

소아환자에서 교정분석을 위한 콘빔CT 촬영시 유효선량에 관한 연구

단국대학교 치과대학 구강악안면방사선학교실

김 은 경

ABSTRACT

Effective dose of cone-beam computed tomography for orthodontic analysis in pediatric patient

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, College of Dentistry, Dankook University
Eun-Kyung Kim

Objective: The objectives of this study were to measure pediatric organ and effective doses of cone-beam computed tomography (CBCT) for orthodontic analysis and to compare them to those of panoramic and lateral cephalometric radiography, the conventional radiography for orthodontic analysis.

Materials and Methods: Alphard VEGA for CBCT, Planmeca Proline XC for panoramic radiography and Orthophos CD for cephalometric radiography were used for this study. Thermoluminescent dosimeter (TLD) chips were located at 24 anatomic sites of 10-year-old anthropomorphic phantom and exposed during CBCT (C-mode; 200 x 179 mm FOV), panoramic and lateral cephalometric radiographic procedures at the clinical exposure settings for 10-year-old patient. Pediatric organ and effective doses were measured and calculated using ICRP 2007 tissue weighting factors.

Results: Effective doses of CBCT, panoramic radiography and lateral cephalometric radiography in pediatric clinical exposure settings were 292.5 μ Sv, 19.3 μ Sv, and 4.4 μ Sv respectively. The thyroid gland contributed most significantly to the effective dose in all the radiographic procedures.

Conclusion: Effective dose of CBCT was about 12 times to conventional radiographic procedures for orthodontic analysis in pediatric patient. The use of CBCT for orthodontic analysis should be fully justified over conventional radiography and dose optimization to decrease thyroid dose is needed in pediatric patients.

Key words : cone-beam computed tomography; panoramic radiography; cephalometric radiography; effective dose; thyroid gland dose

Corresponding Author

Eun-Kyung Kim, DDS, MSD, PhD

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, College of Dentistry, Dankook University

E-mail : ekkim@dankook.ac.kr

이 연구는 2013년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음

I. 서론

치과용 콘빔CT가 1999년 개발되어 시판된 이후 치과진료에서 삼차원 영상의 정보를 직접적으로 제공하는 콘빔CT의 사용이 급증하고 있다¹⁾. 처음 개발된 출시 초기에는 주로 임플란트 치료계획을 위한 술전 평가에 사용하다가 점차 그 용도가 확대되어 제3대구치나 정중과잉치 등의 매복치의 위치 평가, 구강외과적 질환 진단, 두부 외상 진단과 재진, 치주 및 치근단 병소 평가, 근관치료시 근관 형태 확인, 치근 파절, 교정 분석, 약교정 수술전 분석 등 그 사용이 점차 확대되어 치과 진료의 질 향상에 큰 기여를 하고 있다²⁻⁶⁾. 그러나 콘빔CT에 의한 환자선량은 메디컬 CT보다는 낮지만 기존의 치과방사선사진에 비해서 상당히 높은 선량으로 촬영하는 영상 기술이기 때문에 콘빔CT에 의한 환자선량이 급속히 증가하고 있다. 특히 교정 분야에서 방사선감수성이 높은 소아 환자들이 많아 콘빔CT의 무차별적 촬영이 우려가 되고 있다. 교정 분야에서의 콘빔CT촬영에 대한 큰 쟁점 중의 하나는 기존의 2차원적인 진단영상법인 파노라마방사선촬영과 측방 두부규격 방사선촬영과 비교하여 선량 증가에 대한 정당화이다⁴⁾. 2012년 유럽위원회에서 출간한 '방사선방어 No 172'에 따르면, 교정 술식에서 진단 및 치료계획의 표준 검사법으로 콘빔CT를 추천할 수 없으며, 단지 골격이상성이 있어 교정 및 수술이 요구되는 복잡한 증례에서 콘빔CT가 정당화될 수 있다고 하였다⁶⁾.

진단용 방사선촬영에 의한 환자선량이 쟁점이 되면서 치과용 콘빔CT 촬영시 기종과 촬영 프로토콜에 따른 환자 유효선량에 대한 연구, 저노출 촬영법 등에 대한 연구들⁷⁻¹⁵⁾이 많이 보고되었으나, 대부분 성인 팬텀을 사용하여 성인에서의 유효선량과 방사선위험도에 대한 연구였다. 치과용 콘빔CT 촬영시 소아에서의 유효

선량에 대한 보고¹⁶⁻¹⁹⁾는 많지 않았는데, Theodorakou 등(2012)¹⁶⁾이 10세 소아 팬텀과 성인여성 팬텀(청소년 팬텀으로 간주)을 사용하여 5개의 콘빔CT 장비에서 소아의 평균 유효선량이 116 μ Sv, 청소년의 경우 79 μ Sv로 대부분의 장비에서 청소년의 유효선량보다 소아환자에서의 유효선량이 높았다고 보고하였다. 따라서 방사선감수성이 보다 높은 소아에서 치과용 콘빔CT 촬영은 일반 방사선촬영을 넘어서는 정당성을 반드시 확보해야 하며, 특히 큰 FOV 장비에서는 수직, 수평적 시준에 의한 선량 최적화가 특히 중요하다고 결론지었다. Ludlow 등(2015)²⁰⁾은 그동안 보고된 문헌 고찰을 통해 소아에서 large, medium FOV의 콘빔CT 촬영에서 평균 선량은 175 μ Sv 였으며, 기종마다 큰 차이를 보였다고 하였다.

이에 본 연구에서는 소아환자에서 교정 목적으로 시행하는 콘빔CT 촬영과 기존의 촬영법인 파노라마방사선촬영, 측방 두부규격방사선촬영에 의해 환자가 받는 장기선량과 유효선량을 10세 소아 팬텀을 사용하여 측정, 비교해 보고자 하였다.

II. 재료 및 방법

(1) 방사선 촬영

콘빔CT 촬영을 위해 Alphard VEGA (Asahi Roentgen Ind. Co., Ltd., Kyoto, Japan) 촬영기, 파노라마방사선촬영을 위해 Planmeca Proline XC (Planmeca Co., Helsinki, Finland) 촬영기, 측방 두부규격방사선촬영을 위해 Orthophos CD (Siemens Medical System, Foshheim, Germany) 촬영기를 사용하였으며, 환자선량을 측정하기 위해 조직 등가물질로 이루어진 10세 소아 두

경부 인체모형 팬텀(ATOM model 706 HN-C; Computerized Imaging Reference Systems Inc., Norfolk, VA, USA)(Fig. 1), 3.6mm x 3.6mm x 0.4mm 크기의 LiF-MCS (Mg, Cu, Si) chip (Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea)을 사용하였다. 소아 두경부 팬텀에 24개의 TLD 소자를 위치시키고, 교정 분석용인 C mode 콘빔CT 촬영, 파노라마방사선촬영, 측방 두부규격방사선 촬영을 임상에서의 촬영조건(Table 1)으로 촬영하였다. 콘빔CT 촬영은 scout view를 위한 노출을 포함하여 C mode 노출 3회, 파

노라마방사선촬영, 측방 두부규격방사선 촬영은 각각 5회씩 연속 촬영하였다. 이때 작은 선량도 놓치지 않고 측정할 수 있도록 촬영을 수회 연속하여 반복하였는데, 팬텀의 위치를 바꾸지 않고 파노라마 및 측방 두부규격방사선촬영은 각 검사 프로토콜을 5회씩, 좀 더 노출선량이 많을 것으로 생각되는 콘빔CT 촬영은 3회씩 반복하여 노출시켰고, 측정된 값은 매 검사 당 평균 흡수선량을 구하기 위해 파노라마 및 측방 두부규격방사선 촬영은 5, 콘빔CT 촬영은 3으로 나누어 구하였다.

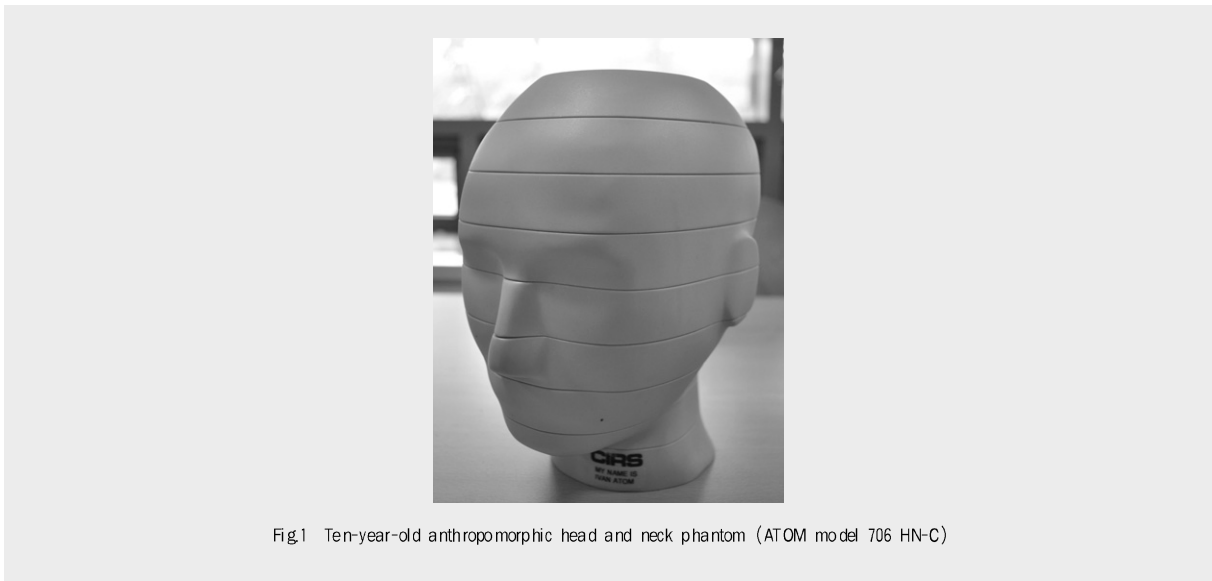


Fig.1 Ten-year-old anthropomorphic head and neck phantom (ATOM model 706 HN-C)

Table 1. Exposure parameters and specifications for cone-beam CT, panoramic and lateral cephalometric radiography

Exposure parameters	Cone-beam CT (C-mode)	Panoramic radiography	Lateral cephalometric radiography
kV	80	66	76
mA	4	7	11
exposure time (seconds)	17	18	0.64
imaging area (mm)	200 × 179		
voxel size (mm)	0.39		
Degree of rotation	360°		

(2) TLD 소자 처리 및 선량 측정, 유효선량 계산

TLD 소자의 보정과 방사선 조사 후 선량 판독은 선량판독 전문업체인 일진 방사선엔지니어링(Iljin Radiation Engineering Co., Ltd., Hwasung, Korea)에 의뢰하였다. 각 소자의 Element Correction Coefficient (ECC)값을 통상적인 방법으로 구한 후, 오차범위가 20% 미만인 소자만 선택하여 선량 측정에 사용하였다. 이때 조사된 선량은 Harshaw 8800 PLUS Automatic Reader (Thermo Electron Corp., Oakwood Village, OH, USA)로 측정하고, 전 실험과정을 통해 각 소자의 동일성을 유지하였다. 매번 촬영 전에 TLD 소자를

소성하여 초기화시킨 후, TLD 소자를 팬텀의 24개 부위 즉 갑상선 2개, 타액선 4개, 골수 8개, 식도 1개, 피부 4개, 뇌 2개, 외흉부 기도에 해당되는 사골동, 상악동, 구인두 기도 부위에 각각 1개씩 위치시켜 촬영하였다(Table 2).

배경 방사선의 양을 측정하기 위해 매 소성 후 동일 조건에서 따로 보관된 5개의 TLD 소자로 배경 방사선 값을 측정, 평균하여 개개의 측정치에서 빼어 보정하였다. 각 조직이나 기관의 여러 부위에서 측정된 흡수선량을 각 부위 별로 평균을 내고(μGy), 이 값에 촬영 시 방사선에 조사되는 조직이나 기관의 비율 (Table 3)을 곱하여 등가선량을 계산하였다. 유효선

Table 2. Phantom locations of TLD chips in 10-year-old child phantom

Phantom location	Phantom level	TLD ID No.
Calvarium posterior	2	1
Calvarium anterior	2	2
Calvarium left	2	3
Midbrain	3	4
Pituitary	4	5
Ethmoid	5	6
Left maxillary sinus	6	7
Right parotid	6 inferior	8
Left parotid	6 inferior	9
Right ramus	6 inferior	10
Left ramus	6 inferior	11
Oropharyngeal airway	7	12
Right submandibular gland	7 inferior	13
Left submandibular gland	7 inferior	14
Right mandible body	8	15
Left mandible body	8	16
Center cervical spine	8	17
Thyroid - right	9	18
Thyroid - left	9	19
Esophagus	9	20
Right lens of eye	4-5	21
Left lens of eye	4-5	22
Right cheek	6	23
Left back of neck	6	24

Table 3. Estimated fraction of tissue irradiated and the dosimeters used to provide an indication of dose to each organ

Organs/Tissue	Fraction indicated (%)	TLD ID
Bone marrow	15.4	
Mandible	1.1	10,11,15,16
Calvaria	11.6	1,2,3
Cervical spine	2.7	17
Thyroid	100	18,19
Esophagus	10	20
Skin	5	21,22,23,24
Bone surface	15.4	
Mandible	1.1	10,11,15,16
Calvaria	11.6	1,2,3
Cervical spine	2.7	17
Salivary glands	100	
Parotid	100	8,9
Submandibular	100	13,14
Brain	100	4,5
Remainder		
Lymphatic nodes	5	8,9,13,14,18-20
Muscle	5	8,9,13,14,18-20
Extrathoracic tissue	100	6-9,12-14,18-20
Oral mucosa	100	8,9,12-14

Table 4. Current International Commission on Radiological Protection (ICRP) tissue- weighting factors (W_T) for calculation of effective dose

Organs/tissue	2007 W_T
Bone marrow	0.12
Breast	0.12
Colon	0.12
Lung	0.12
Stomach	0.12
Bladder	0.04
Esophagus	0.04
Gonads	0.08
Liver	0.04
Thyroid	0.04
Bone surface	0.01
Brain	0.01
Salivary glands	0.01
Skin	0.01
Remainder tissues	0.12 [†]

† : adrenals, extrathoracic tissue, gall bladder, heart, kidneys, lymphatic nodes, muscle, oral mucosa, pancreas, prostate, small intestine, spleen, thymus, uterus/cervix

량(μSv)은 각 조직과 장기의 등가선량에 조직가중계수(Table 4)²⁰를 곱한 값의 총합으로 계산하였다.

$$E = \sum W_T \times H_T$$

E : 유효선량

W_T : 조직가중계수(조직 또는 기관의 전체적인 위험도에 대한 상대적 기여도)

H_T : 등가선량

10세 소아의 하악과 두개골, 경추의 골수 부위는 인체 전체 골수의 15.4%(하악 1.1%, 두개골 11.6%, 경추 2.7%)로 계산하였다⁸⁾. 골표면의 흡수선량은 단일 에너지 광자로 조사된 골조직과 근육에 대한 실험적으로 결정된 질량 에너지 감쇠계수에 기초한 변환계수를 적용하여 계산하였다. 각 X선장비의 최대 X선빔 에너지의 2/3로 추정되는 유효 X선빔 에너지를 골/근육 감쇠비를 결정하는데 사용하였다^{8, 12)}. 40에서 80 kV 까지 감쇠비의 직선관계($R^2=0.996$)에 의해 다음 공식이 산출되었다: 골/근육 감쇠비 = $-0.0618 \times \text{kV peak} \times 2/3 + 6.9406$. Alphard VEGA, Planmeca Proline XC, Orthophos CD의 유효 X선빔 에너지는 각각 최대 에너지 80 kV, 66 kV, 76 kV의 2/3로 추정되었고, 각 촬영에서의 골표면 선량으로의 변환계수는 각각 3.6, 4.2, 3.8로 산출되어 평균 골수선량(marrow dose)에 곱하여 계산하였다.

등가선량을 계산할 때 방사선에 조사되는 조직의 백분율은 갑상선, 타액선, 뇌 부위는 100%, 식도는 10%, 두경부의 피부는 전신의 5%로 간주하였다. 14개의 나머지 기관 중에서 림프선, 근육, 구강점막, 외흉부 기도가 콘빔CT, 파노라마 및 측방 두부계측방사선촬영시 직접 조사된다. 림프선, 근육은 전신의 5%, 구강점막, 외흉부 기도는 100%로 간주하였다. 나머지 기관에 포함되는 기관 중에서 자궁과 전립선은 각각

여성, 남성에서만 존재하기 때문에 나머지 기관의 가중 평균에 사용되는 수는 13으로 나머지 기관에 포함되는 각 기관의 가중계수는 0.12/13으로 계산하였다.

III. 결과

10세 소아 두경부 팬텀을 촬영한 교정 분석용 콘빔CT(C-mode)와 기존의 촬영법인 파노라마, 측방 두부규격방사선사진은 Fig. 2~4와 같다. 이때 각 촬영시 노출된 TLD소자의 선량을 측정하여 계산한 등가선량과 유효선량은 Table 5와 같았다. 콘빔CT(C-mode)의 유효선량은 292.5 μSv , 파노라마방사선촬영과 측방 두부규격방사선촬영에서의 유효선량은 각각 19.3 μSv , 4.4 μSv 였다. 유효선량에 대한 각 장기선량의 기여도는 Table 6과 같았다. 세 촬영 모두에서 각각의 유효선량에 대한 갑상선 선량의 기여도가 49%, 27%, 43%로 가장 높았다.

IV. 고찰

본 연구에서 저자는 10세 소아환자에서 교정 목적으로 시행하는 콘빔CT 촬영과 파노라마, 측방 두부규격촬영시 환자가 받는 유효선량을 측정하여, 콘빔CT 촬영의 유효선량은 292.5 μSv 로, 교정 분석을 위한 기존의 촬영방법인 파노라마 촬영과 측방 두부규격촬영의 유효선량 19.3 μSv , 4.4 μSv 를 더한 값인 23.7 μSv 의 약 12배에 달하는 것을 볼 수 있었다. 소아에서 콘빔CT 촬영의 유효선량 292.5 μSv 는 저자의 이전 연구¹⁵⁾에서 성인 팬텀을 동일 콘빔CT 장비(Alphard VEGA), 동일 조건(C-mode, 80kV, 4mA)으로 촬영해서 얻은 유효선량 145.3 μSv 보다 2배 정도 높은 값이었다. 이는 Alphard VEGA CT 장비가 소아에서도 성인과 동일한 FOV(C-mode;

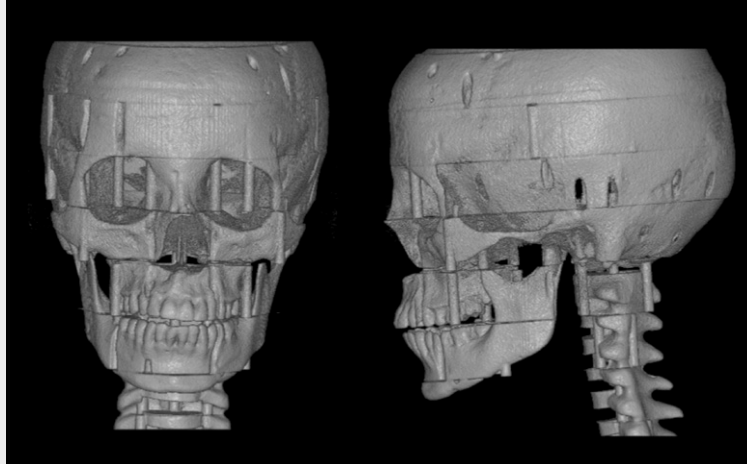


Fig. 2. Cone-beam CT image (C-mode) of 10-year-old child head and neck phantom

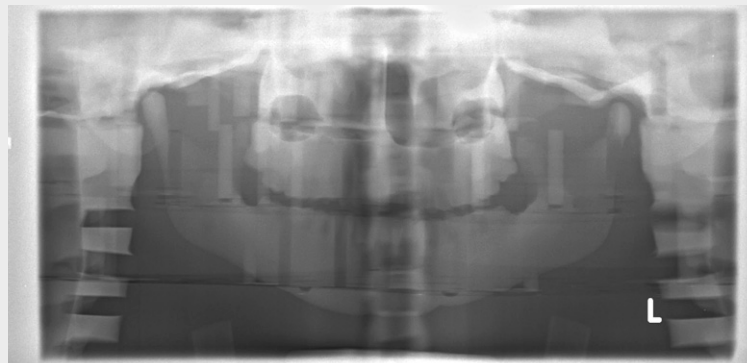


Fig. 3. Panoramic image of 10-year-old child head and neck phantom

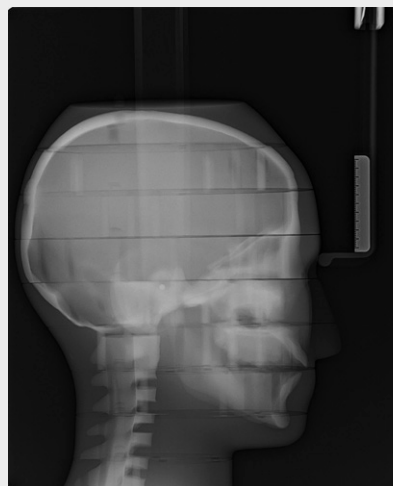


Fig. 4. Lateral cephalometric image of 10-year-old child head and neck phantom

Table 5. Equivalent dose (μSv) and effective dose (μSv) at various organ and tissues for cone-beam CT, panoramic and lateral cephalometric radiography in 10-year-old pediatric population

Organ/tissues	Cone-beam CT (C-mode)		Panoramic radiography		Lateral cephalometric radiography	
	HT (μSv)	E (μSv)	HT (μSv)	E (μSv)	HT (μSv)	E (μSv)
Bone marrow	290	34.77	18	2.14	6	0.70
Esophagus	232	9.29	21	0.85	4	0.18
Thyroid	3582	143.28	132	5.27	47	1.87
Bone surface	1043	10.43	75	0.75	22	0.22
Brain	1671	16.71	32	0.32	29	0.29
Salivary glands	2685	26.85	361	3.61	39	0.39
Skin	191	1.91	6	0.06	3	0.03
Remainder						
Lymphatic nodes	145	1.33	14	0.13	2	0.02
Muscle	145	1.33	14	0.13	2	0.02
Extrathoracic airway	2540	23.45	260	2.40	39	0.36
Oral mucosa	2512	23.19	397	3.66	37	0.34
Effective dose (total)		292.5		19.3		4.4

Table 6. Percentage organ dose contribution to effective dose of cone-beam CT, panoramic and lateral cephalometric radiography (%)

Organ/tissues	Cone-beam CT (C-mode)	Panoramic radiography	Lateral cephalometric radiography
Bone marrow	12	11	16
Esophagus	3	4	4
Thyroid	49	27	43
Bone surface	4	4	5
Brain	6	2	7
Salivary glands	9	19	9
Skin	1	0	1
Remainder			
Lymphatic nodes	0	1	0
Muscle	0	1	0
Extrathoracic airway	8	12	8
Oral mucosa	8	19	8

200 mm × 179 mm)로 촬영하는 장비인데, 불필요하게 큰 FOV를 사용하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 갑상선에 많은 방사선이 조사됨으로써 야기된 것으로 생각되며, 실제 Table 6에서 보는 바와 같이 유효선량에 대한 갑상선 선량의 기여도가 49%나 되

는 것을 알 수 있다. 이는 성인 팬텀을 사용해서 측정했던 이전 연구⁵⁾에서는 유효선량에 대한 갑상선 선량의 기여도가 12% 였던 것과 비교해 볼 때 큰 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 유효선량에 대한 갑상선 선량의 기여도는 파노라마 방사선촬영이나 측

방 두부규격방사선촬영에서도 각각 27%, 43%로 역시 높았다. 이는 선량측정을 위한 촬영시 팬텀의 영상 (Fig. 3, 4)에서 볼 수 있듯이, 파노라마 방사선촬영이나 측방 두부규격방사선촬영에서도 불필요하게 갑상선 부위까지 노출이 되어 선량이 증가된 것임을 알 수 있었다.

Pauwels 등(2012)¹³⁾은 14개의 콘빔CT 장비를 사용하여 성인 팬텀에서 장기선량 및 유효선량을 평가하였는데, 큰 FOV 프로토콜에서 유효선량은 68~368 μSv 였고, 타액선에서 가장 높은 흡수선량이 측정되었으며, 유효선량에 기여하는 장기선량의 상대적 기여도는 높은 조직가중계수로 인해 나머지 기관이 가장 높았다고 보고하였다. Theodorakou 등(2012)¹⁶⁾이 5개의 콘빔CT 기종, 다양한 영상 프로토콜로 10세 소아 팬텀에서 측정된 유효선량은 최소 16 μSv , 최대 282 μSv , 평균 116 μSv 였으며, 가장 유효선량이 높은 경우는 3D Accuitomo 170 장비, 큰 FOV(17 cm \times 12 cm)로 촬영한 경우로 282 μSv 였다. 좀 더 큰 20 cm \times 17.9 cm의 FOV로 촬영한 본 연구에서의 유효선량은 292.5 μSv 로, 유사한 결과를 보였다. 그들은 또한 갑상선 선량이 청소년에 비해 10세 소아에서 4배 정도 높았다고 보고하였으며, 유효선량에 기여하는 장기선량의 상대적 기여도는 소아에서 나머지 기관, 타액선 및 갑상선이 동등하게 기여하고, 청소년 팬텀에서는 나머지 기관, 타액선이 가장 높은 기여도를 보였다고 하였다. 즉 청소년에서는 유효선량의 상대적 기여도가 높지 않았던 갑상선 선량이 소아에서는 본 연구에서와 같이 기여도가 높아지는 것을 알 수

있다. 결론으로 그들은 소아에서 치과용 콘빔CT 촬영은 기존의 진단영상법을 넘어서는 정당화가 반드시 필요하고, FOV 시준에 의한 최적화가 소아에서 특히 중요하다고 강조하였다. Najjar 등(2013)¹⁹⁾은 두 개의 치과용 콘빔CT 기종에서 성인과 소아의 팬텀으로 성인 촬영조건으로 선량을 측정 비교한 결과, 소아에서의 여러 두정부 기관에서 성인에서보다 더 높은 방사선량이 측정되어 가능할 때마다 시준이 사용되어야 하며, 콘빔CT 스캔이 유용하기는 하나 관계적으로나 스크리닝 목적으로 사용되어서는 안 된다고 강조하였다. Hidalgo 등(2015)²²⁾은 10세 소아 팬텀을 사용하여 갑상선 방어장비의 효용성을 평가하여 큰 FOV(17 cm \times 12 cm)의 콘빔CT(3D Accuitomo F170) 촬영시 의미있는 선량 감소를 발견하였으며, 소아에서 큰 FOV의 콘빔CT 촬영시 갑상선 방어장비의 사용이 권고되어야 한다고 보고하였다.

교정 분석용으로 촬영하는 콘빔CT에서의 유효선량은 기존의 촬영방법의 유효선량보다 약 12배 정도 높았다. 따라서 소아에서 교정 분석용 콘빔CT의 촬영은 보다 철저히 정당화가 이루어져야 하며, 정당성이 확보되면 갑상선 방어장비의 사용 등을 통한 최적화가 반드시 필요하다. 또한 본 연구에서 사용된 콘빔CT 장비(Alphard VEGA)는 교정 목적으로 사용하는 C-mode의 FOV가 20cm \times 17.9cm로, 위에서 논의했던 지금까지 보고된 높은 선량을 보이는 장비(17cm \times 12cm의 FOV)보다 더 큰 FOV를 사용하는 장비로서 향후 소아에서 교정 목적으로 촬영시 불필요한 노출이 되지 않도록 FOV의 시준이 권고된다.

참 고 문 헌

1. Arai Y, Tammisalo E, Iwai K, Hashimoto K, Shinoda K. Development of a compact computed tomographic apparatus for dental use. *Dentomaxillofac Radiol* 1999;28:245-8.
2. Momin MA, Matsumoto K, Ejima K, Asaumi R, Kawai T, Arai Y, Honda K, Yosue T. Correlation of mandibular impacted tooth and bone morphology determined by cone beam computed topography on a premise of third molar operation. *Surg Radiol Anat* 2012 Nov 13; doi:10.1007/s00276-012-1031-y.
3. Patel S, Dawood A, Whaites E, Pitt Ford T. New dimensions in endodontic imaging: part 1. Conventional and alternative radiographic systems. *Int Endod J* 2009;42:447-62.
4. Silva MA, Wolf U, Heinicke F, Bumann A, Visser H, Hirsch E. Cone-beam computed tomography for routine orthodontic treatment planning: a radiation dose evaluation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2008;133:640.e1-5.
5. Lofthag-Hansen, Grondal K, Ekestubbe A. Cone-beam CT for preoperative implant planning in the posterior mandible: visibility of anatomic landmarks. *Clin Implant Dent Relat Res* 2009;11:246-55.
6. Radiation protection No. 172. Evidence based guidelines on cone beam CT for dental and maxillofacial radiology. [Internet]. Luxembourg: European commission; 2012 [cited 2015 May 30]. Available from: (<http://ec.europa.eu/energy/en/radiation-protection-publications>)
7. Ludlow JB, Davis-Ludlow LE, Brooks SL, Howerton WB. Dosimetry of 3 CBCT devices for oral and maxillofacial radiology: CB Mercuray, NewTom 3G and i-CAT. *Dentomaxillofac Radiol* 2006;35:219-26.
8. Ludlow JB, Ivanovic M. Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2008;106:106-14.
9. Roberts JA, Drage NA, Davies J, Thomas DW. Effective dose from cone beam CT examinations in dentistry. *Br J Radiol* 2009;82:35-40.
10. Loubele M, Bogaerts R, Van Dijck E, Pauwels R, Vanheusden S, Suetens P, Marchal G, Sanderink G, Jacobs R. Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCT scanners for dentomaxillofacial applications. *Eur J Radiol* 2009;71:461-8.
11. 정기정, 한원정, 김은경. 3차원 안모분석을 위한 저선량 Multi-detector CT영상의 유효선량 및 화질 평가. *대한구강악안면방사선학회지* 2010;40:15-23.
12. Qu XM, Li G, Ludlow JB, Zhang ZY, Ma XC. Effective radiation dose of ProMax 3D cone-beam computerized tomography scanner with different dental protocols. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2010;110:770-6.
13. Pauwels R, Beinsberger J, Collaert B, Theodorakou C, Rogers J, Walker A, Cockmartin L, Bosmans H, Jacobs R, Bogaerts R, Horner K, The SEDENTEXCT Project Consortium. Effective dose range for dental cone beam computed tomography scanners. *Eur J Radiol* 2012;81:267-71.
14. Jeong DK, Lee SC, Huh KH, Yi WJ, Heo MS, Lee SS, Choi SC. Comparison of effective dose for imaging of mandible between multi-detector CT and cone-beam CT. *Imaging Sci Dent* 2012;42:65-70.
15. Kim DS, Rashsuren O, Kim EK. Conversion coefficients for the estimation of effective dose in cone-beam CT. *Imaging Sci Dent* 2014;44:21-9.
16. Theodorakou C, A, Horner K, Pauwels R, Bogaerts R, Jacobs R. Estimation of paediatric organ and effective doses from dental cone beam CT using anthropomorphic phantoms. *Br J Radiol* 2012;85:153-60.
17. 한원정, 김종수. 상악 정중과임치 진단을 위한 cone beam CT의 유효선량. *대한소아치과학회지* 2012;39:273-9.
18. Ludlow JB, Walker C. Assessment of phantom dosimetry and image quality of i-CAT FLX cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013;144:802-17.
19. Najjar AA, Colosi D, Dauer LT, Prins R, Patchell G, Branets I, Goren AD, Faber RD. Comparison of adult and child radiation equivalent doses from 2

참 고 문 헌

- dental cone-beam computed tomography units. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013;143:784-92.
20. Ludlow KB, Timothy R, Walker C, Hunter R, Benavides E, Samuelson DB, Scheske MJ. Effective dose of dental CBCT—a meta analysis of published data and additional data for nine CBCT units. *Dentomaxillofac Radiol* 2015;44:20140197.
21. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Ann ICRP 37. Oxford, UK: Pergamon Press, 2007.
22. Hidalgo A, Davis J, Horner K, Theodorakou C. Effectiveness of thyroid gland shielding in dental CBCT using a paediatric anthropomorphic phantom. *Dentomaxillofac Radiol* 2015;44: 20140285.