

인체 삽입형 인공 의료 기구물 기계적 결함 모니터링을 위한 초음파 시스템 및 계측 기술 연구

윤상연* · 이문환 · 황재운

대구경북과학기술원

Research on Ultrasound System and Measurement Technology for Mechanical Defect Monitoring of Human-inserted Artificial Medical Devices

Sangyeon Youn* · Moonhwan Lee · Jae Youn Hwang

Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology

E-mail : ttorxp12@dgist.ac.kr / moon2019@dgist.ac.kr / jyhwang@dgist.ac.kr

요 약

본 연구에서는 인공 관절치환술 시 삽입되는 라이너의 잔존 두께 측정과 비구컵과의 결합 상태를 판별 할 수 있는 생체 삽입형 보철물 두께 측정 시스템 개발을 위한 생체 삽입형 초음파 변환자의 개발, 잔존 두께측정 알고리즘 및 최적화된 초음파 운용 방법에 대한 연구를 진행했다. 세부적으로, 비슷한 민감도와 대역폭을 갖는 8MHz 와 20MHz의 중심주파수를 갖는 초음파 변환자를 제작하여 상용 폴리에틸렌 재질의 인공 고관절 라이너의 다양한 두께를 측정함으로써 신호대잡음비와 축방향 해상도 비교 분석을 진행하여 체내 초음파 운용 방식 최적화 연구를 진행하였다.

ABSTRACT

In this study, we developed the biometric ultrasound transducer, residual thickness measurement algorithm and optimized ultrasound operation methods to diagnose precise conditions of implanted medical prosthetic material inserted during total hip artificial joint replacement. In detail, ultrasound transducers having 8 MHz and 20 MHz center frequencies with similar sensitivity and bandwidth were fabricated to measure various thicknesses of commercial polyethylene-based artificial hip liners, resulting in a comparative analysis of signal-to-noise ratio and axial resolution to conduct an optimization study of ultrasound operations in vivo.

키워드

Ultrasound transducer, Biometric measurement, Frequency optimization, Thickness measurement algorithm

1. 서 론

현대 의료기술의 고도화에 따라 기대 수명이 높아지고 있으며, 이에 따른 퇴행성 관절염의 발생 빈도 또한 높아지고 있다. 퇴행성 관절염 치료를 위한 관절을 고분자 및 세라믹 물질과 같은 인공 화합물로 치환하는 인공 관절 치환술의 수술 빈도와 수술 후 인공 관절은 치환된 의료기구의 마찰로 인한 마모, 삽입부 주위의 골절, 감염 및 보철물의 느슨해짐 등의 복합적인 원인으로 인한 재수술 빈도 또한 함께 증가하고 있다[1-3]. 재수술

시행 여부는 방사선 촬영뿐만 아니라 침습적으로 환부를 절개하여 진단하는 방식이 사용되어 환자의 경제적, 물리적 피해를 줄이기 위해서 인공 관절의 상태를 비침습적으로 점검 할 수 있는 시스템이 필요하다[2].

이번 연구를 통해 제안하고자 하는 시스템은 인공 고관절 치환술 시술 시 삽입되는 라이너 내부에 내장되어 인공 고관절 대체품인 Liner의 기계적 결함을 초음파를 통한 지속적인 모니터링을 할 수 있는 시스템이다. 본 연구는 전체 시스템 중 체내 삽입형 초음파 변환자의 개발과 잔존 두께 측정 알고리즘, 최적화된 초음파 운용 방법을 대상으로

* speaker

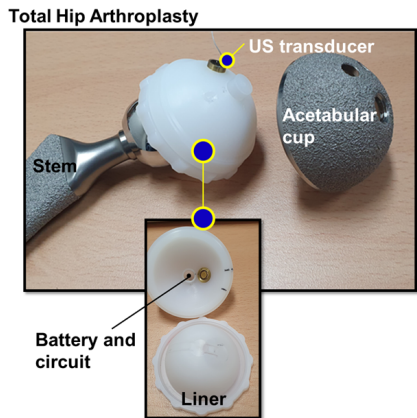


그림 1. 인공 고관절 치환술 시 환자에게 삽입될 시스템

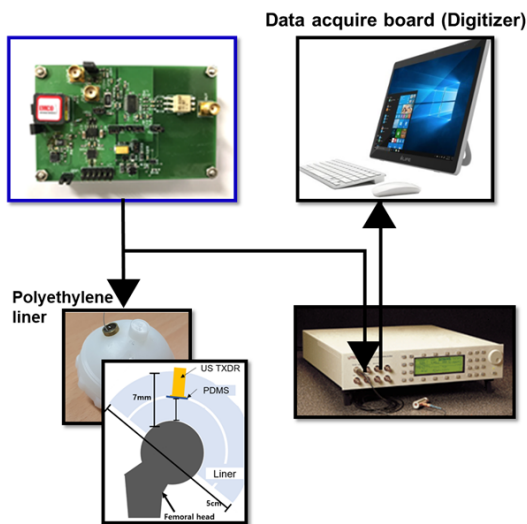


그림 2. 인공 고관절 두께 측정을 위한 실험 구성도

한다.

II. 연구 방법 및 재료

인공 고관절 치환술 시 인공 고관절을 대체할 폴리에틸렌 재질의 Liner, Femoral Stem/Head (인공 대퇴골두), Acetabular component (비구컵)을 사용하고, 실제 Femoral head와의 마찰로 인해 Liner의 마모가 발생한다. 시간에 따른 Liner의 두께를 초음파를 이용하여 무선으로 측정하기 위한 시스템은 그림 1.과 같다.

제안된 시스템은 체외와 통신하기 위해 무선 전력송신 시스템, 초음파 구동을 위한 초음파 펄서/리시버 회로, 회로로부터 발생한 전기 신호를 기계적 진동으로 변환시키는 초음파 변환자로 구성되어 있으며, 이번 연구에서는 그 중 초음파 변환자

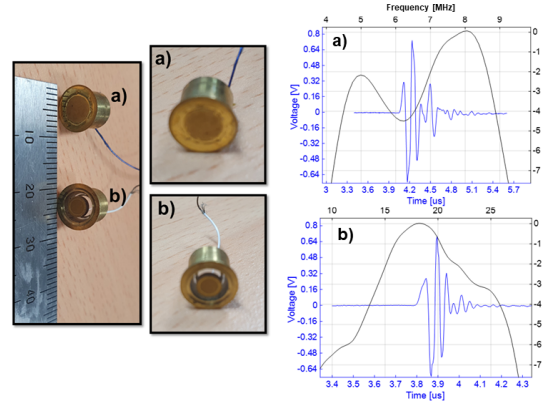


그림 3. 제작된 a) 6MHz, b) 20MHz 체내 삽입형 초음파 변환자 사진 및 반향 음향 신호 특성

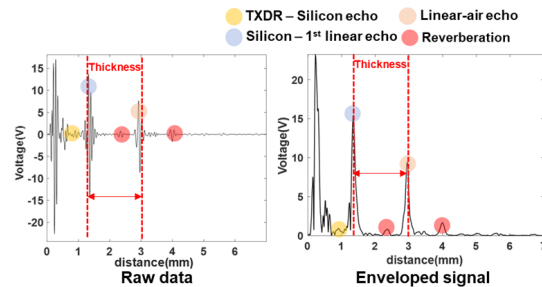


그림 4. 잔여 Liner 두께 측정 알고리즘 모식도

의 개발과 최적화된 초음파 운용방법, 라이너 두께 측정 알고리즘 개발 연구를 중점적으로 진행했다.

개발된 체내 삽입형 초음파 변환자 및 잔여 두께 측정 알고리즘 유효성 평가를 위해 서로 다른 잔여 두께의 Liner 6개(1.1mm, 1.6mm, 2.3mm, 2.7mm, 3.1mm, 3.6mm)를 대상으로 초음파를 사용하여 두께를 측정했다. 실험된 시스템의 구성은 초음파 파형을 결정하는 전기신호를 발생하는 Field Programmable Gate Array 기반 Pulser 회로, 발생된 전기 신호로부터 초음파를 발진하는 초음파 변환자, Liner 샘플에서 반향된 신호를 수집하는 Receiver 회로와 데이터 수집 보드를 통해 반향 신호를 획득하여 신호처리 과정을 거친다 [그림 2].

제작된 초음파 변환자는 주파수에 따른 반향 신호의 특성을 분석하기 위해 6MHz, 20MHz의 두 주파수 대역으로 제작하여 진행하였으며, 각 변환자의 민감도는 각각 1.42Vpp, 1.45Vpp로 유사하게 측정되었다 [그림 3]. 초음파의 인가된 전기 신호는 각 초음파 변환자의 중심주파수에 상응하는 6MHz, 20MHz의 사인파 1개 펄스를 20Vpp로 인가하여 반향신호를 측정하였다.

이와 같은 방식으로 획득된 각각의 Liner의 잔여 두께는 획득된 신호의 포락선을 검출하여 의료용 Liner의 두께에 달라지는 표면에서의 반향신호들의

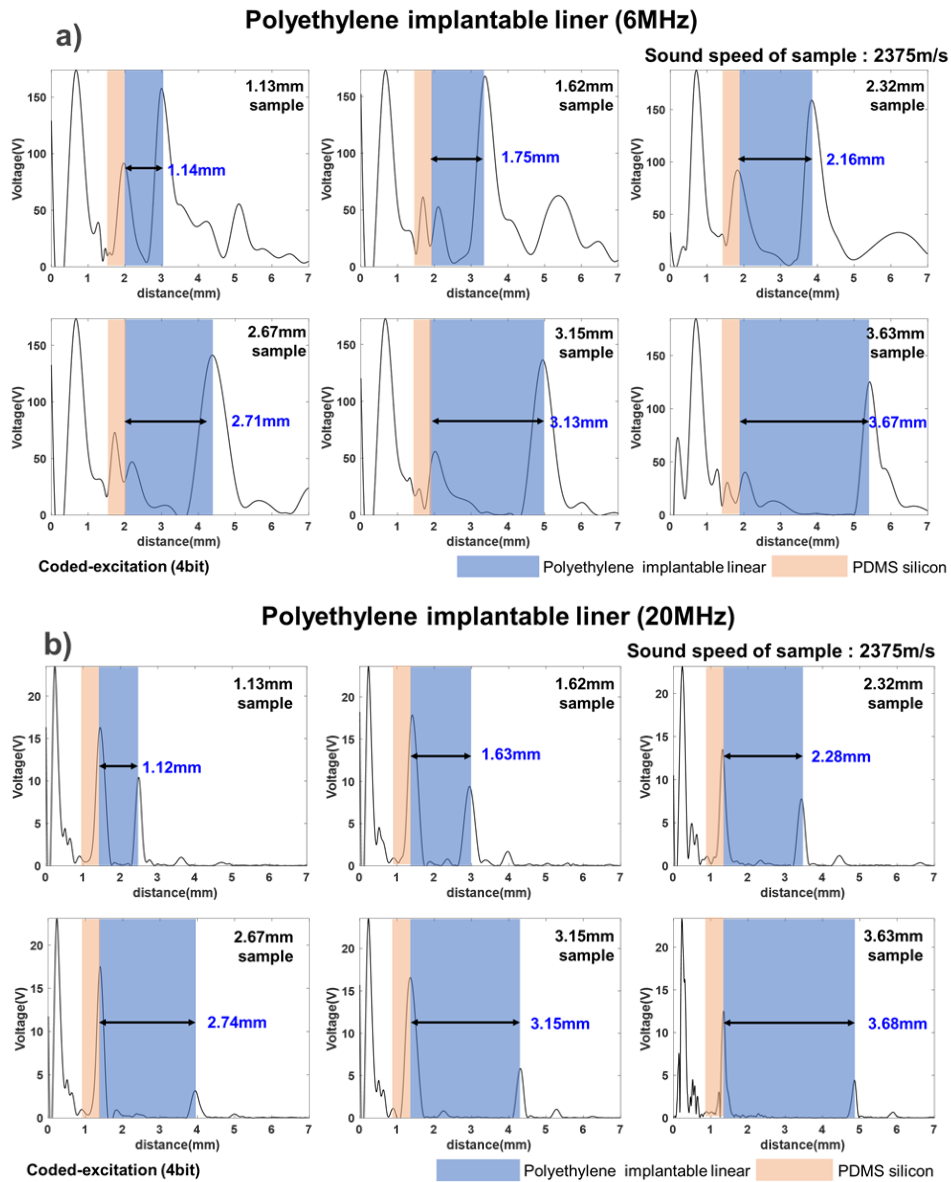


그림 5. 인공 고관절 치환술 내에 삽입될 폴리에틸렌 재질의 서로 다른 두께의 Liner를 대상으로 측정된 a) 저주파(6MHz) 초음파 반향 신호 그래프, b) 고주파 (20MHz) 초음파 반향 신호 그래프

시간차를 측정하여 Liner의 잔여 두께를 측정 할 수 있다 [그림 4].

III. 결과 및 고찰

제안된 시스템 및 개발된 알고리즘의 유효성을 평가하고, 운용된 주파수에 따른 체내 삽입형 의료 기기의 측정 정확도를 비교한 결과는 그림 5와 같다. 그림 5. a)는 6MHz의 중심주파수를 갖는 초음

파 변환자를 사용하여 각 Liner 샘플로부터 두께를 측정하였을 때, 그림 5. b)의 20MHz의 중심주파수를 갖는 초음파 변환자를 이용하여 획득한 두께보다 인가된 동일 전압에서 더 높은 세기를 보여준다. 이는 초음파가 폴리에틸렌 재질의 Liner을 투과하며 발생하는 감쇠도가 주파수에 비례하기 때문에 저주파의 초음파가 동일하게 인가된 세기에서 깊게 침투할 수 있음을 보인다. 하지만, 인공

표 1. 준비된 Liner 샘플의 두께 실측 값 기준 측정치의 정확도

샘플 두께	6MHz [%]	20MHz [%]
1.1 mm	99.1	99.1
1.6 mm	92.6	99.4
2.3 mm	93.1	98.3
2.7 mm	98.5	97.4
3.1 mm	99.3	100
3.6 mm	98.9	98.6
Average	96.9	98.8

고관절 치환술에 삽입된 Liner의 잔존 두께를 측정하는 용도에서는 충분히 각 경계면의 인식이 가능하기 때문에 보다 좋은 해상도로 측정할 수 있는 20MHz 고주파 초음파 사용이 보다 효율적이다. 인공 고관절 치환술에서 사용되는 인공 고관절 폴리에틸렌 Liner의 샘플 측정으로부터 계산된 신호대 잡음비 (Signal to Noise Ratio)는 저주파, 고주파 각각 33.39dB(표준편차 : 4.29), 21.78dB(표준편차 : 3.34)로 계산된다. 추가적으로 Liner의 경계면에서 발생하는 반향신호의 -6dB 해상도는 각각 340.4um, 133um로 측정되며, 고주파 초음파의 짧은 파장으로 인해 보다 높은 해상도를 보인다.

제안된 시스템의 유효성 평가를 위해 각 Liner 샘플에서 추산된 두께와 실측 두께를 정량적으로 비교하여 유사도를 평가했다[표 1]. 계산된 결과는 6MHz의 저주파 초음파를 이용했을 때의 정확도는 약 96.9%, 20MHz 고주파 초음파를 이용하였을 때 98.8%의 정확도를 보였다. 이는 제안된 삽입형 초음파 변환자를 이용한 두께 추산 시스템 및 알고리즘의 정확도가 95% 이상이며, 그 중 고주파 초음파는 98.8%를 보이며 성공적으로 초음파 두께 측정 시스템 및 알고리즘의 실효성을 증명했다.

IV. 결 론

본 연구를 통해, 우리는 체내 삽입형 의료 기기들의 기계적 결함 및 마모도 측정을 무선으로 모니터링할 수 있는 초음파 시스템 및 잔존 두께 측정 알고리즘을 개발하였다. 또한, 체내의 낮은 전력 상태를 고려하여 저주파 및 고주파 초음파를 각각 따로 운용하여 샘플의 깊이 및 측정 상황에 맞게 초음파를 운용하기 위한 기초 연구를 진행하였다. 현재 사용되는 인공 고관절 치환술 의료기구를 통해 인공 고관절로써 삽입되는 Liner의 여러 두께를 측정된 결과, 저주파/고주파 초음파 모두 95% 이상으로 높은 정확도를 보였다. 특히, 고주파 초음파 변환자의 정확도는 98.8%로 매우 우수한

성능을 보인다.

이는 추후 개발될 시스템 내의 전력 관리 회로 및 통신 시스템이 추가가 된다면, 체내에 삽입된 의료기기의 기계적 결함 및 마모를 보다 빠르고 정확하게 진단하여 환자의 경제적, 신체적 부담을 줄일 수 있는 보다 진보된 의료 진단기기가 될 가능성이 높다.

Acknowledgement

이 논문은 산업통상자원부의 산업핵심기술 개발 사업 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 10085624)

References

- [1] Kurtz, Steven, et al., "Projections of primary and revision hip and knee arthroplasty in the United States from 2005 to 2030.", *Jbjs*, 89.4, pp.780-785, 2007.
- [2] Encinas-Ullán, Carlos A., Primitivo Gómez-Cardero, and E. Carlos Rodríguez-Merchán., "Revision Total Knee Arthroplasty." *Comprehensive Treatment of Knee Osteoarthritis*. Springer, Cham, pp. 183-194, 2020.
- [3] Bansal, Ankit, Omar N. Khatib, and Joseph D. Zuckerman., "Revision total joint arthroplasty: the epidemiology of 63,140 cases in New York State.", *The Journal of Arthroplasty*, 29.1, pp.23-27, 2014.