

# Development of a Screening Swallowing Algorithm for Using Ultrasonic Doppler Sensor and Microphone

Baekhee Lee<sup>1</sup>, Giltae Yang<sup>2</sup>, Sewon Hong<sup>3</sup>, Duklyul Na<sup>4</sup>, and Heecheon You<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial and Management Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, 37673

<sup>2</sup>R&D Research Team, SEED Technology, Co., Bucheon, 14523

<sup>3</sup>R&D Research Team, Digital Echo, Co., Hwaseong, 18385

<sup>4</sup>Department of Neurology, Sungkyunkwan University School of Medicine, Seoul, Seoul, 06351

## ABSTRACT

**Objective:** The present study is to develop an algorithm for screening only swallowing movements out of various laryngopharyngeal movements using ultrasonic Doppler sensor and microphone. **Background:** Only swallowing movements need to be discriminated out of various laryngopharyngeal movements (e.g., vocalization, cough) measured by a swallowing measurement system using ultrasonic Doppler sensor for specialization in swallowing research. **Method:** laryngopharyngeal movement and audio signals during swallowing, cough, vocalization, respiratory, and neck movement were simultaneously measured three times to five healthy adults by ultrasonic Doppler sensor and microphone. A swallowing screening algorithm calculating movement-to-audio ratio applied with swallowing apnea was developed for screening only swallowing movements. **Results:** Vocalization, cough, and respiratory movements were perfectly discriminated with swallowing movements by the swallowing screening algorithm; however, neck rotation movements 73% due to occurring no laryngopharyngeal movements. **Conclusion:** The swallowing screening algorithm developed in the study could discriminate swallowing movements from vocalization, cough, and respiratory movements. **Application:** The swallowing screening algorithm can be applied to the swallowing measurement device and contribute to accurate evaluation of swallowing movements for patients with dysphagia.

Keywords: Swallowing, ultrasonic Doppler signal, Audio signal, Swallowing apnea, Dysphagia

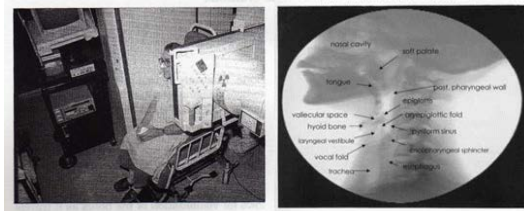
## 1. Introduction

삼킴 장애(연하 곤란, dysphagia)는 음식을 먹는 과정에서 발생하는 어려움의 질병으로서, 정확한 진단 및 신속한 치료가 중요하다. 삼킴 장애는 주로 뇌졸중, 중후 신경 및 말초 신경의 퇴행성 질환, 외상성 뇌질환, 두경부 종양, 근육 질환 환자들에게 동반되며(Daniels et al., 2006), 나이가 증가할수록 유병률도 증가(Morris, 2006)하여 특히 60세 이상 노인들의 유병률이 높다(Robbins and Barczy, 2003). 삼킴 장애가 발생하면 흡인, 폐렴, 탈수, 영양실조 등이 유발되고 심해지면 사망할 수 있어(Ekberg et al., 2002), 삼킴 장애의 보다 정확한 진단 및 신속한 치료를 통하여 삼킴 장애 환자들의 삶의 질 향상에 대한 관심이 증대되고 있다(Wilkins et al., 2007).

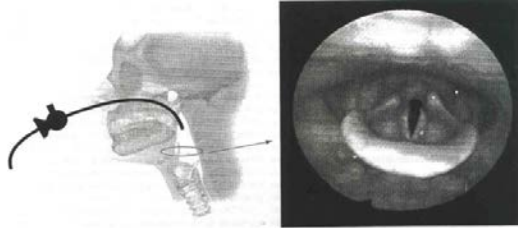
삼킴 장애 평가를 위한 기존 삼킴 측정 장비들은 정량적 검사결과 미제공과 낮은 안전성 및 불편함 측면의 한계가 있다. 기존 삼킴 장애는 주로

인두강(pharynx) 내부에 대하여 Figure 1과 같은 비디오 투시 조영 검사(VideoFluoroscopic Swallowing Study, VFSS)와 비디오 내시경 검사(Fiberoptic Endoscopic Evaluation of Swallowing, FEES)를 통하여 임상가에 의해 진단되고 있다(Langmore et al., 1988). 그러나, 전술된 장비들을 사용할 경우 임상가 육안에 의해 정성적으로 삼킴이 평가되어야 하고, VFSS의 경우 방사선 노출과 FEES의 경우 침습으로 인하여 안전성이 낮고 삼킴의 측정이 불편한 것으로 보고되고 있다(Lee et al., 2012).

기존 삼킴 측정 장비들(VFSS, FEES)의 한계점 보완을 위하여 ultrasonic Doppler sensor를 사용하여 삼킴 시 인후두(laryngopharynx) 움직임을 측정하는 신규 삼킴 측정 장비가 개발되었으나 삼킴 움직임만 정확하게 선별하는 방법의 개발이 필요하다. Lee et al.(2012)는 Figure 2와 같이 초음파 도플러 센서를 사용하여 인두강 내부기관의 움직임을 파악할 수 있는 삼킴 측정 장치와 측정된 삼킴 신호를 peak amplitude, duration, number of peaks, peak interval, 그리고 impulse의



(a) VideoFluoroscopic Swallowing Study (VFSS)



(b) Fiberoptic Endoscopic Evaluation of Swallowing (FEES)

Figure 1. Existing devices for diagnosis of dysphagia

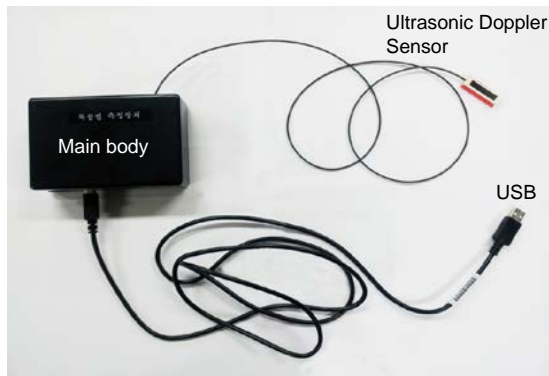


Figure 2. Swallowing measurement device by Lee et al.(2012)

다섯 가지 삼킴 정량화 척도로 분석하는 시스템을 개발하였다. Lee et al.(2013)은 개발된 삼킴 측정 장치의 효용성 평가를 위하여 정상인 120명과 삼킴 장애 환자 36명을 비교한 결과, 삼킴 장애 환자는 정상인보다 peak amplitude가 1.3배 작고, duration이 3배 크며, number of peaks가 2배 유의하게 많은 것으로 나타났다. 그러나, 개발된 삼킴 측정 장치는 삼킴 움직임 외에도 발성, 기침, 호흡, 목 움직임과 같은 삼킴 외 움직임들도 측정되는 것으로 파악되어 삼킴 움직임만 정확하게 선별하는 알고리즘 개발이 필요하다.

본 연구는 ultrasonic Doppler sensor를 사용한 삼킴 측정 장치로 측정되는 다양한 laryngopharynx 움직임들 중 삼킴 움직임만 선별하는 알고리즘을 개발하였다. Laryngopharynx 움직임 발생 시 소리를 측정하기 위하여 개발된 삼킴 측정 장치에 microphone이 추가로 탑재되었다. 삼킴 선별 알고리즘은 움직임 신호와 소리 신호를 사용하고 삼킴 무호흡(swallowing apnea)



Figure 3. Laryngopharyngeal movements measured by the swallowing measurement device (Lee et al., 2012)

개념을 적용하여 개발되었으며 정상인 5명을 대상으로 효용성이 평가되었다.

## 2. Method

### 2.1 Apparatus

본 연구는 소리 신호를 획득하기 위하여 ultrasonic Doppler sensor를 사용한 삼킴 측정 장치에 초소형 microphone을 탑재하였다. Ultrasonic Doppler sensor (frequency = 2 MHz, Amplitude = 94 mW/cm<sup>2</sup>, Power = 20 mW; SeedTech, Co., Korea)와 초소형 microphone (sensitivity = -38 ~ 48 dB, frequency = 50 ~ 16 kHz, S/N ratio > 60 dB; PBM Electech, Co., Korea)은 목 고정 시 움직임과 소리 신호가 동시에 획득될 수 있도록 Figure 4와 같이 case에 함께 부착되었다.

### 2.2 Swallowing screening algorithm

인두 삼킴 단계에서 기도(trachea)와 성대(vocal fold)가 닫힘으로써 호흡(respiratory)과 발성(vocalization)이 모두



Figure 4. Laryngopharyngeal movements measured by the swallowing measurement device

불가능한 상태이다(Loch et al., 1982; Nichino, 1990; Ren et al., 1993). 정상인의 삼킴 무호흡 시간(swallowing apnea duration)은 연령, 성별, 음식 종류, 그리고 음식 용량에 따라 1 ~ 3초 정도로 나타난다(Radish and Jayashree, 2012). 따라서, 인두 삼킴이 발생하는 최소 1초동안은 소리 발생이 불가능하고, 인두 삼킴 중심(movement peak)으로부터 최소 전후 0.5초동안은 소리 발생이 불가능하다. 즉, Figure 5와 같이 소리 발생 중심(audio peak)으로부터 최소 전후 0.5초동안은 삼킴 발생이 불가능하다.

발성과 기침 움직임들을 cancellation하기 위하여 시간대별 삼킴 움직임 발생 가능 확률을 나타내는 maximum-likelihood function(MLF)이 개발되었다. Figure 6.a에 나타난 바와 같이, 소리 발생 중심으로부터 전후 0.5초동안은 삼킴 움직임 발생 확률이 거의 없기 때문에 1%로, 전후 0.5초 이후에는 삼킴 움직임 발생 확률이 최대 swallowing apnea duration인 전후 1.5초(총 3초)까지 점점 선형으로 최대 99%까지 높아지도록 MLF가 개발되었다. Figure 6.b에 나타난 바와 같이, 연속적인 다량의 소리가 발생할 경우 최초에서 최종 소리 발생 중심 사이에서는 삼킴 움직임 발생 확률이 거의 없기 때문에 1%로 설정하는 통합 MLF도 개발되었다.

삼킴 선별 알고리즘은 Figure 7과 같은 5단계 절차(S1. smoothing, S2. audio peak detection, S3. MLF application, S4. audio binary conversion, S5. swallowing peak detection)로 구성된다. 첫째, smoothing 단계에서는 움직임과 소리 신호에 moving average 기법(lag  $n = 50$ )을 적용(Lee et al., 2012)하여 noise를 제거하고 peak를 명확하게 만든다. 둘째, audio peak detection 단계에서는 소리 신호 cutoff 값(0.15 mV) 이상에서 검출된 audio peak들을 선정한다. 셋째, MLF application 단계에서는 audio peak 개수에 따른 단일/통합 MLF를 움직임 신호에 곱해준다. 넷째, audio binary conversion 단계에서는 소리

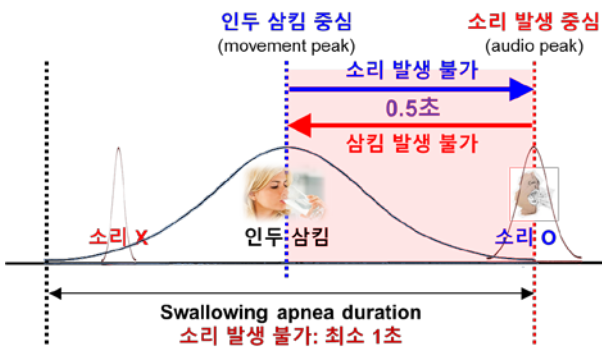
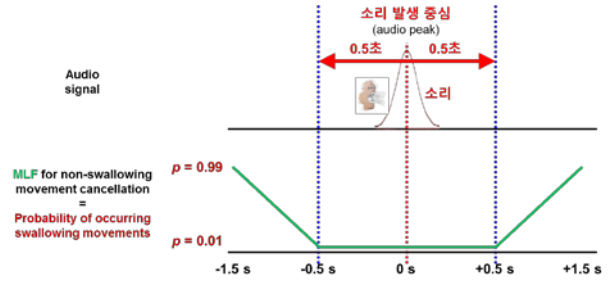
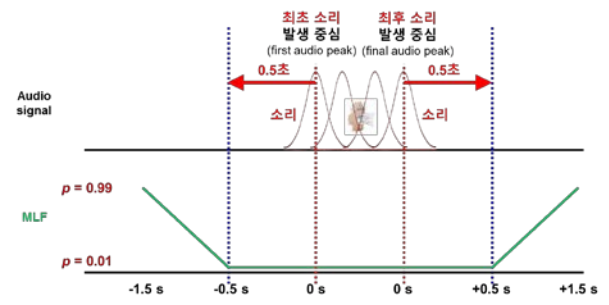


Figure 5. Swallowing apnea duration on pharyngeal movement and audio signals



(a) MLF for uni-audio peak



(b) MLF for multi-audio peaks

Figure 6. Maximum-likelihood function (MLF) for non-swallowing movement cancellation

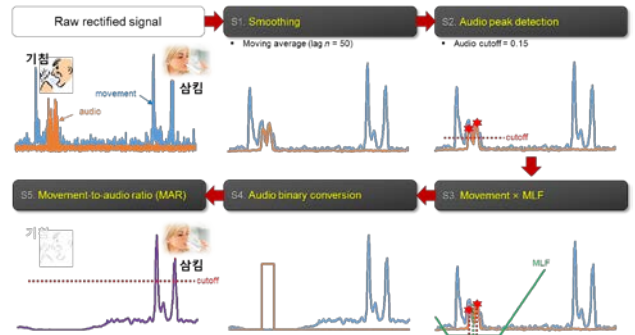


Figure 7. Swallowing screening algorithm (blue line: movement signal, orange line: audio signal, green line: MLF, purple line: movement-to-audio ratio)

신호의 안정화를 위하여 소리 신호 cutoff 값보다 크면 1, 작으면 0.01로 이분화시킨다. 마지막으로, swallowing peak detection 단계에서는 움직임 신호에서 소리 신호를 나눈 값인 movement-to-audio ratio를 계산하고 일정 cutoff 값 이상에서 검출되는 peak들을 삼킴으로 판별한다. 한편, 개발된 삼킴 선별 알고리즘은 Matlab 2011a로 구현되어 측정된 움직임 신호와 소리 신호를 불러오고 유관 parameter들(예: 소리 신호 cutoff, 삼킴 선별 cutoff 등)만 입력하면 movement-to-audio ratio가 산출 및 저장되는 자동화 프로그램으로 개발되었다.

### 2.3 Experimental design

삼킴 선별 알고리즘 검증을 위하여 정상인 5명(20대 남성)을 대상으로 삼킴, 발성, 기침, 호흡, 그리고 목 움직임의 5가지 실험조건에 대하여 인후두 움직임과 소리 신호가 동시에 3회씩 측정되었다. 삼킴은 물 1ml에 대한 삼킴이, 발성은 임의의 50자 이내 1문장 읽기가, 기침은 고의적 기침이, 호흡은 코, 입, 코입 동시 호흡이, 목 움직임은 좌/우, 상/하, 회전에 대해 수행되었다. 실험 순서는 5 × 5 balanced Latin square가 적용되어 Table 1과 같이 수행되었다.

Table 1. Experimental order by 5 × 5 balanced Latin square

	1번째	2번째	3번째	4번째	5번째
S01	삼킴	발성	기침	호흡	목 움직임
S02	발성	기침	목 움직임	삼킴	호흡
S03	기침	목 움직임	호흡	발성	삼킴
S04	호흡	삼킴	발성	목 움직임	기침
S05	목 움직임	호흡	삼킴	기침	발성

### 3. Results

삼킴은 기침, 발성, 그리고 호흡과 100% 구별되고 목 움직임과는 73% 구별되는 것으로 나타났다(Table 2). 개발된 삼킴 선별 알고리즘은 Figure 8과 같이 다양한 인후두 움직임에 대해 삼킴 움직임만을 정확하게 선별할 수 있는 것으로 파악되었다. 삼킴 선별 알고리즘은 인후두 움직임과 소리가 함께 발생하는 기침과 발성과 인후두 움직임이 거의 발생하지 않는 호흡의 경우 삼킴과 100% 구별하였다. 목 움직임은 좌/우, 상/하 움직임의 경우 인후두 움직임이 발생하지 않아 삼킴과 100% 구별될 수 있었으나, 인후두 움직임이 일부 발생했던 목 회전 움직임의 경우 27%(4/15회) 구별하지 못했다.

Table 2. Swallowing screening results (O: peak amplitude < cutoff, X: o/w)

	기침	발성	코	입	코/입	좌/우	목 움직임 상/하	회전
Movement	+	+	-	-	-	-	-	+
Audio	+	+	o	o	o	o	o	o
S01 (cutoff = 80)	o	o	o	o	o	o	o	o
S02 (cutoff = 80)	o	o	o	o	o	o	o	o
S03 (cutoff = 40)	o	o	o	o	o	o	o	o
S04 (cutoff = 40)	o	o	o	o	o	o	o	x
S05 (cutoff = 80)	o	o	o	o	o	o	o	x
Discriminant rate (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	73%

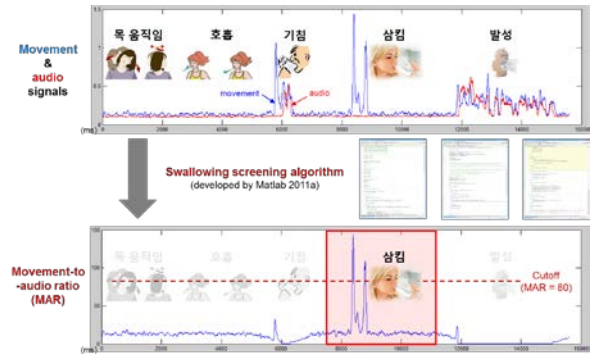


Figure 8. Example of non-swallowing movement cancellation by the swallowing screening algorithm developed in the present study

### 4. Discussion

본 연구는 ultrasonic Doppler sensor를 사용한 삼킴 측정 장치(Lee et al., 2012)로 측정되는 다양한 인후두 움직임들(삼킴, 발성, 기침, 호흡, 목 움직임) 중 삼킴 움직임만을 선별하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 삼킴 시 소리가 발생할 수 없는 swallowing apnea 개념(Loch et al., 1982; Nichino, 1990; Ren et al., 1993)을 적용하기 위하여 기존 삼킴 측정 장치에 초소형 microphone을 연동하여 인후두 움직임 신호와 소리 신호를 동시에 획득하였다. 삼킴 시 인후두 움직임이 발생하지만 소리 발생이 불가능한 개념 구현에 특화된 신호 처리(예: moving average 기법)와 통계 기법(예: maximum-likelihood function)을 적용하여 삼킴 선별 알고리즘이 개발되었다. 개발된 삼킴 선별 알고리즘은 일상생활 중 삼킴 장애 환자의 다양한 인후두 움직임들 중 삼킴 움직임만을 정확하게 선별하여 삼킴 장애의 진단 및 치료 연구에 기여할 수 있다.

개발된 삼킴 선별 알고리즘을 사용하면 기침, 발성, 그리고 호흡의 경우 100% 삼킴과 구별이 가능하지만, 목 회전 움직임의 경우 일부(27%)가 삼킴과 구별되지 않아 추후 연구가 필요하다. 소리가 발생하는 기침, 발성과 인후두 움직임이 발생하지 않는 호흡은 삼킴 선별 알고리즘으로 삼킴과 구별된다. 그러나, 소리는 발생하지 않으나 인후두 움직임만 발생하는 목 회전의 경우 삼킴 선별 알고리즘으로 삼킴과 정확하게 구별할 수 없었다. 따라서, 목 변위(deviation)가 발생하는 목 회전을 삼킴과 구별하기 위해서는 변위를 측정할 수 있는 장치(예: gyro sensor, accelerometer)와 같은 장치를 추가로 탑재하여 신규 삼킴 선별 알고리즘을 개발하는 연구가 필요하다.

## Acknowledgements

The present research was jointly supported by the Ministry of Health & Welfare (HI10C0626) and the Biomedical Research Institute of Chonbuk National University Hospital.

## References

- Daniels, S.K., Schroeder, M.F., McClain, M., Corey, D.M., Rosenbek, J.C., and Foundas, A.L., Dysphagia in stroke: development of a standard method to examine swallowing recovery, *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 43(3), 347-356, 2006.
- Ekberg, O., Hamdy, S., Woisard, V., Wuttge-Hannig, A., and Ortega, P., Social and psychological burden of dysphagia: its impact on diagnosis and treatment, *Dysphagia*, 17, 139-146, 2002.
- Langmore, S.E., Schatz, K., Olsen, N., Fiberoptic endoscopic examination of swallowing safety: a new procedure, *Dysphagia*, 2(4), 216-219, 1988.
- Lee, B., Jung, K., Yang, K., Seo, M., Na, D., and You, H., Development of a quantitative assessment system for dysphagia using Doppler ultrasound, In *Proceedings of the 2012 Spring Conference of the Korean Institute of Industrial Engineers*.
- Lee, B., Lee, H., Yun, M., Suh, M., Na, D., and You, H., Comparison of swallowing characteristics in normal controls and patients with dysphagia, In *Proceedings of the 2013 Spring Conference of the Ergonomic Society of Korea*.
- Loch, W.E., Loch, W.E., Reiriz, H.M., Loch, M.H., Swallow apnea: Rhinomanometric manifestation and classification, *Rhinology*, 4, 179-91, 1982.
- Morris, H., Dysphagia in the elderly: a management challenge for nurses, *British Journal of Nursing*, 15(10), 558-562, 2006.
- Nishino, T., Yonezawa, T., Hon, D.A., Effects of swallowing on the pattern of continuous respiration in human adults, *Am Rev Respir Dis*, 6, 1219-1222, 1985.
- Ren, J., Shaker, R., Zamir, Z., Doods, W.J., Hogan, W.J., Hoffmann, R.G., Effect of age and bolus variables on the coordination of the glottis and upper esophageal sphincter, *Am J Gastroenterol*, 88, 665-669, 1993.
- Robbins, J.A., and Barci, S.R., Disorders of swallowing, In W. Hazzard & J. Halter (Eds.), *Principles of geriatric medicine* (5th ed.), New York: McGraw Hill, 2003.
- Wilkins, T., et al., The prevalence of dysphagia in primary care patients: a HamesNet Research Network study, *The Journal of the American Board of Family Medicine*, 20(2), 144-150, 2007.

**Baekhee Lee:** x200won@postech.ac.kr

**Highest degree:** M.S., Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

**Position title:** Ph.D. candidate, Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

**Areas of interest:** Vehicle ergonomic, Clinical ergonomic, Ergonomic product design & development, Digital human modeling & simulation

**Giltae Yang:**

**Highest degree:**

**Position title:**

**Areas of interest:**

**Saewon Hong:** swhong@digital-echo.co.kr

**Highest degree:** M.S., Biomedical Engineering

**Position title:** CTO of Digital ECHO Co., Ltd.

**Areas of interest:** Biomedical Ultrasound Transducer Engineering

**Duk L. Na:** dukna@skku.edu

**Highest degree:** Ph.D., Department of Neurology, Korea University School of Medicine

**Position title:** Professor, Department of Neurology, Samsung Medical Center, Sungkyunkwan University School of Medicine

**Areas of interest:** Dementia and cognitive neurology, cognitive training, diagnosis, treatment and prevention for dementia, life style modification for dementia prevention

**Heecheon You:** hcyou@postech.ac.kr

**Highest degree:** Ph.D., Industrial Engineering, Pennsylvania State University

**Position title:** Associate Professor, Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

**Areas of interest:** Ergonomic product design & development, User interface design & evaluation, Digital human modeling & simulation, Human performance & workload assessment, Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) prevention, Usability testing

## Author listings