

<원저>

비디오투시연하검사 스크리닝을 위한 근적외선 기술 조사

박지수¹⁾·정영진^{1,2)}¹⁾동서대학교 고령친화사업 적응형 보건의로 고급인재 양성 사업단·²⁾동서대학교 방사선학과

Investigation of Near Infrared Radiation Based Screening for Video-Fluoroscopy Swallowing Studies

Ji-Su Park¹⁾·Young-Jin Jung^{1,2)}¹⁾Advanced Human Resource Development Project Group for Health Care in Aging Friendly Industry, Dongseo University²⁾Department of Radiological Science, Dongseo University

Abstract With the recent advances in radiological science, there was radiographic techniques development and several researches to diagnosing dysphagia. We proposed the new Imaging technology based on Near Infrared radiation (NIR) for video fluoroscopic swallowing study (VFSS). To reduce the risk of the VFSS examination for swallowing rehabilitation, multi-NIR camera system comprised. Based on the multi-NIR camera imaging system, Computational simulation was conducted to identify the potential of the multi-NIR camera imaging system as a clinical tool (screening system). As a result of the simulation applied in this study, the proposed system has a potential to be a clinical solution although there is a few of limitations, we believe that it will be a good tool to support the VFSS as a screening technology in clinical fields

Key Words : Video fluoroscopic swallowing study (VFSS), X-ray, Near infrared radiation (NIR), Tomography, Swallowing

중심 단어 : 비디오 투시 조영 검사, X선, 근적외선, 단층촬영, 삼킴

1. 서론

방사선 학문 분야의 발전에 힘입어, 방사선 영상 촬영 기법의 안전성과 진단의 정확성, 그리고 환자의 이익을 높이기 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다. 그 중에서도, 뇌졸중을 포함한 다양한 신경학적 질환으로 인해 삼킴에 어려움을 호소하는 환자의 연하장애를 진단하기 위한 방사선 촬영 기법 중 하나인 비디오투시조영검사(Video fluoroscopic swallowing study; VFSS)가 널리 수행되고 있다. 여기서, 연하장애란 구강, 인두 그리고 식도까지 음식물이 넘어가는 일련의 과정 동안 발생하는 모든 문제를 총칭한다[1]. 특히 인두기 연하장애는 음식물의 기도 흡인으로 인한 폐렴 발생에 직접적인 영향을 미친다[2]. 기도 흡인을 통한 흡인성 폐

렴은 사망까지 유발할 수 있는 잠재적 위험 요소이기 때문에 연하장애 평가에서 가장 중요한 항목이다[3].

VFSS는 연하장애 환자들의 삼킴 기능과 해부학적 구조를 관찰하기 위해 사용되는 표준화된 평가 방법으로 알려져 있다[4]. VFSS 평가는 크게 정면과 측면 촬영을 통해 바륨과 결합된 음식물의 좌우 대칭적 흐름, 인두부의 잔여물, 인두벽 코팅과 같은 다양한 증상을 관찰할 수 있으며 특히 기도 흡인의 유무 그리고 그 정도를 평가할 수 있는 장점이 있다[5].

VFSS는 기본적으로 X선 장비를 활용하여 바륨이라고 불리는 형광 조영제의 구강 내에서 인두와 식도까지의 흐름을 연속 촬영을 통해 동영상으로 구현한다. 바륨과 결합된 음식물 또는 액체는 구강을 통해 인두 단계에서 기도로의 유입되

This work was supported by Dongseo University, "Dongseo Cluster Project" Research Fund of 2020 (DSU-20200002)

Corresponding author: Youngjin Jung, Department of Radiological Science, Dongseo University, 47, Jurey-ro, Sasang-Gu, Busan, 47011, Republic of Korea / Tel; +82-51-320-2871 / E-mail: microbme@dongseo.ac.kr

Received 3 February 2021; Revised 18 February 2021; Accepted 21 February 2021

Copyright ©2021 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

는 양과 정도를 관찰함에 따라 연하장애 증상을 객관적으로 평가할 수 있으며 이를 기반으로 적절한 중재를 제공할 수 있다[6]. 그러므로 VFSS를 이용한 기도 흡인 평가는 연하장애 환자의 진단과 재활 치료의 필수적인 평가이다.

그럼에도 불구하고 VFSS는 방사선 피폭과 관련된 제한점으로 인해 임상에서 사용함에 있어 다양한 고려사항이 존재한다[7]. 첫째, VFSS는 X선을 이용한 투시 장비로 방사선 피폭의 노출이 존재하며 이는 인간에게 결정론적 그리고 확률적 효과 혹은 비 결정론적 효과의 생물학적 영향을 미친다고 알려져 있다[8]. 이전 연구들에 따르면 VFSS 촬영 동안의 방사선량은 성인에게 일반적으로 1.27 ± 0.63 mSv 그리고 소아에게 0.48 ± 0.26 mSv로 보고되었으며, 검사자의 숙련도에 따라 차이가 있을 수 있다[9, 10]. 이러한 방사선 노출량은 연간 인간이 일상에서 받는 자연 피폭량에 비해 크게 낮은 수치이다[11]. 그러나 VFSS를 수행하는 의료기사는 반복 촬영을 통해 피폭이 지속적으로 누적될 수 있으며, 환자 역시 VFSS 검사를 통해 상대적으로 높은 피폭의 위험에 노출될 수 있는 제한점이 있다. 둘째, 검사 동안 방사선 노출로 인해 특수 처리된 공간에서의 촬영만이 허용된다. 그러므로 신체의 거동이 어려운 환자 또는 노인이 직접 그 공간으로 방문하여 검사를 수행해야 되는 어려움이 존재한다. 그러므로 VFSS의 이러한 제한점을 최소화하는 것이 임상적으로 대단히 중요하다.

위와 같은 제한점을 극복하고자, 최근 근적외선(Near Infrared Radiation; NIR) 촬영 기법의 방사선 촬영 분야의 적용이 고려되고 있다[12]. NIR은 X선과는 달리 $0.78 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 의 파장대로 방사선 피폭의 위험이 없는 특징을 가진다. 특히 근적외선은 인도시아닌그린(Indocyanine green; ICG) 형광 조영제와 더불어 투시검사가 가능하기에 내분비외과 등에서 이러한 시스템을 현재 이용하고 있다. 그러므로 NIR와 ICG의 결합된 시스템은 음식물과 결합된 ICG 용액 흐름의 관찰을 통해 연하장애 환자의 기도 흡인을 평가할 수 있는 잠재적 가능성이 존재한다. 그러므로 본 연구에서는 NIR 모듈을 이용한 시스템 제작을 통해 ICG의 흐름을 측정할 수 있는 가능성을 확인하기 위해 팬텀 시뮬레이션 실험을 수행하고자 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 시스템의 기본 구성

본 연구에는 ICG 형광 조영제를 이용하여, 물체 내부의

기능적 근적외선 영상을 촬영하고자 시스템을 설계하였다. 전체적인 시스템의 구성은 근적외선 발광부, 그리고 ICG에 의해서 변환된 파장을 측정하는 측정부, 마지막으로 이를 제어하여 신호를 측정할 수 있는 신호처리 및 제어용 PC로 구분되게 된다[Fig. 1]. 이러한 시스템에는 부가적으로 발광 파장의 전반사(fully reflected light)를 제거하기 위한 편광필터와 발광부의 근적외선을 차단하기 위한 광학 필터(optical filter)가 적용되게 된다.

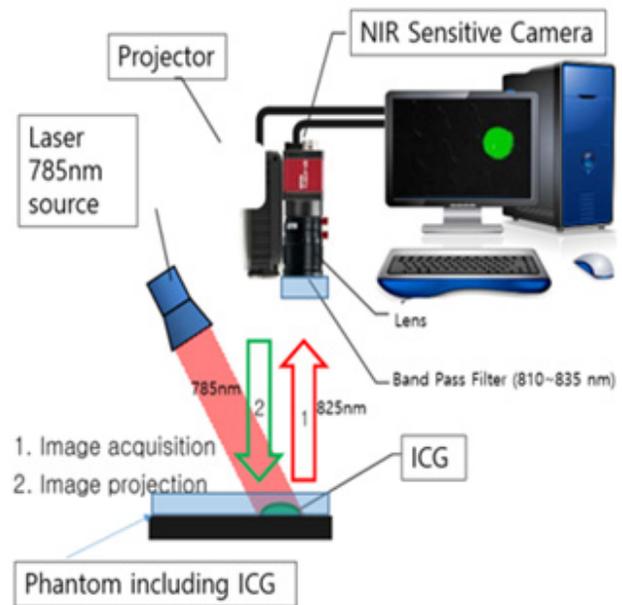


Fig. 1. NIR based Screening System : (1: 825nm NIR light for image acquisition, 2: 785nm NIR-light-emitting for imaging (ICG Fluorescent contrast agent))

2. 3차원 영상 재구성을 위한 촬영 시스템

3차원 영상의 재구성을 위한 촬영 시스템은 Fig. 2와 같이 구성하였다. 총 5대의 근적외선 카메라 모듈과 생체와 비슷한 광 흡수율, 산란율, 투과율 가지는 물질을 담은 아크릴 기반 팬텀을 제작하였으며, 3차원 영상 재구성을 위한 순차적 점등을 진행할 수 있는 근적외선 LED array를 구성하였다. 3차원 영상의 재구성을 위해서는 우선적으로 단면 영상의 재구성이 진행되어야 하며, 이러한 단면 영상의 재구성 과정에 순차적 NIR LED 점등은 알고리즘 구현에서 요구되어지게 된다.

3. 영상 재구성을 위한 시뮬레이션

근적외선 기반 3차원 영상 시뮬레이션을 진행하기 위해서,

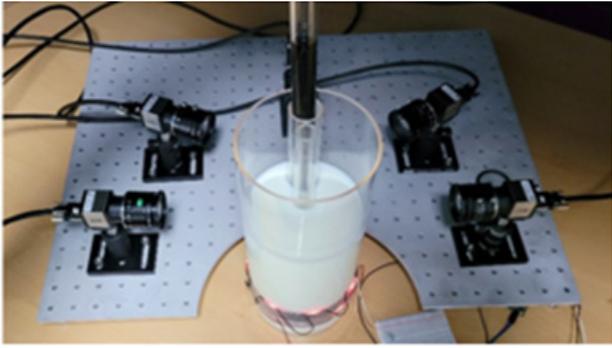


Fig. 2. Multi-camera system and phantom for NIR-based 3D Tomography simulation system. NIR LED is attached to the phantom, and the camera is structured to acquired image from a remote distance.

2014년 Schweiger와 Arridge가 개발한 TOAST++[13]를 적용하여 확산 광 단층촬영(Diffuse Optical Tomography; DOT)기법을 도입하였다. 시뮬레이션 실험은 총 2단계로 구성하였으며, 첫 번째 시뮬레이션은 forward equation에 의한 형광 조영제의 촬영에 대한 것이고, 두 번째 시뮬레이션은 촬영된 형광영상을 재구성하는 것으로 구성되었다. 여기서 최종적으로 3차원 영상 재구성을 진행하기 위해서 우선 수행해야 하는 2차원으로 재구성을 시뮬레이션 하였다. 본 시뮬레이션은 TOAST++에서 제공되어지는 카메라 기반 형광 영상 촬영 예제를 기반으로 수행하였다[13]. 여기서 현재, 시스템을 360°로 가정하여 총 8대의 카메라를 이용하여 촬영하는 것으로 시뮬레이션 환경을 구성하고, 근적외선 광의 속도는 진공상태의 빛의 속도인 0.3 [mm / ps], 매질의 굴절율(refractive index)는 1.4, 프로젝트 그리드는 128 by 128로 설정하였다. 여기서 실린더 모델과 NIR LED 센서와 측정 point에 대한 정보는 툴박스에서 제공되는 'cy12.msh'와 'circle200_8x8x3_z0.qm'을 적용하였다.

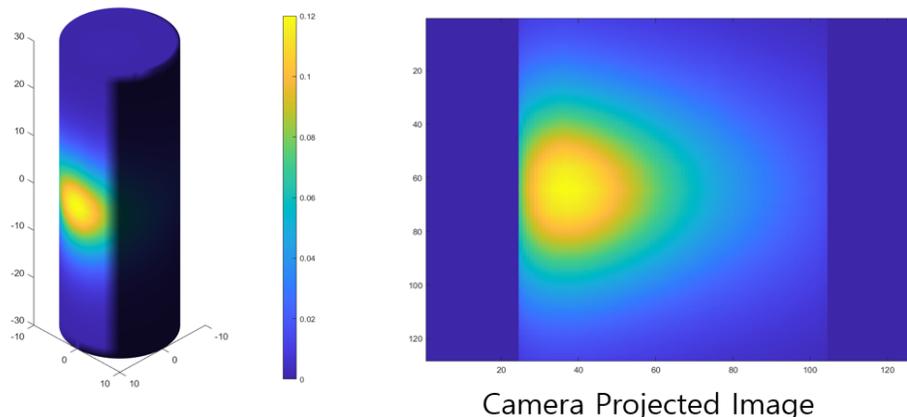


Fig. 3. The simulation results based on the cylinder model (left), the projected image (using simulation) from the camera (right)

1) 형광영상 촬영 시뮬레이션

형광 영상의 측정을 위한 시뮬레이션은 기본적으로 GPU 연산이 수반되는 유한요소해석(finited element model)이 적용되어지게 된다. 이는 실린더에 입사되는 785 nm의 광이 실린더 표면에 도달하여 흡수, 산란, 투과의 과정을 복잡하게 거치며, 근적외선 카메라를 기반으로 표면에서의 785 nm의 영상을 측정하는 시뮬레이션 결과를 구하고자 하였다. 또한, 이론적으로 완벽한 광학 필터를 적용하여 ICG 형광 조영제에 의해서 발산되는 빛의 양도 함께 시뮬레이션 하였다

2) 영상 재구성 시뮬레이션

형광 물질이 실린더 내부에 존재할 경우에 이를 재구성하는 시뮬레이션으로, 우선적으로 카메라의 개수는 임의적으로 증가시켜, 영상 재구성의 효율을 높여 진행하였다. 총 3개의 서로 다른 위치의 형광 물질이 존재할 경우에 이를 재구성알고리즘으로 위치를 파악하는 여부를 조사하기 위해서 환경을 세팅하였다. 총 3개의 형광 물질 위치에 따른 fCONTRAST=[0.1, 0.05, 0.1]로 설정하였으며, 이를 바탕으로 전체적인 영상을 재구성하는 시뮬레이션을 진행하였다.

III. 결과

1. 형광영상 촬영 시뮬레이션

연하재활 스크리닝을 위해 제작한 시스템과 유사한 구성으로 시뮬레이션을 진행한 결과, 근적외선 LED로부터 발산되는 광으로부터 형광 조영제를 거쳐서 다시 실린더 표면에 도달하는 형광 영상의 측정이 시뮬레이션 되는 카메라에서 측정되는 것을 확인할 수 있다[Fig 3, 4].

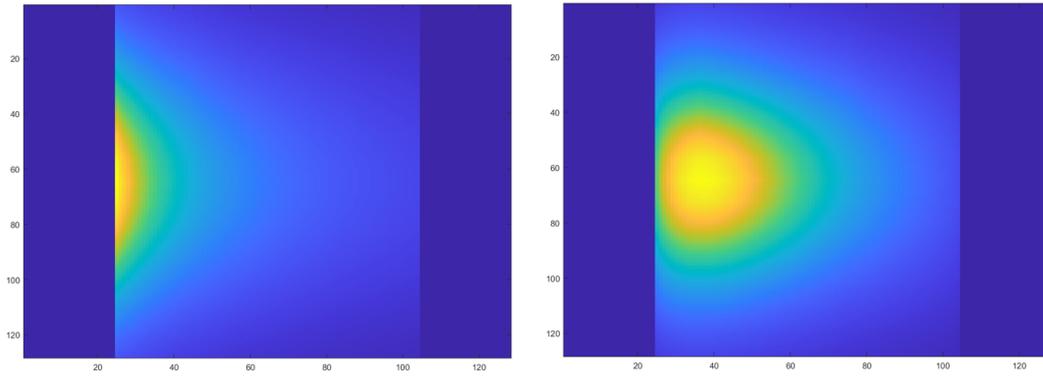


Fig. 4. A simulation images measured by different cameras locations (left, right)

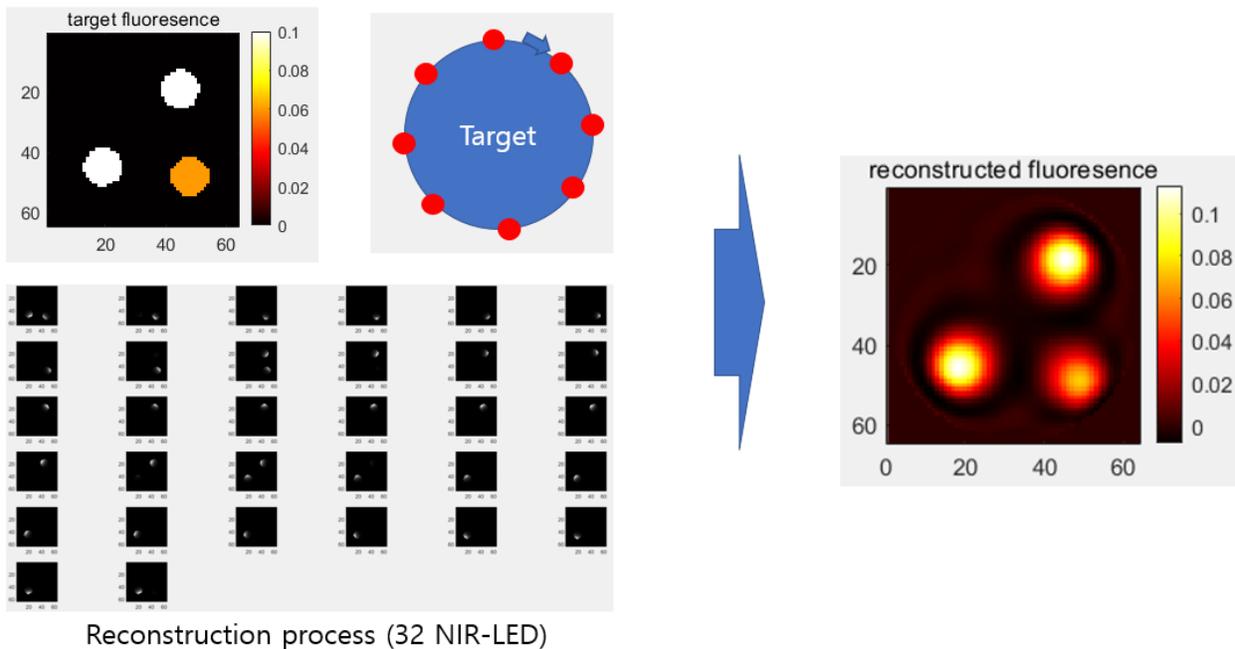
2. 영상재구성 시뮬레이션

서로 다른 위치의 3개의 형광 조영제에 대한 영상 재구성은 총 32개의 LED를 구성하여 각각의 LED가 발광하는 영상을 우선적으로 재구성하고, 이렇게 재구성된 32개의 영상을 중첩의 원리를 적용하여 영상의 재구성하는 과정을 거치게 된다. 이렇게 재구성된 영상은 실제 시뮬레이션상에서 위치시킨 형광 조영제의 위치와 잘 부합하는 것을 확인할 수 있다. 본 시뮬레이션 결과, 형광 조영제의 초기 가정 위치와 재구성된 영상에서의 형광 조영제의 위치가 유사하며, 실제 형광 조영제 위 농도에 따라서, 그 크기가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다[Fig 5].

IV. 고찰

본 연구에서는 3차원 영상 재구성 기법을 적용한 새로운 근적외선 형광 이미징 시스템의 개발 가능성을 조사하였다. 결과에서 나타내는 부분은 근적외선에 기반한 형광영상을 카메라를 통해서 촬영하고, 이 과정에서 측정된 신호는 2차원 단층 영상으로 재구성한 뒤, 이를 다시 3차원 영상으로 구성이 가능함을 시사한다. 이러한 점을 바탕으로 볼 때, 근적외선 기반 형광 조영 영상화 시스템의 개발 가능성은 매우 높을 것이라 예상된다.

이와 유사한 3차원 형광 조영 이미징 기술은 과거 다양한



Reconstruction process (32 NIR-LED)

Fig. 5. The process of deriving a reconstructed image in a simulation environment based on 32 LEDs. The figure on the right is the reconstructed image of the fluorescent contrast agents. By comparing images, the reconstructed image is similar to the actual assumed location of the fluorescent contrast agents.

질환 검사에서 시도된 적이 있다[14, 15]. 유방암 또는 상지의 회복과정을 진단하기 위한 시스템으로 개발이 시도되어 현재에는 이와 관련되어 임상적 적용과 시도가 함께 이루어지고 있으며, 이러한 새로운 비전리 방사선 기반 영상 시스템의 활용에 대해서는 다양한 시도가 지속적으로 이루어질 것이다.

그러나, 본 연구에서 적용된 시뮬레이션은 이론적 지식에 기반하며, 실제적으로 적용하여 개발할 경우에는 아래와 같은 몇가지 문제점을 극복해야 한다. 1) 카메라의 낮은 NIR 민감도 - 카메라 시스템은 많은 데이터를 순간적으로 측정할 수 있는 큰 장점을 가지고, 특히 3차원 영상을 재구성하기 위한 충분한 데이터를 측정할 수 있다. 그러나, 카메라는 이와 유사한 기능을 하는 광증배관(photomultiplier tube; PMT)와는 상당히 큰 차이의 민감도를 가진다. 현재 대부분의 근적외선 의료영상 시스템이 광증배관 또는 이와 유사한 반도체기반 센서(Silicon Photomultipliers; SiPM)를 적용하는 현상은 이러한 현실적인 한계가 존재하기 때문이다. 2) Dark Noise (암흑 노이즈) - 카메라 센서의 경우 암흑 노이즈로 알려져 있는 노이즈가 촬영된 영상에 첨부된다. 이러한 노이즈는 온도와 전원에 의해서 크게 달라질 수 있는데 이는 낮은 민감도와 더불어 임상적 활용에 한계점으로 인지되고 있다. 3) 피사체와의 거리 - 조영제에 의해서 발생하는 광신호는 레이저신호와 달리, 상대적으로 넓은 파장영역과 산란에 따른 확산 현상으로 피사체와의 거리가 멀어지게 되면 그 신호의 강도는 거리의 제곱분의 1로 ($1/R^2$)으로 감소하게 된다. 이러한 신호의 감소에 따른 오차가 발생할 경우에 재구성되는 영상에서의 심각한 위치 오류가 발생할 수 있다. 물론 현재 첨단 컴퓨터 비전 기술에 기반하여 카메라와 피사체의 위치 관계를 3차원적으로 파악할 수 있는 기술이 이를 보완할 수 있겠지만, 이러한 오차에 대한 인지와 기술적 대처에 대한 고민은 지속적으로 요구되게 될 것이다. 이외 시스템의 개발 과정에서 나타나게 될 현실적 문제들은 다수 존재할 수 있지만, 센서기술의 발전과 컴퓨터 비전의 발전으로 인하여 근적외선 단층영상 기술의 임상적 활용은 증가될 것이라 기대한다.

또한, 현재 방사선 영역에 적용되고 있는 여러 의료영상 기술[16]에 발전을 바탕으로 볼 때, 앞서 언급한 몇몇 제한점들은 인공지능의 기술 발전과 더불어 극복될 수 있는 가능성이 존재한다. 특히, 노이즈 제거를 위한 인공지능 알고리즘의 구현은 현재 널리 활용되고 있는 점을 바탕으로 본다면, 본 연하재활 스크리닝 시스템 구현 시 노이즈 제거를 위한 인공지능의 활용은 매우 유리한 측면이 존재할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 연하재활 진단 및 치료를 위해 널리 사용되고 있는 비디오 투시조영검사를 적용하기에 앞서서 근적외선 기반 영상화 장치를 활용한 영상 재구성 시스템의 개발을 위해서 비디오 투시조영검사 스크리닝을 위한 근적외선 기술 조사를 통해 그 가능성을 확인하고자 하였다. 본 조사에서 적용한 시뮬레이션 결과, 몇몇 기술적 요소가 해결된다면 이러한 시스템의 개발은 곧 이루어질 수 있을 것이라 예상된다. 또한, 이러한 기술의 개발은 향후 다양한 비전리 방사선 영상화 장치의 개발로 이루어질 수 있을 것이라 기대된다.

REFERENCES

- [1] Park NJ, Kim SJ, Lee HJ, Jeon JY, Lim JY, Han TR. Movement of the hyoid bone and the epiglottis during swallowing in patients with dysphagia from different etiologies. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2019;18(2):329-35.
- [2] Park JS, Oh DH, Chang MY. Effect of expiratory muscle strength training on swallowing related muscle strength in community-dwelling elderly individuals: A randomized controlled trial. *Gerodontology*. 2017;34(1):121-8.
- [3] Robertson J, Chadwick D, Baines S, Emerson E, Hatton C. People with intellectual disabilities and dysphagia. *Disability and Rehabilitation*. 2018; 40(11):1345-60.
- [4] Duncan PW, Zorowitz R, Bates B, Choi JY, Glasberg JJ, Graham GD, Katz RC, Lamberty K, Reker D. Management of adult stroke rehabilitation care: A clinical practice guideline. *Stroke*. 2005;36:100-43.
- [5] Kim JW, Choi H, Jung J, Kim HJ. Risk factors for aspiration pneumonia in patients with dysphagia undergoing videofluoroscopic swallowing studies: A retrospective cohort study. *Medicine(Baltimore)*. 2020;99(46):e23177
- [6] Lee KW, Kim SB, Lee JH, Lee SJ, Park JG, Jang KW. Effects of Neuromuscular Electrical Stimulation for Masseter Muscle on Oral Dysfunction After Stroke. *Annals of Rehabilitation Medicine*. 2019;

- 43(1):11-8.
- [7] Donald JP, Ehsan S. How to Understand and Communicate Radiation Risk. *Journal of American College of Radiology*. 2010;4:652-7.
- [8] Ivan ZM, Chapple CL, Leslie PL. Radiation dose in videofluoroscopic swallow studies. *Dysphagia*. 2007; 22(1):13-5.
- [9] Kim HM, Choi KH, Kim TW. Patients' radiation dose during videofluoroscopic swallowing studies according to underlying characteristics. *Dysphagia*. 2013;28(2):153-58.
- [10] Bonilha HS, Humphries K, Blair J, Hill EG, McGrattan K, Carnes B, et al. Radiation exposure time during MBSS: Influence of swallowing impairment severity, medical diagnosis, clinician experience, and standardized protocol use. *Dysphagia*. 2013;28(1):77-85.
- [11] Hong JY, Hwang NK, Lee G, Park JS, Jung YJ. Radiation Safety in Videofluoroscopic Swallowing Study: Systematic Review. *Dysphagia*. 2021;36(1): 73-82.
- [12] Jung YJ, Shin CW, Ahn SM, Hong JY, Ahn YJ, Lim CH. The Evaluation of Non-Ionizing Radiation (Near-Infrared Radiation) based Medical Imaging Application: Diabetes Foot. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2016;39(3):399-406.
- [13] Schweiger M, Arridge SR. The Toast++ software suite for forward and inverse modeling in optical tomography. *J Biomed Opt*. 2014;19(4):040801. doi: 10.1117/1.JBO.19.4.04080
- [14] Ge J, Zhu B, Regalado S, Godavarty A. Three-dimensional fluorescence-enhanced optical tomography using a hand-held probe based imaging system. *Phys*. 2008;35(7):3354-63.
- [15] Godavarty A, Khandavilli Y, Jung YJ, Rao PSS. Non-contact optical imaging of healing and non-healing diabetic foot ulcers. DSG Alfano RR ed., *Progress in Biomedical Optics and Imaging- Proceedings of SPIE*. 2015;9318.
- [16] Hong JY, Park SH, and Jung YJ. Artificial Intelligence Based Medical Imaging: An Overview. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2020;43(3):195-208.

| 구분 | 성명 | 소속 | 직위 |
|------|-----|-----------------------------|-------|
| 제1저자 | 박지수 | 고령친화사업 적응형 보건의료 고급인재 양성 사업단 | 연구 교수 |
| 교신저자 | 정영진 | 동서대학교 방사선학과 | 부교수 |