

Estimation Algorithm of Bowel Motility Based on Regression Analysis of the Jitter and Shimmer of Bowel Sounds

김 거 식* · 서 정 환** · 김 민 호*** · 유 상 훈*** · 송 철 규†
 (Keo-Sik Kim · Jeong-Hwan Seo · Min-Ho Kim · Sang-Hun Ryu · Chul-Gyu Song)

Abstract - Bowel sounds (BS) are produced by the movement of the intestinal contents in the lumen of the gastro-intestinal tract during peristalsis and thus, it can be used clinically as useful indicators of bowel motility. We devised an estimation algorithm of bowel motility based on the regression modeling of the jitter and shimmer of BS signals measured by auscultation. Ten healthy males (23.5±2.1 years) were examined. Consequently, the correlation coefficient, coefficient of determination and standard error between the colon transit times (CTT) measured by a conventional radiograph and the values estimated by our algorithm were 0.98, 0.96 and 2.86, respectively. Also, through k-fold cross validation, the average value of the absolute differences between them was 5.0±2.5 hours. This method could be used as a complementary tool for the non-invasive measurement of bowel motility.

Key Words : Bowel sound, Jitter, Shimmer, Motility, Regression modeling,

1. 서 론

장 운동성(bowel motility)을 진단하기 위한 기존 방법으로는 Barr and Blethyn 지수, 대장 통과 시간(Colon Transit Time, CTT)등 방사선 영상을 이용하는 방법이 있으며, 이중 임상에서는 Metcalf 등이 고안한 CTT가 가장 널리 사용되고 있다[1-2]. CTT는 피검자가 방사선 마커(radiopaque marker)가 함유된 캡슐을 삼킨 후, 1일, 3일, 7일 후에 X-ray나 자기공명영상(MRI)을 이용하여 대장에 남아 있는 마커의 개수를 확인함으로써 장의 운동성을 진단하는 방법이다. 그러나 이러한 방사선 장치 기반의 장 운동성 진단법은 측정 기간이 1주일 정도로 길고, 검사 비용이 비싸며, 빈번한 방사선 노출(최소 3회 이상)로 인한 부작용 등의 문제점이 있다.

따라서 이러한 문제점을 해결하고자 장음(bowel sound)을 이용한 장 운동성 평가 방법이 고안되었다. 장음은 소화 운동 중 장 내 소화 물질과 가스의 이동에 의해 발생하는 음향신호로서, non-stationary한 특성이 있다. 그러나 장음 수집 시 불필요하게 유입된 심음, 호흡음 등 주변 잡음과 청진기와 피부 간 마찰로 인한 잡음은 장음 분석을 방해하는 요인이 된다. 따라서 이를 적절히 제거하기 위한 신호처리

방법으로 적응 필터링, wavelet 변환, neuro-fuzzy 모델링 기법, 첨도-기반 잡음감지 방법(Iterative Kurtosis-based Detector, IKD) 등이 보고된 바 있다[3-4]. 또한, 장 운동성의 정도에 따라 장음 신호의 크기나 빈도수, 피치 간 주기, 중심 주파수 등이 달라지는 것으로 알려져 있다[5-6]. 하지만, 기존 연구들에서 정상인과 장 운동성에 질환이 있는 환자 간의 특징 변수의 크기를 비교한 연구는 있었으나, 도출된 특징 변수를 이용하여 장 운동성을 정량적으로 진단할 수 있는 방법에 대한 연구는 없었다. 또한, 장음의 jitter, shimmer, trace를 측정하여 장 운동성을 평가한 연구는 보고된 바가 없었다.

따라서 본 연구에서는 장음의 jitter, shimmer, trace를 측정 후, 기존 장 운동성 진단법인 CTT간의 회귀 모델링을 이용하여 관계식을 도출한 후, 이를 기반으로 장 운동성을 정량적으로 진단할 수 있는 방법을 고안하였다. 이를 위해, IKD 알고리즘을 이용하여 장음에 유입된 잡음을 제거하고, 변수감소 회귀 분석법(step-wise regression analysis)을 이용하여 특징 변수들과 CTT간의 관계식을 도출하였다. 또한 k-겹 교차 검증법(k-fold cross validation)을 이용하여 제안된 방법의 성능을 평가하였다.

2. 장 운동성 진단 알고리즘

그림 1은 제안된 장음 분석을 통한 장 운동성 진단 과정으로, (a)는 장음 분석을 통해 도출된 특징 변수를 이용하여 CTT로 변환하기 위한 관계식을 구하는 과정이며, (b)는 실제 측정된 장음 특징 변수를 CTT로 변환하는 과정이다. 먼저, 수집된 장음은 4차 버터워스 대역통과 필터(5-600 Hz)와 IKD 알고리즘을 이용하여 심음, 호흡 잡음이나, 피검자의 불필요한 움직임으로 인한 잡음을 제거한다. 장음은

† 교신저자, 정회원 : 전북대 전기전자컴퓨터공학부,
 영상정보신기술연구소 교수
 E-mail : song133436@gmail.com

* 정 회원 : 전북대 대학원 전자정보공학부 박사과정
 ** 비 회원 : 전북대 의학전문대학원 재활의학교실 교수
 *** 준 회원 : 전북대 대학원 전자정보공학부 석사과정
 접수일자 : 2010년 10월 29일
 최종완료 : 2011년 1월 12일

100-500 Hz 이내에 중요한 정보가 분포되어 있으므로[6], 이를 고려하여 대역통과 필터의 대역폭을 결정하였다. 또한, IKD 알고리즘은 non-stationary 신호의 침도는 stationary 신호의 침도에 비해 크다는 특성을 이용하여, 전체 신호에서 non-stationary한 신호만을 선택적으로 추출하기 위한 것으로서, 이를 이용하면 장음에 섞여 있는 stationary 신호의 일종인 호흡음, 심음 등을 효과적으로 제거할 수 있다[3].

다음으로, 10 msec 이동 윈도우를 이용하여, 장음 신호가 존재하는 구간만을 분리(segmentation)한 후, 각 구간의 장음 신호로부터 특징 변수인 jitter($J_{ch,t}$), shimmer($S_{ch,t}$), trace(T_{ch})를 추출하며, 이는 각 식 (1)~(3)에 의해 계산된다. 여기에서, P_i , A_i , N 은 각각 장음신호 각 피치 간 주기와 각 피치의 피크 간 크기 그리고 총 피치 개수이며, ch 와 t 는 각각 장음을 측정할 채널(CH1, CH2, CH3)과 시간(1, 4, 8시간 후)을 나타낸다. 특징 변수는 총 21개(jitter 9개, shimmer 9개, trace 3개)가 측정된다.

$$J_{ch,t} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left| \frac{1}{P_i} - \frac{1}{P_{i+1}} \right| \quad (1)$$

$$S_{ch,t} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |20 \log(A_{i+1}/A_i)| \quad (2)$$

$$T_{ch} = \sum_{i=1}^2 \sqrt{(J_{ch,t} - J_{ch,t+1})^2 + (S_{ch,t} - S_{ch,t+1})^2} \quad (3)$$

이 후, 변수감소 회귀 분석법을 이용하여 특징 변수들과 CTT간의 관계식을 도출한다. 이는 종속변수와 상관성이 높은 독립변수를 순차적으로 회귀 모델에 입력하여 관계식을 도출하는 것으로, 진입 조건을 $p < 0.2$ 로 제한하였다. 다시 말해, 전체 21개 특징변수 중 CTT와 상관성이 높은 변수들(SF_k)을 선정된 후, 선택된 변수들을 CTT로 변환($eCTT$)하기 위한 회귀 방정식의 계수(C_k)를 추정함으로써, 식 (4)와 같은 변환식을 도출할 수 있다. 여기에서, k 와 M 은 각각 선택된 특징 변수의 종류와 총 개수를 의미한다.

$$eCTT = \sum_{k=0}^M C_k SF_k \quad (4)$$

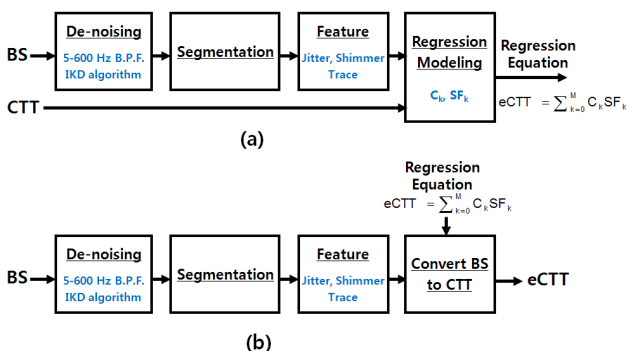


그림 1 장음 분석을 통한 장 운동성 진단 알고리즘 (a) 회귀방정식 산출 과정, (b) 장 운동성 변환 과정
Fig. 1 Algorithm for estimating the CTT, (a) procedures for calculating the regression equation, and (b) for converting the selected features to CTT

최종적으로, 피검자의 장음 신호에서 측정된 특징 변수들을 상기 과정을 통해 획득한 식 (4)에 입력함으로써, 장 운동성을 진단한다.

3. 실험 대상 및 방법

장 운동성에 질환이 없는 정상인 남자 10명을 대상으로 장음 신호와 CTT를 수집하였다. 피검자의 연령은 23.5±2.1세, 체질량 지수(Body Mass Index, BMI)는 22.7±2.3 kg/m²이었으며, CTT는 20.4±15.8 시간이었다.

고성능 피에조폴리머 마이크로폰(CM-01B, Measurement Specialties Inc., U.S.)을 이용하여 상행 결장(CH1), 하행 결장(CH2), S자 결장(CH3)에서 장음을 수집하였다. 수집된 아날로그 신호는 A/D 컨버터(USB-6009, NI Corp., U.S.)를 이용하여 디지털 신호로 변환하였으며, 샘플링 주파수와 해상도는 각각 8 KHz, 14 bits이었다. 그림 2는 본 연구에서 사용된 장음 측정 장치를 나타낸다.

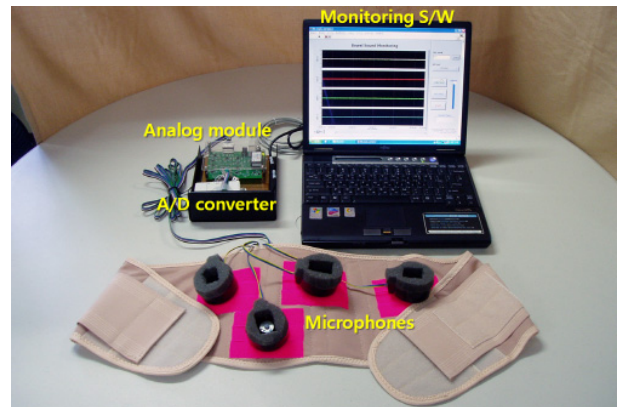


그림 2 제작된 장음 측정 장치
Fig. 2 Photograph of the developed system

CTT는 Metcalf 등[2]에 의해 제안된 방법을 이용하여 측정하였다. 먼저 방사선 마커 20개가 함유된 캡슐을 3일 간 알씩 복용한 후, 각각 4일과 7일이 경과한 날에 X-ray촬영을 실시하여 대장에 남아있는 마커의 개수를 확인함으로써 CTT를 측정하였다. 장음 수집은 마커를 삼킨 지 7일이 경과한 날에 측정하였다. 먼저 9시 경에 약 200g의 음식을 섭취한 후, 10시(1시간 경과, t=1), 13시(4시간 경과, t=2), 17시(8시간 경과, t=3)에 각 10분간 장음 신호를 수집하였다.

4. 실험 결과

그림 3은 피검자(27세 남자, BMI: 20.7kg/m²)의 상행 결장(CH1, t=3)에서 수집한 (a) 잡음이 섞인 장음 신호와, (b) IKD 알고리즘을 이용해 걸러진 순수한 장음 신호 성분과 (c) 잡음 신호를 나타낸다. 그림을 통해, 제안된 방법에서 사용된 IKD 알고리즘이 불규칙적으로 발생하는 순수한 장음 신호를 선택적으로 분리할 수 있음을 알 수 있다.

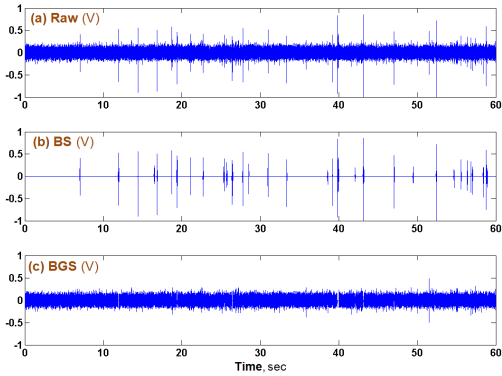


그림 3 (a) 수집된 장음 신호, (b) IKD 알고리즘을 이용해 분리된 순수한 장음 신호와 (c) 주변잡음 신호

Fig. 3 (a) Raw signals obtained from the abdomen, (b) bowel sounds detected by the IKD algorithm and (c) back-ground noise

변수감소 회귀 모델링 과정에서 모델 차수의 증가에 따른 추출된 특징 변수와 CTT 간의 상관계수(R), 결정계수(R²), 표준오차(S.E.)와 변화량을 계산하여 CTT를 추정하기에 적합한 특징 변수와 변환식의 차수를 결정하였다. 실험을 통해 상관계수(0.978)와 결정계수(0.956)가 크고, 표준오차(2.86)가 작으며, 차수가 증가하여도 각 값의 변화(ΔR, ΔR²)가 0.1 이하인 5차 회귀 방정식을 장 운동성 진단을 위한 변환식으로 선정하였으며, 이는 식 (5)와 같다.

$$eCTT = -72.4 - 25.4T_3 + 2050.5J_{2,1} - 1329.4J_{1,2} + 4.0S_{3,2} - 2.6S_{1,2} \quad (5)$$

표 1은 회귀 분석을 통해 선택된 5가지 특징 변수, 기존 방사선 진단법을 통해 측정된 CTT와 제안된 방법을 통해 추정된 CTT를 나타낸다. 실험 결과, 측정된 CTT와 추정된 값 간(eCTT)의 절대 오차는 1.6±1.1 시간(범위: 0.6~4.0 시간)이었다. 이러한 오차는 피검자수가 상대적으로 적었기 때문에 발생한 것으로 생각되며, 다수의 피검자를 대상으로 장음 신호를 수집하여 변환식을 도출할 경우 오차를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

표 1 회귀 분석을 통해 선택된 특징 변수, 측정된 대장 통과 시간(CTT)과 추정된 값(eCTT)

Table 1 Selected features among all 21 features, measured colon transit times and estimated values

T ₃	J _{2,1}	J _{1,2}	S _{3,2}	S _{1,2}	CTT	eCTT
2.1	0.141	0.147	32.4	34.7	2.4	5.1
1.0	0.148	0.171	36.0	36.0	25.2	25.8
2.1	0.157	0.156	33.8	36.2	26.4	27.0
3.5	0.165	0.172	36.7	35.0	2.4	1.2
1.9	0.148	0.154	34.2	34.4	26.4	22.3
2.9	0.153	0.152	36.6	38.3	10.8	10.3
2.4	0.149	0.153	34.1	34.6	12.0	12.7
2.2	0.151	0.161	36.8	34.6	18.0	19.7
3.4	0.161	0.153	36.1	37.6	10.8	12.9
2.1	0.145	0.153	36.5	37.1	16.8	15.0
Absolute error					1.6 ± 1.1 hours	

제안된 방법의 신뢰성과 재현성을 평가하기 위해 k-묶음 교차 검증법을 실시하였다. 전체 10명의 데이터 중 임의로 6명의 특징 변수(T₃, J_{2,1}, J_{1,2}, S_{3,2}, S_{1,2})를 이용하여 관계식을 도출한 후, 나머지 4명의 데이터를 도출된 관계식에 입력하여 실제 CTT와 추정된 CTT간의 절대 오차를 계산하였다. 이를 총 10회 반복한 결과, 절대 오차는 5.0±2.5 시간(범위: 0.8~7.2 시간)이었다.

5. 결 론

본 연구에서는 장음 신호에서 특징 변수를 추출한 후, CTT와의 회귀 모델링을 통해 관계식을 도출하고, 이를 이용하여 장 운동성을 진단할 수 있는 방법을 제안하였다. 실험 결과, k-묶음 교차 검증법을 통해 실제 측정된 CTT와 제안된 방법에 의해 추정된 값 간의 절대 오차는 5.0±2.5 시간이었다. 연구를 통해, 장음에서 추출한 jitter, shimmer, trace가 장 운동성을 진단할 수 있는 비 침습적인 도구로 사용될 수 있는 가능성을 확인하였으며, 이는 장음 분석을 통한 질병의 조기 진단과 예후 판정에 도움이 될 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] Jackson C.R., Lee R.E., Wylie A.B.Z., Adams C., Jaffray B., "Diagnostic accuracy of the Barr and Blethyn radiological scoring systems for childhood constipation assessed using colonic transit time as the gold standard", *Pediatr. Radiol.*, vol. 39, pp. 664-667, 2009.
- [2] Metcalf A.M., Phillips S.F., Zinmeister A.R., MacCarty R.J., Beart R.W., Wolff B.G., "Simplified assessment of segmental colonic transit", *Gastroenterology*, vol. 92, pp. 40-47, 1987.
- [3] Rekanos I.T., Hadjileontiadis L.J., "An iterative kurtosis-based technique for the detection of nonstationary bioacoustic signals", *Signal Process.*, vol. 86, pp. 3787-3795, 2006.
- [4] Dimoulas C., Kalliris G., Papanikolaou G., Kalampakas A., "Long term signal detection, segmentation and summarization using wavelets and fractal dimension", *Comput. Biol. Med.*, vol. 37, pp. 438-462, 2007.
- [5] Yamaguchi K., Yamaguchi T., Odaka T., Saisho H., "Evaluation of gastrointestinal motility by computerized analysis of abdominal auscultation findings", *J. Gastroen. Hepatol.*, vol. 21, pp. 510-514, 2006.
- [6] Ranta R., Dorr V.L., Heinrich C., Wolf D., Guillemin F., "Digestive activity evaluation by multichannel abdominal sounds analysis", *IEEE T. Bio-med. Eng.*, vol. 57, pp. 1507-1519, 2010.