

Evaluation of Effective Dose with National Diagnostic Reference Level using Monte-Carlo Simulation

Seung-Youl Lee, Youl-Hun Seoung*

Department of Radiological Science, College of Health & Medical Sciences, Cheongju University

Received: November 23, 2021. Revised: December 24, 2021. Accepted: December 31, 2021

ABSTRACT

In this study, the effective dose for frequently general radiography among the diagnostic reference level (DRL) for examinations provided by the government in Korea was evaluated using the Monte Carlo N-Particle eXtended (MCNPX) simulation tool. We were selected to evaluate for a total of 5 examination sites which included head anterior-posterior, chest (posterior-anterior, lateral), abdomen anterior-posterior and pelvis anterior-posterior. Physical conditions such as tube voltage and tube current used in MCNPX simulation were used in domestic conditions of the Korea Disease Control and Prevention Agency (KDCA). To evaluate domestic medical radiation exposure, we used the HDRK-Man computerized human phantom manufactured based on the international standard ICRP 103 that was applied to the MCNPX simulation. The phantom could represent the standard body shape of Koreans. As a results, the effective dose corresponding to the DRL based on adult males of head anterior-posterior position was 0.086 mSv, chest posterior-anterior position was 0.05 mSv, chest lateral was 0.354 mSv, abdomen anterior-posterior position was 0.548 mSv, and pelvis anterior-posterior position was 0.451 mSv.

Keywords: Monte-Carlo Simulation, General radiography, Diagnostic reference level, Effective dose

I. INTRODUCTION

최근 의료방사선 검사빈도 증가는 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 증가추세를 보이고 있다. 의료 영역에서 방사선 검사가 빈번해지면서 방사선 피폭 선량의 증가와 함께 방사선 노출에 대한 위험과 부작용에 대한 일반인들의 관심과 우려가 함께 증가하고 있다^[1]. 최근 질병관리청에 따르면 전체 의료방사선 사용빈도는 2016년 3.12억 건에서 2019년 3.74억 건으로 약 19.9% 증가하였고, 2019년 일인당 유효선량은 약 2.42 mSv로 2016년 1.96 mSv에 비해 약 23% 증가하였다^[2]. 검사종류별 일인당 유효선량은 전산화단층영상검사가 약 0.94 mSv (38.7%)로 가장 높았고, 다음으로 일반엑스선검사 0.69 mSv (28.6%), 중재적 시술 0.62 mSv (25.5%), 투시검사 0.061 mSv (2.5%), 혈관엑스선검사 0.059

mSv (2.4%), 유방엑스선검사 0.037 mSv (1.5%), 치과촬영 0.014 mSv (0.6%) 순이었다. 또한 2008년 UN 방사선영향과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; UNSCAER) 보고서에 따르면 1988년의 전 세계 진단용 의료방사선 검사 횟수는 17.4억 회에서 2008년 36.6억 회로 약 2배 이상 증가하였다고 보고하고 있다^[3].

특히 국내 일반엑스선검사의 사용 빈도는 2019년 약 2.68억 건으로 전체 사용 빈도 중 약 71.7%로 가장 높았으며, 2016년 2.25억 건과 비교해 약 19% 증가하였다. 일반엑스선검사의 1인당 연간 유효선량은 2019년 기준 0.69 mSv로 2016년 0.57 mSv보다 약 21% 증가하였다^[2]. 또한 UNSCAER 2008 보고서에 따르면 1988년의 전 세계 진단용 의료방사선 검사 횟수는 17.4억 회에서 2008년 36.6억 회로

* Corresponding Author: Youl-Hun Seoung E-mail: radimage@cju.ac.kr Tel: +82-43-229-7993 Address: 298, Daeseong-ro, Cheongwon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, Republic of Korea

약 2배 이상 증가하였다고 보고하였다^[3].

의료피폭은 방사선안전보다는 진료가 우선이 되어 임상적 목적에 부합하는 행위라면 정당하기 때문에 환자에 대하여는 개인선량한도를 정하지 않는다^[4]. 그러나 의료방사선 사용 빈도 및 선량이 지속적으로 증가하고 있기 때문에 세계보건기구(World Health Organization; WHO) 및 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA) 등 6개 국제기구가 공동으로 의료피폭 저감화를 위하여 일반엑스선검사 시 환자가 받는 선량의 지도 수준(Guidance level)을 마련하였다. 이 기구들은 1996년에 Basic Safety Standards (BSS) No. 115를 권고하였다. 2008년에는 ICRP publication 103을 마련하여 의료방사선에 의한 환자방어의 최적화를 위해서 환자선량의 진단참고수준(Diagnostic Reference Level; DRL)을 각 국가가 자국 실정에 맞게 운영하도록 권고하고 있다^[5,6].

국내 식품의약품안전처(식약처)에서는 일반엑스선검사에 대해 2007년부터 권고해왔으며 최근에는 질병관리청에서 진단참고수준을 마련하여 의료기관에 권고하고 있다. 하지만 진단참고수준의 단위는 흡수선량으로 인체 피폭에 대한 평가가 가능한 유효선량이 아니다. 따라서 본 연구에서는 국가에서 제공하는 주요 일반엑스선검사 진단참고수준의 물리적 방사선량을 몬테카를로 시뮬레이션 툴(Monte Carlo N-Particle eXtended 2.7.0; MCNPX, Los Alamos National Laboratory, USA)과 한국인의 표준 전산 인체팬텀을 이용하여 유효선량으로 평가하고자 하였다.

II. MATERIALS AND METHODS

1. 일반엑스선검사의 진단참고수준 평가 대상 및 엑스선 조사조건 선정

일반엑스선검사의 진단참고수준에 대한 유효선량 평가 검사 부위는 가장 다빈도로 검사되는 대표부위로 두부 전후면(Anterior-Posterior; AP), 흉부 후전면(Posterior-Anterior; PA), 흉부 측면(Lateral; LAT), 복부 AP, 골반 AP 등 총 5개의 검사 부위로 선정하였고, 몬테카를로 시뮬레이션에 사용되는 관전압과 관전

류는 2019년 질병관리청의 진단참고수준 가이드라인의 3사분위 값을 사용하였다^[7]. 엑스선 조사거리 및 조사야는 2014년 식약처의 표준촬영 프로토콜 가이드라인의 조건을 사용하였다^[8].

2. 엑스선 스펙트럼 및 일반엑스선검사 장치 모사

일반엑스선검사 장치의 엑스선 스펙트럼 데이터는 Fig. 1과 같이 SRS 78 (The Institute of Physics and Engineering in Medicine; IPEM, United Kingdom)에서 제공하는 엑스선 스펙트럼 계산 프로그램을 사용하였다^[9].

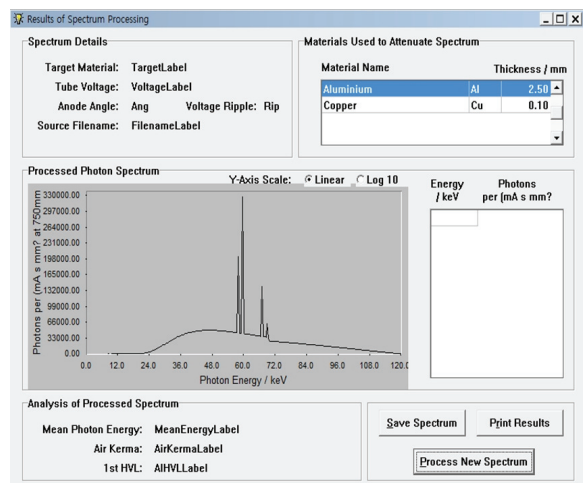


Fig. 1. IPEM SRS 78 program calculating X-ray spectrum.

Fig. 2와 같이 MCNPX 시뮬레이션 프로그램에 엑스선원을 점선원으로 모사하였다. 점선원은 등방성으로 방사선이 방출되기 때문에 벡터를 테이블 방향으로 설정하고 영상 크기에 맞게 방사각(Cos θ)을 조절하여 불필요한 광자의 손실을 줄이고 광자의 수송 효율을 높였다. 다시 원뿔형(Cone beam)으로 조정된 엑스선을 실제의 사각뿔형태로 방사되도록 ARB 카드로 조사야를 설정하여 사각뿔을 재현하였으며, 각각의 검사별 영상 크기에 맞춰 조사야 크기를 조정하였다. 선원-영상 거리는 각 엑스선 조사조건과 동일한 조건으로 구성하고 테이블 표면에서 28 cm 되는 지점(전산 인체팬텀 박스의 표면)에 선량계를 모사하고 *F6 tally를 지정하였다.

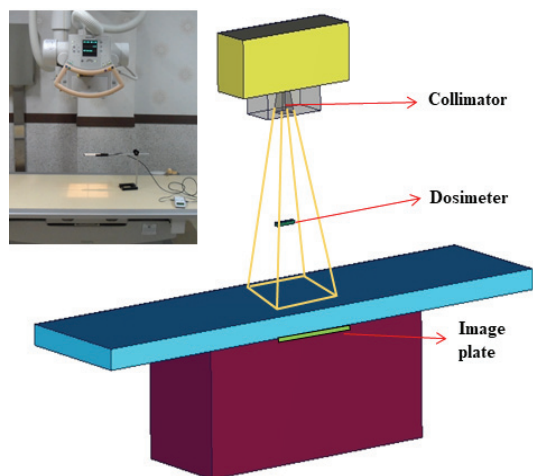


Fig. 2. Geometry of X-ray generator simulated by MCNPX.

측정된 Tally 값의 단위는 Jerk/g (10^9 J/g) 이며 광자 한 개당 단위질량 당 흡수된 에너지를 나타낸다. 다시 이 값은 같은 엑스선 조사조건에서 측정된 에어 커마 값을 시뮬레이션으로 산출된 값으로 나눠 주게 되면 목표물로 조사된 정규화 된 광자의 개수(Normalized Factor; NF)를 Eq. 1을 통하여 구할 수 있다. 여기서 K_{air-M} 은 각 엑스선 조사조건에 따라 측정된 팬텀 표면 위치에서의 공기 커마 값이며, K_{air-S} 는 MCNPX로 모사한 팬텀표면 위치에서의 공기 커마 값이다. 해당값은 실제 시뮬레이션된 광자하나당 확률값에 대한 양적개념이 들어간 실측값의 비이다. 최종적으로 시뮬레이션으로 나온 장기별 흡수선량 값에 각 장기별 ICRP 103의 조직가중계수값을 적용하여 유효선량을 산출하였다.

$$NF = \frac{K_{air-M}}{K_{air-S}} \quad (1)$$

3. 전산 인체 모의체(Phantom) 선정

국내 의료방사선 피폭량 평가를 위해 MCNPX 시뮬레이션에 사용되는 전산 인체 모의체(Phantom)의 신체 크기, 인체 장기 및 조직 정보 등이 한국인을 대표할 수 있어야 하며 장기의 구조 및 형상을 뚜렷하게 구별할 수 있고 국제규격의 ICRP 103 기반으로 제작되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 한국 성인 남, 여를 대표할 수 있고 MCNPX 모사에 적

용 가능한 Fig. 3과 같이 HDRK-Man^[10] 전산 인체팬텀을 MCNPX 시뮬레이션에 적용하였다.

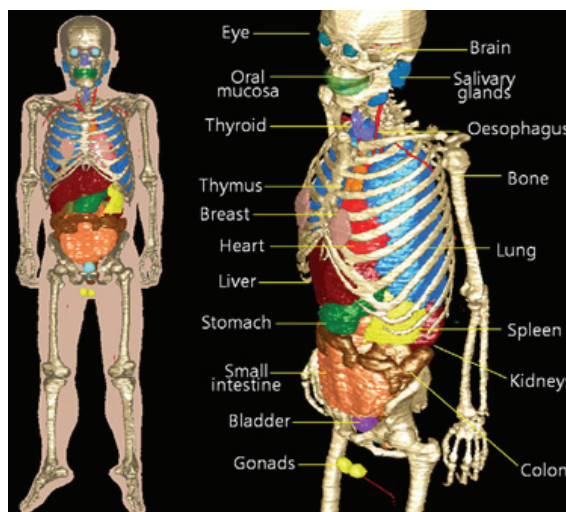


Fig. 3. 3D whole-body frontal view with semi-transparent skin (left) and major organs and tissues (right) of HDRK-Man (Kim et al, 2008).

III. RESULTS

국내 일반엑스선검사의 진단참고수준 중 성인의 흉부 검사 및 복부 검사 등 5개 검사에 대한 유효선량을 MCNPX 시뮬레이션 툴과 HDRK 한국형 전산팬텀을 이용하여 Table 1과 같이 평가하였다. 그 결과, 두부 AP의 유효선량은 0.086 mSv, 흉부 PA는 0.05 mSv, 흉부 LAT은 0.354 mSv, 복부 AP는 0.548 mSv, 골반 AP는 0.451 mSv로 평가되었다.

Table 1. Summary of mean effective dose of general radiography calculated in this study

Examination	DRL 2019 (mGy)	Effective dose (mSv)	Error (%)
Head AP	2.85	0.086	2.9
Chest PA	0.4	0.050	1.2
Chest LAT	1.26	0.354	0.8
Abdomen AP	3.64	0.548	0.9
Pelvis AP	3.59	0.451	2.3

각 부위별로 평가된 장기선량에 ICRP 103의 조직가중계수를 적용하여 유효선량은 산출하였다.

Table 2에서 두부 AP 검사에 따른 장기선량은 뇌 (1.11 mGy), 침샘 (1.07 mGy), 뼈 (0.45 mGy), 구강점막 (0.37 mGy) 등 순이었다.

Table 2. Organ dose and effective dose of head AP projection

Organ or Tissue	Organ Dose (mGy)	Organ or Tissue	Organ Dose (mGy)
Red bone marrow	0.016973	Adrenal	0.000011
Colon	0.000037	Extra thoracic	0.003873
Lung	0.001927	Gall bladder	0.000006
Stomach	0.000103	Heart	0.000074
Breast	0.000411	Kidney	0.000006
Gonads	0.000025	Limphatic node	0.000308
Bladder	0.000005	Muscle	0.000831
Esophagus	0.001371	Oral mucosa	0.004085
Liver	0.000066	Pancreas	0.000006
Thyroid	0.007100	Prostate	0.000001
Bone	0.005416	Small intestine	0.000003
Brain	0.013348	Spleen	0.000011
Salivary gland	0.012873	Thymus	0.000198
Skin	0.001539	-	-
Effective dose (mSv)	0.071		

Table 3에서 흉부 PA 검사에 따른 장기선량은 폐 (0.12 mGy), 식도 (0.09 mGy), 림프절 (0.08 mGy), 심장 (0.07 mGy) 등 순이었다.

Table 3. Organ dose and effective dose of chest AP projection

Organ or Tissue	Organ Dose (mGy)	Organ or Tissue	Organ Dose (mGy)
Red bone marrow	0.003873	Adrenal	0.000177
Colon	0.000200	Extra thoracic	0.000085
Lung	0.009415	Gall bladder	0.000059
Stomach	0.001796	Heart	0.000432
Breast	0.002157	Kidney	0.000064
Gonads	0.000012	Limphatic node	0.000516
Bladder	0.000008	Muscle	0.000210
Esophagus	0.002482	Oral mucosa	0.000063
Liver	0.001025	Pancreas	0.000084
Thyroid	0.001713	Prostate	0.000001
Bone	0.000383	Small intestine	0.000016
Brain	0.000014	Spleen	0.000163
Salivary gland	0.000086	Thymus	0.000332
Skin	0.000115	-	-
Effective dose (mSv)	0.025		

Table 4에서 흉부 LAT 검사에 따른 장기선량은 폐 (0.88 mGy), 갑상선 (0.74 mGy), 유방 (0.7 mGy), 심장 (0.66 mGy) 등 순이었다.

Table 4. Organ dose and effective dose of chest LAT projection

Organ or Tissue	Organ Dose (mGy)	Organ or Tissue	Organ Dose (mGy)
Red bone marrow	0.020214	Adrenal	0.000959
Colon	0.001079	Extra thoracic	0.000798
Lung	0.067910	Gall bladder	0.000455
Stomach	0.008952	Heart	0.003874
Breast	0.053641	Kidney	0.000309
Gonads	0.000020	Limphatic node	0.003610
Bladder	0.000027	Muscle	0.001241
Esophagus	0.015874	Oral mucosa	0.000310
Liver	0.010392	Pancreas	0.000497
Thyroid	0.018967	Prostate	0.000003
Bone	0.002327	Small intestine	0.000089
Brain	0.000063	Spleen	0.000466
Salivary gland	0.000479	Thymus	0.003515
Skin	0.000834	-	-
Effective dose (mSv)	0.217		

Table 5에서 복부 AP 검사에 따른 장기선량은 소장 (1.56 mGy), 위 (1.56 mGy), 담낭 (1.49 mGy), 췌장 (1.26 mGy) 등 순이었다.

Table 5. Organ dose and effective dose of abdomen AP projection.

Organ or Tissue	Organ Dose (mGy)	Organ or Tissue	Organ Dose (mGy)
Red bone marrow	0.024944	Adrenal	0.005600
Colon	0.149548	Extra thoracic	0.000011
Lung	0.018836	Gall bladder	0.014200
Stomach	0.192897	Heart	0.001152
Breast	0.003250	Kidney	0.005610
Gonads	0.003547	Limphatic node	0.001629
Bladder	0.021780	Muscle	0.002013
Esophagus	0.004554	Oral mucosa	0.000013
Liver	0.047440	Pancreas	0.011982
Thyroid	0.000296	Prostate	0.001590
Bone	0.003807	Small intestine	0.014903
Brain	0.000003	Spleen	0.009712
Salivary gland	0.000013	Thymus	0.000219
Skin	0.001952	-	-
Effective dose (mSv)	0.542		

Table 6에서 복부 AP 검사에 따른 장기선량은 소장 (1.85 mGy), 방광 (1.80 mGy), 생식선 (1.58 mGy), 대장 (1.41 mGy) 등 순이었다.

Table 6. Organ dose and effective dose of pelvis AP projection

Organ or Tissue	Organ Dose (mGy)	Organ or Tissue	Organ Dose (mGy)
Red bone marrow	0.033101	Adrenal	0.001087
Colon	0.171379	Extra thoracic	0.000003
Lung	0.001960	Gall bladder	0.005405
Stomach	0.027618	Heart	0.000084
Breast	0.000287	Kidney	0.003944
Gonads	0.128197	Lymphatic node	0.000809
Bladder	0.073110	Muscle	0.002620
Esophagus	0.000364	Oral mucosa	0.000003
Liver	0.003789	Pancreas	0.003026
Thyroid	0.000048	Prostate	0.010847
Bone	0.005101	Small intestine	0.017277
Brain	0.000001	Spleen	0.002357
Salivary gland	0.000005	Thymus	0.000018
Skin	0.001900	-	-
Effective dose (mSv)	0.494		

IV. DISCUSSIONS

본 연구에서는 국가에서 권고하는 진단참고수준의 물리량을 유효선량으로 평가하기 위해 MCNPX 시뮬레이션과 한국인의 전산팬텀, 그리고 국가기관에서 제공하는 엑스선 조사조건을 이용하여 연구 결과의 신뢰성을 높이고자 하였다. 다만 해당 평가에서 사용된 검사조건은 2019년 질병관리청에서 진단참고수준을 마련하기 위해 조사된 의료기관의 자료로서 국내 모든 의료기관에서 사용하는 검사조건을 대표할 수 없으며, MCNPX 시뮬레이션 툴과 전산팬텀, 그리고 연구자의 모사방법에 따라 달라질 수 있다.

또한 의료피폭은 선량한도를 적용받지 않는 정당한 방사선 사용이고 검사 시에 참고로만 사용되는 권고 수치이기에 진단참고수준을 유효선량으로 평가하는 것이 적절하지 않을 수 있다. 하지만 임상에서 사용자나 환자들이 진단참고수준의 양이 각 검사마다 단위도 다르고 물리량으로 제시되기에 피폭의 정도를 가늠하기 어려움이 있기에 일반적으로 잘 알려진 유효선량으로 평가하는 방법론을 본 연구를 통해 제시하고 검사에 따른 장기별 피폭량을 객관적 지표를 통해 평가해보고자 했다.

최종 연구 결과에서는 두부 AP와 흉부 LAT의 입사표면선량은 각각 2.85 mGy, 1.26 mGy로, 두부 AP가 2배 이상 높았지만, 이를 유효선량으로 평가한 결과 각각 0.086 mSv, 0.354 mSv로 흉부 LAT이 4배 이상 높았다. 이는 두부 AP는 두개골을 투과하기 위해 높은 조건이 적용되지만 검사범위에 직접적으로 조사되는 장기 중 폐나 대장 등의 조직가중계수가 높은 장기가 없었기 때문으로 판단된다. 또한 검사별 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 나타내는 Error 값은 nps를 10^9 이상으로 적용하였기에 모두 3% 미만으로 나왔고, 이는 통상적으로 결과값에 신뢰가 있다고 할 수 있다. 이중 두부 AP의 유효선량이 다른 검사보다 높은 것은 상대적으로 인체의 상단 부분에 집중된 촬영이기에 장기가 다수 분포된 복부 등 하부의 장기에 광자가 도달되는 수가 적기 때문으로 판단된다.

V. CONCLUSIONS

최근 국내 권고되는 진단참고수준 중 다빈도 5개 부위의 일반엑스선검사에 대한 유효선량을 한국인의 전산팬텀과 MCNPX 시뮬레이션 툴로 평가한 결과, 두부 AP의 유효선량은 0.086 mSv, 흉부 PA는 0.05 mSv, 흉부 LAT는 0.354 mSv, 복부 AP는 0.548 mSv, 골반 AP는 0.451 mSv로 평가되었다. 두부 AP 검사의 장기선량은 뇌조직이 가장 높았고 유효선량 기여도는 적골수가 가장 높았다. 흉부 PA와 LAT의 장기선량과 유효선량 기여도는 폐가 가장 높았다. 복부 AP와 골반 AP의 장기선량은 두 검사 모두 소장이 가장 높았고, 유효선량 기여도는 각각 위와 대장이 가장 높았다.

본 연구를 통해 의료기관에 권고되는 물리량의 진단참고수준을 방호량인 유효선량으로 평가하여 임상 종사자나 환자가 주요 일반엑스선검사에 따른 피폭방사선량을 참고하고 방사선피폭을 최소화 하는데 도움이 되고자 하였다. 향후 연구에서는 일반엑스선검사 이외의 검사에 대한 유효선량 평가와 다양한 연령 별 평가에 관한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

Reference

- [1] S. E. Jung, K. P. Kim, K. H. Do, J. Y. Lee, J. M. Kim, "Research for National Medical Radiation Exposure Reduction Infrastructure", Ministry of Food and Drug Safety, 2012.
- [2] K. P. Kim, "Assessment of Radiation Exposure of Korean Population by medical radiation", Korea Disease Control and Prevention Agency, 2020.
- [3] UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes VOLUME I, UNITED NATIONS New York, 2010.
- [4] ICRP, Radiological Protection in Medicine, International Commission on Radiological Protection, ICRP publication 105, 2007.
- [5] IAEA: Safety Series No,115, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, 1996.
- [6] ICRP: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, 2007.
- [7] KCDC: Guidline for Diagnostic Reference Level - general radiography, Korea Disease Control and Prevention Agency, 2019.
- [8] MFDS: Standard Radiography Method for General Radiography, Ministry of Food and Drug Safety, 2014.
- [9] IPEM: Institute of Physics and Engineering in Medicine, Catalogue of diagnostic x-ray spectra and other data, IPEM Report 78, UK, 1997.
- [10] C. H. Kim, S. H. Choi, J. H. Jeong, C. S. Lee, M. S. Chung, "HDRK-Man: a whole-body voxel model based on high-resolution color slice images of a Korean adult male cadaver", *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 53, No. 15, pp. 4093-4199, 2008. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/53/15/006>

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 국내 일반엑스선검사 진단참고수준의 유효선량 평가

이승열, 성열훈*

청주대학교 보건의료과학대학 방사선학과

요 약

본 연구에서는 국가에서 제공하는 일반엑스선검사의 진단참고수준 중 다빈도 검사에 대한 유효선량을 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 평가하고자 하였다. 일반엑스선검사의 진단참고수준에 대한 유효선량 평가는 가장 다빈도로 검사되는 두부 전후면(Anterior-Posterior; AP), 흉부 후전면(Posterior-Anterior; PA), 흉부 측면(Lateral; LAT), 복부 AP, 골반 AP 등 총 5개의 검사 부위로 선정하였다. 몬테카를로 시뮬레이션에 사용되는 관전압과 관전류 등의 물리적 조건은 국내 조건의 대표성을 나타내기 위해 질병관리청의 자료를 사용하였다. 국내 의료방사선 피폭량 평가를 위해 사용된 인체 전산 팬텀은 한국인의 표준 체형을 대표할 수 있고 국제규격의 ICRP 103 기반으로 제작된 HDRK-Man 전산 인체팬텀을 몬테카를로 시뮬레이션에 적용하였다. 그 결과, 성인 남성을 기준으로 두부 AP의 진단참고수준에 해당되는 유효선량은 0.086 mSv, 흉부 PA는 0.05 mSv, 흉부 LAT는 0.354 mSv, 복부 AP는 0.548 mSv, 골반 AP는 0.451 mSv로 평가되었다.

중심단어: 몬테카를로 시뮬레이션, 일반엑스선검사, 진단참고수준, 유효선량

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	이승열	청주대학교 보건의료과학대학 방사선학과	연구원
(교신저자)	성열훈	청주대학교 보건의료과학대학 방사선학과	교수