Journal of Radiation Industry 10(3) : 139~144(2016)

몬테카를로 방법론을 이용한 구내촬영 검사 시 환자 방사선량 평가

박 일[1] · 김경호[1,2] · 오승철[1,2] · 송지영[1] · 권오현[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과, [2]한국원자력안전기술원

Evaluation of Radiation Dose to Patients in Intraoral Dental Radiography Using Monte Carlo Method

Il Park[1], Kyeong Ho Kim[1,2], Seung Chul Oh[1,2], Ji Young Song[1], O Hyun Kwon[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]*Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea*
[2]*Korea Institute on Nuclear Safety, Daejeon 34142, Republic of Korea*

Abstract - The use of dental radiographic examinations is common although radiation dose resulting from the dental radiography is relatively small. Therefore, it is required to evaluate radiation dose from the dental radiography for radiation safety purpose. The objectives of the present study were to develop dosimetry method for intraoral dental radiography using a Monte Carlo method based radiation transport code and to calculate organ doses and effective doses of patients from different types of intraoral radiographies. Radiological properties of dental radiography equipment were characterized for the evaluation of patient radiation dose. The properties including x-ray energy spectrum were simulated using MCNP code. Organ doses and effective doses to patients were calculated by MCNP simulation with computational adult phantoms. At the typical equipment settings (60 kVp, 7 mA, and 0.12 sec), the entrance air kerma was 1.79 mGy and the measured half value layer was 1.82 mm. The half value layer calculated by MCNP simulation was well agreed with the measurement values. Effective doses from intraoral radiographies ranged from 1 μSv for maxilla premolar to 3 μSv for maxilla incisor. Oral cavity layer (23~82 μSv) and salivary glands (10~68 μSv) received relatively high radiation dose. Thyroid also received high radiation dose (3~47 μSv) for examinations. The developed dosimetry method and evaluated radiation doses in this study can be utilized for policy making, patient dose management, and development of low-dose equipment. In addition, this study can ultimately contribute to decrease radiation dose to patients for radiation safety.

Key words : Dental radiographic examination, Intraoral radiography, Dosimetry, Monte Carlo method

서 론

진단용 의료방사선 검사는 환자에게 외상을 입히지 않고 인체 내부의 병변 부위를 육안으로 진단할 수 있는 현대 의학의 중요한 도구이다. 이러한 비 침습적 유용성으로 인해 진단 방사선 검사 수는 국내를 비롯해 전 세계적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 유엔방사선영향 과학위원회(UNSCEAR) 보고에 의하면 선진국형 의료수준국가(Level

* Corresponding author: Kwang Pyo Kim, Tel. +82-10-4030-7067, Fax. +82-31-273-3592, E-mail. kpkim@khu.ac.kr

1)의 평균 의료방사선 사용량은 1970년대 인구 천명 당 820건에서 2000년대 천명 당 1,332건으로 약 62% 증가한 것으로 나타났다(UNSCEAR 2010). 유엔방사선영향과학위원회에서 우리나라를 선진국형 의료수준국가로 분류한 것을 고려하면 국내의 의료 방사선 사용량 수준도 위의 유엔방사선영향과학위원회에서 보고한 결과와 크게 다르지 않을 것으로 예상된다.

이 중 치과방사선 검사는 전체 의료방사선 검사들 중 사용비중이 상당히 큰 것으로 나타났다. 식품의약품안전평가원에서 국가단위로 수행한 진단용 의료방사선 사용량 조사 결과에 의하면 2011년 기준 치과방사선 사용량은 전체 진단용 의료방사선 사용량의 11%로 집계되었다. 이러한 통계치는 건강보험의 적용을 받는 경우만 고려한 것으로, 건강보험을 적용 받지 못하는 경우를 모두 고려하면 그 사용량은 이보다 높을 것으로 예상된다. 또한 구내촬영, Cone Beam CT, 파노라마 등 다양한 치과방사선 촬영 중 구내촬영은 전체 치과방사선 사용량의 76%를 차지하는 것으로 나타났다(식품의약품안전처 2013).

치과방사선 검사는 검사 시에 관심영역인 치아 주변의 국소 영역만을 진단하기 때문에 검사 시에 엑스선 조사면적이 작다. 그리고 치아주변에는 침샘, 구강점막을 제외하고는 방사선 감수성이 예민한 장기가 위치하고 있지 않기 때문에 검사 시 환자에게 수반되는 방사선량은 다른 방사선 검사에 비해 상대적으로 낮다. 그러나 방사선 피폭은 환자에게 암 유발과 같은 잠재적 위험성을 내재하고 있으며 현재 국내에서 치과방사선 검사가 차지하는 사용비중을 고려한다면 방사선안전 측면에서 환자에 대한 피폭방사선량 평가가 필요하다. 유엔방사선영향 과학위원회에서는 치과방사선 검사를 의료방사선 검사들 중 사용량이 가장 많은 것으로 간주하고 있으며, 다른 방사선 검사에 비해 상대적으로 피폭수준은 낮지만 장비의 특성, 프로토콜에 따라 피폭영향이 클 수 있다고 언급하고 있다(UNSCEAR 2000).

치과방사선 검사는 검사 시에 환자가 얼마나 방사선에 노출되었는지 노출량을 제공한다. 제공되는 노출량은 입사면선량(ESD: Entrance Surface Dose), 입사공기커마(ESAK: Entrance Surface Air Kerma), 선량면적곱(DAP: Dose Area Product) 등을 포함한다. 상기 노출량들은 환자가 얼마나 방사선에 노출되었는지 그 수준을 직감적으로 알 수는 있지만 정확히 얼마나 피폭을 받았는지 피폭방사선량을 정량적으로 나타내지는 않는다. 따라서 검사 시 환자의 방사선 위해도를 정량적으로 알 수 있는 표준화된 지표로 방사선량을 평가할 필요성이 있다.

치과방사선 검사 중 구내촬영에 대한 방사선량 평가 연구는 일부 수행이 되었다. 대부분의 연구는 선량면적곱 또는 입사공기커마를 측정하여 구내촬영 시 방사선량을 평가하였으며(Gonzalez *et al*. 2001; Looe *et al*. 2006), Ludlow은 인체 두부 팬텀 내에 TLD 소자를 장착하여 장기선량을 평가하였다(Ludlow *et al*. 2008). 또한 Makarevich은 몬테카를로 방법론를 이용하여 구내촬영 중 일부 검사에 대한 환자의 장기선량 및 유효선량 환산인자를 평가하였다(Makarevich *et al*. 2016).

본 연구에서는 다양한 구내촬영 종류에 대해 실제 병원에서 사용하는 검사조건을 이용하여 환자의 방사선량을 평가하였다. 방사선량 평가를 위해 구내촬영 기기의 방사선학적 특성을 평가하고, 상기 특성을 바탕으로 몬테카를로 방법론을 이용하여 환자의 장기선량 및 유효선량을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 구내촬영 기기의 방사선학적 특성 평가

구내촬영 기기는 제조사 및 모델에 따라 기기별로 방사선학적 특성이 상이할 뿐만 아니라 검사조건의 설정 범위 또한 다양하다. 본 연구에서는 국내에 사용되는 많은 종류의 구내촬영 기기 중 대학병원에서 주로 사용되고 있는 벽걸이형 구내촬영 기기인 Sirona사 Heliodent Plus를 측정 장비로 선정하였다(Sirona Dental Systems 2009).

구내촬영 시 측정선량은 일반적으로 입사공기커마와 선량면적곱을 측정한다. 본 연구에서는 선정한 구내촬영 장비에 대한 입사공기커마를 측정하기 위해 Radcal 사의 2026C 선량계와 60 cc 이온전리함(20X6-60E, Radcal Co., Germany)을 사용하였다.

본 연구에서는 환자선량 평가 및 방사선수송 전산코드를 이용하여 모사한 엑스선 스펙트럼의 검증을 위해 입사공기커마와 반가층을 측정하였다. 입사공기커마 및 반가층은 환자 검사 시 주로 사용되는 검사조건(관전압 60 kVp, 관전류 7 mA, 조사시간 0.16 sec)으로 측정하였다. 입사공기커마 측정 시 조사되는 엑스선이 계측기 면적을 모두 포함하도록 구내촬영 기기와 이온전리함의 거리를 충분히 두고 측정을 수행하였다(IAEA 2007). 반가층 측정을 위해 2 mm 알루미늄 판을 18 mm 알루미늄 두께까지 선량을 측정하였다(식품의약품안전처 2012). 측정 시 알루미늄 판에 의한 산란선을 최소화하기 위해 이온전리함을 알루미늄 판과 10 cm 이상 이격시켰다. Fig. 1에 입사공기커마와 반가층 측정 모습을 나타내었다.

2. 몬테카를로 방법론을 이용한 피폭방사선량 평가 방법론 개발

구내촬영 검사 시 환자선량을 평가하기 위해 몬테카를로 방법론을 기반한 프로그램인 MCNPX v2.6을 이용하였다. 환자의 장기선량 계산을 위해 *F6 Tally를 사용하여 커마를

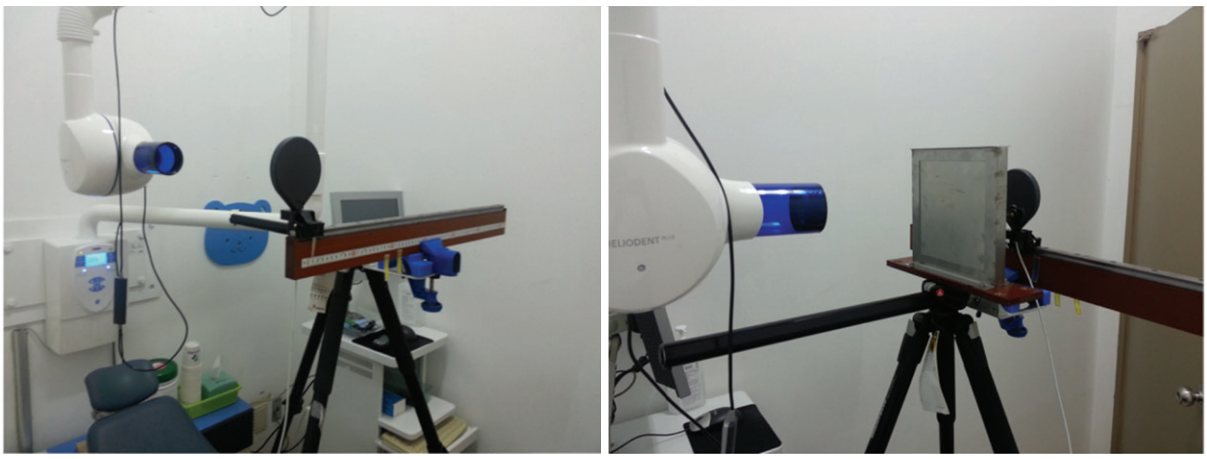

Fig. 1. Measurement of entrance air kerma and half value layer.

계산하였으며, 뼈 선량을 계산하기 위해 F4 Tally를 이용하여 flux를 계산하였다. 국제방사선방호학회(IRPA: International Radiation Protection Association)에서는 커마를 이용하여 환자 내 장기선량을 평가하더라도 하전입자평형 현상으로 인해 흡수선량과 큰 차이를 나타내지 않는다고 보고하였다(IRPA 1996). 또한 국제방사선방호위원회 보고서에 따르면 하전입자평형 현상으로 인한 커마와 흡수선량의 차이는 약 5%이며, 3 MeV까지는 커마를 이용하여 흡수선량을 계산하는 것이 가능하다고 언급하고 있다(ICRP 1997).

엑스선 스펙트럼은 환자선량에 영향을 미치는 주요 인자로서, 엑스선 발생을 위한 관전압, 양극 물질, 양극 각도, 필터 등 다양한 인자들의 영향을 받는다. 본 연구에서는 엑스선 스펙트럼을 모사하기 위해 IPEM (Institute of Physics and Engineering in Medicine)에서 제공하는 엑스선 스펙트럼 생성 프로그램인 SRS-78 (Institute of Physics and Engineering in Medicine, York, United Kingdom)을 사용하였다. 상기 프로그램은 엑스선 관전압을 150 kVp까지 모사가 가능하며, 다양한 양극 물질(텅스텐, 몰리브덴, 로듐 등) 및 다양한 필터 재질(알루미늄, 구리, 철 등)에 따라 엑스선 스펙트럼의 모사가 가능하다(IPEM 1997).

국제방사선방호위원회 권고에 의하면 인체 외부피폭 방사선량 평가를 위해서는 MRI나 CT 영상을 기반으로 인체 내부의 장기 및 조직을 실제 인체와 유사하게 모사한 선량평가 모의체를 사용하도록 권고하고 있다(ICRP 2007). 본 연구에서는 구내촬영 시 환자 방사선량 평가를 위해 ICRP 110 보고서에서 제시한 ICRP 체적소 선량평가 모의체를 사용하였다. 상기 선량평가 모의체는 ICRP 103 신 권고에 따라 유효선량 평가가 가능하도록 대장, 간, 위 등의 장기뿐만 아니라 다양한 골격 조직 및 연골 등 약 140개 조직을 포함하고 있다.

구내촬영은 일반적으로 직경이 6 cm인 조사통에서 방출되는 엑스선을 이용하여 2~4개의 치아를 진단한다. 이러한 구내촬영은 크게 치근단 촬영과 교익촬영으로 구분된다. 치근단 촬영은 치식부위에 따라 상악, 하악으로 구분하며, 상악, 하악의 경우 전치, 견치, 소구치, 대구치 검사로 세부적으로 분류된다. 교익촬영은 대구치와 소구치 두 가지 검사로 세부 분류된다.

Table 1. Scan angle at each intraoral examination

Examination		Scan angle	
		Verticality	Horizontality
Maxilla	Incisor	45	90
	Molar	20	0
	Premolar	30	30
	Canine	45	45
Mandible	Incisor	−15	90
	Molar	0	0
	Premolar	−15	30
	Canine	−15	45
Bitewing	Molar	0	0
	Premolar	0	30

일반적으로 동일한 구내촬영 진단을 수행하더라도 환자의 구강구조가 환자마다 다양하기 때문에 엑스선이 입사하는 촬영방향 및 각도 또한 환자별로 상이하다. 미국 구강치료 및 구강의학회에서는 구내촬영별 입사각도에 대한 가이드라인을 제시하고 있다(ADA 2009). 본 연구에서는 미국 구강치료 및 구강의학회의 가이드라인과 국내 전문가의 자문을 통해 구내촬영 종류별 엑스선 입사 각도를 선정하였다. Table 1에 구내촬영의 검사종류에 따른 촬영 각도를 나타내었다. Fig. 2에는 본 연구에서 이용한 엑스선 스펙트럼을 나타내었으며, Fig. 3에는 방사선수송 전산코드를 이용하여 모사한 구내촬영 시 환자 피폭환경을 나타내었다. 구내촬영 검사는 관심영역에 따라 엑스선 중심점, 조사 각도 등

이 조절되며, 이에 따라 환자에게 수반되는 장기선량은 달라진다.

3. 구내촬영 시 환자 방사선량 평가

MCNP 코드에서 산출된 결과값은 방사선 입자 1개에 대한 확률값이다. 실제 환경에서는 많은 수의 방사선 입자들이 방출되므로 이로 인한 피폭영향을 평가해야 한다. 본 연구에서는 상기 결과값을 실제 장기선량 값으로 환산하기 위해 MCNP의 결과값에 환산인자(Normalized Factor; NF)를 곱하여 장기선량을 도출하였다(Lee *et al*. 2007). 환산인자는 이온전리함을 이용하여 측정한 값과 그 측정환경을 동일하게 모사하여 도출한 입자 1개의 결과값의 비로써 나타낸다. 아래 식에서 $D_{absolute}$은 장기선량 모사값을 의미하며, $D_{simulated}$는 입자 1개에 대한 장기선량 모사값을 의미한다.

$$D_{absolute} = NF \times D_{simulated}$$

국제방사선방호위원회에서는 뼈를 구성하는 조직 중 조혈기능을 가진 적색골수와 골 형성 기능을 가진 뼈막을 방사선에 민감한 조직으로 구분하고 있으며, 뼈 선량 평가 시 적색골수와 뼈 표면에 대한 방사선량을 고려하도록 권고하고 있다. 적색골수와 뼈 표면은 인체 내의 타 장기와 같이 일정한 형태를 갖고 있지 않고, 각 뼈마다 비균질적으로 분포되어 있기 때문에 기존의 장기선량 평가 방법을 적용하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 뼈 선량을 계산하기 위해 MCNP 코드를 이용하여 적색골수와 뼈 표면에 대한 에너지별 volume flux를 도출하였다. 도출한 volume flux와 각 뼈에 포함된 적색골수와 뼈 표면의 질량비 및 에너지별 선량반응함수(Dose Response Function; DRF)를 적용하여 뼈 선량을 계산하였다(Johnson *et al*. 2011). 아래 식에서 $D_{absolute}$은 적색골수/뼈 표면의 선량 모사값을 의미하며, $D_{simulated}$는 입자 1개에 대한 적색골수/뼈의 표면 선량 모사값을 의미한다. 또한 Fraction은 각 뼈에 대한 적색골수/뼈 표면의 질량비를 의미한다.

$$D_{absolute} = NF \times D_{simulated} \times DRF \times Fraction$$

유효선량은 신체 내 장기 및 조직의 방사선 위해 정도를 고려하여 방사선 피폭 시 인체가 받은 피폭 위험도를 정량적으로 나타내는 지표이다. 2007년 국제방사선방호위원회에서는 각 장기에 대한 방사선 위해 정도를 고려하여 장기 및 조직별 가중치를 권고하였다. 본 연구에서는 장기 및 조직별 선량, 방사선 가중치 및 조직가중치를 이용하여 ICRP 103 권고에 따라 유효선량을 평가하였다(ICRP 2007).

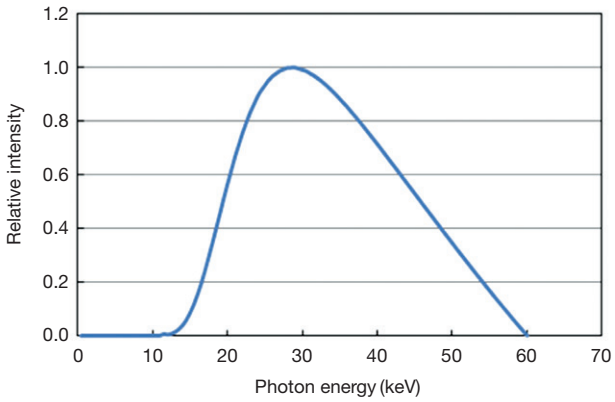

Fig. 2. The X-ray energy spectrum generated by SRS-78.

결 과

1. 엑스선 반가층 측정 및 모사 결과

이온 전리함을 이용하여 구내촬영 시 일반적으로 사용되는 검사조건(관전압: 60 kVp, 관전류: 7 mA, 조사시간: 0.16 sec)에서 측정한 결과 입사공기커마는 1.79 mGy로 나타났으며, 반가층은 알루미늄 1.82 mm로 나타났다. 또한 입사공

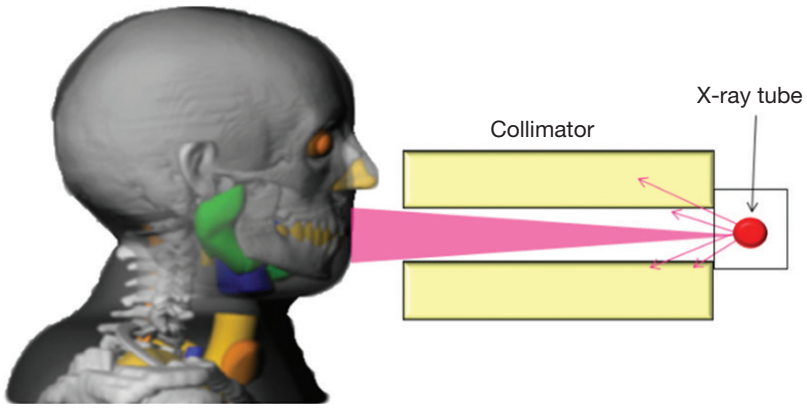

Fig. 3. MCNP simulation to calculate radiation dose resulting from intraoral radiography.

기커마의 측정값과 몬테카를로 코드 및 스펙트럼 생성 프로그램을 이용한 입사공기커마의 모사값을 이용하여 계산한 환산인자(NF)는 1.02×10^{11}로 나타났다. 이러한 환산인자를 이용하여 모사한 반가층의 계산결과는 알루미늄 1.86 mm로 나타났으며, 반가층의 모사값과 측정값은 2.2%의 오차를 나타내었다. Fig. 4에 구내촬영 검사 시 반가층 측정값과 모사값을 비교하여 나타내었다.

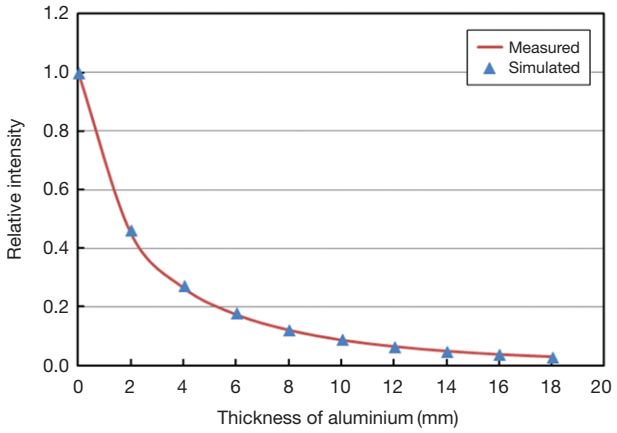

Fig. 4. Measured and simulated relative intensity by aluminum thickness.

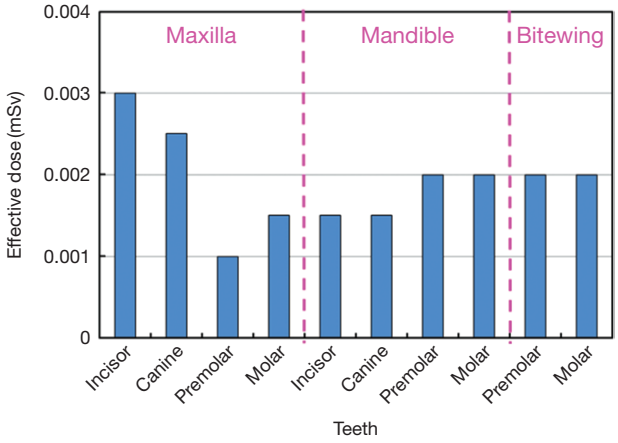

Fig. 5. Calculated effective dose by intraoral radiography.

2. 구내촬영 종류별 환자 장기선량 및 유효선량

Fig. 5에 구내촬영 종류별 환자의 유효선량 계산결과를 나타내었다. 10개 종류의 구내촬영에 대한 환자의 유효선량은 1.0~3.0 μSv의 범위로 나타났다. 상악 전치 검사 시 유효선량이 가장 높게 나타났으며, 상악 소구치 검사가 구내촬영 중 가장 낮은 유효선량을 나타내었다. 이러한 유효선량의 차이는 구내촬영별 진단 범위에 포함되는 장기 종류 때문이다. Table 2에 구내촬영별 장기선량을 나타내었다. 일반적으로 구내촬영 시 주로 포함되는 장기는 구강점막 및 침샘이며, 각각의 장기선량 범위는 23~82 μSv, 10~68 μSv를 나타내었다. 상악 전치 및 견치 검사의 경우 갑상선의 장기선량이 3~47 μSv로 타 구내촬영에 비해 높게 나타났다.

고 찰

본 연구에서는 몬테카를로 방법론을 이용하여 구내촬영 종류별 환자의 장기선량 및 유효선량을 평가하였다. 구내촬영 시 환자 선량은 일반적으로 구강의 하부 측면에 위치한 구강점막 및 침샘에 의한 영향이 크게 나타났다. 이러한 두 장기의 위치로 인해 전면인 전치, 견치 검사 보다는 측면인 소구치, 대구치의 장기선량이 높으며, 상악보다는 하악 검사 시 선량이 높게 나타난다. 또한 상악 전치 및 견치 검사의 경우 치아 구조로 인해 엑스선을 아래로 기울여 조사하기 때문에 갑상선이 영향을 받아 타 종류의 구내촬영에 비해 상대적으로 선량이 높게 평가되었다. 상악 전치와 견치의 갑상선 선량은 타 구내촬영에 비해 최대 10배 이상 높게 평가되었다.

Table 2. Calculated organ dose (μSv) by intraoral radiography

Organs	Maxilla				Mandible				Bitewing	
	Incisor	Canine	Premolar	Molar	Incisor	Canine	Premolar	Molar	Premolar	Molar
Brain	0.5	0.5	0.5	1.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Salivary glands	9.5	9.5	19.0	46.5	46.0	46.5	59.0	68.0	66.0	40.0
Oral cavity layer	23	25	36	56	51	51	65	77	82	74
Oesophagus	2.5	1.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0
Thyroid	47.0	43.0	4.0	2.5	7.5	8.0	8.5	9.0	5.0	4.0
Skin	7.0	6.5	5.5	5.5	4.5	5.5	4.5	5.0	5.0	4.5
Thymus	13.0	5.0	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5
Trachea	12.5	8.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	1.5	1.0	1.0
Muscle	2.5	2.0	2.0	2.5	2.5	2.5	2.5	3.0	3.0	2.5
Bone surface	3.0	4.0	3.5	3.5	4.5	3.5	3.5	3.0	3.0	4.0
Red bone marrow	3.5	3.0	3.5	3.0	4.5	4.0	4.0	3.0	3.0	4.5
Remainder	4.0	3.5	3.0	4.5	4.5	4.5	5.5	6.5	6.5	6.0

결 론

본 연구에서는 몬테카를로 방법론을 이용하여 다양한 구내촬영 검사 시 환자의 장기선량 및 유효선량을 평가하였다. 유효선량 평가를 위해서 구내촬영 장비의 방사선학적 특성을 평가하였으며, 평가한 방사선학적 특성을 바탕으로 몬테카를로 기법 기반의 MCNP 프로그램을 이용하여 환자 선량평가 방법론을 개발하였다. 또한 개발한 몬테카를로 기반의 선량평가 방법론과 일반적으로 사용되는 검사조건을 이용함으로써 다양한 구내촬영 검사 시 환자의 장기선량 및 유효선량을 도출하였다.

구내촬영 시 일반적으로 사용되는 검사조건에서 측정한 입사공기커마는 1.79 mGy로 나타났다. 또한 알루미늄 판을 이용하여 반가층을 측정한 결과 약 1.82 mm Al로 나타났으며, 이를 MCNP 프로그램으로 동일하게 모사하여 시뮬레이션 한 결과 약 1.86 mm Al로 2.2% 이내로 동일하게 모사된 것을 확인하였다. 모사된 엑스선 스펙트럼을 토대로 구내 촬영 시 환자 피폭환경을 동일하게 구현하였으며 구내촬영 종류에 따라 환자 선량평가를 수행하였다. 모사된 엑스선 스펙트럼을 이용하여 구내촬영 종류별로 환자의 유효선량을 평가한 결과 상악 전치가 3.0 μSv로 가장 높게 나타났으며, 상악 소구치가 1.0 μSv로 가장 낮게 나타났다. 구내촬영별 장기선량은 일반적으로 구강점막(23~82 μSv), 침샘(10~68 μSv)의 피폭방사선량이 높게 나타났으며, 일부 검사에서는 갑상선에 대한 장기선량(3~47 μSv)이 높게 나타났다.

본 연구에서 수행한 구내촬영 시 환자의 유효선량 평가 결과는 환자 피폭선량 이력관리에 활용 될 수 있다. 또한 국가 정책수립, 저선량 치과 진단기기 개발 등의 기초자료로 활용 될 수 있으며, 이를 통해 궁극적으로 치과 촬영으로 인한 국민의 피폭선량 저감화에 기여할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2014년도 식품의약품안전처의 연구개발비(14172MFDS427)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

식품의약품안전처. 2012. 진단용방사선발생장치의 검사기준 및 검사방법 가이드라인. 방사선안전관리 시리즈 No.29.

식품의약품안전처. 2013. 진단용 방사선 사용에 따른 국민 방사선량 평가 연구. 연구결과보고서 13172방사선579.

ADA. 2009. Intraoral radiography positioning and radiation protection. American Dental Association. Chicago.

Gonzalez L, Vano E and Fernandes R. 2001. Reference doses in dental radiodiagnostic facilities. *Brit. J. Radiol.* **74**:153-156.

IAEA. 2007. Dosimetry in Diagnostic Radiology; An International Code of Practice. Technical Report series No.457. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria.

ICRP. 1997. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. International Commission on Radiological Protection. New York.

ICRP. 2007. Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography. ICRP Publication 102. International Commission on Radiological Protection. New York.

ICRP. 2007. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. International Commission on Radiological Protection. New York.

IPEM. 1997. Catalogue of diagnostic x-ray spectra and other data. IPEM Report 78. Institute of Physics and Engineering in Medicine. York, UK.

IRPA. 1996. How to assess the dose to the patient in diagnostic radiology. IRPA 9. International Radiation Protection Association. Vienna, Austria.

Johnson PB, Bahadori AA, Eckerman KF, Lee C and Bolch WE. 2011. Response functions for computing absorbed dose to skeletal tissues from photon irradiation-an update. *Med. Phys. Biol.* **56**:2347-2365.

Lee C, Lee C, Staton RJ, Hintenlang DE, Arreola MM, Williams JL and Bolch WE. 2007. Organ and effective doses in pediatric patients undergoing helical multislice computed tomography examination. *Med. Phys.* **34**(5):1858-1873.

Looe HK, Pfaffenberger A, Chofor N, Eenboom F, Sering M, Ruhmann A, Poplawski A, Willborn K and Poppe B. 2006. Radiation Exposure to Children in Intraoal Dental Radiology. *Radiat. Prot. Dosim.* **121**(4):461-465.

Ludlow JB, Davies LE and White SC. 2008. Patient Risk Related to Common Dental Radiographic Examinations: The Impact of 2007 International Commission on Radiological Protection Recommendations Regarding Dose Calculation. *J. Am. Dent. Assoc.* **138**:1237-1243.

Makarevich KO, Minenko VF and Kutsen SA. 2016. Modelling Dental X-ray Examinations for Assessment of Radiation Doses to Patients. *Central European Researchers Journal* **2**(1):1-8.

Sirona Dental Systems Gmbh. 2009. Heliodent Plus DHHS-Statements. North Carolina, USA.

UNSCEAR. 2010. Sources and effects of ionizing radiation Vol. I Source. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York.

Received: 2 August 2016
Revised: 30 August 2016
Revision accepted: 9 September 2016