

비침습적 관절 질환 모니터링을 위한 슬관절 음향분석

論 文
54D-12-8

The acoustical analysis of knee sound for non-invasive diagnosis of articular pathology

金巨植[†] · 朴景世^{*} · 金敬燮^{**} · 宋哲奎^{***}
(Keo-Sik Kim · Gyung-Se Park · Kyeong-Seop Kim · Chul-Gyu Song)

Abstract - This paper describes the possibility of evaluating and classifying arthritic pathology using the acoustical analysis of knee joint sound. Six normal subjects and 11 patients with knee problems were enrolled. Patients were divided into the 1st patient group which required an orthopaedic surgery and the 2nd patient group of osteoarthritis. During sitting and standing periods, subjects' active knee flexion and extension were monitored. Fundamental frequency, mean amplitude of pitch, jitter and shimmer were analyzed according to the position. The results demonstrate that the values of fundamental frequency, jitter and shimmer of the 2nd patient group were larger than others and changed unstably. The values of the standing position were larger than the sitting position.

Key Words : Knee Joint Sound, Fundamental Frequency, Mean Amplitude, Jitter, Shimmer

1. 서 론

관절의 퇴행성 질환은 다양한 원인의 외상으로 인해 빈번히 발생한다. 이러한 질병은 치료가 늦어질 경우 더욱 치명적으로 전이될 수 있기 때문에 조기 진단이 매우 중요하다. 하지만, 외상이 발생한 후 연골에 염증이 확산되는 동안 관절의 상태 변화를 감지하기가 어렵기 때문에 조기 진단에 한계가 있었다. 기존에는 관절 질환을 진단하기 위해 X-ray나 CT, MRI가 사용되어 왔다. 하지만, 이러한 방법들은 연골의 해부학적인 영상을 제공할 뿐 연골의 기능에 대한 정보를 제공하거나 이를 정량화하기 어렵다[1-2]. 또한, 관절 질환이 진행되는 초기 단계에서 일반적인 검사법으로는 관절의 상태 변화를 검출하는데 한계가 있으며, 연골의 퇴보가 오랜 시간 동안 진행된 후에도 관절경 검사와 같은 침습적인 검사법을 사용하지 않고 관절 질환을 진단하기는 어렵다[3]. 그러나 침습적인 검사법을 이용하면 환자에게 고통을 줄 수 있으며, 검사 후 회복 기간이 오래 걸린다는 단점이 있다.

따라서 비침습적으로 관절 질환을 진단하고자 하는 연구가 다양한 방법으로 시도되어 왔다[4]. 슬관절음은 연골 표면의 거칠기나 마찰 계수, 연화 정도에 따라 달라지기 때문에 슬관절 표면의 해부학적인 상태와 관련이 있으며, 이를 이용하여 조기 진단의 유용한 지표로 사용할 수 있기 때문이다. Chu 등은 슬관절음을 최초로 자기상관함수와 같은 과학적인 방법을 이용하여 분석하고 관절음의 특성에 따라 류마티스 관절염, 퇴행성관절염, 슬개골 연골 연화증으로 분류하였다[5].

Nagata 등은 협대역 스펙트럼을 이용하여 퇴행성관절염을 진단하기 위한 방법을 연구하였다[6]. Rangayyan 등은 질병 요인에 따라 관절의 마찰면 사이에 존재하는 연골 조직이 다를 경우 주파수 분포도 다를 것이라는 것에 착안하여, 시주파수 분석을 이용하여 반월판 열상이 손상된 환자의 경우 0~200 Hz, 연골 연화증 환자는 0~300 Hz의 대역에 에너지가 집중된다는 결과를 보였다[7].

본 연구에서는 관절음 수집 도중 유입된 불필요한 잡음을 제거하기 위한 전처리 알고리즘을 개발하고, 질병 요인에 따른 슬관절음 피치의 변화 양상을 분석하기 위해 특징 변수를 추출하고 그룹별로 비교하였다.

2. 연구 대상 및 방법

2.1 연구 대상

2004년 2월부터 동년 6월까지 전북대학교 병원에 내원한 환자들 중에서 슬관절의 이학적 검사와 MRI 검사를 실시하여 슬관절 질환이 있는 환자 11명을 실험군, 슬관절과 고관절 질환의 기왕력이 없는 정상인 6명을 대조군으로 선정하였다. 또한, 실험군은 슬관절 외상으로 반월상 연골이나 전십자 인대의 열상이 있어 정형외과의 수술적 치료가 필요했던 환자들을 실험 제 1군으로, 골 관절염으로 진단되었던 환자들을 실험 제 2군으로 분류하였다.

표 1 연구대상

Table 1 Characteristics of each group

	대조군	실험군	
		제 1군	제 2군
병명	없음	관절 손상에 의한 수술 필요	골 관절염
연령	28.3±2.3	30.2±10.3	42.1±16.2
남/여	4 / 2	5 / 1	2 / 3

[†] 교신저자, 學生會員 : 全北大學校 大學院 電子工學科 碩士課程
E-mail : keosikis@chonbuk.ac.kr

^{*} 學生會員 : 群山大學校 科學技術學部 專任講師

^{**} 正會員 : 建國大學校 醫學工學科 助教授

^{***} 正會員 : 全北大學校 電子情報工學部 副教授

接受日字 : 2005年 10月 4日

最終完了 : 2005年 10月 31日

2.2 데이터 수집 방법

고성능 피에조폴리머 센서가 내장된 전자 청진기 (SP-S1 TM, Hanbyul Meditec, Korea)를 이용하여 관절음을 수집하였다[8]. 수집된 관절음은 A/D 컨버터 (MP-100TM, Biopac system, U.S.)를 이용하여 디지털 신호로 변환되었으며, 저장된 데이터의 샘플링 주파수는 1.7 KHz이다. 또한, 관절 운동 각도를 측정하기 위해 전자 각도계 사용하였으며, 실리콘 패드와 젤을 이용하여 관절음 수집 과정에서 전자 청진기와 피부와의 마찰로 인해 발생하는 잡음을 제거하였다. 슬관절음은 해부학적인 구조를 고려하여 슬관절 주변 근육의 진동으로 인해 발생하는 잡음인 muscle contraction interference (MCI)가 가장 작은 슬개골 측면에서 수집되었다[9].

관절의 운동에 대한 프로토콜을 설정하기 위해 대퇴골과 경골 사이의 각도가 90°를 이루는 자세를 굴곡위, 0°가 되는 자세를 완전 신전위라 할 때, 굴곡위 자세에서 무릎을 완전 신전위까지 운동하고 다시 굴곡위 자세를 이루는 과정을 한 사이클이라 하였다. 좌위 자세에서 피검자는 메트로놈을 이용하여 사이클 당 2초의 속도를 유지하면서 관절 운동을 하도록 하였으며 20초간 총 3회 실시하였다. 기립위 자세에서도 동일한 방법을 수행하여 관절음을 수집하였다.

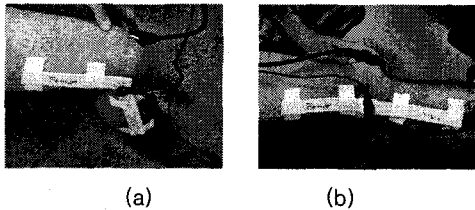


그림 1 실험 프로토콜 (a) 굴곡 (90°), (b) 완전 신전 (0°)
 Fig. 1 Experimental protocol; (a) knee flexed in 90°, (b) full extension (0°) in sitting

2.3 잡음 제거를 위한 전처리 알고리즘

수집된 신호에 유입된 잡음과 MCI 성분을 제거하기 위해 필터를 설계하였다. 전원 잡음과 고조파 잡음을 제거하기 위해 60 Hz 노치 필터와 800 Hz 저역 통과 필터를 이용하였다. 또한, 대역폭이 100 ~ 800 Hz인 4차 대역통과 필터를 이용하여 저주파에서의 MCI 성분과 고주파 잡음을 제거하였으며 전달 함수는 식 (1)과 같다[10]. 그리고 DC 성분을 제거하기 위해 1차 디지털 필터를 이용하였으며, 전달 함수는 아래 식 (2)와 같다.

$$H(z) = \frac{0.0095 - 0.0191z^{-1} + 0.0095z^{-2}}{1 - 3.6275z^{-1} + 5.011z^{-2} - 3.1256z^{-3} + 0.7436z^{-4}} \quad (1)$$

$$H(z) = 1 - 0.97z^{-1} \quad (2)$$

만약 피검자가 관절음을 수집하는 동안 관절 운동 속도를 일정하게 유지하지 않으면, 각 사이클의 주기가 변하고 이는 음향학적 변수들을 검출하고 그룹별로 비교하는데 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 동적 시간 신축 기법을 이용하여 관절 운동 주기를 일정하게 하였다. 먼저, 전자 각도계를 이용하여 관절음의 시작점과 끝점을 검출하고, 각 사이클의 주기가 2초로 설정된 기준 신호와 입력 신호로부터 맵핑 변수를 계산하여 입력 신호의 시간 축을 확대 또는 축

소하였다. 위의 전처리 과정을 거친 신호를 이용하여 각 특징 변수를 추출하였다.

2.4 특징 변수

각 피치의 주기(P_i)와 크기(A_i)를 검출하여 기본 주파수(F₀)와 평균 피치 크기(A₀), jitter, shimmer를 계산하였다. F₀는 평균피치, A₀는 평균피치의 크기를 의미하며, jitter와 shimmer는 각각 피치의 주기 변화율과 크기 변화율을 의미한다. jitter나 shimmer의 값이 클수록 피치가 더욱 불안정하고 급격하게 변하는 것을 의미한다. 그림 2는 슬관절음 각 피치의 주기와 크기를 보여주며 각각의 특징 변수는 식(3)~(6)에 의해 계산된다.

$$F_0 \text{ (Hz)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{P_i} \quad (3)$$

$$A_0 \text{ (dB)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 20 \log(A_i) \quad (4)$$

$$\text{jitter (\%)} = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |P_i - P_{i+1}|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i} \quad (5)$$

$$\text{shimmer (\%)} = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |A_i - A_{i+1}|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i} \quad (6)$$

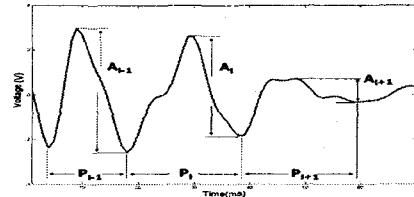


그림 2 피치의 주기 (P_i)와 크기 (A_i)
 Fig. 2 The period (P_i) and amplitude (A_i) of pitch

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 자세별 특징 변수 비교

먼저 슬관절에 가해지는 하중이나 스트레스로 인한 슬관절음의 변화를 관찰하기 위해 좌위와 기립위에서의 특징 변수를 비교하였다. 추출된 변수는 paired T-test를 이용하여 유의성을 검증하였으며 신뢰도는 95%이다. 실험 결과, 대조군의

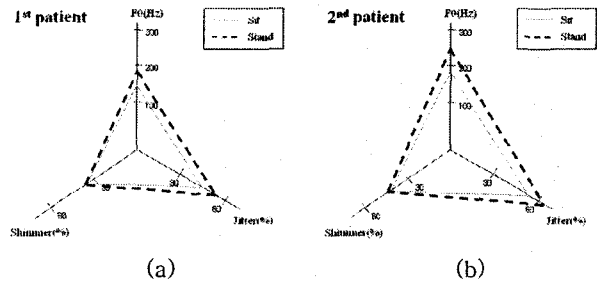


그림 3 자세별 특징 변수 (a)실험 제 1군 (b)실험 제 2군
 Fig. 3 Characteristic parameters according to position (a) the 1st experimental group (b) the 2nd experimental group in sitting and standing

좌위와 기립위에서의 변수들 간의 차이가 없었지만, 실험군에서는 기립위에서의 F_0 , jitter, shimmer가 좌위에서의 값보다 큰 값을 보였으며 A_0 는 차이가 없었다($p < 0.05$). A_0 의 경우, 신호의 크기가 매우 작아서 주변 잡음에 민감하므로, 통계분석을 하면 그룹 간에 차이가 없는 것으로 분석된다. 결과로부터 체중에 의해 슬관절에 가해지는 하중과 스트레스가 커질 경우 슬관절음의 피치가 불안정해지며, 주파수 성분이 고주파 대역에 집중되는 것을 알 수 있었다. 그림 3은 각 그룹의 좌위와 기립위에서의 특징 변수의 비교를 나타낸 그림이다.

3.2 그룹별 특징 변수 비교

질병 원인과 관절 표면의 구조적인 차이에 의한 특징 변수의 차이를 비교하기 위해 좌위와 기립위에서의 특징 변수들을 그룹별로 비교하였다. 그림 4는 각 자세에서의 그룹별 특징 변수를 비교한 것이다. 실험 결과, 자세에 관계없이 실험 제 2군의 F_0 , jitter, shimmer가 정상인에 비해 큰 값을 보였으며, 실험 제 1군의 F_0 , jitter, shimmer는 정상인에 비해 작은 값을 보였다($p < 0.05$).

실험 제 1군의 경우 외상으로 인해 관절의 특정 부위가 손상되어서 슬관절의 내부 구조가 불안정한 상태이다. 따라서 관절 사이의 마찰 부위가 뒤튼졌거나 마찰 부위가 좁고, 관절 사이에 혈액이나 삼출액이 유출되어 있어 마찰계수가 줄어들었기 때문에 정상인과 비교하여 피치 변화가 작은 양상을 보인다. 그러나 실험 제 2군의 경우에는 연골의 거의 전 부위에

염증이 있고, 관절 사이의 마찰면이 거칠기 때문에 마찰 계수가 증가하여 다른 그룹에 비해 큰 특징 변수를 보이며, 관절음의 피치도 불안정하고 급격히 변화하는 양상을 보인다. 표 2는 자세별, 그룹별 특징 변수를 표로 정리한 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 관절 운동 동안 발생하는 슬관절음을 수집하여 특징 변수를 추출하고, 자세별, 그룹별로 비교하였다. 실험 결과, 평균 피치 크기를 제외한 기본 주파수, jitter, shimmer에서 자세별, 그룹별로 차이가 있었다. 자세별 비교에서는 실험군의 기립위에서의 특징 변수가 좌위에서의 값보다 큰 값을 보였다. 또한, 그룹별 비교에서는 골 관절염 환자들의 특징 변수는 정상인의 값보다 큰 값을 보였으며, 슬관절 외상 환자들의 특징 변수는 정상인의 값보다 작은 값을 보였다. 이는 질병 원인에 따라 연골이나 슬관절 사이의 구조나 형태가 그룹마다 각기 달라서 마찰 계수가 변하기 때문이다. 본 연구 결과는 슬관절음 분석을 통한 질병의 조기 진단과 예후 판정에 도움이 될 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] I. Van Breuseghem, "Ultrastructural MR imaging techniques of the knee articular cartilage: Problems for routine clinical application", Clinical Imaging, vol. 28, pp. 233, 2004.
- [2] C. G. Peterfy, A. Guermazi, S. Zaim, P. F. I. Tirman, Y. Miaux, D. White, M. Kothari, M. Lu, K. Fye, S. Zhao, H. K. Genant, "Whole-Organ Magnetic Resonance Imaging Score (WORMS) of the knee in osteoarthritis", Osteoarthritis and Cartilage, vol. 12, pp. 177-190, 2004.
- [3] C. C. Jiang, J. H. Lee, T. T. Yuan, "Vibration arthrometry in the patients with failed total knee replacement", IEEE trans. Biomed. Eng., vol. 47, pp. 219-227, 2000.
- [4] C. B. Frank, R. M. Rangayyan, G. D. Bell, "Analysis of knee joint sound signals for noninvasive diagnosis of cartilage pathology", IEEE Engineering in Med. Bio. Magazine, vol. 9, pp. 65-68, 1990.
- [5] M. L. Chu, I. A. Gradisar, M. R. Railey, G. F. Bowling, "A non-invasive electroacoustical evaluation technique of cartilage damage in pathological knee joints", Med. Bio. Eng. Comput., vol. 16, pp. 437-442, 1978.
- [6] Y. Nagata, "Joint sounds in gonarthrosis-Clinical application of phonoarthrography for the knee", J UOEH, vol. 10, pp. 47-58, 1988.
- [7] R. M. Rangayyan, C. B. Frank, G. D. Bell, R. Smith, "Analysis of knee joint sound signals", Proc IEEE Eng. in Med. Bio. Soc. the 10th annual Int. Conf., pp.712-713, 1988.

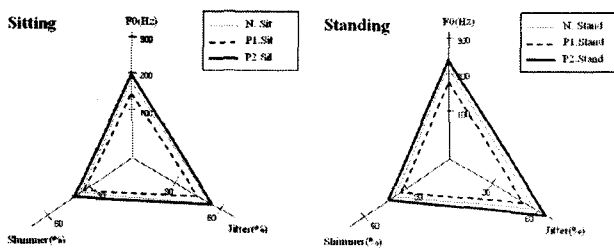


그림 4 그룹별 특징 변수 (a)좌위 (b)기립위
Fig. 4 Characteristic parameters in each group (a)sitting (b)standing

표 2 특징 변수

Table 2 The mean values of characteristic parameters

	F_0 (Hz)			jitter (%)		
	좌 위	기립위	p^1	좌 위	기립위	p^1
대조군	175.61 (115.18)	210.02 (122.52)		53.14 (26.34)	57.71 (23.86)	
실험 제1군	140.43 (105.37)	179.95 (111.44)	*	45.93 (23.35)	51.49 (20.39)	*
실험 제2군	182.14 (120.02)	235.29 (120.75)	*	55.51 (25.94)	62.19 (23.08)	*
p^2	#	#		#	#	
	A_0 (dB)			shimmer (%)		
	좌 위	기립위	p^1	좌 위	기립위	p^1
대조군	0.87 (4.85)	0.74 (4.46)		36.47 (20.70)	40.27 (20.83)	
실험 제1군	0.70 (3.55)	0.40 (1.92)		34.55 (18.41)	36.17 (15.12)	
실험 제2군	0.56 (3.29)	0.48 (3.10)		40.01 (19.67)	44.25 (18.85)	*
p^2	#	#		#	#	

(): S.D.
* : 각 그룹의 자세별 비교, $p^1 < 0.05$
: 각 자세에서의 그룹별 비교, $p^2 < 0.05$

- [8] J. E. Smeathers, M. C. Winn, A. C. C. Tann, W. Nirbito, J. H. Evans, "Detection of human articular joint pathology using piezo-ceramic transducers", Int. Soc. of Biomech. XVIIIth Cong., pp. 261, 2001.
- [9] Y. Shen, R. M. Rangayyan, G. D. Bell, C. B. Frank, Y. T. Zhang, K. O. Ladly, "Localization of knee joint cartilage pathology by multichannel vibroarthrography", Med. Eng. Phys., vol. 17, pp. 583-594, 1995.
- [10] R. M. Rangayyan, S. Krishnan, G. D. Bell, C. B. Frank, K. O. Ladly, "Parametric representation and screening of knee joint vibroarthrographic signals", IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 44, pp. 1068-1074, 1997.