

Comparison of Linac-based VMAT Stereotatic Radiosurgery and Conventional Stereotatic Radiosurgery for Multiple Brain Lesions

Eun-Sung Jang¹, Bo-Seok Chang^{2*}

¹Department of Radiation Oncology Kosin University Gospel Hospital

²Department of Radiological Science, Gin Cheon University

Received: March 03, 2021. Revised: April 21, 2021. Accepted: April 30, 2021.

ABSTRACT

Portal Dosimetry was verified using EPID to secure the clinical application and reliability of the existing research dose evaluation. The dose distribution of Geant4 was compared with the measured value by 360° rotational irradiation with a 2.5 cm cone for stereotactic brain surgery. To confirm the dose distribution of patients with brain metastasis, the dose distribution investigated by inserting a Gafchromic EBT film into the parietal phantom and the dose distribution obtained from the parietal phantom using VMAT are compared and applied to actual patients. As a result of the analysis, it was confirmed that the accuracy of the beam center and the center of the couch coincide accurately with an error within 1mm as a result of QA through a pin ball. In addition, it was confirmed that the EBT3 film has excellent linearity in the range of 0 to 10 Gy according to various dose irradiation. In the same setting as the two cervical phantoms, we confirm that the implementation and simulation results calculations of dose calculations based on Geant4 using photon beams match the experimental data within the treatment planning volume (PTV). Therefore, volume modulated arc treatment (VMAT) 360° rotational irradiation was performed, and the result of iso-dose distribution analysis by rotational irradiation confirmed that it is appropriate to include a virtual tumor.

Keywords: Geant4 simulation, Alderson rando phantom, SRS(stereotactic radiosurgery), dose distribution, VMAT

I. INTRODUCTION

정위방사선수술(Stereotactic radiosurgery, SRS)은 소조사면 직경 1.0 -3.0 cm 으로 뇌종양 중심에는 고선량, 건강조직의 조사량을 가능한 적게 하고, 1회 조사로 수술효과를 나타내는 조사법이다^[1-3]. 뇌 정위 방사선수술은 뇌수막종, 신경초종, 동정맥기형 뿐만 아니라 전이성 종양 등의 치료에도 이용되고 있어 그 적용범위가 확대되고 있다^[4,5-7].

또한, 뇌전이 치료방법은 종양의 형태 및 사이즈 종류에 따라 달라진다. 특히, 삶의 질 향상 및 생존 기간 연장에 효과적인 방법은 전뇌조사이다. 하드웨어와 소프트웨어의 발전으로 다양한 조사면을

단시간에 쉽고 편리하게 만들 수 있는 다엽 콜리메이터(Multileatcollimator, MLC)는 3차원 입체조형 방사선치료(3-Dimension conformal diation therapy, 3D-CRT), 강도변조 방사선치료(Intensity-Modulated Radiation Therapy, IMRT), 체적 강도변조 회전방사선치료 (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT,) 등 방사선 치료계획에 쓰이며 종양에는 고선량을 집중 조사하고 종양 제어확률을 높이고, 정상조직에는 최소한의 선량을 조사하여 정상조직 합병증 확률을 낮추어 방사선 치료효율을 높일 수 있는 장점이 있다^[8-10]. 기존 연구에서 두부인체 팬텀에 정위적 방사선수술 용도의 콘(cone) 장착하여 종양의 위치와 크기에 따라 회적 혹은 고정된 방향으로 여러 개의 빔을 집중적으로 조사 할 수 있게 되었다^[11,12].

* Corresponding Author: Chang Bo Seok E-mail: boseok7@daum.net Tel: *** - **** - ****
Address: Department of Radiological Science, Collage of Health Sciences, Gimcheon University, Korea

반면, 본 연구에서는 체적 강도변조 회전방사선 치료 (VMAT)를 사용한 두부인체팬텀에 방사선수술(SRS)을 사용하여 선량분포를 비교하여 실제 환자에 적용하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 실험재료

- Light speed RT16, CT simulator (General Electric Co, USA)
- Eclipse V13.6 (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, USA)
- Anderson Rando Phantom (Alderson Research Laboratories Inc., USA)
- Geant4.10.2 simulation code
- LTLF (Laser Target Localization Frame)
- RLPP (Recti-Linear Phantom Pointer)
- Helical Focuser
- Clinac 600 (Varian Medical system, USA)
- TrueBeam STX (Varian Medical system, USA)
2.5 mm MLC
- Gafchromic TM Dosimetry Media, TYPE EBT-3

2. Head Phantom CT simulation

인체팬텀(Anderson Rando Phantom)을 대상으로 정위적 방사선수술 두부 프레임을 장착하여 Brain CT에서 120 kV, 200 mA, 1.25 slice 두께로 뇌를 포함한 두부 전 영역이 포함되도록 스캔하여 영상을 촬영하였다. Fig. 1과 같다.

2.1. Isocentric Accuracy & Film Calibration in Linac SRS

기존연구 SRS에서는 LTLF를 LCMA에 장착 후 270, 0, 90 각각의 방향에서 cone의 beam center와 측면의 laser beam center와 couch의 center가 정확하게 일치하는가를 pin ball을 통해 QA 하였다. Fig. 2와 같다. 또한 VAMT-SRS에서는 EBT3 film에 6 MV, 0-10 Gy영역까지 다양하게 선량을 조사하였

다. Fig. 3과 같다.

선량평가의 임상 적용 및 신뢰도 확보를 위하여 EPID를 이용하여 Portal Dosimetry를 진행하였다.

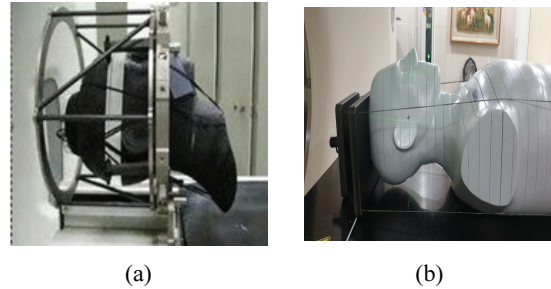


Fig. 1. CT simulation by anthropomorphic phantom Setup.

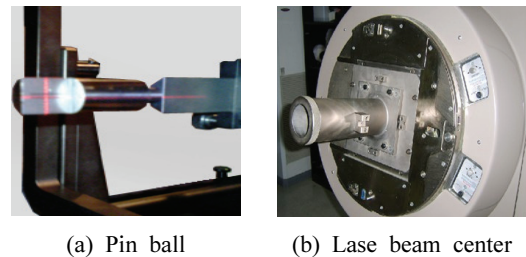


Fig. 2. Isocentric Accuracy QA.

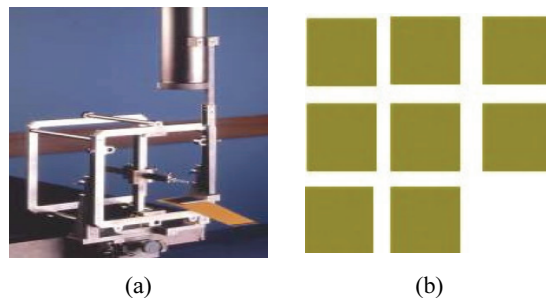


Fig. 3. The Experimental Setup for the test using film.

3. Dose distribution in the Alderson-Rando head phantom

Eclipse Treatment Planning System과 GEANT4 systems에서 기하학적 정의에 필요한 CT 영상은 이미지 획득한 후 GEANT4와 Eclipse Treatment Planning System으로 전송되었다. Fig. 4과 같다.

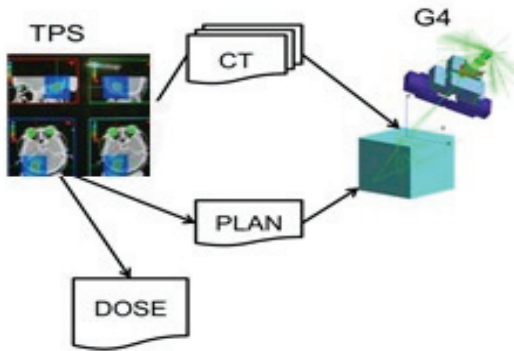


Fig. 4. Overall organization of the developed GEANT4 dose calculation system.

체적변조회전에 의한 입체선량은 종양과 주위 건강 장기에 도달하는 선량계획을 통해서 이루어진다. 전산화선량계획은 기하학적 입체구조의 선량 분포를 파악하기에 적절하다^[13-16].

따라서 방사선치료계획은 전산화치료계획 장치로는 Eclipse Treatment Planning System (Varian Medical System, Version 13.6, USA)을 사용하였고 치료 장비는 trueBEAM Stx(Varian Medical system, USA)을 사용하였다. 치료계획용적(Planning Target Volume, PTV)의 95 %를 처방선량 포함 및 최대선량이 107 % 되도록 하였다. Fig. 5과 같다. 치료계획은 full 2 Arc를 사용하였다.

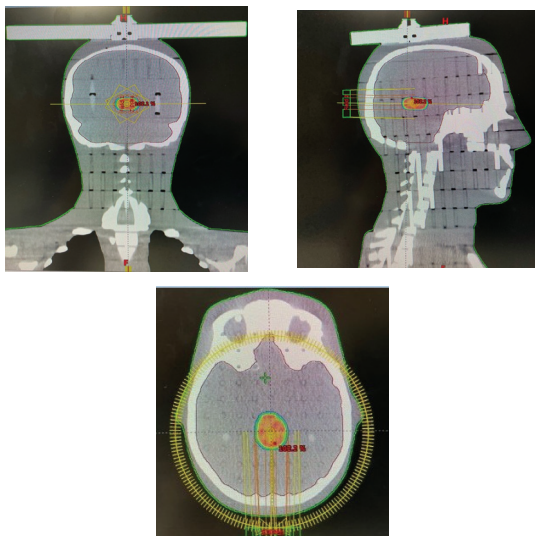
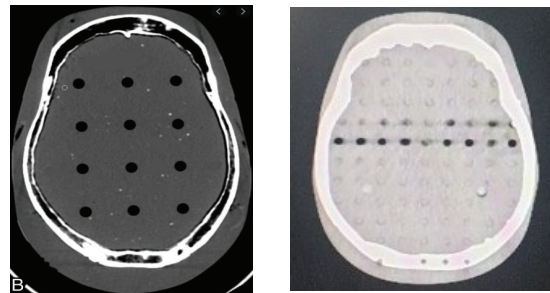


Fig. 5. Axial and coronal and sagittal image of whole brain radiation therapy planning image.

또한, Geant4 툴킷에 기초한 선량 계산은 다음과 같이 구성된다^[17,18]. Geant 4 기반 적용은 3D 복셀 직선 기하학에서 선량계산을 수행하도록 설계되었다^[19-21]. 인체의 정확한 표현은 방사선 이미지, 즉 전산화 단층촬영(CT)의 도움을 받아 달성된다. Fig. 6과 같다.



(a) Geant4 CT image (b) Measurement CT image

Fig. 6. Comparison Geant4 simulation CT anthropomorphic phantom image with measurement CT image.

4. Irradiation of an Alderson-Rando Head Phantom

기존 SRS는 치료계획용적의 크기, 모양, 주변장기들의 위치를 고려하여 6개의 조사야로 가상의 target에 2.5 cm 원통형 cone 장착 후 6 MV 광자선 600MU/mim의 선량률로 300 cGy를 조사하였다. Fig. 7과 같다. VMAT- SRS는 인체팬텀에 가상의 Target을 만들어 360°를 회전하는 방법으로 조사 후 선량 분포를 비교하였다.



Fig. 7. Alderson-Rando Head Phantom SRS Cone and EPID Treatment Comparison.

5. Application

Phantom QA의 해부학적 정보를 기준으로 실제 환자에 적용했던 체적 강도변조 회전방사선치료 (VMAT) 전산화치료계획을 수립하여 빔 parameter를 적용하여 6 MV 광자선으로 뇌암 환자를 치료하였다.

III. RESULTS

선형가속기 기반 뇌정위적방사선 수술의 첫 번째 절차는 beam center와 couch의 center가 정확하게 일치하는가를 pin ball을 통해 QA한 결과 1 mm 이내의 오차로 정밀함을 확인할 수 있었다. 또한 EBT3 Film에 다양한 선량조사에 따라 0-10 Gy영역까지 우수한 선형성임을 확인할 수 있었다. Fig. 8과 같다.

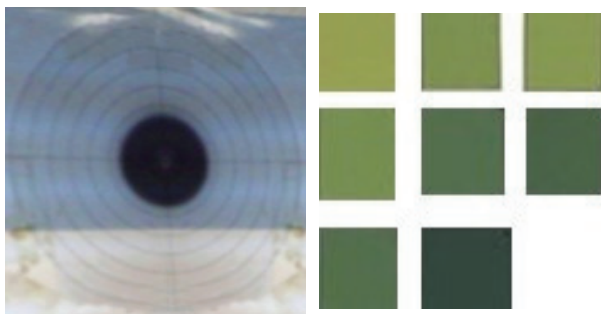


Fig. 8. Evaluating the accuracy of the irradiated film.

팬텀에서 각 event의 시뮬레이션은 하나 이상의 주요 입자(광자, 전자 및 양전자)에 대한 에너지, 위치, 방향에 관한 정보를 제공한다. 따라서 Geant4에서 선형 가속기에 의해 생성된 6 MV 광자 빔의 시뮬레이션을 통해 얻은 사전 계산된 위상-공간 데이터와 연결해서 두부인체 팬텀에 빔을 조사했다. Fig. 9과 같다.

Fig. 10은 뇌정위방사선수술 2.5 cm cone을 장착하여 조사에 의한 측정치와 Geant4의 선량분포를 비교하였다.

모두 등선량곡선이 가상 종양을 충분히 포함하였으며, 이것은 cylindrical cone을 이용한 많은 연구자들의 선량분포와 유사한 결과였음을 확인하였다 [22].

또한, Fig. 11은 두경부 팬텀 사이에 EBT 필름을 삽입하여 가상의 종양에 뇌정위방사선수술 2.5 cm cone을 장착하여 조사하였다. 분석결과 선량분포 붉은색으로 표시된 부분을 중심으로 가상 종양 2.5 cm을 포함하기에 적절함을 확인하였다. 또한 체적 강도변조 회전방사선치료 (VMAT) 360° 회전 조사를 실시하여 회전조사에 의한 등선량분포 분석결과 가상 종양을 포함하기에 적절함을 확인하였다.

또한, 실제 환자에게 적용하기 위해 brain 부위를 1.25 mm 간격으로 스캔하여 정위방사선수술 환자를 획득한 영상으로 Arc를 사용하여 선량분포의 우수함을 확인하였다. Fig. 12과 같다.

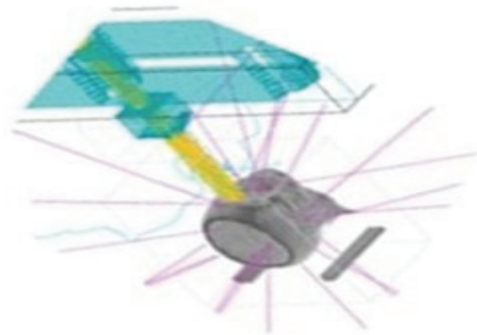


Fig. 9. Schematic view of the experimental setup including the Geant4 simulated geometry of the 6 MV Varian linac head and simulated geometry of the Head phantom.

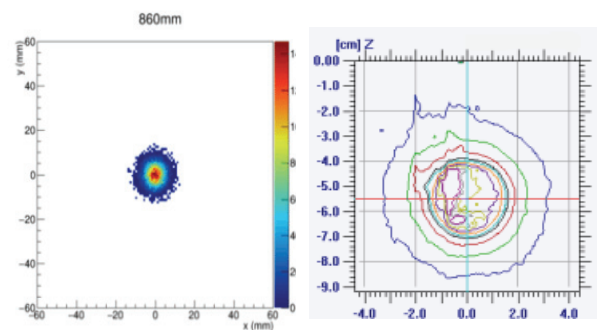


Fig. 10. Comparison of the dose distributions for the measured and Geant4 simulation dose distributions. Isodose contours with a circular field of 2cm in diameter for 6 MV X-ray.

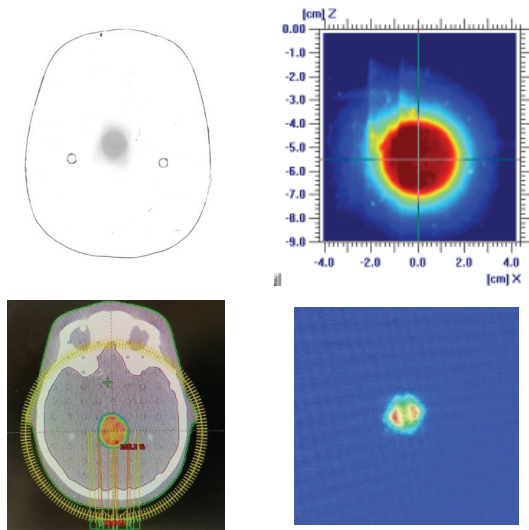


Fig. 11. Comparison of the dose distributions for the measured and Geant4 simulation dose distributions. Isodose contours with a circular field of 2.5 cm in diameter for 6 MV X-ray.

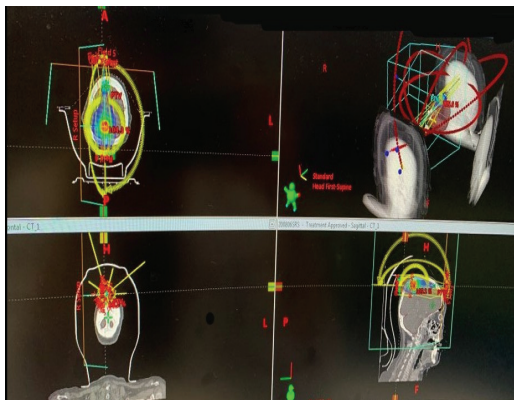


Fig. 12. High Dose distribution image of VMAT srs brain radiation therapy planning.

IV. DISCUSSION & CONCLUSION

본 연구에서는 기존에 연구하였던 전통적으로 LINAC 기반 SRS는 각 병변마다 하나의 Isocenter(등각점)를 활용하여 필름 QA를 통해 실제 환자 치료 시까지 전체시간이 길어지는데 반해, 하나의 Isocenter(등각점)를 사용하여 두개골 SRS 환자에 대한 VMAT QA는 치료시간이 단축됨을 확인하였다. 기존 치료계획에 비해 정밀하게 치료계획을 할 수 있어, 처방선량내에 선량 분포가 달성될 수 있음을 확인하였다. 또한, 두부인체 팬텀과 같은 설정에서

광자 빔을 사용한 Geant4에 기반한 선량 계산 도구의 구현과 시뮬레이션 결과 계산치는 치료계획용적(PTV)내에서 실험 데이터와 일치함을 확인하였다. 따라서 실제 환자를 적용한 방사선 치료 분야에서 뇌정위적방사선 수술과 입체적 세기변조 회전 기법이 융합 되면서 정확한 선량계산의 방법으로 전산 모사 이용이 더욱 요구되고 있다.

Acknowledgement

본 논문은 2020년도 김천대학교 교내학술 연구비에 의하여 지원되었음.

Reference

- [1] G. M. Clark, R. A. Popple, P. E. Young, et al., "Feasibility of single-isocenter volumetric modulated arc radiosurgery for treatment of multiple brain metastases", *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, Vol. 76, No. 1, pp. 296-302, 2010.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrobp.2009.05.029>
- [2] T. M. Peters, J. A. Clark, G. B. Pike, C. Henri, L. Collins, D. Leksell, O. Jeppsson, "Stereotactic Neurosurgery Planning on a Personal Computer Based Work Station", *Journal of Digital Imaging*, Vol. 2, No. 2, pp. 75-81, 1989.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF03168023>
- [3] F. Colombo, A. Benedetti, F. Pozza, A. Zanardo, R. C. Avanzo, G. Chierago, C. Marchetti, "Stereotactic radiosurgery utilizing a linear accelerator", *Applied Neurophysiology*, Vol. 48, pp. 133-145, 1985.
<http://dx.doi.org/10.1159/000101117>
- [4] Hartmann Günther H., Schlegel Wolfgang, Sturm Volker, Kober Bernd, Pastyr Otto, Lorenz Walter J., "Cerebral radiation surgery using moving field irradiation at a linear accelerator facility", *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, Vol. 11, No. 6, pp. 1185-1192, 1985.
[http://dx.doi.org/10.1016/0360-3016\(85\)90068-9](http://dx.doi.org/10.1016/0360-3016(85)90068-9)
- [5] Siddon Robert L., Barth Norman H., "Stereotaxic localization of intracranial targets", *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, Vol. 13, No. 8, pp. 1241-1246, 1987.
[http://dx.doi.org/10.1016/0360-3016\(87\)90201-X](http://dx.doi.org/10.1016/0360-3016(87)90201-X)

- [6] E. S. Jang, C. S. Lee, "Feasibility Study of Dose Evaluation of Stereotactic Radiosurgery using GafChromic EBT® Film", *The Journal of Korean Society for Radiation Therapy*, Vol. 191, No. 1, pp. 27-33, 2007.
- [7] G. Minniti, E. Clarke, G. Lanzetta, et al., "Stereotactic radiosurgery for brain metastases: analysis of outcome and risk of brain radionecrosis", *Radiation Oncology*, Vol. 6, No. 1, pp. 48, 2011.
- [8] G. M. Clark, R. A. Popple, B. M. Prendergast, et al., "Plan quality and treatment planning technique for single isocenter cranial radiosurgery with volumetric modulated arc therapy", *Practical Radiation Oncology*, Vol. 2, No. 4, pp. 306-313, 2012.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.prro.2011.12.003>
- [9] Z. A. Kohutek, Y. Yamada, T. A. Chan, et al., "Long-term risk of radionecrosis and imaging changes after stereotactic radiosurgery for brain metastases", *Journal of Neuro-Oncology*, Vol. 125, No. 1, pp. 149-205, 2015.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11060-015-1881-3>
- [10] Ramakrishna Naren, Rosca Florin, Friesen Scott, Tezcanli Evrim, Zygmanski Piotr, Hacker Fred, "A clinical comparison of patient setup and intra-fraction motion using frame-based radiosurgery versus a frameless image-guided radiosurgery system for intracranial lesions", *Radiotherapy and Oncology*, Vol. 95, No. 1, pp. 109-115, 2010.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.radonc.2009.12.030>
- [11] H. Zaidi, "Relevance of accurate Monte Carlo modeling in nuclear medical imaging", *Medical Physics*, Vol. 26, No. 4, pp. 574-608, 1999.
<https://doi.org/10.1118/1.598559>
- [12] B. Tas, I. F. Durmus, A. Okumus, et al., "Correlation between heterogeneity index (HI) and gradient index (GI) for high dose stereotactic radiotherapy/radiosurgery (SRT/SRS)", *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1815, No. 1, 2017.
<https://doi.org/10.1063/1.4976462>
- [13] F. Colombo, A. Benedetti, F. Pozza, A. Zanardo, R. C. Avanzo, G. Chiarego, C. Marchetti, "Stereotactic Radiosurgery Utilizing a Linear Accelerator", *Stereotactic and Functional Neurosurgery*, Vol. 48, pp. 133-145, 2004.
<http://dx.doi.org/10.1159/000101117>
- [14] Giuseppe Minniti, Claudia Scaringi, Enrico Clarke, Maurizio Valeriani, Mattia Osti, Riccardo Maurizi Enrici, "Frameless linac-based stereotactic radiosurgery (SRS) for brain metastases: analysis of patient repositioning using a mask fixation system and clinical outcomes", *Radiation Oncology*, Vol. 6, No. 1, pp. 158, 2011.
<http://dx.doi.org/10.1186/1748-717X-6-158>
- [15] Stanhope C, Chang Z, Wang Z, et al. "Physics considerations for single-isocenter, volumetric modulated arc radiosurgery for treatment of multiple intracranial targets", *Practical Radiation Oncology*, Vol. 6, No. 3, pp. 207-213, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.prro.2015.10.010>
- [16] R. D. Lewis, S. J. Ryde, A. W. Seaby, D. A. Hancock, C. J. Evans, "Use of Monte Carlo computation in benchmarking radiotherapy treatment planning system algorithms", *Physics Medicine and Biology*, Vol. 45, No. 7, pp. 1755-1764, 2000.
<http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/45/7/304>
- [17] Sean Jy-Shyang Chen, Pierre Hellier, Maud Marchal, Jean-Yves Gauvrit, Romain Carpentier, Xavier Morandi, D. Louis Collins, "An anthropomorphic polyvinyl alcohol brain phantom based on Colin27 for use in multimodal imaging", *Medical Physics*, Vol. 39, No. 1, pp. 554-561, 2012.
<http://dx.doi.org/10.1118/1.3673069>
- [18] A. Kimura, S. Tanaka, T. Aso, H. Yoshida, N. Kanematsu, M. Asai, T. Sasaki, "DICOM Interface and Visualization Tool for Geant4-based Dose Calculation", *2005 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, Vol. 2, pp. 981-984, 2005. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2005.1596418>
- [19] M. K. Kang, "Comparison of the Dose of the Normal Tissues among Various Conventional Techniques for Whole Brain Radiotherapy", *The Korean Society for Radiation Oncology*, Vol. 28, No. 2, pp. 99-105, 2010.
<http://dx.doi.org/10.3857/jkstro.2010.28.2.99>
- [20] Filippo Alongi, Alba Fiorentino, Pietro Mancosu, Pierina Navarria, Niccolò Giaj Levra, Rosario Mazzola, "Stereotactic radiosurgery for intracranial metastases: linac-based and gamma-dedicated unit approach", *Expert Review of Anticancer Therapy*, Vol. 16, No. 7, pp. 731-771, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1080/14737140.2016.1190648>

- [21] D. W. Andrews, C. B. Scott, P. W. Sperduto, A. E. Flanders, L. E. Gaspar, M. C. Schell, et al., "Whole brain radiation therapy with or without stereotactic radiosurgery boost for patients with one to three brain metastases: phase III results of the RTOG 9508 randomised trial", *The Lancet*, Vol. 363, No. 9422, pp. 1665-1672, 2004.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(04\)16250-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(04)16250-8)
- [22] J. D. Graham, A. E. Nahum, M. Brada, "A comparison of techniques for stereotatic radiotherapy by linear accelerator based on 3-dimensional dose distributions", *Radiotherapy and Oncology*, Vol. 22, No. 1, pp. 29-35, 1991.
[http://dx.doi.org/10.1016/0167-8140\(91\)90066-P](http://dx.doi.org/10.1016/0167-8140(91)90066-P)

Linac 기반 VMAT 정위적 수술 뇌 병변 연구와 기존의 정위적 방사선 수술 비교

장은성¹, 장보석^{2,*}

¹고신대학교복음병원 방사선종양학과

²김천대학교 방사선학과

요 약

기존 연구인 선량평가의 임상 적용 및 신뢰도 확보를 위하여 EPID를 이용하여 Portal Dosimetry를 검증하였다. 뇌정위방사선수술 2.5 cm cone을 장착하여 360° 회전조사에 의한 측정치와 Geant4의 선량분포를 비교하였다. 뇌전이 환자의 선량분포를 확인하기 위해 두부인체 팬텀에 Gafchromic EBT필름을 삽입하여 조사한 선량분포와 VMAT을 이용한 두부인체 팬텀에서 얻은 선량분포를 비교하여 실제 환자에 적용하고자 한다. 분석결과 beam center와 couch의 center가 정확하게 일치하는가를 pin ball을 통해 QA한 결과 1 mm 이내의 오차로 정밀함을 확인할 수 있었다. 또한 EBT3 Film에 다양한 선량조사에 따라 0 ~ 10 Gy영역까지 우수한 선형성임을 확인할 수 있었다. 두경부 팬텀과 같은 설정에서 광자 빔을 사용한 Geant4에 기반한 선량계산 도구의 구현과 시뮬레이션 결과 계산치는 치료계획용적(PTV)내에서 실험 데이터와 일치함을 확인하였다. 따라서 체적변조 아크치료(VMAT) 360° 회전 조사를 실시하여 회전조사에 의한 등선량분포 분석결과 가상 종양 을 포함하기에 적절함을 확인하였다.

중심단어: Geant4 simulation, 인체팬텀, 뇌정위방사선수술, 선량분포, 체적변조회전조사.

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	장은성	고신대학교복음병원 방사선종양학과	주임/연구원
(교신저자)	장보석	김천대학교 방사선학과	교수