같이 제작된 TX(송신소자)의 실제 성능을 평가하기 위해 Fig. 7과 같이 측정 시스템을 구축하였다.

TX를 임의의 주파수로 구동하기 위해 평선제네레이터로 가진 주파수를 생성하여 파워 앰프로 전력을 증폭하여 TX에 입력하였다. 이를 통해 생성된 TX의 초음파 출력 음압(SPL)은 초음파 측정용 마이크를 사용하여 측정하였다. 공진주파수와 Q factor는 시뮬레이션에서 계산된 공진주파수를 중심으로 일정 대역의 주파수를 스캔하고 각 스캔 주파수 별 출력을 측정용 마이크를 이용하여 측정한다. 측정된 주파수 별 음압 중 최대치가 나오는 주파수가 실제 측정된 TX의 공진 주파수로 판단된다. 측정된 최대 음압의 $1/\sqrt{2}$ 을 출력하는 주파수 대역폭을 측정된 공진 주파수로 나누어 Q factor를 측정하게 된다.

TX의 전체 출력 음압 파워를 측정하기 위해 상기한 시스템에 TX 회전 스테이지와 TX와 측정용 마이크간 거리를 조절하기 위한 거리 조절 스테이지를 부착하였다. 앞서 측정된 공진주파수로 가동되는 TX를 회전시키며 각도에 대한 TX 출력 음압 프로파일을 측정 후, 마이크가 설치된 거리에서 음압 프로파일을 면적적분을 하면 총출력 음압 파워의 1/2이 측정이 된다. 이는 TX의 출력의 절반은 TX의 앞쪽으로, 나머지 절반은 TX의 뒤쪽으로 출력되기 때문이다. 실제로 TX에서 출력되는 음압 파워는 TX와 측정 마이크간의 거리에 상관없이 일정해야 하고 이를 확인하기 위해 측정 마이크를 거리 조절 스테이지에 부착하고 TX와 측정 마이크간의 거리를 변화시키며 TX 회전 각도에 대한 음압 출력 프로파일을 측정하여 거리 별로 TX 음압 출력 파워를 측정 하였다.

Fig. 8은 실제로 구성된 TX 음압 출력 파워 측정 시스템의 구성도이다.

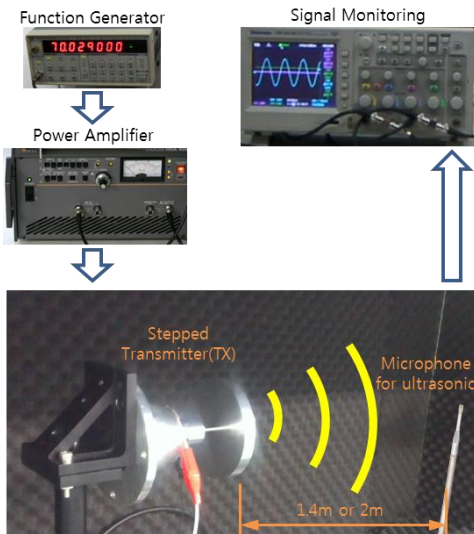


Fig. 8 Photo of the transmitter (TX) acoustic output power measurement system

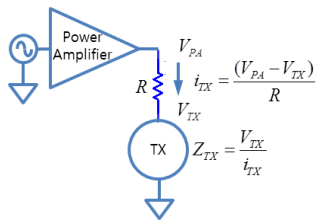


Fig. 9 Schematic of the transmitter (TX) impedance and input power measurement

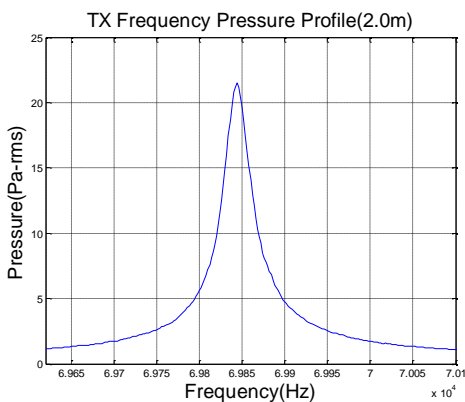


Fig. 10 Frequency response of the transmitter (TX)

외부에서 발생하는 소음을 차단하고 TX에서 발생하는 음압이 벽에 반사되어 발생하는 잔향이 측정값에 영향을 미치는 것을 차단하기 위해 사진에서와 같이 방음제로 프레임을 구성하고 내부표면을 흡음

제로 마감한 챔버 내부에 측정시스템을 구축하였다. 측정 마이크로 측정된 음압(SPL)은 오실로스코프를 이용하여 모니터를 하였고 NI DAQ와 LabView 프로그램을 이용하여 측정 데이터를 저장하였다.

제작된 TX의 효율을 측정하기 위해서는 상기된 TX의 출력 파워뿐만이 아니라 입력 파워 또한 측정되어야 한다. 이를 위해 Fig. 9와 같이 파워앰프와 TX 사이에 전류 측정용 파워저항을 삽입하였다. 이렇게 회로를 구성한 후, TX의 공진주파수로 TX를 구동하면서 파워저항 양단에 걸리는 파워앰프 출력 전압(V_{PA})과 TX에 걸리는 전압(V_{TX})의 차를 파워저항의 크기로 나눠 주면 TX에 입력되는 전류(i_{TX})의 크기를 알 수 있다. 여기서 구동 주파수에서 TX의 입력 임피던스는 TX에 걸리는 전압(V_{TX})을 TX에 입력되는 전류(i_{TX})로 나눠주면 구해지며 약 70kHz의 구동 주파수에서 약 138.9Ω의 임피던스를 가지는 것으로 측정되었다. 그리고 TX에 입력되는 파워는 TX에 걸리는 전압(V_{TX})과 TX에 입력되는 전류(i_{TX})의 곱으로 계산되어 실험 조건으로 계산된 TX 입력 파워 대비 TX 출력 음압 파워로 제작된 TX의 효율이 계산된다.

(2) 성능 측정 및 평가

상기한 바와 같이 실험장치를 구축하여 TX와 측정마이크 사이의 거리를 2m로 설정하여 측정한 제작 TX의 주파수 응답은 Fig. 10과 같다. 공진주파수는 69822Hz, Q factor는 69822Hz/(69860Hz - 69830Hz) ≈ 2328로 측정되었고 공진주파수에서의 출력 음압은 21.49Pa-rms로 측정되었다.

앞서 측정된 공진주파수로 가동되는 TX를 하부에 장착된 회전스테이지를 이용하여 +5° ~ -5°의 범위를 0.1° 스텝으로 회전시키며 1.4m, 2m거리 각각에서 각도에 대한 TX 출력 음압을 프로파일을 측정하였다. 이를 마이크가 설치된 1.4m와 2m 거리에서의 반경으로 환산하여 반경에 대한 출력 음압 프로파일로 Fig. 11에 나타내었다. 결과 값은 각 거리별로 3회 반복 측정하여 평균한 값을 사용하였다. 거리가 가까운 1.4m에서는 반경이 0m인 곳에서의 출력 음압이 상대적으로 높지만 반경이 증가할수록 급격하게 출력 음압이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 반면에 2m에서의 측정 결과는 반경이 0m인 곳에서의 출력 음압이 상대적으로 낮지만 반경이 증가할수록 출력 음압이 낮아지는 기울기가 1.4m에서의 결과보다 완만한 것을 알 수 있다.

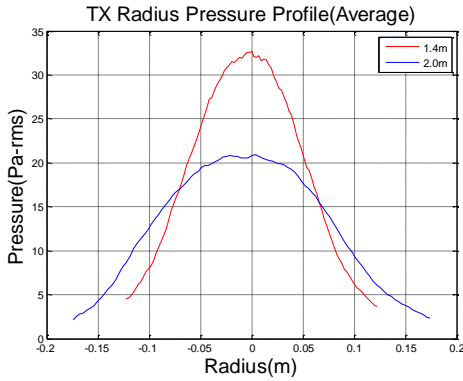


Fig. 11 TX radius pressure profile of the transmitter (TX)

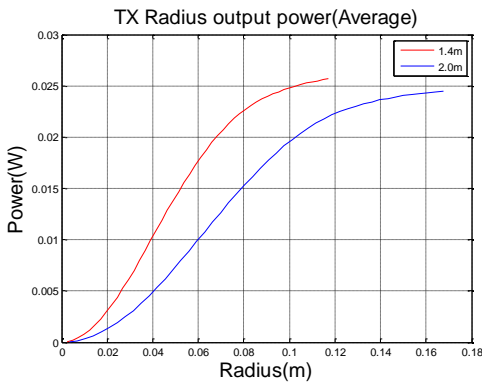


Fig. 12 Integration acoustic output power of the transmitter (TX)

Fig. 11의 결과를 바탕으로 반경 0m를 시점으로 음압 출력 파워를 적분한 결과는 Fig. 12와 같다. 앞서 예상한 바와 같이 1.4m와 2m에서 각각 적분된 값이 25mW에 근접한 결과를 보인다. TX의 앞과 뒤 두 방향을 고려하면 TX의 출력 음압 파워는 약 50mW일 것으로 보인다. 두 결과 값이 미소한 차이를 보이는 것은 측정 환경적인 측면(챔버 내부 온도, 습도 등)와 TX 및 측정용 마이크의 이송 시 발생한 정렬 오차에 기인하는 것으로 판단된다.

TX 가진 전압은 20Vpp였고, 구동 주파수인 69822Hz에서 측정된 TX의 임피던스는 약 138.9Ω 이었으므로 TX에 입력된 전기적 파워는 360mW-rms 였다. 이러한 입력을 기준으로 한 TX의 출력 효율은 1.4m 거리에서 약 14.3%, 2m 거리에서 약 13.6% 였다.

4. 결 론

본 논문에서는 인체 유해성 문제가 없고 소자 크

기 대비 장거리 전력전송이 가능한 초음파 전력 전송 시스템의 송신소자의 개발에 관하여 기술하였다.

적용 분야에 따른 구동조건을 설정하고 FEM을 통하여 TX가 구동조건을 만족하도록 설계 및 제작하였고 제작된 TX의 특성을 평가하기 위한 시스템을 구축하였다.

실험 결과 공진주파수나 Q factor는 FEM 해석에 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 약 14%의 전송 효율은 예상보다 낮은 결과이며 향후 PZT가 부착된 드라이버 부분의 최적화를 통하여 향상시켜야 할 부분이다.

또한 향후 수신소자(RX)를 설계, 구성하여 전체 충전 시스템을 구축하고 시스템의 충전효율 측정 및 전송효율 향상을 위한 연구를 진행할 계획이다.

후 기

This work was supported by the IT R&D program of MKE/KEIT(10035570, Development of self-powered smart sensor node platform for smart & green building) and the Converging Research Center Program through the Ministry of Education, Science and Technology (2011K000972).

참 고 문 헌

- (1) SeungYeol Kang, et al., 2008, Wireless energy transfer technology. Analysis of electronics and telecommunications trends. Vol. 23, No. 6, pp. 59~69.
- (2) 2010, Proceeding of wireless energy transfer technology workshop.
- (3) Kinsler, L., et al., 1982, Fundamentals of Acoustics. Radiation and reception of acoustic waves, Wiley, New York, pp.171~204.
- (4) Je, Y., et al., 2010, A stepped-plate bi-frequency source for generating a difference frequency sound with a parametric array, The Journal of the Acoustical society of America. Vol. 127, No. 6, pp. 3494~3502.
- (5) Barone, A. and J.A.G. Juarez, 1972, Flexural Vibrating Free-Edge Plates with Stepped Thicknesses for Generating High Directional Ultrasonic Radiation, The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 51, No. 3B, pp. 953~959.
- (6) Juarez, G., et al., 1978, An ultrasonic transducer for high power applications in gases, Ultrasonics. Vol. 16, No. 6, pp. 267~271