

사이버나이프 출력인자 분석: 전리함, 다이오드 검출기 및 필름

가톨릭대학교 의과대학 *사이버나이프센터, †방사선종양학교실, ‡신경외과학교실,
§경희대학교병원 방사선종양학과, ¶경기대학교 의학물리학과

장지선*^{||} · 강영남[†] · 신동오[§] · 최병욱[†] · 이태규[†] · 최일봉[†] · 김문찬[†] · 권수일^{||}

사이버나이프에 대한 정확한 선량측정은 정위방사선수술 전 과정에서 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구에서는 여러 가지 검출기를 이용하여 사이버나이프의 상대적인 출력인자 값에 대하여 평가하고자 하였다. 사이버나이프는 12개 조준기를 사용하고 있으며, 이들 조준기에 대한 출력인자 값은 6개의 검출기(다이오드 검출기, X-Omat V 필름, Gafchromic EBT 필름, 0.015 cc, 0.125 cc, 0.6 cc 전리함)를 사용하여 측정하였다. 다이오드 검출기와 전리함은 물팬텀을 이용하여 선원과 표면 간의 거리 80 cm, 최대선량깊이인 1.5 cm에서 측정하였고 필름은 고체팬텀을 이용하여 물팬텀과 동일한 위치에서 측정하였다. 각 조준기의 출력인자는 사이버나이프의 최대 조사면의 크기인 직경 60 mm 조준기의 출력인자 값에 대하여 규격화하였다. 조준기의 크기가 30 mm 이상인 경우 0.6 cc 전리함을 제외하고 다른 검출기에서 0.5% 이내로 상호 잘 일치하였다. 그러나 15 mm 이하의 조준기에서는 출력인자 값이 검출기의 종류에 따라 다소 차이가 있음을 확인하였다. 즉, 다이오드 검출기와 Gafchromic 필름 경우 5 mm 조준기의 출력인자는 각각 0.656 ± 0.009 와 0.777 ± 0.013 이었다. 전리함과 다이오드 검출기에서 이러한 차이는 깊이에 따라 선량을 변화가 급격하고 측방쪽으로의 전자평형상태(lateral electronic equilibrium)가 이루어지지 않은 것으로 기인된다. 그러므로 Gafchromic EBT 필름이 사이버나이프 출력인자 값을 결정하는데 다른 검출기에 비하여 보다 정확하다고 사료된다.

중심단어: 사이버나이프, 출력인자, 다이오드 검출기, Gafchromic EBT 필름

서 론

감마나이프나 선형가속기를 사용하는 정위방사선수술은 정상조직에 최소한의 선량을 주고 목표점에는 높은 선량의 방사선을 정확하게 조사하는 것을 목표로 한다. 이러한 기술로 정위적 틀(stereotactic frame)은 정확한 조사를 위해 환자의 머리를 고정시키는 데 사용되었다. 정위적 틀을 사용하는 방사선수술에서는 분할된 치료를 수행하기 어렵고 머리 이외의 신체 부분에 쉽게 이용할 수 없었다. 이러한 점을 보완하기 위하여 정위적 틀을 사용하지 않는 무고정틀 정위방사선수술 및 정위방사선치료 방법(frameless stereotactic radiosurgery & radiotherapy)이 나오게 되었다.¹⁾ 기존의 무고정틀 정위방사선수술에서는 실시간 위치 추적에

어려움이 있어서 이에 Adler 등²⁾은 영상유도의 무고정틀 정위방사선수술(image-guided frameless stereotactic radiosurgery) 장비인 사이버나이프(CyberKnife)를 개발하였다.²⁻⁶⁾

사이버나이프 시스템은 치료계획에서 정위방사선수술 시행까지 두부나 체부에 고정할 정위적 틀이 필요 없고, 다분할 정위방사선수술을 시행할 수 있다. 또한 두개강 내 뿐만 아니라 두개강 외에 있는 병변에 대해서도 모두 치료가 가능하고, 실시간 영상추적을 통해 병변위치를 정확하게 치료할 수 있는 장점을 가지고 있다.²⁻⁶⁾ 사이버나이프 시스템은 0.2 mm 이내의 기하학적 및 기계적으로 높은 정확·정밀도를 가지고 있으며, 일회 또는 분할하여 소조사면의 목표점에 방사선을 조사한다. 사이버나이프를 이용한 방사선 수술 시 출력인자(relative output factor)의 정확한 측정은 정위방사선수술 성적에 중요한 영향을 미친다. 특히 삼차신경통(trigeminal neuralgia)과 같은 5 mm 조준기(collimator)를 이용한 정위방사선수술은 일회에 고 선량의 방사선이 환자에게 조사되므로 출력인자의 정확성은 분명히 중요하다.⁷⁾

정위방사선수술에서의 선량 검증은 병변에 최대한 선량을 조사하고 병변 주위의 정상조직이나 장기는 최대한 보

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력증강기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

이 논문은 2006년 2월 24일 접수하여 2006년 3월 20일 채택되었음.

책임저자 : 강영남, (150-713) 서울시 영등포구 여의도동 62번지

가톨릭대학교 성모병원 방사선종양학교실

Tel: 02)3779-1440, Fax: 02)780-1279

E-mail: k3yn@catholic.ac.kr

호하기 위하여 소조사면을 사용하고 있다. 그러나 조사면 크기에 비해 검출기의 기하학적인 크기가 상대적으로 커서 깊이에 따라 선량을 변화가 급격하고 조사면 측방으로의 전자평형상태가 이루어지지 않아 정확한 선량 검증이 어려운 실정이다.⁸⁻¹⁰ 정위방사선수술 시 소조사면에 대하여 선량측정을 위해서는 유효 체적이 작은 전리함(ionization chamber)이나 다이아몬드 검출기(diamond detector), 다이오드 검출기(diode detector), 열형광선량계(TLD) 또는 필름 등을 사용하여 수행하고 있다.¹¹⁻¹⁶ 전리함은 출력인자 측정에 기준이 되어 사용되는 검출기로 유효 체적이 작은 전리함은 정확한 절대선량을 평가할 수 있으나 상대적으로 작은 신호와 큰 노이즈를 가지는 문제점이 있다.^{11,12} 다이아몬드 검출기는 물등가물질로 구성되어 있고 작은 유효 체적을 갖고 있어 소조사면 측정에 정확성을 보여주지만 고가이고 선량률에 대한 의존성을 가진다.¹³ 열형광선량계는 물등가물질과 유사하며 선형적인 선량 반응을 갖고 있지만 불확도가 큰 단점이 있다.⁹ 필름은 소조사면에 대한 선량 검증에서 감도가 높지만 교정 및 판독 과정에 불확도가 큰 단점이 있다. Gafchromic 필름은 조직 등가물질로 구성되어 있으며 가시광선에 민감하지 않고 현상할 필요가 없다. 감도가 높지만 에너지 의존성에 대하여 보고된 바 있다.^{10,14-16} 다이오드 검출기는 공간 분해능과 재현성, 안정성에서 뛰어나며 사용하기 쉽고 바이어스(bias)가 필요하지 않다. 그렇지만 실리콘의 비교적 높은 원자번호로 인하여 에너지 의존성을 가지는 단점이 있다.¹⁶ 따라서 본 연구에서는 여러 가지 검출기를 이용하여 사이버나이프의 상대적인 출력인자 값에 대하여 평가하고자 한다.

재료 및 방법

1. 사이버나이프 시스템

사이버나이프 시스템(Fig. 1)은 6개의 관절로 구성된 로봇팔(KUKA, Germany)에 평목상의 에너지 6 MV X-선이 방출되는 선형가속기와 영상유도장치(target localization system, TLS)로 구성되어 있다. 로봇팔은 6개의 자유도(Fig. 1f)를 가지고 있으며, 0.2 mm 이내의 기하학적 및 기계적으로 높은 정확·정밀도를 보인다. 사이버나이프를 사용한 정위방사선수술은 약 100개의 node를 사용하여 약 1,200개의 빔을 이용하고 각 환자의 병변의 모양과 크기 등에 따라 최적화하여 결정한다. 사이버나이프는 하나의 축교점(isocenter)을 가지고 치료하는 기존의 선형가속기를 이용한 방사선

수술과는 달리 축교점이 없는(non-isocentric) 방법으로 이용하여 방사선을 조사한다. 사이버나이프는 두 개의 X-선 선원과 두 개의 비결정질의 실리콘 검출기(amorphous silicon detector)가 있어 실시간 영상유도 기술을 이용하여 환자의 표적 병변의 위치를 파악한 후 실시간으로 추적·교정한다. 두정부의 경우 두개골을 위치 추적의 기준으로 정하고 있으며 체부의 경우 기존의 무고정틀 정위방사선수술에서 사용한 방법과 동일한 원리로 몸속에 삽입된 금속표식자의 위치를 추적하여 실시간으로 확인하면서 치료한다. 사이버나이프의 조준기는 기존의 선형가속기와는 다른 형태로 구성되어 있다. 사이버나이프의 일차 조준기는 원형의 콘형태이며 직경은 70 mm이다. 이차 조준기는 직경 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60 mm의 총 12개로 구성되어 있다. 사이버나이프의 X-선에 대한 흡수선량은 직경 60 mm 조준기에 대하여 최대선량깊이(dmax)인 1.5 cm에서 MU당 1 cGy로 교정되어 있으며, 전리함을 이용한 선량평가가 주기적으로 수행되고 있다.²⁻⁶

2. 출력인자 측정 방법

출력인자의 측정은 앞서 언급한 12개의 조준기에 대하여 수행되었다. 출력인자의 측정을 위하여 0.015 cc, 0.125 cc, 0.6 cc의 3개의 전리함과 다이오드 검출기, Gafchromic EBT 필름, X-Omat V 필름 등 총 6개의 검출기를 사용하였다. 각 조준기의 출력인자는 사이버나이프의 최대 조사면의 크기인 직경 60 mm 조준기의 출력인자 값에 대하여 규격화하였다. 사이버나이프의 12개의 조준기에 대한 출력인자의 모든 값은 5회 측정의 평균값이다.

1) 전리함 및 다이오드 검출기 측정

전리함은 0.015 cc, 0.125 cc, 0.6 cc (PTW-Freiburg, Germany)의 세 종류의 전리함을 사용하였다(Table 1). 다이오드 검출기(Type 60008, PTW-Freiburg, Germany)는 P형의 실리콘 검출기를 사용하였으며, 고 에너지 광자선(⁶⁰Co-50 MV)에 대하여 물에서 측정하도록 설계되었다. 다이오드 검출기의 검출부 면적은 1 mm²이며 두께는 2.5 μm이다.

전리함과 다이오드 검출기는 60×50×40 cm³의 물팬텀에서 선원과 표면 간의 거리(SSD) 80 cm, 최대선량깊이인 1.5 cm에서 측정하였다(Fig. 2a). 각각의 검출기 및 조사면에 대하여 100 MU를 5회 조사하여 전하량의 평균값과 표준편차를 구하였다. 이때 사용된 전기계는 MULTIDOSE (PTW-Freiburg, Germany)이다.

2) 필름 측정

필름을 이용한 출력인자의 측정은 Gafchromic EBT 필름

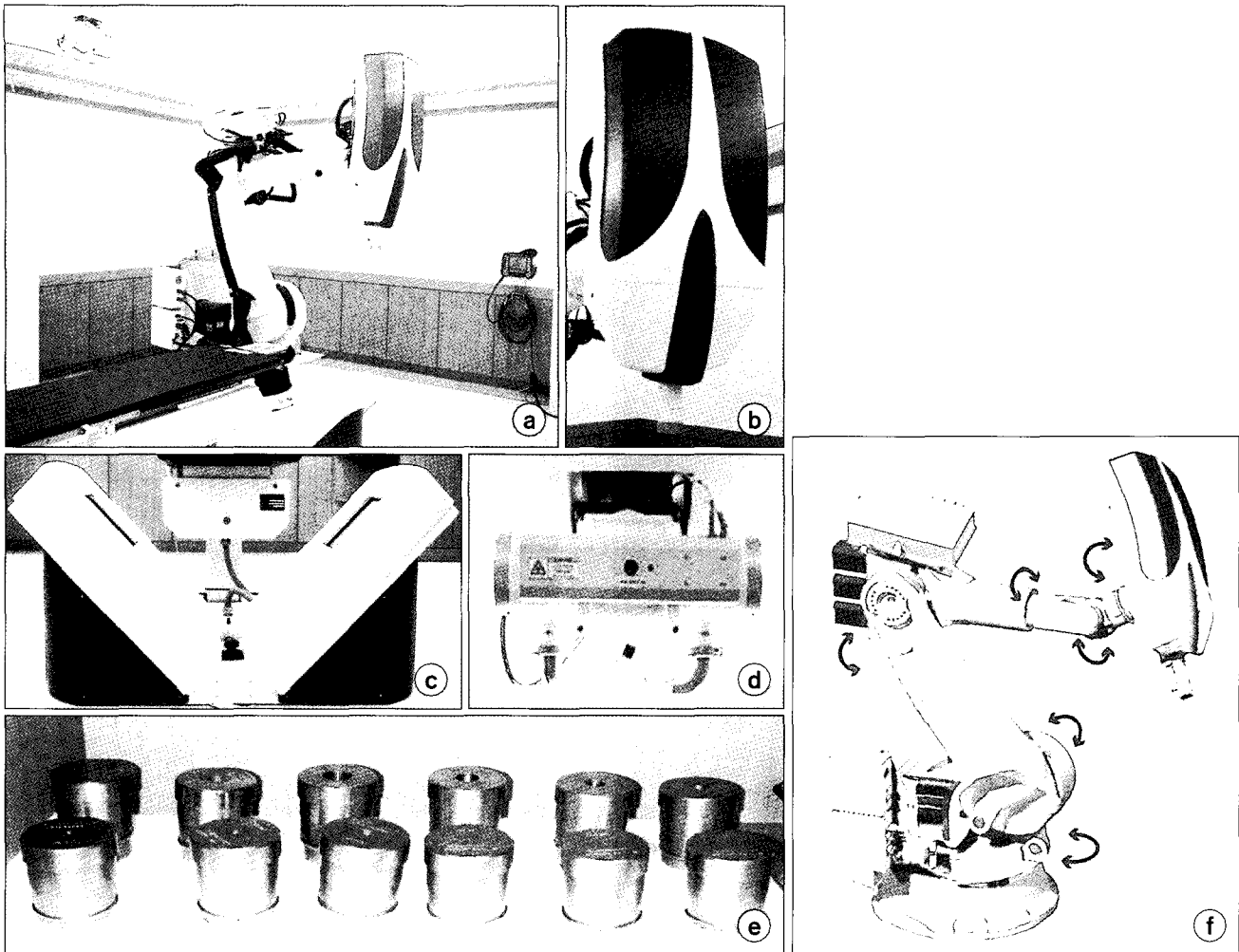


Fig. 1. (a) The CyberKnife system installation at the Catholic University of Korea. Close-up view of (b) 6 MV X-band linac, (c) floor-mounted orthogonal amorphous silicon detectors, (d) ceiling-mounted x-ray camera, (e) collimators. (f) Six axes of robot arm motion provide unparallel radiation beam directionality for maximum dose weighting and optimal dose conformity, especially for complex lesion shapes.

Table 1. Characteristics of cylindrical ionization chamber types which is used in the study.

Ionization chamber type	Cavity volume (cm ³)	Cavity length (mm)	Cavity radius (mm)	Wall material	Wall thickness (gcm ⁻²)	Build-up cap material	Build-up cap thickness (gcm ⁻²)	Central electrode material	Water-proof
PTW 31006	0.015	5.0	1.0	PMMA	0.079	PMMA	0.357	Steel	Y
PTW 31010	0.125	6.5	2.8	PMMA	0.078	PMMA	0.357	Al	Y
PTW 30013	0.6	23.0	3.1	PMMA	0.057	PMMA	0.541	Al	Y

(International Specialty Products, NJ, USA)과 X-Omat V (Kodak Industrie, USA) 필름의 두 종류를 이용하였다. Gaf-chromic 필름은 유효원자번호가 조직과 유사하며 1~800

cGy 범위에서 선형성을 가지고 있어, 일반적 흡수선량 측정에 널리 사용되고 있다.¹⁷⁾ 필름 측정은 물팬텀 대신 고체팬텀을 사용하였다. 고체팬텀(RW3 slab phantom, PTW-

Freiburg, Germany)은 30×30 cm²에 두께가 1 cm인 6개의 평판과 필름 위에 놓일 1.5 cm의 평판으로 구성되었다.

물팬텀에서 측정된 고에너지 광자선 6 MV에 대한 선질 지표인 TPR²⁰₁₀을 RW3과 비교 측정된 결과 0.4% 이내에서 잘 일치하였다. 또한 물팬텀으로 TPR²⁰₁₀값을 결정된 후 RW3를 이용하여 출력선량을 측정하였을 경우 6 MV 광자선의 경우 최대선량깊이에서 ±0.7% 이내로 일치하였다. 이에 고체팬텀을 이용한 필름 측정은 전리함 및 다이오드

검출기와 동일한 위치인 SSD 80 cm, 깊이 1.5 cm가 되는 지점에 설치하였다(Fig. 2b). 출력인자의 측정을 위하여 모든 필름은 평균 23°C에서 선량률 300 MU/min으로 100 MU를 조사하여 5회를 측정하였다. Gafchromic 필름은 조사 후 24시간 후에 Epson Expression 1680 Pro (Epson, USA)에서 스캔한 후 흑화도(optical density)는 Verisoft (PTW-Freiburg, Germany)를 이용하여 분석하였다.

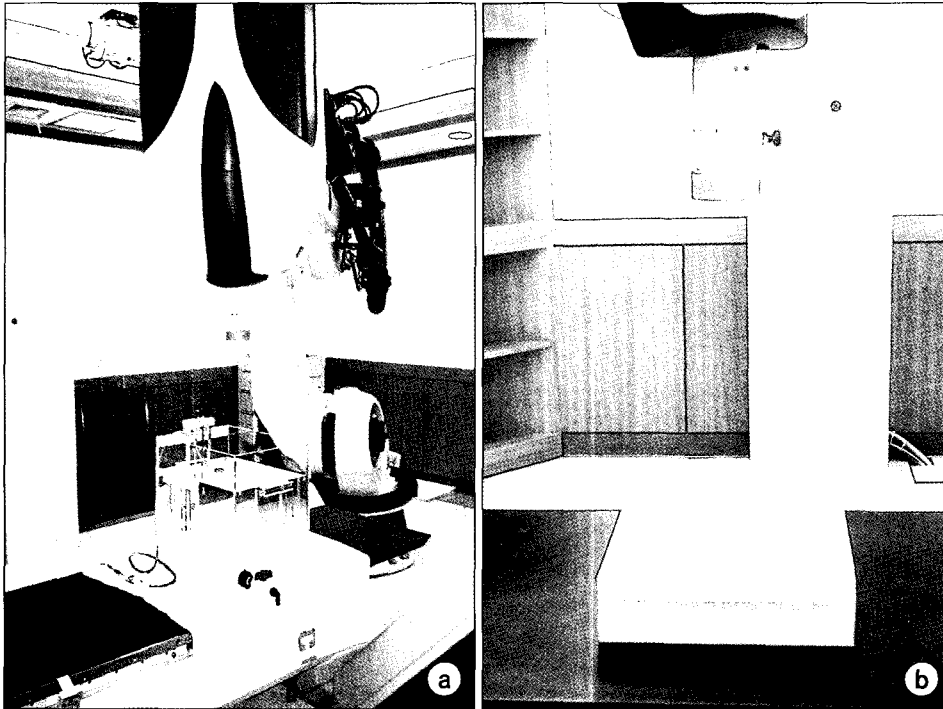


Fig. 2. Dosimetry equipment of relative output factor in the Cyber-Knife. (a) water phantom (WP-3040, CNMC, USA), (b) solidwater phantom (RW3 slab phantom, PTW-Freiburg, Germany).

Table 2. Summary of relative output factors measured with different detectors.

Collimator size (mm)	0.6 cc ion chamber	0.125 cc ion chamber	0.015 cc ion chamber	Diode detector	Gafchromic EBT film	X-Omat V film
5	0.113±0.006	0.320±0.010	0.635±0.010	0.656±0.009	0.777±0.013	0.680±0.014
7.5	0.238±0.007	0.641±0.012	0.772±0.009	0.865±0.009	0.876±0.011	0.825±0.013
10	0.347±0.008	0.756±0.010	0.850±0.008	0.911±0.007	0.923±0.011	0.876±0.014
12.5	0.475±0.010	0.859±0.010	0.905±0.009	0.948±0.001	0.952±0.012	0.895±0.012
15	0.595±0.011	0.919±0.001	0.936±0.006	0.967±0.001	0.967±0.011	0.929±0.010
20	0.799±0.010	0.965±0.001	0.966±0.002	0.980±0.003	0.968±0.010	0.965±0.010
25	0.921±0.003	0.980±0.002	0.977±0.002	0.986±0.002	0.968±0.010	0.966±0.009
30	0.967±0.003	0.986±0.001	0.984±0.001	0.990±0.001	0.981±0.009	0.974±0.010
35	0.983±0.002	0.990±0.002	0.987±0.001	0.992±0.002	0.990±0.010	0.981±0.010
40	0.990±0.001	0.994±0.001	0.991±0.001	0.993±0.002	0.990±0.010	0.981±0.009
50	0.996±0.001	0.998±0.001	0.996±0.001	0.998±0.001	0.994±0.010	0.989±0.009
60	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

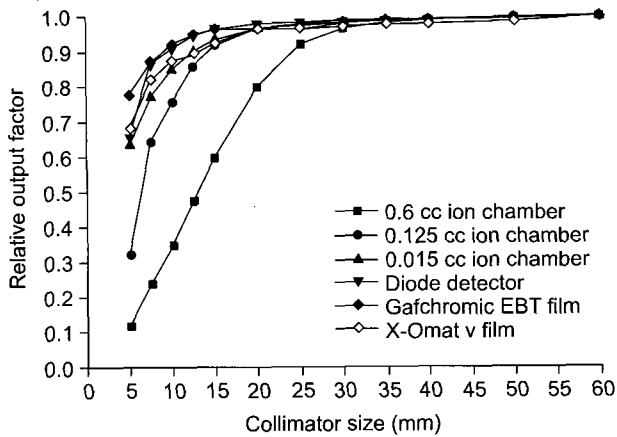


Fig. 3. Plot of the relative output factors as a function of collimator size.

결 과

사이버나이프 시스템의 12개의 조준기별로 6개의 검출기를 이용하여 사이버나이프의 출력인자를 측정하였다. 12개의 조준기에 대한 검출기별 출력인자는 Table 2에 나타내었다.

조준기의 크기가 30 mm 이상인 경우 0.6 cc 전리함을 제외하고 다른 검출기에서 0.5% 이내에서 잘 일치하였다. 그러나 15 mm 이하의 조준기에서는 출력인자 값이 검출기의 종류에 따라 다소 차이가 있음을 확인하였다(Fig. 3).

1. 전리함 및 다이오드 검출기

전리함 및 다이오드 검출기의 출력인자는 조준기의 크기가 30 mm 이상인 경우 0.6 cc 전리함을 제외하고 잘 일치하였다. 그러나 조준기의 크기가 줄어들어 따라 각 검출기별로 출력인자 값의 차이도 커짐을 보여주었다. 0.6 cc 전리함은 다른 전리함에 비해 유효 체적이 커서 25 mm 이하의 조준기에서는 출력인자 값이 급격히 감소하였다. 0.125 cc 전리함은 조준기의 크기가 12.5 mm 이하인 경우 출력인자 값이 크게 변하였다. 0.015 cc 전리함과 다이오드 검출기는 직경이 20 mm 이상의 조준기에서는 다른 검출기와 잘 일치하였으나 15 mm 이하의 조준기에서 출력인자 값에 차이를 보였다. 모든 값들은 5회 측정의 평균값이며 이때 표준편차는 ± 0.012 이내였다.

2. 필름

필름 측정으로 얻어진 출력인자는 다이오드 검출기와 거의 유사하였다. Gafchromic 필름은 다이오드 검출기의

출력인자와 5 mm 조준기의 출력인자 값을 제외한 모든 값에서 거의 일치함을 보여주었다. 다이오드 검출기 및 Gafchromic 필름의 5 mm 조준기의 출력인자는 각각 0.656 ± 0.009 와 0.777 ± 0.013 이었다. X-Omat V 필름의 출력인자는 Gafchromic 필름과 비교하여 15 mm 이하의 조준기에서 크기에 따라 급격하게 줄어들었다. 모든 값들은 5회 측정의 평균값이며 이때 표준편차는 ± 0.014 이내였다.

결론 및 고찰

사이버나이프 정위방사선수술은 여러 종류의 두개골 내의 병변 및 체부의 정위방사선수술에 있어 중요한 치료 방법 중 하나이다. 사이버나이프를 이용한 방사선수술 시 출력인자의 정확성은 환자에 조사되는 방사선량의 정확성에 영향을 준다. 제작사에서 제공된 12개의 조준기에 대한 출력인자의 정확성은 방사선수술 성적에 영향을 미치며 정확히 정의될 필요가 있다. 정위방사선수술에서의 소조사면은 선량변화가 급격하게 변화하고 편평한 영역이 작아짐에 따라 측면 전자선에 대한 불균형이 발생되므로 정확한 선량 검증이 어려운 문제점을 갖고 있다.

본 연구에서는 12개의 조준기별로 6개의 검출기를 이용하여 사이버나이프의 출력인자를 측정하였다. 조준기의 크기가 30 mm 이상인 경우 0.6 cc 전리함을 제외하고 다른 검출기에서 $\pm 0.5\%$ 이내로 상호 일치하였다. 그러나 15 mm 이하의 조준기에서는 출력인자 값이 검출기의 종류에 따라 다소 차이가 있음을 확인하였다. 전리함 및 다이오드 검출기는 15 mm 이하의 소조사면에서 깊이에 따라 선량을 변화가 급격하고 측방측으로의 전자평형상태(lateral electronic equilibrium)가 이루어지지 않은 것으로 기인된다.

Yu 등⁷⁾은 다이오드 검출기, 필름, TLD 등을 이용하여 출력인자를 측정한 결과, 스탠포드(Stanford)의 값과 5 mm 조준기에서 $\pm 7.4\%$, 그 이상에서 $\pm 2.3\%$ 의 차이가 있음을 보고하였다. 또한 Deng 등¹⁸⁾은 몬테카를로 계산으로 출력인자를 구한 결과 Yu 등⁷⁾이 보고한 값과 5 mm 이상의 조준기에서 $\pm 2.7\%$ 이내로 일치함을 확인하였다. 특히 5 mm 조준기의 경우 Yu 등⁷⁾의 값과 약 11.7%의 차이가 있었다고 보고하고 있어 5 mm 조준기의 출력인자 측정 시 검출기의 선택 및 측정에 주의해야 한다고 언급하고 있다. 본 연구의 다이오드 검출기와 필름에 대한 측정값을 Yu 등⁷⁾의 측정값과 비교한 결과, 5 mm 이상의 조준기의 경우에 2.5% 이내, 필름의 경우에 1.9% 이내로 일치하는 것을 알 수 있었다.

5 mm 조준기의 출력인자 값에 대하여 다이오드 검출기와 필름을 상호 비교한 결과 각각 9.65%와 1.91%의 차이를 나타내어 Deng 등¹⁸⁾이 언급한 바와 같이 5 mm 조준기의 출력인자 측정 시 검출기의 선택 및 측정에 주의가 요구됨을 알 수 있었다.

정위방사선수술 시 사용하는 소조사면의 정확한 선량측정을 위해 많은 연구자들이 다양한 검출기를 사용하여 지속적으로 연구하고 있다. 감마나이프의 경우 광자 에너지가 잘 알려진 Co-60 감마선을 사용하고 기하학적인 구조가 간단하여 몬테카를로 모의 실험한 데이터를 제공하고 있다. 그러나 사이버나이프는 연속 X-선을 사용하고 있고, 다양한 조준기를 사용하고 있어 아직 몬테카를로 계산으로 구한 자료는 충분하지 않다. 따라서 본 연구에서는 소조사면의 경우 가시광선에 민감하지 않고 현상에 따른 불확도를 줄일 수 있으며, 사이버나이프 수술 시 사용하는 선량 범위에 대해서 선형성을 보이고 있는 Gafchromic EBT 필름의 출력인자 값의 사용을 권고한다. 차후 사이버나이프 출력인자의 보다 정확한 결정을 위하여 몬테카를로 계산 등을 병행한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

1. Kang KM, Choi IB, Kim IA, et al: Preliminary result in patients with primary hepatoma treated with stereotactic radiotherapy. *J Korean Soc Ther Radiol Oncol* 19:34-39 (2001)
2. Adler JR Jr, Murphy MJ, Chang SD, et al: Image-guided robotic radiosurgery. *Neurosurgery* 44:1299-1307 (1999)
3. Kuo JS, Yu C, Petrovich Z, et al: The CyberKnife stereotactic radiosurgery system: description, installation, and an initial evaluation of use and functionality. *Neurosurgery* 52:1235-1239 (2003)
4. Murphy MJ, Cox RS: The accuracy of dose localization for an image-guided frameless radiosurgery system. *Med Phys* 23:2043-2049 (1996)
5. Murphy MJ: An automatic six-degree-of-freedom image registration algorithm for image-guided frameless stereotactic radiosurgery. *Med Phys* 24:857-866 (1997)
6. Manière ÈC, Olender D, Kilby W, et al: Robotic whole body stereotactic radiosurgery: clinical advantages of the CyberKnife® integrated system. *Int J Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* 1:28-39 (2005)
7. Yu C, Jozsef G, Apuzzo MLJ, et al: Measurements of the relative output factors for CyberKnife collimators. *Neurosurgery* 54:157-162 (2004)
8. Chiarego G, Francescin P, Cora S, et al: Analysis of dosimetric measurements in linear radiosurgery calibration. *Radiother Oncol* 28:82-85 (1993)
9. Rice RK, Hansen JL, Svensson GK, et al: Measurements of dose distributions in small beams of 6 MV x-rays. *Phys Med Biol* 32:1087-1099 (1987)
10. Bjarngard CF, Tsai JS, Rice RK: Doses on the central axes of narrow 6 MV x-ray beams. *Med Phys* 17:794-799 (1990)
11. Mack A, Scheib SG, Major J, et al: Precision dosimetry for narrow photon beams used in radiosurgery-determination of Gamma Knife output factors. *Med Phys* 29:2080-2089 (2002)
12. Zhu RX, Allen JJ, Shi J, et al: Total scatter factors and tissue maximum ratios for small radiosurgery fields: Comparison of diode detectors, a parallel-plate ion chamber, and radiographic film. *Med Phys* 27:472-477 (2000)
13. McKerracher C, Thwaites DI: Assessment of new small-field detectors against standard-field detectors for practical stereotactic beam data acquisition. *Phys Med Biol* 44:2143-2160 (1999)
14. Francescon P, Cora S, Cavedon C, et al: Use of a new type radiochromic film, a new parallel-plate micro-chamber, MOSFETS, and TLD 800 microcubes in the dosimetry of small beams. *Med Phys* 25:503-511 (1998)
15. McLaughlin L, Soares CG, Sayeg JA, et al: The use of a radiochromic detector for the determination of stereotactic radiosurgery dose characteristic. *Med Phys* 21:379-388 (1994)
16. Somigliana A, Cattaneo GM, Fiorino C, et al: Dosimetry of Gamma Knife and linear accelerator based radiosurgery using radiochromic and diode detectors. *Phys Med Biol* 44:887-897 (1999)
17. Devic S, Seuntjens J, Sham E, et al: Precise radiochromic film dosimetry using a flat-bed document scanner. *Med Phys* 32:2245-2253 (2005)
18. Deng J, Guerrero T, Ma CM, Nath R: Modelling 6 MV photon beams of a stereotactic radiosurgery system for Monte Carlo treatment planning. *Phys Med Biol* 49:1689-1704 (2004)

Analysis of Relative Output Factors for CyberKnife: Comparison of Ion Chambers, Diode Detector and Films

Jisun Jang*^{||}, Young Nam Kang[†], Dong Oh Shin[§], Byung Ock Choi[†], Tae Kyu Lee[†],
Ihl Bohng Choi[†], Moon Chan Kim[†], Soo Il Kwon^{||}

*CyberKnife Center, [†]Departments of Radiation Oncology and [†]Neurosurgery, The Catholic University of Korea, [§]Department of Radiation Oncology, School of Medicine, KyungHee University, ^{||}Department of Medical Physics, Kyonggi University

The accuracy of the dosimetry in the CyberKnife system is accomplishing important role from all processes of the stereotactic radiosurgery. In this study, we estimated relative output factors for CyberKnife. All measurements were performed by six different detectors: diode detector, X-Omat V film, Gafchromic EBT film, 0.015 cc, 0.125 cc and 0.6 cc ionization chamber. The diode detector and three ionization chambers performed using water phantom at 80 cm SSD and 1.5 cm depth. When the film measurements were performed, the water phantom was replaced with a solidwater phantom. Each collimator normalized with respect to the output factor of the largest collimator (60 mm). For the collimators over than 30 mm, the output factors from the different detectors showed a good agreement within 0.5% except 0.6 cc ion chamber. For the collimators less than 15 mm, there were substantial differences in the output factors among different detectors. That is, the value of output factor for the 5 mm collimator of a diode and Gafchromic film was each 0.656 ± 0.009 and 0.777 ± 0.013 . In the ion chamber and diode detector, those difference were due to the presence of large dose gradients and lack of electronic equilibrium in narrow megavoltage x-ray beams. Therefore, the Gafchromic EBT film were considered more accurate than the others detectors.

Key Words : CyberKnife, Relative output factor, Diode detector, Gafchromic EBT film