Journal of Radiation Industry 11(4) : 241~250(2017)

핵의학 방사선작업종사자의 수정체선량 평가

강경원[1,2] · 송하진[1,3] · 김희근[4] · 동경래[5] · 김미현[5,6] · 정운관[1,*]

[1]조선대학교 원자력공학과, [2]전남대학교 핵의학과,
[3]한국원자력연구원 핵주기전략개발부, [4]위덕대학교 에너지전기공학부,
[5]광주보건대학교 방사선과, [6]전북대학교대학원 방사선과학기술학과

Evaluation of Lens Dose of Nuclear Medicine Radiation Workers

Kyeong-Won Kang[1,2], Ha-Jin Song[1,3], Hee-Geun Kim[4], Kyung-Rae Dong[5],
Mi-Hyun Kim[5,6] and Woon-Kwan Chung[1,*]

[1]*Department of Nuclear Engineering, Chosun University, 375, Seosuk-dong, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea*
[2]*Department of Nuclear Medicine, Chonnam National University Hospital, 42, Jebong-ro, Dong-gu, Gwangju 61469, Republic of Korea*
[3]*Nuclear Fuel Cycle Strategy Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111, Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea*
[4]*Division of Energy & Electrical Engineering, UiDuk University, 261, Donghae-daero, Gangdong-myeon, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do 38004, Republic of Korea*
[5]*Department of Radiological Technology, Gwangju Health University, 683-3, Shinchang-dong, Gwangsan-gu, Gwangju 62287, Republic of Korea*
[6]*Department of Radiation Science & Technology, Graduate School of Chonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea*

Abstract - In April 2011, ICRP issued a statement on tissue reactions in which it recommended, for occupational exposure, a dose limit for equivalent dose to the lens of the eye of 20 mSv·year^{-1}, averaged over defined periods of 5 years, with no annual dose in a single year exceeding 50 mSv. Thus, the need for lens dose assessment and management of nuclear medicine workers is increasing. This study measured the lens exposure dose of the nuclear medicine radiation workers using ED 3 Active Extremity Dosimeter for six months from February 2017 to July 2017. It was measured for ^{99m}Tc-Bone scan and ^{18}F-FDG PET. because they are most frequently exam in nuclear medicine. As a result of measurement, the annual lens dose in ^{99m}Tc-Bone scan is 4.29 ± 1.73 mSv·day^{-1}, based on 8.37 ± 2.82 patients·day^{-1}. The annual lens dose in ^{18}F-FDG PET is 2.56 ± 0.98 mSv·day^{-1}, based on 5.47 ± 1.48 patients·day^{-1}. This does not exceed the lens equivalent dose limit. However, it is necessary to continuously manage the lens dose as it may result in workers exposed to high doses depending on the working environment.

Key words : Lens dose, Nuclear medicine workers, ^{99m}Tc-Bone scan, ^{18}F-FDG PET

* Corresponding author: Woon-Kwan Chung, Tel. +82-62-230-7166,
Fax. +82-62-232-9218, E-mail. wkchung@chosun.ac.kr

서 론

수정체는 방사선에 민감한 조직으로써 적색골수, 생식세포 등과 함께 방사선감수성이 가장 높은 장기로 분류된다(ICRP 2007). 수정체가 방사선에 노출되어 손상된 세포가 발생하면 수정체의 혼탁 내지는 백내장이 발생하기도 한다. 방사선 유발 백내장의 특징은 6개월 내지 수년의 잠복기를 가진다는 점이다. 손상된 상피세포 잔유물이 이동하여 서서히 안쪽 중심부의 후극에 모이고 수정체 중앙부터 반점의 출현이 확대되어 시력 장애를 일으킨다(Cho *et al*. 2007). 눈의 수정체나 국부 피부는 유효선량한도만으로는 항상 방호할 수 없기 때문에 유효선량한도 외에 수정체와 피부에 대한 한도가 ICRP 60에서 설정되었다(ICRP 1990). 이를 반영한 국내 원자력안전법에서도 유효선량한도 뿐만 아니라 수정체등가선량한도를 따로 두어 관리하도록 하고 있다(원자력안전위원회 2016a; 원자력안전위원회 2016b). 2007년 발간된 ICRP 103에서는 수정체에서 백내장이 발현할 문턱선량을 약 3 Gy로 평가하였고 수정체의 등가선량 한도를 연간 150 mSv로 권고 하고 있다. 하지만 ICRP의 새로운 역학연구결과 백내장을 일으키는 문턱선량이 0.5 Gy 정도로 낮은 것으로 나타났다(ICRP 2007). 이에 따라 ICRP 118의 조직반응에 대한 성명서에서 장기간의 관찰과 최근 가용한 역학조사의 결과를 통하여 수정체 등가선량한도를 5년 동안 평균 20 mSv (5년간 100 mSv), 그리고 한 해에 50 mSv를 초과하지 않는 것으로 하향 조정하였다(ICRP 2012). 이는 기존 종사자들이 수정체 선량한도를 초과하여 피폭할 것이라는 우려를 낳고 있다. 또한 ICRP103에서의 선량제약치 설정 권고로 인해 각 사용기관에서 종사자의 피폭선량관리가 더욱 중요해진 상황이다(ICRP 2007). 선량제약치는 선량한도 아래에서 설정되며 계획피폭상황에서 최적화 프로세스의 핵심이 된다. 방사선방호 전략을 계획하고 이를 합리적으로 달성 가능한 한 개인선량을 낮게 유도하는 수단으로 사용된다. 최근에는 해외에서도 선량제약치를 운영하는 사례가 보고되고 있으며 국내 연구에서는 핵의학 방사선작업종사자의 선량제약치를 작업종사자 평균 연선량한도의 1/3 정도인 6 mSv로 제안하고 있다(원자력안전위원회 2014). 방사선작업종사자의 피폭선량관리가 중요해지는 상황과 더불어 수정체등가선량 하향권고로 인해 그동안 잘 관리되지 않던 방사선작업종사자의 수정체 등가선량에 대한 적절한 평가가 이루어져야 할 필요성이 대두 되었다. 수정체 등가선량 한도가 낮아짐에 따라 가슴에 착용하는 법정선량계의 유효선량한도를 충족하는 것이 반드시 수정체 등가선량한도를 충족하지 못할 경우도 있을 수 있다는 우려 때문이다. 특히 개봉방사성동위원소를 사용하고 이를 투여 받은 환자에게서 방출되는 방사선에 근접하여 노출될 수밖에 없는 핵의학 종사자의 업무특성상 납치마(apron) 안쪽 가슴에 착용하는 선량계의 유효선량이 차폐가 없는 상태의 수정체 등가선량을 대변한다고 보기는 더욱 힘들다. 최근 5년(2011~2015년)간 핵의학과에서 종사자 수가 가장 많은 직종은 방사선사로써 평균 피폭선량은 3.56±2.92 mSv으로 최소 0.01 mSv, 최대 23.31 mSv를 보였다(원자력안전위원회 2014). 이는 수정체 등가선량한도에 가깝거나 초과하여 피폭한 종자사가 존재함을 시사한다. 따라서 핵의학 종사자의 수정체등가선량에 대한 적절한 평가기준과 방호대책 마련이 시급하다. 또한 현재 국내에서는 수정체선량 측정을 위한 전용의 측정기를 구비하기 어려운 환경이다. 그러므로 기관마다 수정체선량 전용의 선량계를 구비할 수 없는 점을 고려하여 본 연구에서는 핵의학과에서 검사 시 투여량에 따른 선량값과 준비, 투여, 검사 및 기타 작업으로 구분하여 수정체 선량으로 환산하여 작업 시 수정체 선량한도를 초과하거나 초과할 우려가 있는 작업이나 종사자를 구분하여 선량저감화 활동을 실시할 수 있을 것으로 사료된다.

재료 및 방법

1. 연구 재료

ED3 (Active Extremity Dosimeter)는 Rounda S.T에서 나온 제품으로써 에너지별로 디텍터를 다르게 두고 있는 전자선량계이다(Fig. 1). 이 선량계의 주요 용도는 중재적 방사선, 방사선 치료, 핵의학, 높은 선량 환경에서 측정이 가능하다. 주요특징을 보면 베타와 광자(감마, X선)에 대한 H_p (0.07)을 실시간으로 기록 또는 ALARA의 영향에 대해 모니터링할 수 있고, 소프트웨어를 사용하여 PC에 보관할 수 있다. 그리고 수정체 선량 H_P (3)에 적합하다. ED3 Active Extremity Dosimeter에 사용되는 디텍터는 두 가지로 ED3D4와 ED3D1이다.

Fig. 1. ED3 Active Extremity Detector.

각각의 디텍터 ED3D1은 2개의 실리콘 다이오드로 구성되어 H_P (0.07) 말단선량에 대하여 60 keV~1.25 MeV까지 광자의 선량을 측정하는데 적합하다. ED3D4는 60 keV 이하의 저에너지 광자 및 고에너지 베타 측정에 적합하게 되어 있다. 본 연구에서는 사용되어지는 핵종들이 60 keV~1.25 MeV 사이의 광자를 방출하고 또한 말단선량의 알고리즘을 수정체에 사용할 수 있다는 판단 하에 말단선량 디텍터인 ED3D1을 사용하였다. ED3 Active Extremity Dosimeter를 한국표준과학연구원에서 지정해준 (주)코라솔에 감마선 조사장치를 이용하여 교정을 의뢰하였다(Table 1). 교정에 사용된 표준장비는 감마선조사장치 ^{137}Cs을 이용하였고 (주)에스에프테크놀로지에서 개발한 SFTIR-01형식이다.

Table 1. ED3 correction result

The reference kerma rate[a]	Standard dose[b]	Measures[b]	Correction factor
1.0	0.1	0.108	0.93
10.0	1.0	1.116	0.90
12.5	3.0	3.367	0.89
Calibration factor average			0.91
Measurement uncertainty (Expanded uncertainty) (%)[c]			7.8

[a]The unit is the number of mGy·h^{-1}. [b]The unit is the number of mSv. [c]The measurement uncertainty is the confidence level about 95%, The value at k=2

2. 측정 대상 및 방법

방사성동위원소는 전국 핵의학과에서 구입 및 사용량이 가장 많은 ^{99m}Tc, ^{18}F를 대상으로 하였다(Table 2) (한국동위원소협회 2010; 대한핵의학회 2014a; 대한핵의학회 2014b).

핵의학종사자 중 개봉선원을 이용한 작업을 직접 수행하고 종사자 수가 가장 많으며 조사된 피폭선량 중 최대치를 기록한 종사자가 있는 방사선사를 대상으로 측정을 실시하였다(Table 3) (원자력안전위원회 2014).

^{99m}Tc을 사용한 검사는 핵의학영상검사 중 가장 건수가 많은 ^{99m}Tc-Bone scan을 대상으로 하였다. 검사방법은 ^{99}Mo-^{99m}Tc Generator에서 용출된 $^{99m}TcO_4^-$를 분배실 내 분배대에서 방사성의약품(HDP)과 표지시킨다. 분배대에서 주사기에 분배한 ^{99m}Tc-HDP를 약 30 mCi 환자에게 정맥주사하고 3~4시간 후에 Gamma camera를 이용하여 전신 scan을 실시하고 필요시 spot, SPECT/CT를 추가적으로 검

Table 2. Purchase and use of isotopes in the nuclear medicine department in 2014

Purchase amount			Use amount		
Radioisotope	Total amount		Radioisotope	Total amount	
	mCi	MBq		mCi	MBq
Mo/Tc Generator	5,936,817	219,660,342	F-18 FDG	3,951,996	146,223,852
TcO4-99m	681,673	25,221,901	F-18 FPCIT	37,175	1,375,475
Total	6,618,490	224,882,243	F-18 FLT	1,190	44,030
I-131	1,868,748	69,143,661	F-18 Fluoride	1,188	43,956
I-131 MIBG	11,393	421,556	F-18 FES	240	8,880
Tl-201	63,294	2,341,878	F-18 FDOPA	0	0
Ga-67	392	14,504	F-18 Flumazenil	0	0
I-125	2,634	97,499	C-11 acetate	4,406	163,022
I-123	64,504	2,386,630	C-11 Methionine	7,360	272,320
I-123 MIBG	7,774	287,638	C-11 PIB	575	21,275
Sr-89	120	4,440	C-11 Raclopride	0	0
In-111	248	9,185	C-11 NMSP	0	0
Y-90	5,783	213,982	C-11 Flumazenil	0	0
Lu-177	0	0	N-13 ammonia	1,930	71,410
Ho-166	0	0	O-15 water	1,550	57,350
Other	95	3,549	Other	0	225,330

Table 3. Occupational exposure dose of nuclear medicine workers

Job	Number of annual dose records	Average annual dose[a] (Mean±SD)	MIN annual dose[a]	MAX annual dose[a]
Radio Technologist	552	3.56±2.92	0.01	23.31
Nurses	51	1.48±1.39	0.04	7.25
Medical doctors	107	0.48±0.78	0.03	4.32
Cyclotron Operator	17	4.14±2.08	0.14	8.78
Medical Technologist	66	0.45±0.54	0.04	4.17
Cleaner	3	0.64±0.60	0.2	1.24

[a]The unit is the number of mSv.

사하였다. 분배대 작업 외의 차폐는 납치마를 통해서만 이루어졌다. ^{18}F을 사용한 검사는 마찬가지로 검사 건수가 많은 ^{18}F-FDG를 대상으로 하였다. 검사방법은 Auto dispenser를 이용하여 ^{18}F-FDG를 분배하고 바로 옆에 위치해 있는 주사전용 L-block으로 이동하여 환자에게 0.13 mCi·kg^{-1} 용량으로 정맥주사하고 안정실로 안내하여 안정을 취하도록 한다. 1시간 후에 환자에게 소변을 보게 하고 PET/CT를 이용하여 torso scan을 실시한다. 영상검사를 위한 핵의학과 방사선사의 업무는 의료기관 특성별로 크게 두 가지 방법으로 분류할 수 있다. 분배실, 검사실, 주사실, 방사선안전관리 등 업무별로 업무분장이 이루어져 있는 방법이 있는 반면 해당 검사실별로 담당자가 방사성의약품의 용출부터 조제, 분배, 주사, 검사까지 모두 수행하는 경우도 있다. 측정을 실시한 기관은 후자의 경우로서 해당 검사실 담당자가 검사에 필요한 모든 업무를 수행하는 경우이다. 측정을 위해 2017년 2월부터 2017년 7월까지 6개월간 검사 준비 전에 ED3 선량계를 착용하여 당일 검사가 모두 끝날 때까지 계속 착용을 하였다. 착용위치는 수정체에 가깝게 위치시키기 위하여 안경테에 ED3 디텍터를 부착하여 착용하였다(Fig. 2).

하루 동안의 모든 작업과정을 포함하는 측정이므로 작업의 분류는 수정체에 영향이 많을 것이라 예상되는 3~4가지 과정으로 단순화하였다. ^{99m}Tc-HDP Bone scan 대상으로 한 측정은 4가지 작업으로 분류하였다. 방사성동위원소 용출 · 방사성의약품 표지 · 방사성의약품 분배 과정을 포함한 '준비', 환자에게 방사성의약품을 정맥주사 하는 '투여', Gamma camera를 이용한 검사를 하는 '검사', 그 밖에 대기환자에 의한 피폭을 포함하는 '기타'로 분류를 하여 측정을 실시함과 동시에 작업노트를 작성하여 시간대별로 작업을 구분하였다. 또한 실제 작업환경과 동일한 조건으로 측정하기 위해서 해당기관이 실제로 실시하는 방법과 마찬가지로 투여 작업 시 납치마 외에 별다른 차폐체를 사용하지 않았다. ^{18}F을 사용한 검사를 대상으로 한 측정은 3가지 작업으로 분류하였다. ^{18}F를 타 기관에서 구매하고, 분배작업은 Auto dispenser가 사용되므로 수정체등가선량에 미치는 영향이 적다. 뿐만 아니라 분배직후에 바로 투여작업과 연속적으로 발생하는 점 때문에 ^{99m}Tc에서는 분류되었던 '준비'는 '투여'에 포함하였다. PET/CT를 이용한 검사와 안정실에 대기하던 환자를 검사실로 안내하는 과정을 '검사'로, 그 외적으로 대기환자에 의한 피폭을 포함하는 '기타'로 분류를 하여 측정을 실시함과 동시에 작업노트를 작성하여 시간별 작업을 구분하였다.

Fig. 2. Where to wear ED3.

결 과

1. 방사선작업 분석에 따른 수정체등가선량 평가

^{99m}Tc-Bone scan은 방사성동위원소를 환자에게 투여 후 3~4시간 후에 검사가 시행되므로 환자에게 투여작업이 집중되어 있는 오전시간에 많은 피폭이 나타났다. 투여작업이 종료되고 검사작업만 주로 이루어지는 오후 시간에는 상대적으로 낮은 피폭이 주를 이루었다(Fig. 3). 누적선량 그래프에서 관찰할 수 있듯이 투여작업이 주를 이루었을 때는 가파른 상승을 보이다가 검사작업이 주를 이루는 오후시간에는 완만한 상승을 보이고 있다(Fig. 4). 해당 날짜의 그래프에서 투여작업이 주를 이루는 오전 11시까지를 기준으로 나누었을 때 오전 26.046 μSv, 오후 5.416 μSv로 4.8배 차이가 났다.

하루단위로 수정체 선량을 측정한 결과 ^{99m}Tc-Bone scan에서는 35회의 측정에서 하루 평균 8.371±2.819명의 환자를 검사하는 동안 17.159±6.931 μSv의 피폭이 발생하였다(Table 4).

피폭기여도는 투여 11.062±5.03 μSv (64.5%), 검사 4.964±2.768 μSv (28.9%), 준비 0.745±0.697 μSv (4.3%), 기타 0.387±0.244 (2.3%)순으로 투여작업이 가장 많은 것으로 나타났다. 환자 1명당 평균 2.05±1.078 μSv를 피폭하는 것으로 나타났다(Fig. 5).

^{18}F-FDG PET은 방사성동위원소를 환자에게 투여 후 약 1시간 후에 검사가 시행되며 대체적으로 투여와 검사가 순차적으로 이루어진다. Fig. 6에서 두 작업의 선량률이 비슷한 수준으로 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 피폭선량이 시간경과에 따라 대체적으로 일정하게 증가하게 된다. 이는 누적선량 그래프에서도 확인할 수 있다(Fig. 7).

하루단위로 수정체 선량을 측정한 결과 ^{18}F를 사용한 검사에서는 47회의 측정에서 하루 평균 5.468±1.485명의 환자를 검사하는 동안 10.259±3.925 μSv의 피폭이 발생하였다(Table 5).

피폭기여도는 검사 5.801±2.626 μSv (56.5%), 투여 3.340±1.660 μSv (32.6%), 기타 1.118±0.529 μSv (10.9%)

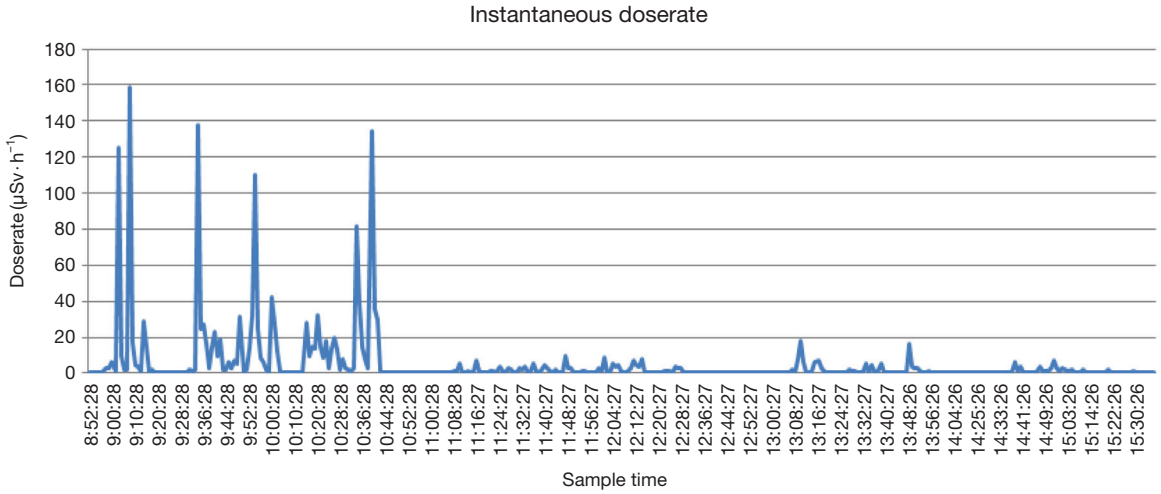

Fig. 3. ^{99m}Tc-HDP Bone scan dose rate graph.

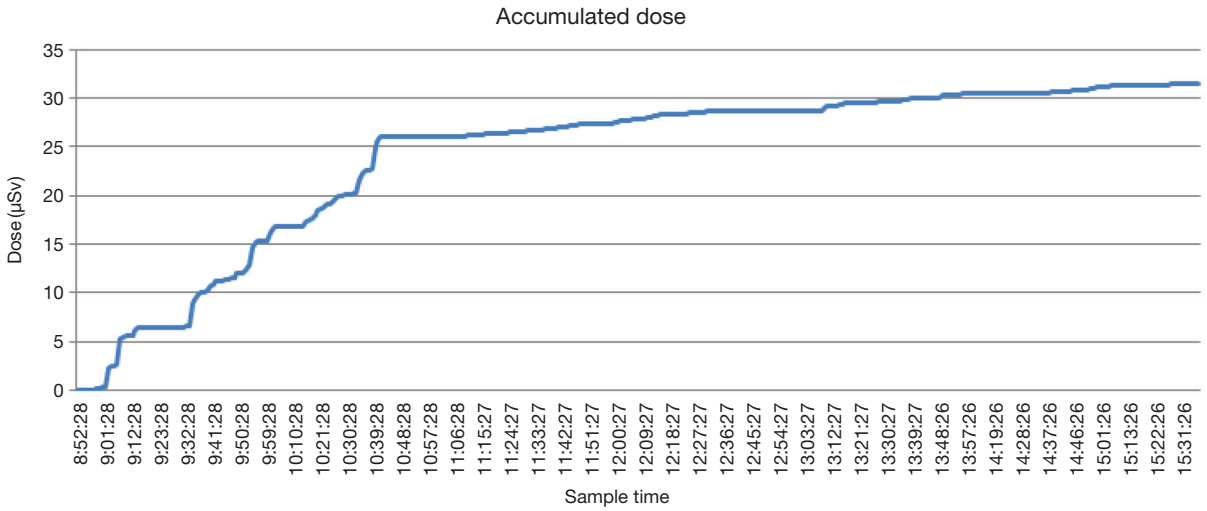

Fig. 4. ^{99m}Tc-Bone scan accumulated dose graph.

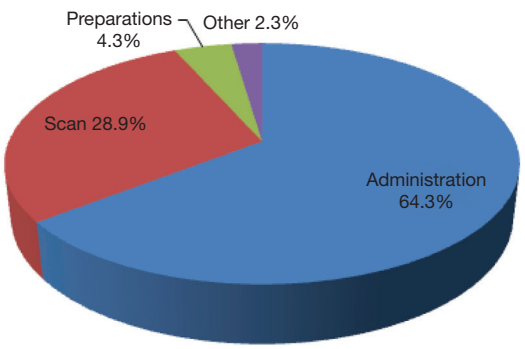

Fig. 5. Contribution of exposure in ^{99m}Tc-Bone scan.

순으로 검사작업이 가장 많은 것으로 나타났다. 환자 1명당 평균 1.876±0.88 μSv를 피폭하는 것으로 나타났다(Fig. 8).

2. 환자 수에 따른 수정체 피폭선량

^{99m}Tc-Bone scan의 하루 평균 8.371±2.819명의 환자를 검사하는 동안 17.159±6.931 μSv·day^{-1}의 피폭이 발생하였다. 방사선작업종사자의 일반적인 근무시간인 2,000시간을 기준으로 연간피폭선량을 환산하면 4.289±1.732 μSv (약 4.3 mSv)가 된다. 즉, 방사선사 1명이 매일 8.371명의 ^{99m}Tc-Bone scan을 1년 동안 시행한다면 연간수정체등가선량은 약 4.3 mSv로 예측할 수 있다. 기관마다 하루 동안에 검사하는 환자수가 다를 수 있으므로 환자 수에 따라 피폭선량을 예측해 보면 다음의 표와 같다(Table 6). 방사선사 1명이 매일 1년간 bone scan을 수행할 때 하루 환자 수를 10명으로 가정했을 때 연간수정체선량은 5125 μSv, 20명으로 가정했을 때는 10250 μSv로 예상할 수 있다.

Table 4. A ^{99m}Tc-Bone scan with ED3 measured the lens dose

Number of measurements	Total exposure dose[a]	Preparations[a]	Administration[a]	Scan[a]	Other[a]	Patient[b]
1	10.275	0.126	7.113	2.593	0.442	7
2	9.899	0.417	5.296	3.685	0.501	3
3	25.936	0.795	19.322	5.551	0.268	10
4	26.471	0.075	16.340	9.770	0.287	10
5	24.694	0.795	18.636	5.084	0.178	8
6	11.888	0.242	10.621	0.951	0.075	9
7	28.630	0.219	20.484	7.540	0.387	11
8	22.404	0.137	14.452	7.664	0.151	8
9	11.145	0.096	7.795	2.959	0.294	5
10	9.278	0.082	6.000	2.889	0.308	6
11	11.865	1.158	6.780	3.214	0.713	6
12	16.561	0.264	9.218	6.465	0.614	10
13	22.757	0.123	16.809	5.674	0.152	10
14	12.836	0.346	9.306	2.668	0.516	5
15	18.524	1.082	13.594	3.285	0.562	9
16	24.055	1.097	15.743	6.955	0.260	11
17	16.382	0.186	6.884	9.099	0.213	4
18	12.561	1.235	8.477	2.283	0.566	8
19	17.981	1.706	9.297	6.038	0.939	10
20	16.174	1.417	8.488	5.597	0.672	10
21	10.319	0.287	7.144	2.736	0.152	5
22	15.289	3.441	7.922	3.214	0.713	7
23	24.442	0.409	17.459	6.187	0.387	12
24	23.058	0.929	16.798	5.091	0.241	12
25	7.364	0.629	4.092	2.320	0.323	8
26	9.301	0.082	5.743	3.169	0.308	6
27	21.137	0.829	12.479	7.525	0.304	12
28	32.389	0.774	15.971	14.448	1.197	13
29	20.962	0.662	12.067	7.982	0.252	10
30	8.011	0.901	5.212	1.822	0.076	3
31	22.724	1.921	17.114	3.178	0.511	12
32	22.828	1.850	17.215	3.491	0.272	13
33	18.642	1.119	10.071	7.088	0.364	9
34	5.101	0.331	2.483	2.214	0.072	6
35	8.672	0.324	4.728	3.330	0.290	5
Mean ± SD	17.159 ± 6.931	0.745 ± 0.697	11.062 ± 5.030	4.964 ± 2.768	0.387 ± 0.244	8.371 ± 2.819

[a]The unit is the number of μSv. [b]The unit is the number of person.

^{18}F-FDG PET 검사의 하루 평균 5.468 ± 1.485명의 환자를 검사하는 동안 평균 10.239 ± 3.925 μSv·day^{-1}의 피폭이 발생하였다. 방사선작업종사자의 일반적인 근무시간인 2,000시간을 기준으로 연간피폭선량을 환산하면 2.559 ± 0.981 μSv (약 2.56 mSv)가 된다. 즉, 방사선사 1명이 매일 5.468명의 ^{18}F-FDG PET를 1년 동안 시행한다면 연간수정체선량은 약 2.56 mSv로 예측할 수 있다. 기관마다 하루 동안에 검사하는 환자수가 다를 수 있으므로 환자 수에 따라 피폭선량을 예측해 보면 Table 7과 같다. 방사선사 1명이 매일 1년간 PET를 검사를 수행할 때 하루 환자 수를 10명으로 가정했을 때 연간수정체선량은 약 4690 μSv, 20명으로 가정했을 때는 9380 μSv로 예상할 수 있다. 2014년 대한핵의학회에서 발간된 전국 PET 검사 및 대수 통계에서 장비 대수가 기재되지 않은 1 기관을 뺀 129 기관에서 장비 1대당 하루 평균 검사 건수는 10.11건으로 나타났다(대한핵의학회 2014). 통상적으로 PET실 근무자가 2명이지만 1명이 근무한다고 가정하였을 때에도 수정체등가선량한도인 연평균 20 mSv에는 미치지 못하는 수치였다.

3. 사용량 1 mCi에 따른 수정체 피폭선량

핵의학 방사선작업종사자는 동일한 양의 방사성동위원소를 사용하더라도 검사환경에 따라 받게 되는 피폭선량의 차이가 나타날 수 있다. 그러나 일반적인 환경에서는 사용량에 따른 피폭량을 미리 알고 작업계획을 세운다면 더욱 효과적인 피폭관리를 할 수 있다. 검사종류별, 환자 체중별로 사용되는 방사성동위원소의 투여량이 각각 다르기 때문에 사용되는 선원 1 mCi 당 피폭되는 수정체 선량을 분석하여 체계적인 피폭관리에 도움이 되고자 했다.

^{99m}Tc를 이용한 검사를 시행하였을 때는 1 mCi 당 전체 피폭선량은 0.071 ± 0.021 μSv이고, 준비는 0.003 ± 0.003 μSv, 투여는 0.045 ± 0.014 μSv, 검사는 0.021 ± 0.012 μSv, 기타는

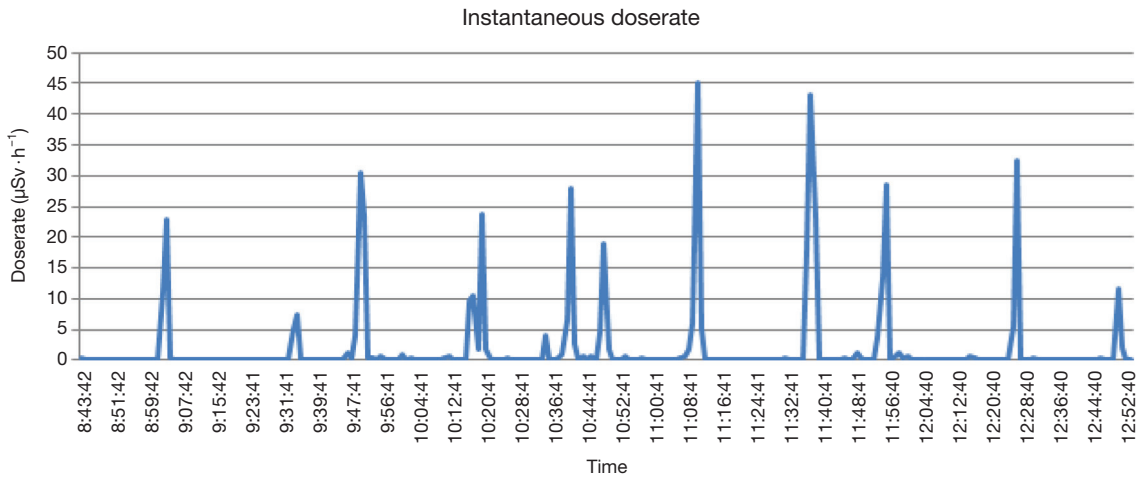

Fig. 6. ^{18}F-FDG PET san dose rate graph.

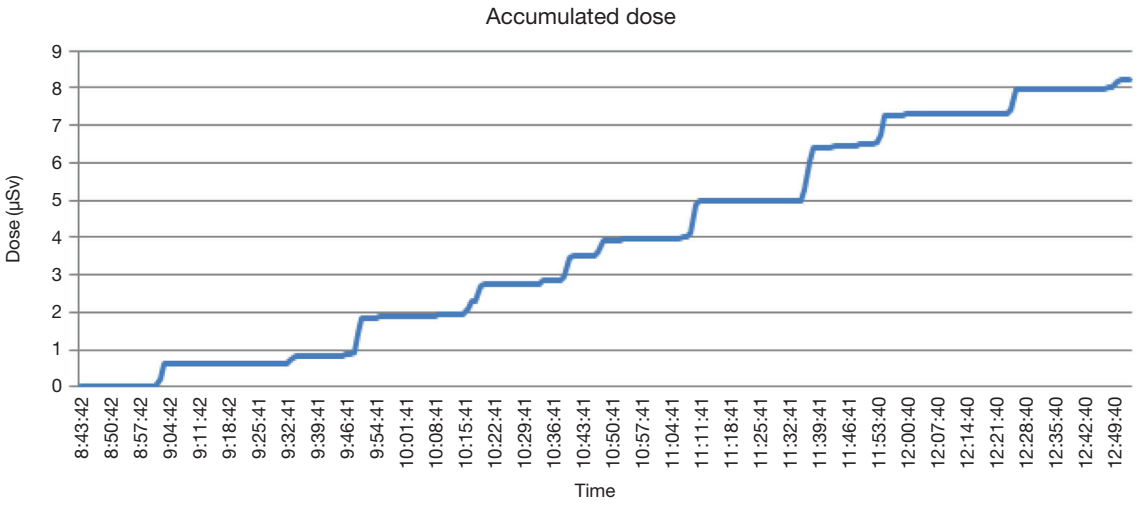

Fig. 7. ^{18}F-FDG PET scan accumulated dose graph.

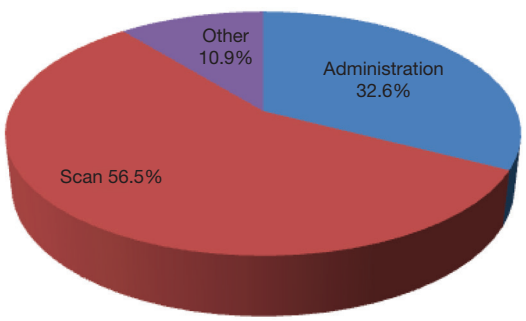

Fig. 8. Contribution of exposure in ^{18}F-FDG PET scan.

0.002±0.001 μSv로 나타났다(Table 8). 이 중 투여가 주사기에 선원이 집중된 형태로 수정체에 가깝게 위치하므로 피폭선량이 가장 높은 것으로 나타났다. 또한, 측정을 시행한 기관에서 ^{99m}Tc를 이용한 투여작업 시에는 L-block 등 수정체에 대해 차폐를 사용하지 않은 것도 원인으로 나타났다.

^{18}F를 이용한 검사를 시행하였을 때는 1 mCi 당 전체 피폭선량은 0.257±0.099 μSv이고, 투여는 0.083±0.040 μSv, 검사는 0.147±0.069 μSv, 기타는 0.027±0.012 μSv로 나타났다(Table 9). 이 중 근접한 거리에서 환자를 케어해야 하는 검사가 피폭선량이 가장 높게 나타났다.

고 찰

현재 원자력안전법에서 제시하는 종사자의 피폭선량의 관리는 유효선량한도 감시를 위한 법정선량계인 열형광선량계(Thermoluminescence dosimeter; TLD), 유리형광선량계(Radiophotoluminescence glass dosimeter; PLD) 및 광자극발광선량계(Optically stimulated luminescence dosimeter;

Table 5. ^{18}F-FDG PET scan with ED3 measured the lens dose administration[a]

Number of measurements	Total exposure dose[a]	Preparations[a]	Scan[a]	Other[a]	Patient[b]
1	4.044	1.813	1.803	0.429	4
2	5.643	0.911	3.733	0.999	4
3	13.040	3.405	7.975	1.660	6
4	11.873	2.758	8.399	0.715	7
5	6.435	2.189	3.301	0.945	4
6	9.877	3.587	5.345	0.945	5
7	19.799	6.754	12.197	0.848	6
8	11.163	3.964	5.931	1.268	4
9	3.784	1.583	1.970	0.230	3
10	11.316	2.844	8.078	0.394	4
11	7.331	2.847	3.060	1.423	3
12	7.758	3.085	3.683	0.990	6
13	10.632	3.469	6.463	0.700	6
14	5.777	1.034	4.189	0.554	5
15	14.643	5.530	7.841	1.272	6
16	14.590	3.877	9.725	0.988	5
17	9.847	2.178	7.015	0.654	4
18	12.088	3.646	7.753	0.689	3
19	8.658	1.802	5.669	1.187	6
20	11.330	4.953	5.744	0.633	6
21	9.082	2.037	6.535	0.511	5
22	7.465	3.777	3.027	0.662	3
23	15.334	5.579	8.765	0.989	7
24	16.062	4.434	10.634	0.994	5
25	14.989	4.445	9.215	1.329	8
26	7.490	2.007	4.986	0.497	5
27	10.557	5.101	3.307	2.149	5
28	10.389	2.469	6.053	1.867	7
29	9.093	4.038	3.438	1.617	7
30	16.419	6.709	7.969	1.742	7
31	8.631	1.981	5.350	1.300	4
32	10.345	1.915	6.390	2.040	5
33	14.453	4.535	7.537	2.381	5
34	10.227	3.791	4.643	1.793	6
35	3.602	0.788	2.632	0.182	3
36	7.743	2.734	3.967	1.043	6
37	8.383	3.026	3.674	1.684	5
38	11.093	5.101	4.735	1.258	6
39	10.656	4.869	4.242	1.545	8
40	9.892	2.566	6.517	0.809	6
41	21.241	6.880	12.551	1.811	8
42	11.594	2.392	7.655	1.547	8
43	5.568	1.785	2.126	1.658	6
44	6.903	0.922	5.620	0.361	4
45	13.163	7.250	5.158	0.755	6
46	8.483	1.975	5.350	1.158	9
47	3.687	1.625	0.713	1.349	6
Mean ± SD	10.259 ± 3.925	3.340 ± 1.660	5.801 ± 2.626	1.118 ± 0.529	5.468 ± 1.485

[a]The unit is the number of μSv. [b]The unit is the number of person.

OSLD) 등을 가슴부위에 착용하는 것을 원칙으로 하고 있다(원자력안전위원회 2014). 하지만 선량한도에 언급되어 있는 수정체나, 손, 발 등의 부위에 관한 관리방법은 따로 법에서 구체적으로 제시되지 않고 있다. 이전에는 수정체등가선량 한도가 몸통의 유효선량한도와 약 7배 차이가 있기 때문에 몸통에 패용하는 주 선량계가 연간 20 mSv를 넘기지 않는다면 몸통에 인접한 눈이 150 mSv를 넘을 가능성이 거의 없을 것으로 보았다(Cho *et al*. 2007). 하지만 ICRP 118에서 수정체 등가선량한도의 하향 권고로 인하여 주 선량계가 20 mSv를 넘지 않더라도 수정체 등가선량한도를 초과하여 피폭하는 종사자가 발생할 우려가 커지고 있다(ICRP 2012). 유효선량은 남녀 평균된 가상의 물리량이므로 실측할 수 있는 양이 아니다. 물리량이 실측 가능하다고 하더라도 체내 각 장기나 조직의 위치에 선량계를 두

Table 6. ^{99m}Tc-Bone scan, annual lens dose

Number of patients	Lens dose[a]	Annual lens dose[b]
1	2.05	512.5
5	10.25	2562.5
10	20.50	5125.0
15	30.75	7687.5
20	41.00	10250.0
25	51.25	12812.5

[a]The unit is the number of μSv · day^{-1}. [b]The unit is the number of μSv · year^{-1}.

Table 7. ^{18}F-FDG PET scan, annual lens dose

Number of patients	Lens dose[a]	Annual lens dose[b]
1	1.876	469
5	9.360	2345
10	18.720	4690
15	28.080	7035
20	37.440	9380
25	46.800	11725

[a]The unit is the number of μSv · day^{-1}. [b]The unit is the number of μSv · year^{-1}.

고 선량을 측정한다는 것은 비현실적이다. 따라서 방사선방호 목적에서 유효선량에 근사한 값을 가지면서 실측 가능한 어떤 물리량이 필요하다. 이 목적으로 실용량(operational quantity)을 정의한다. 실용량은 측정을 위한 것이므로 등가선량이 아니라 측정 가능한 선량당량을 기본으로 한다. 실용량을 정의할 목적으로 ICRU는 방사선장을 단순화한다. 그러한 기준방사선장으로 확장 방사선장과 정렬확장 방사선장을 사용한다. 확장된(expanded) 방사선장이란 점 P의 방사선장 속성을 주변까지 확장시킨 상태를 의미한다. 정렬확장(aligned and expanded)이란 점 P 주위의 방사선장을 확장할 뿐만 아니라 한 방향으로 정열까지 한 상태를 말한다. 실제에서 접하는 넓은 빔, 특히 선원에서 멀리 떨어져 방사선이 거의 평행하게 진행하는 경우에는 확장된 방사선장의 전형적인 경우가 된다. 서로 다른 방사선을 내는 복수 선원이 한 방향에서 원거리로부터 조사된다면 정렬된 방사선장의 특성을 나타낸다(ICRU 1993; Yokoyama and Aoki 2014). ICRU는 표준방사선장에 노출되는 모의체에서 정의되는 실용량으로서 방사선장을 측정(area monitoring)하기 위한 양인 주위선량당량(ambient dose equivalent) H*(d)와 방향성 선량당량(directional dose equivalent) H′(d,α), 그리고 사람의 피폭선량을 계측하기 위한 개인선량당량(personal dose equivalent) H_p(d)을 채택했다(Behrens and Dietze 2010). 이에 실용량 H_p(0.07)로 교정된 말단선량계인 ED3 (Active Extremity Dosimeter)를 사용하여 수정체선량을 측정하였다. 최근의 수정체선량 관련 연구에서는 방사성의약품별로 단위 작업 당 수정체 선량을 반복 측정한 결과로 연간수정체등가선량을 추정하였다(Ju *et al*. 2017; Kim *et al*. 2017; Song *et al*. 2017). 이를 통해 작업수행 시 사용된 동위원소

Table 8. ^{99m}Tc-Bone scan isotope use Conversion of dose per 1 mCi

Exposure situation	ED3 Measures[a]	Use amount[b]	Dose per 1 mCi[c]
Total	17.159 ± 6.931		0.071 ± 0.021
Preparations	0.745 ± 0.697		0.003 ± 0.003
Administration	11.062 ± 5.030	246.857 ± 83.009	0.045 ± 0.014
Scan	4.964 ± 2.768		0.021 ± 0.012
Other	0.387 ± 0.244		0.002 ± 0.001

[a]The unit is the number of μSv. [b]The unit is the number of mCi. [c]The unit is the number of μSv · mCi^{-1}.

Table 9. ^{18}F-FDG PET scan isotope use Conversion of dose per 1 mCi

Exposure situation	ED3 Measures[a]	Use amount[b]	Dose per 1 mCi[c]
Total	10.259 ± 3.925		0.257 ± 0.099
Preparations	3.340 ± 1.660	42.02 ± 11.95	0.083 ± 0.040
Administration	5.801 ± 2.626		0.147 ± 0.069
Scan	1.118 ± 0.529		0.027 ± 0.012

[a]The unit is the number of μSv. [b]The unit is the number of mCi. [c]The unit is the number of μSv · mCi^{-1}.

1 mCi 당 수정체 등가선량을 추측할 수 있었다. 하지만 실제 검사에서는 환자의 상태와 당시의 작업환경에 따라 피폭시간에 큰 차이가 생겨난다. 거동이 힘들거나 주사혈관 확보가 어려운 환자의 경우 방사성동위원소를 투여하는 시간이 증가한다. 이는 피폭선량에 큰 차이를 가져올 수 있다.

일반적으로 검사 중에는 환자가 검사테이블에 누워있기 때문에 환자와 방사선사 사이에 일정한 거리를 유지할 수 있다. 하지만 움직임이 많은 환자의 경우는 검사시간 내내 환자에게 근접하여 관찰하거나 움직이지 않도록 붙잡고 있어야 하는 상황이 발생한다. 이때 몸통은 납치마 착용으로 방사선으로부터 어느 정도 보호를 받을 수 있지만 환자와 매우 근접한 거리에 위치하고 있어야 하는 수정체는 보호받지 못하기 때문에 상대적으로 더 많은 피폭이 예상된다. 그러므로 하루 동안에 받는 피폭량은 환자 수뿐만 아니라 환자의 상태나 검사환경에도 많은 영향을 받을 것이다. 따라서 대체적으로 거동이 정상적인 환자를 대상으로 실험이나 측정을 목적으로 반복측정한 수정체 선량값을 이용하여 연간 선량을 추정한 경우에는 실제 방사선사가 받게 되는 수정체선량을 과소평가할 수 있다. 이는 실제로 실시된 수정체선량 측정에서도 나타난다. 수정체선량 실측을 위한 하루단위의 측정에서 선량은 환자 수에 반드시 비례하지는 않았으며 환자상태나 검사환경에 따라 같은 수의 환자에서도 약 3배 정도의 차이를 보였다. 따라서 핵의학과처럼 시간과 공간적으로 불균일한 방사선장에서 보다 실제적으로 연간 수정체선량을 예측하기 위해서는 장기간의 측정을 통한 신뢰도 높은 추정치가 필요하다.

결 론

핵의학종사자의 수정체선량을 확인하기 위하여 전자선량계인 ED3을 안경테에 부착하여 수정체에 가까운 위치에서 측정을 실시하였다. ^{99m}Tc-Bone scan에서는 검사과정을 준비, 투여, 검사, 기타로 4가지로 분류하였다.'준비'작업은 납으로 차폐된 분배대 내에서 실시하였으며, 그 외의 작업에서는 납치마 외의 다른 차폐를 사용하지 않았다. 그 결과 8.371±2.819명의 환자를 검사하는 동안 17.159±6.931 μSv의 피폭이 발생하였고 피폭이 가장 많은 작업은 '투여' 작업이었다. 동일한 조건으로 방사선사 1명이 매일 10명의 환자를 1년간 검사한다고 가정하였을 때는 약 5125 μSv (5.13 mSv)를 피폭하게 되며 ^{99m}Tc 1 mCi 당 수정체 피폭선량은 0.071±0.021 μSv이었다. ^{18}F-FDG PET에서는 검사과정을 투여, 검사, 기타로 3가지로 분류하였다. '투여'작업은 대부분 L-block을 사용하였고 그 외의 작업에는 별다른 차폐를 사용하지 않았다. 그 결과 하루 평균 5.468±1.485명의 환자를 검사하는 동안 11.274±4.313 μSv의 피폭이 발생하였고 피폭이 가장 많은 작업은 '검사'작업이었다. 동일한 조건으로 방사선사 1명이 매일 10명의 환자를 1년간 검사한다고 가정하였을 때는 약 4680 μSv (4.68 mSv)를 피폭하게 되며, ^{18}F 1 mCi 당 수정체 피폭선량은 0.257±0.099 μSv이었다. ED3를 이용한 측정 결과 수정체 등가선량한도에 못 미치는 값이지만 작업환경에 따라 높은 선량에 피폭되는 작업자가 발생할 우려가 있는 만큼 수정체선량에 대한 지속적인 관리가 요구되고 점차 강화되는 선량한도에 따른 수정체 선량 평가나 관리체계 구축에 따른 기초자료로 각 의료기관에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Radiation Safety Foundation (KORSAFe) and the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC), Republic of Korea (Grant No. 1305033).

참 고 문 헌

대한핵의학회. 2014a. 2014년 전국 인력 RI 장비 현황 합계.

대한핵의학회. 2014b. 2014년 전국 PET 검사 및 대수.

원자력안전위원회. 2014. 개인 피폭방사선량의 평가 및 관리에 관한 규정. 원자력안전위원회고시 제2014-69호.

원자력안전위원회. 2016a. 원자력안전법 시행령 대통령령 제27678호.

원자력안전위원회. 2016b. Establishment of Dose Constrains for Radiation Workers in Nuclear Medicine. NSTAR-15NS11-01.

한국동위원소협회. 2010. 방사성동위원소 핵종정보.

Behrens R and Dietze G. 2010. Monitoring the eye lens: which dose quantity is adequate?. *Phys. Med. Biol.* **55**(14):4047-4062.

Cho JK, Cho HS and Han TJ. 2007. Efficacy of Lens Shielding Device to Prevent Cataract with Radiotherapy for Orbit or Ocular Adnexal Tumor. *J. Korea Cont. Assoc.* **7**(12):139-144.

ICRP. 1990. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Pergamon Press, New York.

ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Pergamon Press, New York.

ICRP. 2012. ICRP Statement on Tissue Reaction and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs-Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118. Pergamon Press. Oxford.

ICRU. 1993. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report 51. Bethesda.

Ju YJ, Dong KR, Choi EJ, Kwak JG, Ryu JK and Chung WK. 2017. A Study on Exposure Dose from Injection Work and Elution Work for Radiation Workers and Frequent Workers in Nuclear Medicine. *J. Radia. Ind.* **11**(1):19-25.

Kim HG, Kong TY, Dong KR and Choi EJ. 2017. A Review of Radiation Field Characteristics and Field Tests for Estimating on the Extremity Dose under Contact Tasks with Radioactive Materials. *J. Radiat. Ind.* **11**(3):123-130.

Song HJ, Ju YJ, Jang H, Dong KR, Kang KW, Choi EJ, Kwak JG, Ryu JK and Chung WK. 2017. Estimation of Lens Dose of Radioactive Isotopes Using ED3. *J. Radia. Ind.* **11**(1):19-25.

Yokoyama S and Aoki Katsunori. 2014. Calculation of equivalent dose for the lens of the eye in a positron field using EGS5. *Prog. Nucl. Sci. Technol.* **4**:788-792.

Received: 8 November 2017
Revised: 22 November 2017
Revision accepted: 28 November 2017