

Comparison of Swallowing Characteristics in Normal Controls and Patients with Dysphagia

Baekhee Lee¹, Hyewon Lee¹, Myeongeun Yun¹, Mee Kyung Suh², Duk L. Na², and Heecheon You¹

¹Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH, Pohang, 790-784

²Department of Neurology, Sungkyunkwan University School of Medicine, Samsung Medical Center, Seoul, 135-710

ABSTRACT

Objective: The present study is intended to compare swallowing characteristics between normal controls and patients with dysphagia through quantification of the pharyngeal movement. **Background:** The existing diagnoses of swallowing have been qualitatively conducted by a clinician referring to results of the VideoFluoroscopic Swallowing Study (VFSS) or the Fiberoptic Endoscopic Evaluation of Swallowing (FEES); therefore, a quantitative methodology for assessment of the swallowing is required to diagnose dysphagia more accurately. **Method:** A three-step approach was applied in the study: (1) development of a swallowing measurement device consisting of an ultrasonic Doppler sensor to measure the pharyngeal movement, (2) establishment of five swallowing quantification measures (peak amplitude, duration, number of peaks, peak interval, and impulse of swallowing) by a swallowing signal preprocessing, (3) evaluation of the swallowing in 120 normal controls and 36 dysphagic patients by three-step protocol (S1. informed consent, S2. exercise, S3. swallowing session; type and volume: dry saliva, thin liquid 1, 3, 9 ml, and thick liquid 1, 3, 9 ml). **Results:** Swallowing signals of normal controls and dysphagic patients classified into 2 types (short-single: 39%; short-double: 43%) and 3 types (short-double: 58%; long-double: 33%; long-multiple: 9%), respectively. Dysphagic patients had difficulties in swallowing of 9 ml regardless of swallowing type. Highest peak amplitude, duration, number of peaks, average peak interval, and impulse of dysphagic patients were 1.3 times higher ($t = 4.31, p < .001$), 3 times longer ($t = -11.15, p < .001$), 2 times more ($t = -6.73, p < .001$), 2 times longer ($t = -9.23, p < .001$), and 1.3 times lower ($t = 8.94, p < .001$) than those of normal controls, respectively. **Application:** The swallowing characteristics of dysphagic patients can be applied to develop a diagnostic model which can evaluate quantitatively the existence and severity for dysphagia.

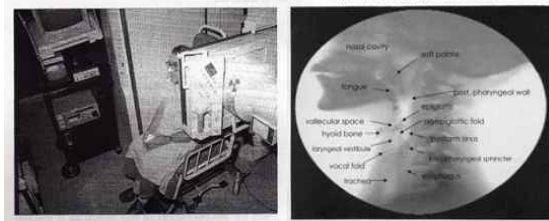
Keywords: Dysphagia, Swallowing, Ultrasonic Doppler sensor, Signal processing, Quantitative evaluation

1. Introduction

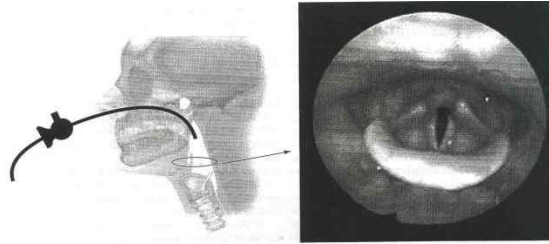
삼킴 장애(연하 곤란, dysphagia)는 음식을 먹는 과정에서 발생하는 어려움의 질병으로서, 정확한 진단 및 신속한 치료가 중요하다. 삼킴 장애는 주로 뇌졸중, 중후 신경 및 말초 신경의 퇴행성 질환, 외상성 뇌질환, 두경부 종양, 근육 질환 환자들에게 동반되며(Daniels et al., 2006), 나이가 증가할수록 유병률도 증가(Morris, 2006)하여 특히 60세 이상 노인들의 유병률이 높다(Robbins and Barczi, 2003). 삼킴 장애가 발생하면 흡인, 폐렴, 탈수, 영양실조 등이 유발되고 심해지면 사망할 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).



(a) VideoFluoroscopic Swallowing Study (VFSS)



(b) Fiberoptic Endoscopic Evaluation of Swallowing (FEES)

Figure 1. Existing devices for diagnosis of dysphagia

기존 삼킴 측정 장비들의 한계점 보완을 위하여 Lee et al.(2012)에 의해 개발된 삼킴 측정 장치 및 시스템은 효율성 검증이 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 다섯 가지 삼킴 정량화 척도로 분석해주는 시스템을 개발하였다. Lee et al.(2012)은 정상인과 삼킴 장애 환자 각각 10명을 비교한 결과, 정상인이 thin liquid와 thick liquid 1, 3, 9 ml 삼킴 시의 peak amplitude는 환자보다 각각 2 ~ 3배 유의하게 큰 것(유의수준 5%)을 파악하였다. 그러나, 분석된 삼킴 신호의 표본 수가 적고 모든 척도들의 변별성(discriminability)이 파악되지 못했기 때문에 후속 연구를 통한 삼킴 측정 장치 및 시스템의 유용성 검증이 필요하다.

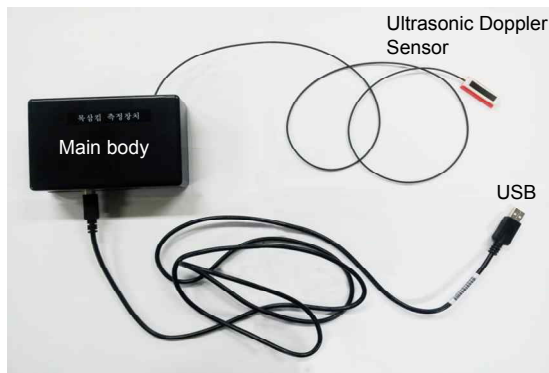


Figure 2. Swallowing measurement device by Lee et al.(2012)

본 연구는 정상인과 삼킴 장애 환자의 삼킴 특성을 비교 분석하였다. 본 연구는 정상인 120명과 환자 36명을 대상으로 dry saliva, thin liquid, 그리고 thick liquid의 세 가지 종류에 대한 삼킴 실험을 수행하였다. 본 연구는 초음파 도플러 센서로 측정된 삼킴 신호에 대하여 moving average 기법을 적용하여 preprocessing을 수행하고 삼킴 정량화 척도를 추출하였다. 본 연구는 삼킴 장애의 정량적 평가를 위하여 척도 별로 정상인과 환자에 대한 대표 삼킴 유형을 파악하고 삼킴 특성을 비교 분석하였다.

2. Method

2.1 Measurement of swallowing

2.1.1 Participants

본 연구의 삼킴 측정 실험에는 20대 ~ 70대 남녀 정상인 120명과 삼킴 장애 환자 36명이 참여하였다. 정상인은 신경계통질환이 없고 삼킴에 문제가 없는 사람으로 모집되었다. 삼킴 장애 환자는 서울삼성병원 신경과에서 삼킴 장애로 진단(장애 정도: mild 13명, moderate 19명, severe 4명)된 환자로 모집되었다. 정상인과 환자의 연령과 성별 분포는 각각 Table 1과 Table 2에 나타난 것과 같다.

2.1.2 Apparatus

삼킴 측정에는 Lee et al.(2012)이 개발한 삼킴 측정 장비와 시스템이 사용되었다. 삼킴 측정 장비(Figure 2; SeedTech, Co., Korea)의 초음파 도플러 센서(주파수: 2 MHz, 세기: 94

Table 1. Age and gender distribution of normal controls

	20s	30s	40s	50s	60s	70s	Total
Male	10	10	10	10	10	10	60
Female	10	10	10	10	10	10	60
Total	20	20	20	20	20	20	120
Age (mean ±SD)	23.9 ±2.3	33.2 ±3.2	43.1 ±2.9	54.2 ±3.4	64.2 ±2.8	72.2 ±2.1	-

Table 2. Age and gender distribution of patients with dysphagia

	20s	30s	40s	50s	60s	70s	Total
Male	-	-	1	6	12	7	26
Female	-	1	-	1	1	7	10
Total	-	1	1	7	13	4	36
Age (mean ±SD)	-	31.0	43.0	56.1 ±2.0	63.7 ±2.7	76.3 ±4.4	-

mW/cm², 출력: 20 mW)는 목에 부착했을 때, 인두강 내부 기관들의 움직임을 신호로 변환해 준다. 본 연구는 초음파 도플러 센서를 목에 고정시키기 위하여 센서 고정용 밴드를 고안하였다. 삼킴 실험에는 물, 매실주스, 연하곤란환자용 점도증진제(Thick&Easy, Hormel HealthLabs, USA), 계량스푼(1, 3, 5 ml), 그리고 초음파 젤이 사용되었다.

2.1.3 Experimental procedure

삼킴 실험에는 네 단계 절차(S1. introduction, S2. Exercise, S3. swallowing session, S4. debriefing)가 적용되었다. Introduction 단계에서는 피실험자에게 실험 진행절차를 설명해주고, IRB의 실험참여 동의서를 받았다. Exercise 단계에서는 Figure 3과 같이 센서를 목에 부착한 피실험자가 생수를 조금씩 삼키가며 삼킴 신호가 가장 잘 감지되는 부착위치를 결정하였다. Swallowing session 단계에서는 피실험자가 침(dry saliva, DS), 물(thin liquid, TN) 1, 3, 9 ml, 그리고 점도증진제를 포함한 매실주스(thick liquid, TK) 1, 3, 9 ml를 임의의 순서로 3회씩 삼켰다. 마지막으로, debriefing 단계에서는 측정된 삼킴 신호를 확인하고 실험참여비를 지급하였다.

2.2 Analysis of swallowing characteristics

2.2.1 Preprocessing of swallowing signals

본 연구는 삼킴 신호 처리 방법으로 네 단계 절차(S1. signal rectification, S2. smoothing with moving average technique, S3. starting and ending point detection, S4. peak detection)를 적용하였다(Figure 4). 첫째, signal rectification 단계에서는 신호의 negative한 값을 positive한 값으로 변환하였다. 둘째, smoothing 단계에서는 noise를 제거하고 신호의 peak가 명확하게 나타나게 하기 위하여 lag $n = 50$ 인 moving average 기법을 적용하였다. Point detection 단계에서는 신호의 기울기가 급격히 증가 또는 감소(기울기 > 0.9)하는 지점을 분석하여 삼킴의 시작과 종료 시간을 파악하였다. 마지막으로, peak detection 단계에서는 cutoff 값인 5 mV 이상인 peak들을 파악하였다.

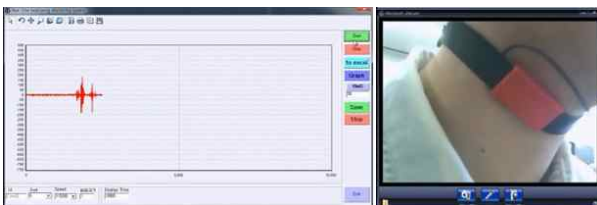


Figure 3. Swallowing experiment

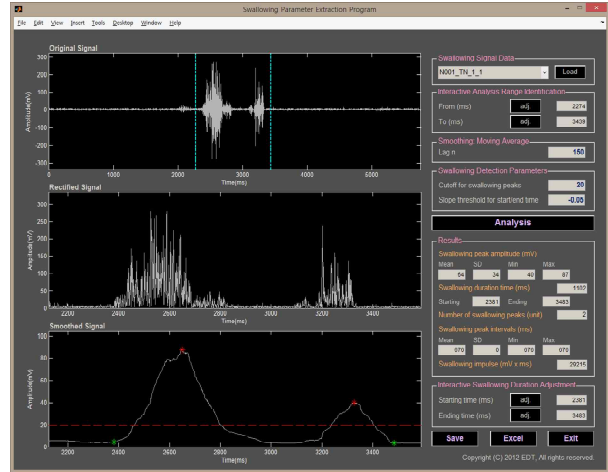


Figure 4. Swallowing quantification system

2.2.2 Quantification of swallowing signals

본 연구는 삼킴 정량화 프로그램(Figure 4)을 사용하여 삼킴 peak, 삼킴 시작 시간, 그리고 삼킴 종료 시간을 이용하여 다섯 가지 삼킴 정량화 척도 (peak amplitude, duration, number of peaks, peak interval, 그리고 impulse)를 추출하였다. 첫째, peak amplitude (mV)는 삼킴 시 인두강 내부기관이 움직인 정도를 나타낸다. 둘째, duration(msec)은 삼킴에 소요된 시간(= 종료시간 - 시작시간)을 나타낸다. 셋째, number of peaks(개)는 cutoff 이상에서 감지된 peak들의 개수이다. 넷째, peak interval(msec)은 인두강 내부 움직임 변화간의 시간 간격으로써 peak와 peak 사이의 시간 간격을 나타낸다. 마지막으로, impulse(msec × mV)는 삼킴 시 인두강 내부기관 움직임을 나타내며 시작과 종료시간 사이 신호의 면적으로 계산되었다.

3. Results

3.1 Swallowing types

정상인의 삼킴 유형은 short-double(Figure 5.a)와 short-single(Figure 5.b)의 두 가지, 삼킴 장애 환자는 short-double(Figure 5.a), long-double(Figure 5.c), 그리고 long-multiple(Figure 5.d)의 세 가지로 분류되었다. 예를 들어, short-double peak 유형은 삼킴 시간이 짧고 peak의 수가 2개인 것을 나타낸다. 정상인의 삼킴 시간은 대부분 1초 이내로 짧아 peak 수에 따라서 short-double(39%)와 short-single(43%) peak로 구분되었다. 삼킴 장애 환자는 short-double 유형이 58%, long-double

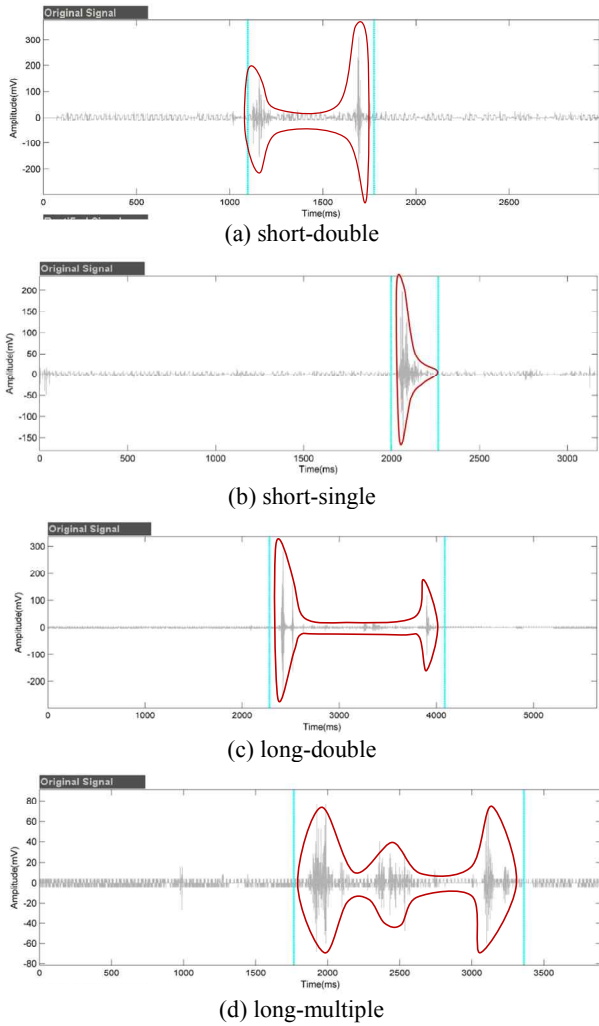


Figure 5. Representative swallowing types

유형이 33%, 그리고 long-multiple 유형이 9%인 것으로 나타났다. 한편, 삼킴 장애 환자는 장애 정도(mild, moderate, severe)의 관계 없이 TN과 TK 9 ml의 삼킴이 어려운 것으로 파악되어 실험이 수행되지 못했다.

3.2 Comparison of swallowing characteristics

삼킴 장애 환자와 정상인은 peak amplitude, duration, number of peaks, peak interval, 그리고 impulse 모두 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 첫째, 삼킴 장애 환자의 highest peak amplitude(18.7 ± 16.2 mV)는 정상인(24.5 ± 19.0 mV)보다 1.3배 정도 유의하게 낮은 것으로 분석되었다($t[753] = 7.03, p < .001$; Figure 6.a). 둘째, 삼킴 장애 환자의 duration($1,262 \pm 1,108$ msec)은 정상인(420 ± 223 msec)보다 3배 정도 유의하게 긴 것으로 분석되었다($t[427] = -15.59, p < .001$; Figure 6.b).

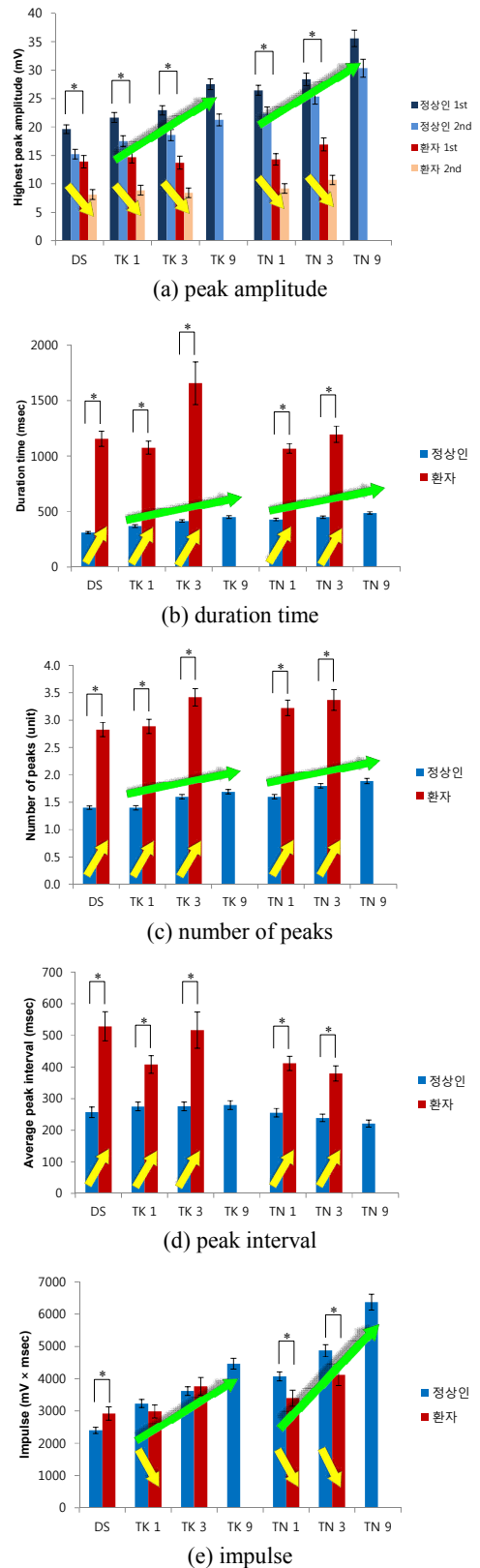


Figure 6. Representative swallowing types (* $p < 0.05$)

셋째, 삼킴 장애 환자의 number of peaks(3.1 ± 1.4 개)는 정상인(1.7 ± 0.8 개)보다 2배 정도 유의하게 많은 것으로 분석되었다($t[460] = -20.86, p < .001$; Figure 6.c). 넷째, 삼킴 장애 환자의 average peak interval(448 ± 374 msec)은 정상인(256 ± 178 msec)보다 2배 정도 유의하게 긴 것으로 분석되었다($t[560] = -10.73, p < .001$; Figure 6.d). 마지막으로, 삼킴 장애 환자의 impulse(3424 ± 2559 msec×mV)는 정상인($4,145 \pm 3,312$ msec×mV)보다 1.2배 정도 유의하게 낮은 것으로 분석되었다($t[854] = 5.44, p < .001$; Figure 6.e).

4. Discussion

본 연구는 삼킴 장애 환자가 정상인보다 인두강 내부기관의 움직임이 적고 오래 삼키는 것을 정량적으로 파악하였다. 기존 삼킴 측정은 임상가가 VFSS나 FEES와 같은 장비(Figure 1)를 사용하여 삼킴 장애를 육안으로 관찰하고 장애의 정도를 주관적으로 평가하는 한계가 있다. 본 연구는 초음파 도플러 센서로 구성된 삼킴 측정 장치 및 시스템을 사용하여 정상인과 삼킴 장애 환자의 삼킴 특성을 peak amplitude, duration, number of peaks, peak interval, 그리고 impulse의 다섯 가지로 정량화하였다. 환자는 정상인보다 peak amplitude가 1.3배 작고, duration이 3배 크며, number of peaks가 2배 유의하게 많은 것으로 나타났다. 이는 환자의 경우 인두강 내부의 기계적 협착이나 운동성 장애로 인하여 인두강 내부기관의 움직임의 크기가 작기 때문에, 소량의 음식물도 삼킴을 반복함으로써 삼키는 시간이 길어지는 것으로 사료된다.

본 연구에서 개발된 삼킴 정량화 척도들은 삼킴 장애 판별 모형을 개발하는데 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구는 사후 분석으로 Figure 7과 같이 highest peak amplitude를 포함한 13가지 변수를 사용하여

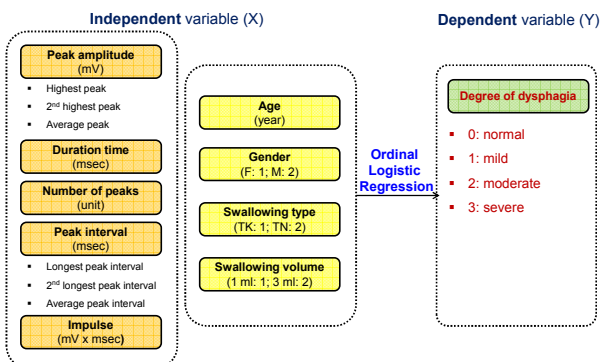


Figure 7. Development method of a diagnostic model for degree of dysphagia

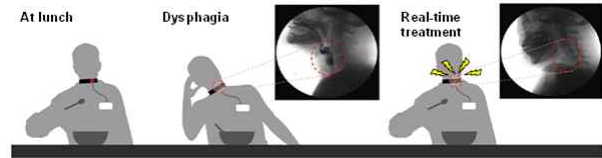


Figure 8. Real-time therapy of dysphagia

normal, mild, moderate, 그리고 severe의 네 가지 장애 정도를 판별하는 ordinal logistic regression을 개발해 본 결과, 96%의 sensitivity를 가지는 것으로 파악되었다. 본 연구는 추후 척도들간 상관관계 분석 등을 통하여 개발된 모형의 성능을 향상시킬 예정이다.

추후 본 연구는 개발된 삼킴 측정 시스템을 삼킴 장애 치료 기술과 연동할 예정이다. Figure 8과 같이 삼킴 장애의 정도가 분석되면 장애 정도에 적합한 치료 방법이 실시간으로 적용되어, 삼킴 장애 환자가 일상생활 중에 나타나는 삼킴의 어려움을 해소 시키는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

The present research was jointly supported by the Ministry of Health & Welfare (HI10C0626) and the IT Consilience Creative Program of MKE and NIPA (C1515-1121-0003).

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*.

Morris, H., Dysphagia in the elderly: a management challenge for nurses, *British Journal of Nursing*, 15(10), 558-562, 2006.

Robbins, J.A., and Barczy, 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.

musculoskeletal disorders (WMSDs) prevention, Usability testing

Author listings

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: Ergonomic Product Design & Development, Digital Human Modeling & Simulation, Vehicle Ergonomic, Hospital Ergonomic

Hyewon Lee: lhwon76@postech.ac.kr

Highest degree: B.S., Department of Industrial Design Engineering, Korea University of Technology and Education

Position title: M.S. candidate, Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Ergonomic Product Design & Development, Universal Design

Myeongeun Yun: skymint79@naver.com

Highest degree: B.S., Convention Management, Politics and Diplomacy, KyungHee University

Position title: Researcher, Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Ergonomic Product Development

Meekyung Suh: rosasuh@hanmail.net

Highest degree: Ph.D., Graduate program in Speech and Language Pathology, Yonsei University

Position title: Speech-language pathologist, Department of Neurology, Samsung medical Center

Areas of interest: Neurogenic speech disorders, neurogenic language disorders, neurogenic swallowing disorders

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