

# CAD 모델 기반의 4D CT 데이터 제작 의용공학 융합 프로그램 개발

서정민<sup>1,2\*</sup>, 한민철<sup>1</sup>, 이현수<sup>1</sup>, 이세형<sup>1,3</sup>, 김찬형<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 원자력공학과, <sup>2</sup>대원대학교 방사선학과, <sup>3</sup>분당제생병원 방사선종양학과

## Development of 4D CT Data Generation Program based on CAD Models through the Convergence of Biomedical Engineering

Jeong Min Seo<sup>1,2\*</sup>, Min Cheol Han<sup>1</sup>, Hyun Su Lee<sup>1</sup>, Se Hyung Lee<sup>1,3</sup>, Chan Hyeong Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Nuclear Engineering, Hanyang University

<sup>2</sup>Department of Radiology, Daewon University College

<sup>3</sup>Department of Radiation Oncology, Bundang Jesaeng General Hospital

**요약** 본 연구에서는 Computer-Aided Design (CAD) 모델로부터 4D CT 데이터로 변환하는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 성능을 확인하기 위해, 공학과 의학의 융합 모델로 인체 호흡을 모사할 수 있는 호흡 모사 팬텀을 CAD 기반 프로그램으로 모델링하였으며, 이 모델을 10개의 위상영상을 포함하는 DICOM형태의 4D CT 데이터로 변환하는 CAD2DICOM을 개발하였다. 이후, 제작된 4D CT 데이터의 정확성 및 유효성을 평가하기 위하여 영상의 해상도, 종양의 체적 및 위치 등을 방사선치료계획시스템을 이용하여 평가하였다. 결과적으로, 제작된 4D CT 데이터가 방사선치료계획시스템 상에 정상적으로 인식됨을 확인하였으며, 모든 위상에서 종양 체적은 8.8cc로 차이가 나타나지 않고 종양의 움직임도 설정된 10mm로 나타나 정확히 반영됨을 확인하였다. 본 연구를 통해 개발된 프로그램을 이용하면 실제 4차원 CT 촬영에서 발생할 수 있는 영상의 인공물(허상)이 없는 표준 영상을 획득할 수 있으므로, 향후 움직임에 민감한 4차원 방사선 치료계획연구 및 4차원 방사선 영상 평가연구 등에 활용될 것으로 사료된다.

• **주제어** : 4D CT, DICOM, CAD, 방사선치료계획, artifact

**Abstract** In the present study, we developed the 4D CT data generation program from CAD-based models. To evaluate the developed program, a CAD-based respiratory motion phantom was designed using CAD software, and converted into 4D CT dataset, which include 10 phases of 3D CTs. The generated 4D CT dataset was evaluated its effectiveness and accuracy through the implementation in radiation therapy planning system (RTPS). Consequently, the results show that the generated 4D CT dataset can be successfully implemented in RTPS, and targets in all phases of 4D CT dataset were moved well according to the user parameters (10 mm) with its stationarily volume (8.8 cc). The developed program, unlike real 4D CT scanner, due to the its ability to make a gold-standard dataset without any artifacts constructed by modality's movements, we believe that this program will be used when the motion effect is important, such as 4D radiation treatment planning and 4D radiation imaging.

• **Key Words** : 4D CT, DICOM, CAD, radiation therapy planning, artifact

\*Corresponding Author : 서정민(thomas8@daewon.ac.kr)

Received March 15, 2017

Revised March 26, 2017

Accepted April 20, 2017

Published April 28, 2017

## 1. 서론

방사선 치료는 전리방사선을 이용하여 악성 신생물 등을 치료하는 임상 의학의 한 분야이며[1][2], 그 효과를 높이기 위하여 인체 내부 장기의 움직임 및 환자의 호흡에 의한 움직임을 고려한 방사선치료가 필요하다[3]. 이를 위하여 임상에서는 4차원 전산화 단층촬영(4-Dimensional Computed Tomography; 4D CT)을 시행하여 환자의 종양과 내부 장기의 움직이는 범위를 파악하고, 4D CT 기반의 4차원 방사선치료계획(4D Radiation Treatment Planning; 4D RTP)을 수립하며, 계획된 4D RTP에 맞는 4차원 방사선치료(4D Radiation Therapy; 4D RT)를 시행하고 있다[4,5,6].

질병의 진단에 사용되는 엑스선 기반의 CT[23,24]를 방사선치료의 계획 및 선량계산에 사용한다. 최근, 국내의 의료기관에서는 종양에 높은 선량을 전달함과 동시에 종양보다 얇은 위치의 정상조직에는 낮은 선량만을 전달하는 양성자의 특성을 이용한 양성자 치료센터가 증가하는 추세이며, 양성자 치료 중 가장 고수준의 치료인 active scanning proton beam 기반의 4D RT 증례가 증가하고 있는 추세이다. 하지만, 양성자 기반의 치료 시 환자의 움직임뿐만 아니라 치료 빔의 움직임이 존재하기 때문에, 이 두 움직임에 의한 상호작용, 즉 상호간섭 효과(interplay effect)의 평가가 사전에 이루어져야 한다[7,8,9,10].

여러 연구팀에서는 상호간섭 효과를 평가하기 위해 호흡움직임을 모사하는 팬텀과 4차원 전산화 방사선 치료 방법을 이용하여 연구를 수행한 바 있다[11,12,13]. 위 연구에서는 모두 호흡 모사 팬텀은 4D CT 스캔 과정을 거쳐 의료 표준 디지털 영상인 DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) 형태의 4D CT 데이터 변환된 영상을 사용하였다.

하지만 4D CT 촬영 시 CT 스캔 과정에서 발생하는 스캐너 자체의 움직임(i.e., couch movement)과 피사체의 움직임 등으로 인하여 영상 내에 인공물(artifact, 허상)이 발생하게 되며[14], 발생한 인공물(artifact, 허상)은 상호간섭 효과 평가 시 오차의 원인으로 작용할 수 있다. 특히, 일부 범위에만 높은 방사선량을 전달하는 양성자 빔의 특성 상, 양성자 치료 과정에서 발생하는 상호간섭 효과 평가에 인공물(artifact, 허상)은 치명적인 오류로 작용할 수 있다[15].

전산화 방사선 치료 및 의료공학의 연구에서 실물 촬영 영상의

한계인 인공물(artifact, 허상)의 영향을 최소화하기 위한 방법으로, 정확하고 정밀한 3차원 디지털 모델을 생성할 수 있는 장점을 가진 컴퓨터공학의 CAD(computer-Aided Design) 시스템[16]을 의학 및 의학공학에 융합한 연구, 즉 DICOM 포맷의 CT영상을 CAD기반의 모델로 재구성하거나[17,18,19,20] 자기공명영상으로부터 3차원 CAD 모델을 구성하여 적용하는 연구[19]가 수행된 바 있다. 또한, CAD 모델을 전산화 방사선의 기하학적 정보로 활용한 연구가 수행된 바 있다[12,22]. 그러나 CAD 기반의 모델을 DICOM 표준 영상으로 변환하는 연구 또는 프로그램의 개발은 아직 이루어지지 않았다. 특히, 움직이는 4D CT DICOM 영상으로 변환하고자 하는 시도는 아직까지 발표된 바 없다.

본 연구에서는 공학과 의학의 융합 모델로 CAD 기반의 모델을 DICOM 형태의 4D CT 데이터로 변환하는 프로그램인 CAD2DICOM을 개발하여 방사선치료계획 시스템을 통하여 그 성능과 효용성을 평가하고자 한다.

## 2. 대상 및 방법

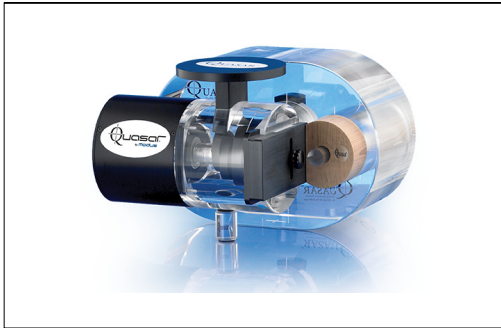
### 2.1 팬텀 및 CAD 디자인

#### 2.1.1 호흡 모사 팬텀 모델링

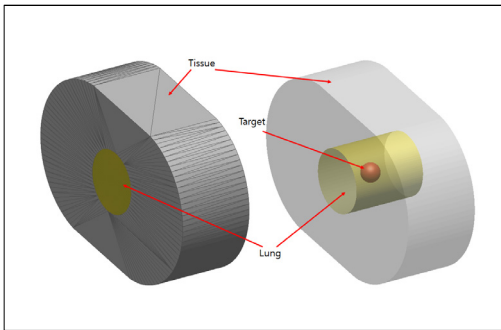
본 연구에서는 평가에 앞서 호흡 모사 팬텀 중 하나인 QUASAR™ Respiratory Motion Phantom (Modus Medical Devices Inc., London, Canada)[Fig. 1]을 CAD 프로그램을 이용하여 모델링하였다. 이 팬텀은 본체의 움직임을 제어하는 모터, 팬텀 지지대로 구성된 플랫폼, 환자의 체부를 모사하는 팬텀 본체로 구성되어 있다. 팬텀 본체에는 환자의 흉부를 모사할 수 있도록 조직(tissue), 폐(lung), 그리고 종양(target)을 대신할 수 있는 삽입체들로 구성되어 있다. 각각의 삽입체는 CT로 촬영했을 때 실제 환자와 유사한 CT번호(Hounsfield Units; HU)가 반영될 수 있도록 구성되어 있으며, 사용자가 지정한 환자의 호흡 패턴에 따라 모터 및 이에 연동된 폐와 종양이 한 축을 중심으로 움직이게 된다.

본 연구에서는 실제 방사선치료의 선량평가에서 필요로 하는 호흡 모사 팬텀의 본체만을 모델링하였다. 모델링은 CAD 프로그램인 Inventor 2015(Autodesk, California, USA)를 이용하였으며, CAD 모델은 3D 로만 제작이 가능하므로 팬텀의 호흡주기 중 50% 위치의 위상을 기준(reference)위상으로 설정하여 이를 모델링하

였다. 이후 3D 폴리곤 메시 형태로 변환하기 위하여 장치의 지역정보를 포함하는 wavefront 포맷(\*.obj)으로 변환하는 작업을 수행하였다. Fig. 2는 최종적으로 제작된 3D 폴리곤 메시 기반의 호흡 모사 팬텀을 보여준다.



[Fig. 1] QUASAR™ Respiratory Motion Phantom (Modus Medical Devices Inc., London, Canada)



[Fig. 2] 3D view of constructed CAD model representing respiratory motion phantom

## 2.2 CAD2DICOM 프로그램

CAD2DICOM 프로그램은 C++ 기반으로 제작하였으며, 아래와 같이 4개의 Class로 구성되어 있다: (1) wavefront 포맷(\*.obj)의 3D 모델을 읽어 올 수 있도록 하는 OBJ\_Handling class, (2) 사용자가 입력한 파라미터에 따라 팬텀을 움직이도록 하는 DICOMUserParameter class, (3) CAD 모델을 DICOM 내부에서 사용되는 복셀(voxel) 데이터로 변환할 수 있도록 하는 Voxelization calss, 그리고 (4) 변환된 복셀 데이터를 DICOM 형태로 저장하는 DICOM\_Handling class.

```

UserParameter macro x
#####
# example of UserParameter for CAD2DICOM
#####
# Set Voxel Size for voxelzation
# ----example-----
# VoxelSize X Y Z (unit: mm)
VoxelSize 1.0 1.0 1.0
# Set CT Number
# ----example-----
# CTNum No.Group
# groupName1 HU1
# groupName2 HU2
# groupName3 HU3
# groupName4 HU4
# .....
CTNum 5
Target 1150
Lung 400
Tissue 1000
# Set TargetHovenent
# ----example-----
# TargetHovenent groupName amplitude(mm) waveform
TargetHovenent Target 10.0 sine
    
```

[Fig. 3] Example of user parameter script file

DICOMUserParameter class에서는 사용자가 프로그램 수행 전에 미리 입력한 파라미터 스크립트 파일을 읽어서 변환을 수행하는 기능이 포함되어 있다. 이때 사용자가 입력할 수 있는 파라미터는 (1) 복셀 크기, (2) 각 장치 별 CT번호 설정, 그리고 (3) 종양의 진폭(Amplitude) 및 호흡 파형 설정이다. Fig. 3은 사용자가 입력하는 파라미터 스크립트 파일의 예를 보여준다.

## 2.3 프로그램 검증

본 연구를 통해 제작된 CAD2DICOM 프로그램의 검증은 위하여, 앞서 모델링된 호흡 모사 팬텀 모델을 10개의 위상(phase)영상을 가지는 4D CT 데이터로 변환하였다.

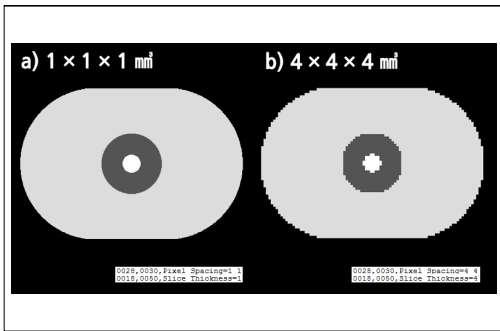
CT 스캔 시 설정되는 절편두께와 스캔영역에 따라 달라지는 복셀 크기의 다양성을 반영하기 위하여 프로그램에서 설정된 복셀 크기 파라미터가 잘 적용되는지 확인하는 방법으로 각 복셀 크기를  $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$  와  $4 \times 4 \times 4 \text{ mm}^3$  두 가지로 설정하고 프로그램을 수행하였다.

두 번째로, 설정된 진폭이 잘 반영되었는지 평가해 보기 위해,  $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ 의 복셀 크기를 가진 팬텀에 대하여 종양(target)의 진폭을 10 mm, 파형은 sine파로 설정하여 4D CT로 출력하였다. 이후 생성된 4D CT 데이터가 DICOM 형태에 맞게 출력이 되었는지 확인하기 위해, 본 연구기관에서 보유하고 있는 방사선치료계획 프로그램인 CorePLAN (SC&J, South Korea)을 이용하여 생성된 4D CT 데이터를 불러왔다. 이후 DICOM 정보가 잘 작성되었는지 확인하기 위하여 방사선치료계획시스템(Radiation Therapy Planning System; RTPS) 내에서 관심 체적의 크기와 위치를 확인하고 비교하였다. 또한 간단한 방사선치료계획을 수립하고 제작된 4D CT 데이터가 정상적으로 사용가능한지 확인하였다.

### 3. 결과

#### 3.1 복셀 크기

Fig. 4는 사용자 파라미터에서 복셀 크기를 각각  $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}$  와  $4 \times 4 \times 4 \text{ mm}$  로 설정하였을 때의 영상을 보여준다. 결과적으로, CAD2DICOM에 의해 생성된 영상은 설정된 복셀 크기에 맞게 해상도가 잘 반영된 것을 확인할 수 있었다.

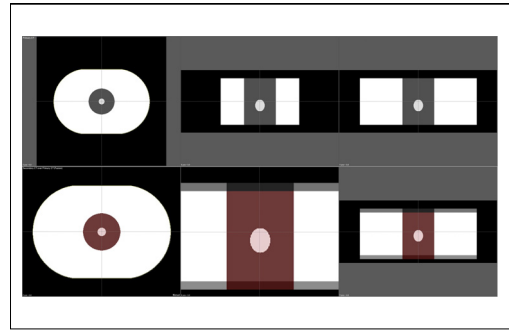


[Fig. 4] Transverse views of constructed 4D CT data according to different voxel sizes, a)  $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}$ , and b)  $4 \times 4 \times 4 \text{ mm}$

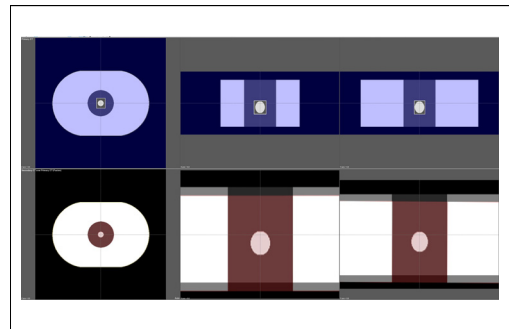
#### 3.2 종양 크기 및 위치 비교

종양의 움직임이 잘 반영되는지 확인하기 위해, 진폭을 10 mm로 설정된 상태에서 CAD2DICOM을 수행하였다. 이후 제작된 4D CT 데이터 내에 존재하는 위상별 종양의 부피 및 위치를 CorePLAN에서 제공하는 auto contouring 기능을 이용하여 평가하였다. 그 결과, 모든 위상에서의 종양의 크기는 모두 8.8 cc로 동일하였으며, 위치 역시 사용자가 입력한 파라미터의 값인 10 mm, sine 파형에 맞추어 정확하게 움직이는 것을 확인할 수 있었다.

추가적으로, 방사선치료계획시스템에서 사용하는 영상융합 프로그램인 CoreFusion (version 2.1.0.1, SC&J, Seoul, South Korea)을 사용하여 종양의 움직임을 정량적으로 평가하였다. 평가는 0%(최대 흡기) 및 50%(최대 호기) 상태의 위상사이의 위치가 평가되었다. CoreFusion의 manual registration을 시행하였을 때 두 위상에서 종양의 차이는 Z방향으로 10 mm임을 확인하였으며 [Fig. 5], auto registration mode에서 Z 방향으로 10.6 mm의 차이를 보임을 확인하였다[Fig. 6]. 이는 종양의 움직임이 사용자가 입력한 진폭의 크기인 10 mm로 정확하게 움직인다는 것을 보여주는 결과이다.



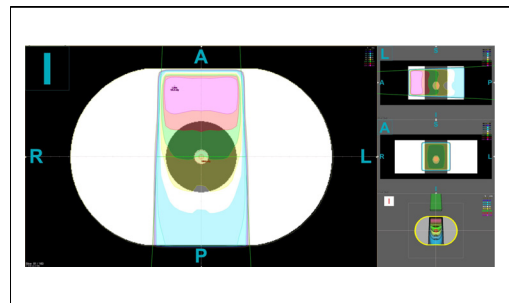
[Fig. 5] Results of manual registration 0% and 50% phases



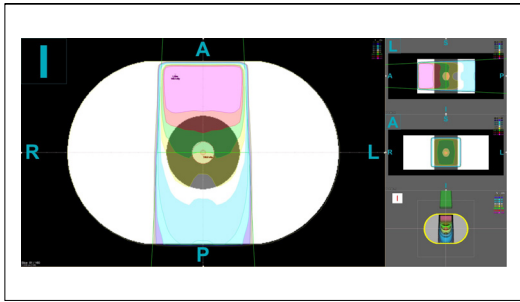
[Fig. 6] Results of auto registration 0% and 50% phases

#### 3.3 방사선치료계획시스템을 이용한 검증

제작된 4D CT 데이터가 DICOM 으로의 기능을 수행할 수 있는지를 검증하기 위하여, CorePLAN을 이용하여 각 위상영상에 10MV 엑스선(field size:  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) 한 개의 빔을 gantry 0°에서 조사하였다. 치료계획은 앞선 평가와 동일하게 0%와 50% 위상에 대해서 평가하였다. 결과적으로, Fig. 7 및 Fig. 8에서 보는바와 같이, 방사선 치료계획 프로그램 내에서 두 위상영상 위에 선량분포가 잘 계산됨을 확인할 수 있었다.



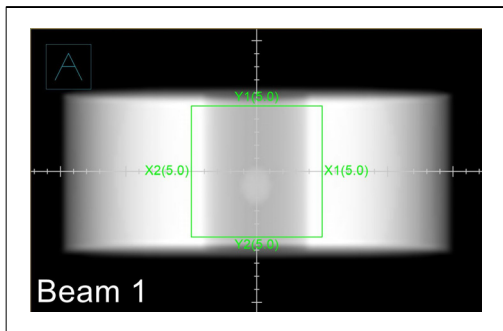
[Fig. 7] Dose distribution of 0% phase achieved with CorePLAN



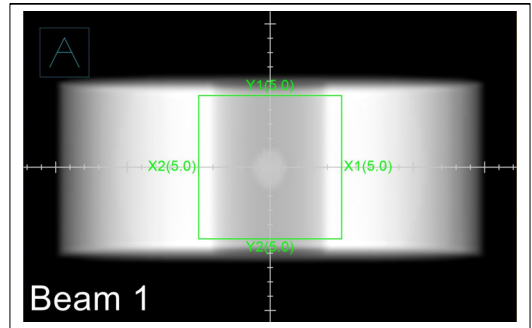
[Fig. 8] Dose distribution of 50% phase achieved with CorePLAN

이후 두 위상의 영상에 등중심(isocenter)을 기준으로 종양에 100 cGy를 처방하는 치료계획을 적용한 결과, 0% 및 50% 위상 내에서 종양의 평균 선량(mean dose)은 각각 99.5 cGy와 99.9 cGy, 최대 선량(max dose)은 각각 104.4 cGy와 104.8 cGy, 최소 선량(min dose)은 각각 94.5 cGy와 95.2 cGy, 그리고 이의 표준 편차는 각각 2.6 cGy와 2.5 cGy로 계산되었다. 이 수치결과는 기존의 DICOM 영상을 이용한 치료계획과 유사한 수치이며, 이는 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 제작된 4D CT 데이터를 이용한 방사선치료계획 수립이 정상적으로 가능함을 보여주는 결과이다.

추가적인 검증을 위하여, 방사선치료계획시스템에서 조사한 빔에 대한 가상의 영상을 형성하는 디지털 재구성 영상(digital reconstruction radiography;DRR) 기능을 적용하였다. CT 데이터의 단면 영상을 이용하여 재구성하는 DRR 기능을 0%와 50% 위상에 적용한 결과, Fig. 9 및 Fig. 10에서 보는바와 같이 정상적으로 DRR을 형성함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 본 프로그램을 이용하여 생성된 4D CT 데이터가 방사선치료계획시스템에 문제없이 적용됨을 확인하였다.



[Fig. 9] Digital reconstruction radiography (DRR) of 0% phase



[Fig. 10] Digital reconstruction radiography (DRR) of 50% phase

#### 4. 고찰 및 결론

본 연구에서는 CAD 모델을 4D CT 데이터로 변환하는 프로그램인 CAD2DICOM을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하면 사용자가 제작한 3D CAD 모델과 사용자가 직접 입력한 조건을 기반으로 4D CT 데이터를 생성할 수 있음을 확인하였다. 이를 이용하면 사용자가 원하는 크기와 형태 및 구조를 가질 수 있는 CAD 모델을 기반으로 사용자가 원하는 CT 수 및 움직임 등이 자유롭게 설정된 4D CT 데이터를 생성할 수 있으므로 그 효용성은 대단히 높다고 할 수 있다. 특히 기존의 4D 호흡 모사 팬텀을 이용할 때 발생할 수 있는 영상의 인공물(artifact, 허상) 및 기계적 오류(모터에 의한 진폭 오차)가 발생하지 않으므로, 관련 연구에 적용하여 사용할 때 영상에 의한 오차를 최소화 할 수 있을 것으로 기대된다. CAD2DICOM 프로그램은 향후 움직임에 민감한 4차원 방사선 치료계획연구 및 4차원 방사선 영상 평가연구 등에 활용될 것으로 사료된다.

#### ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2016R1D1A1A09916337) 및 정부(원자력안전위원회)의 재원으로 수행된 원자력안전연구사업(1403012), 그리고 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국전자통신연구원의 주요사업(15ZC1810)의 일환으로 수행하였음.

## REFERENCES

- [1] E. C. Halperin, C. A. Perez, Luther W. Brady, "Principle and Practice of Radiation Oncology" 5<sup>th</sup> ed., Wolters Kluwer, 2008.
- [2] J. U. Jang, H. S. Lim, M. S. Han, et. al., "Accuracy and radiation exposure from image-guidance in Tomotherapy Hi-Art System", Journal of Digital Policy & Management, Vol. 11, No. 10, pp. 577-584, 2013.
- [3] F. M. Khan, "Treatment Planning in Radiation Oncology", 2<sup>nd</sup> ed., Wolters Kluwer, 2007.
- [4] J. J. Sonke, L. Ziep, P. Remeier, M. V. Herk, "Respiratory correlated cone beam CT", Med. Phys., Vol. 32, No. 4, pp.1176-1186, 2005.
- [5] M. C-M, Paskalev K., "In-room CT technique for image guided radiation therapy", Med. Dosim. Vol. 31, pp.30-39, 2006.
- [6] Wong J. R., Cheng C. W., Grimm L., "Clinical implementation of the world's first Primaton a combination of CT scanner and linear accelerator for precise tumor targeting and treatment", Med. Phys. Vol. 17, pp.271-276, 2001.
- [7] T. Matsuura, N. Miyamoto, S. Shimizu et al, "Integration of a real-time tumor monitoring system into gated proton spot-scanning beam therapy: An initial phantom study using patient tumor trajectory data", Medical Physica, Vol. 40, 2013.
- [8] S. Shimizu, T. Matsuura, M. Umezawa, et al, "Preliminary analysis for integration of spot-scanning proton beam therapy and real-time imaging and gating", Physica Medica, Vol. 30, 2014.
- [9] F. Ammazalorso, U. Jelen, "A 4D dose computation method to investigate motion interplay effects in scanned ion beam prostate therapy" Physics in Medicine and Biology, Vol. 59, 2014.
- [10] C. Graeff, R. Luchtenborg, J. G. Eley, et al, "A 4D-Optimization concept for scanned ion beam therapy", Radiotherapy and Oncology, Vol. 109, 2013
- [11] Paganetti H., Jiang H., Trofimov A., "4D Monte Carlo simulation of proton beam scanning: modeling of variations in time and space to study the interplay between scanning pattern and time-dependent patient geometry", Phys Med Biol. Vol.50, 2005.
- [12] M. C. Han, Y. S. Yeom, T. T. Nguyen, et. al., "TET2MCNP: A Conversion Program to Implement Tetrahedral-mesh Models in MCNP", Journal of Radiation Protection and Research, Vol. 41, No. 4, 2016.
- [13] C. Ong, W. F. A. Verbakel, Johan P. Cuijpers, et al, "Dosimetric impact of interplay effect on Rapidarc lung stereotactic treatment delivery", Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys., Vol. 79, No. 1, 2011.
- [14] Y. Kang, X. Zhang, J. Y. Chang, et al., "4D proton treatment planning strategy for mobile lung tumors", Int J. Radiation Oncology Biol. Phys., Vol. 67, No. 3, 2007.
- [15] H. Paganetti, "Proton Therapy Physics", 1<sup>st</sup> ed. Taylor and Francis Book, 2012.
- [16] S. H. Han, "A Study on the Utilization of Digital Design by Three Dimensional Modeling", Journal of Digital Convergence, Vol. 10, No. 10, pp 447.-456, 2012
- [17] E. Murena, S. Mhlanga, N. Taisepe, C. Mbohwa, "Design of a Digital Imaging and Machining System Programme for Human Bone Implants", International conference on mining, mineral processing and metallurgical engineering, 2014.
- [18] A. D. Muhuri, T. Rajalakshmi, S. J. Pal, "Patient Specific CAD model of Pulmonary artery for Analysis of Arterial Disease", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering
- [19] J. Tabary, S. Marache, S. Valette, et. al., "Realistic X-ray CT simulation of the XCAT phantom with SINDBAD", IEEE, Nuclear Science Symposium Conference, 2009
- [20] A. Shapi, R. Sulaiman, M. Khatim Hasan, et. al., "Applications of Computer Aided Design(CAD) in Medical Image Technology", Conference of

Engineering and Information Technology 2011.

- [21] Z. Wang, I. Aarya, M. Gueorguieva, et. al., "Image-based 3D modeling and validation of radiofrequency interstitial tumor ablation using a tissue-mimicking breast phantom", Int J CARS, Vol.7, 2012.
- [22] F. M. Milian, F. Garcia, M. V. M. Guevara, et. al., "Development of voxel models from 3D surfaces: optimized methodology", Revista Brasileira de Fisica Medica, Vol.4, No. 3, 2011.
- [23] H. R. Jung, K. J. Kim, E. H. Mo, "A Study on the Radiatin Exposure Dose of Brain Perfusion CT Examination a Phantom", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 6, No. 5, 2015.
- [24] Y. H. Seoung, "Evaluation of Surface Radiation Dose Reduction and Radiograph Artifact Images in Computed Tomography on the Radiation Convergence Shield by Using Sea-Shells", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 8, No. 2, 2017.

**저자소개**

**서 정 민(Jeong Min Seo)** [정회원]



- 2011년 8월 : 한양대학교 원자력 공학과 박사 수료
- 2001년 3월 ~ 2011년 8월 : 삼성 서울병원 방사선종양학과
- 2011년 9월 ~ 현재 : 대원대학교 방사선학과 교수

<관심분야> : 의학물리, 방사선의학

**한 민 철(Min Cheol Han)** [정회원]



- 2011년 8월 ~ 현재 : 한양대학교 원자력공학과 (원자력공학 박사 과정)

<관심분야> : 전산모사, 팬텀제작

**이 현 수(Hyun Su Lee)** [정회원]



- 2014년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 원자력공학과 (원자력공학 박사 과정)

<관심분야> : 의학물리, 전산모사

**이 세 형(Se Hyung Lee)** [정회원]



- 2015년 2월 : 한양대학교 원자력 공학과 박사 수료
- 2011년 11월 ~ 현재 : 분당제생 병원 방사선종양학과

<관심분야> : 의학물리, 방사선의학

**김 찬 형(Chan Hyeong Kim)** [정회원]



- 2001년 3월 ~ 2011년 8월 : 한국 원자력안전기술원 선임연구원
- 1999년 2월 ~ 2001년 9월 : Texas A&M University Nuclear Science Center 부소장
- 2001년 10월 ~ 2003년 7월 : Rensselaer Polytechnic Institute 조교수

- 2003년 2월 ~ 현재 : 한양대학교 원자력공학과 교수
- <관심분야> : 전산모사, 방사선계측