creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266820

2018년 2월
석사학위 논문

핵의학 방사선작업종사자의 수정체선량 평가

조선대학교 대학원

원자력공학과

강 경 원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

핵의학 방사선작업종사자의 수정체선량 평가

Evaluation of lens dose of nuclear medicine radiation workers

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원

원자력공학과

강 경 원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

핵의학 방사선작업종사자의 수정체선량 평가

지도교수 정 운 관

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

강 경 원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

강경원의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 이 경 진 (인)

위 원 조선대학교 교 수 송 종 순 (인)

위 원 조선대학교 교 수 정 운 관 (인)

2017년 11월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

List of Figures iii
List of Tables iv
ABSTRACT v
제1장 서론 1
제1절 연구배경 1
제2절 연구목적 3
제2장 본론 5
제1절 배경이론 5
1. 흡수선량 5
2. 등가선량 6
3. 선량한도 7
4. 실용량 8
제2절 핵의학과 사용 방사성의약품 및 방출 방사선의 특성 .. 12
1. ^{99m}Tc 표지 방사성의약품 12
2. ^{99m}Tc의 특성 12
3. 양전자방출핵종 표지 방사성의약품 13
4. 양전자방출핵종의 특성 13
5. 방출 방사선의 특성 14
제3절 수정체 등가선량의 실용량 15
제3장 연구재료 및 방법 16
제1절 연구재료 16
1. ED3(Active Extremity Dosimeter) 16
2. OSL 및 판독시스템 19

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절. 대상 및 방법 ····· 20
1. 측정 대상 ····· 20
2. 측정 방법 ····· 22
제4장 결과 ····· 25
제1절. 방사선작업 분석에 따른 수정체등가선량 평가 ····· 25
1. ^{99m}Tc-Bone scan ····· 25
2. ^{18}F-FDG PET ····· 28
제2절. 환자 수에 따른 수정체 피폭선량 ····· 32
1. ^{99m}Tc-Bone scan ····· 32
2. ^{18}F-FDG PET ····· 32
제3절 사용량에 따른 수정체 피폭선량(1 mCi 환산) ····· 34
제4절 차폐종류에 따른 수정체선량 비교 ····· 36
제5절 ED3과 OSL로 평가된 수정체 선량 비교 ····· 42
제6절 동일 기관 방사선사들의 OSL 수정체선량 비교 ····· 43
제5장 결론 ····· 45
참고문헌 ····· 47

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Figures

Figure 1. 주위선량당량(a)과 방향성선량당량(b) 측정의 개념도 ····· 10
Figure 2. ED3 Active Extremity Detector ····· 16
Figure 3. Landauer(USA)사의 Auto 200 Dosimetry Reader ····· 19
Figure 4. ED3 착용위치 ····· 22
Figure 5. 전형적인 ^{99m}Tc-Bone scan Doserate 그래프 ····· 25
Figure 6. 전형적인 ^{99m}Tc-Bone scan Accumulated Dose 그래프 ····· 26
Figure 7. 전형적인 ^{18}F-FDG PET Doserate 그래프 ····· 28
Figure 8. 전형적인 ^{18}F-FDG PET Accumulated Dose 그래프 ····· 28
Figure 9. 작업별 피폭기여도 ····· 31
Figure 10. ^{99m}Tc-Bone scan 투여 작업 시 차폐체 별 수정체선량 ····· 41

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Tables

Table 1. 방사선의 종류와 에너지에 따른 방사선가중치(ICRP 2007) ····· 6
Table 2. 선량한도(원자력안전법 시행령 제2조 제4호 관련) [별표1] ····· 7
Table 3. 실용량의 종류와 목적 ····· 9
Table 4. 핵의학과 사용 방사성동위원소 핵종정보 ····· 14
Table 5. ED3 Active Extremity Detector ····· 17
Table 6. ED3 교정 결과 ····· 18
Table 7. Auto 200 Dosimetry Reader의 Technical specifications ····· 19
Table 8. 전국 핵의학과 동위원소 구입 및 사용 현황(2014년) ····· 20
Table 9. 핵의학 종사자의 직종별 피폭선량 ····· 21
Table 10. 측정대상 검사의 방사선 작업분류 ····· 23
Table 11. ED3로 측정된 ^{99m}Tc-Bone scan 시행 시 수정체선량 ····· 26
Table 12. ED3로 측정된 ^{18}F-FDG PET 시행 시 수정체선량 ····· 29
Table 13. ^{99m}Tc-Bone scan 시행 시 연간수정체선량 ····· 32
Table 14. ^{18}F-FDG PET 시행 시 연간수정체선량 ····· 33
Table 15. ^{99m}Tc-Bone scan 시행 시 동위원소 사용 1 mCi 당 피폭선량 환산 ····· 35
Table 16. ^{18}F-FDG PET 시행 시 동위원소 사용 1 mCi 당 피폭선량 환산 ····· 35
Table 17. 차폐체의 종류 및 특징 ····· 36
Table 18. ^{99m}Tc-Bone scan에서 방사성의약품 투여작업 시 차폐체 별 수정체선량 ···· 38
Table 19. 방사성동위원소 투여작업 시 차폐체 별 수정체 등가선량 비교 분석결과 40
Table 20. ^{99m}Tc-Bone scan에서 동위원소 사용 1 mCi 당 차폐체 별 수정체선량 ····· 41
Table 21. ED3와 OSL의 수정체 선량 ····· 42
Table 22. ED3와 OSL의 수정체 선량 비교 분석결과 ····· 42
Table 23. ^{99m}Tc-Bone scan에서 동위원소 사용 1mCi 당 차폐체 별 수정체선량 ····· 43

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Evaluation of lens dose of nuclear medicine radiation workers

KYEONGWON, KANG
Advisor : Prof. Chung, Woon-kwan, Ph.D
Department of Nuclear Engineering,
Graduate School of Chosun University

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, 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 ED3 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, based on 8.37 ± 2.82 patients/day. The annual lens dose in ^{18}F-FDG PET is 2.56 ± 0.98 mSv/day, based on 5.47 ± 1.48 patients/day. 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. Also, as a result of the shielding performance test, L-block is the most outstanding among L-block, syringe shield, and lead glass. Based on this study, It is expected that it will build baseline of the evaluation and management system of the lens dose in each medical institution.

Keywords : Nuclear medicine, Radiation workers, Lens dose

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제1장 서론

제1절 연구배경

수정체는 방사선에 민감한 조직으로써 적색골수, 생식세포 등과 함께 방사선감수성이 가장 높은 장기로 분류된다.[1] 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.[2]

눈의 수정체나 국부 피부는 유효선량한도만으로는 항상 방호할 수 없기 때문에 유효선량한도 외에 수정체와 피부에 대한 한도가 ICRP 60에서 설정되었다.[3] 이를 반영한 국내 원자력안전법에서도 유효선량한도 뿐만 아니라 수정체등가선량한도를 따로 두어 관리하도록 하고 있다.[4]

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 Gy정도로 낮은 것으로 나타났다. 이에 따라 ICRP 118의 조직반응에 대한 성명서에서 장기간의 관찰과 최근 가용한 역학 조사의 결과를 통하여 수정체 등가선량한도를 5년 동안 평균 20 mSv(5년간 100 mSv), 그리고 한 해에 50 mSv를 초과하지 않는 것으로 하향 조정하였다.[5] 이는 기존 종사자들이 수정체 선량한도를 초과하여 피폭할 것이라는 우려를 낳고 있다.

또한 ICRP103에서의 선량제약치 설정 권고로 인해 각 사용기관에서 종사자의 피폭선량관리가 더욱 중요해진 상황이다.[1] 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.[6]

방사선작업종사자의 피폭선량관리가 중요해지는 상황과 더불어 수정체등가선량 하향 권고로 인해 그동안 잘 관리되지 않던 방사선작업종사자의 수정체 등가선량에 대한 적

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

절한 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 업무 특성상 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 ㎜Sv으로 최소 0.01 ㎜Sv, 최대 23.31 ㎜Sv를 보였다.[6] 이는 수정체 등가선량한도에 가깝거나 초과하여 피폭한 종자사가 존재함을 시사한다. 따라서 핵의학 종사자의 수정체등가선량에 대한 적절한 평가기준과 방호대책 마련이 시급하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절. 연구목적

현재 원자력안전법에서 제시하는 종사자의 피폭선량 관리는 유효선량한도 감시를 위한 법정선량계인 TLD, OSL 등을 가슴부위에 착용하는 것을 원칙으로 하고 있다.[7] 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.[2] 하지만 ICRP 118에서 수정체 등가선량한도의 하향 권고로 인하여 주 선량계가 20 mSv를 넘지 않더라도 수정체 등가선량한도를 초과하여 피폭하는 종사자가 발생할 우려가 커지고 있다.

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.[8] 이를 통해 작업수행 시 사용된 동위원소 1 mCi 당 수정체에 피폭하는 선량을 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 증가하기 때문이다.

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 위치한 수정체는 보호 받지 못하기 때문에 상대적으로 더 많은 피폭이 예상된다. 그러므로 하루 동안에 받는 피폭량은 환자 수뿐만 아니라 환자의 상태나 검사환경에도 많은 영향을 받을 것이다. 따라서 거동에 불편함이 없는 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 하루 단위의 측정에서 선량은 환자 수에 반드시 비례하지는 않았으며 환자상태나 검사환경에 따라 같은 수의 환자에서도 약 3배 정도의 차이를 보였다. 따라서 핵의학과처럼 시

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

간과 공간적으로 불균일한 방사선장에서 보다 실제적으로 연간수정체선량을 예측하기 위해서는 장기간의 측정을 통한 신뢰도 높은 추정치가 필요하다.

현재 국내에서는 수정체선량 측정을 위한 전용의 측정기를 구비하기 어려운 환경이다. 그러므로 기관마다 수정체선량 전용의 선량계를 구비할 수 없는 점을 고려하여 추가적으로 실험 실시 기관에서 사용 중인 법정선량계(OSL)의 수정체선량 판독값과 비교평가를 실시하였다. ED3 전자선량계를 착용하는 동일한 기간 동안 OSL을 가슴부위에 착용하여 한 달 단위로 판독한 수정체 선량값을 ED3 측정값과 비교하였다. 두 선량계 간 유의한 관계가 밝혀진다면 OSL의 선량판독값 만으로도 수정체에 피폭된 선량을 예측하여 수정체 선량한도를 초과하거나 초과할 우려가 있는 작업이나 종사자에 대하여 선량저감화 활동을 실시할 수 있을 것이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2장 본론

제1절 배경이론

1. 흡수선량

방사선량(radiation dose) 또는 줄여서 선량이란 방사선에 노출되는 양을 나타내기 위한 척도이다. 노출이란 에너지 흐름인 방사선의 진로에 물체가 있어서 그 물체가 방사선 에너지의 일부 또는 전부를 흡수하는 현상이기 때문에 선량을 일반적인 개념으로 나타낸다면 물체 단위질량 당 흡수된 방사선 에너지량이 될 것이다. 이 양을 흡수선량(absorbed dose)이라 한다.

흡수선량을 구체적으로 정의하기 위해서 먼저 부여에너지(imparted energy) ε을 정의하는데

$$\epsilon = Rin - Rout + \sum Q[J]$$

로 나타낸다. 여기서 R_{in} 은 관심 체적에 입사되는 방사에너지이고 R_{out} 은 빠져나오는 방사에너지 ∑Q는 체적 내 정지질량의 총변화이다. 즉 $\sum Q = m_{before} - m_{after}$로 되므로 계내의 정지질량이 증가하면 ∑Q는 음의 값을 가지며, 감소하는 경우에는 양의 값을 갖는다. 핵반응을 수반하지 않는 감마선, X선, 전자선 등에 노출될 때는 정지질량의 변화는 없으므로 ∑Q는 0이다. 부여에너지는 확률론적인 상호작용의 결과로 발생하므로 확률론적 물리량이다.

또, 부여비에너지(specific energy)를

$$z = \frac{\epsilon}{m}\,[Jkg^{-1}]$$

로 정의한다. 부여비에너지 z 역시 확률론적 물리량이다.

그러면 흡수선량 D는 다음과 같이 정의된다.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} = \lim_{m \to 0} \bar{z}\,[Jkg^{-1}]$$

위 식에서 보듯이 흡수선량은 부여비에너지의 평균치로 산출되므로 확률론적 물리량이 아니라 결정론적 물리량이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

흡수선량은 가장 기본적 방사선량으로서 모든 방사선, 모든 피폭 물질에서 정의된다. 흡수선량의 기본단위 Jkg^{-1}을 특별명칭으로 그레이(Gy)라 부른다. 즉, 1 Gy = 1 Jkg^{-1} 이다.

2. 등가선량

선량당량이 서로 다른 방사선이 미치는 생물학적 작용의 차이를 고려하기 위해 고안된 양이지만 진행이 매우 복잡한 생물학적 영향의 과정을 순전히 물리적 양으로 표현하려는 데는 한계와 어려움이 있다. 따라서 방사선 방호를 주관하는 ICRP는 흡수선량 보정에 선질계수를 사용하는 대신, 방사선의 물리적 특성과 생물학적 실험에서 관찰된 자료(예: 생물학적효과비)들을 종합한 판단에 근거하여 선원 방사선별로 적절히 지정한 방사선가중치(radiation weighting factor) w_R을 적용한 등가선량(equivalent dose)을 사용하기로 결정했다.

$$H = D_R w_R$$

여기서 D_R은 방사선 R로 인한 조직 흡수선량이며 w_R은 그 흡수선량을 초래한 방사선의 가중치로서 다음 표와 같다[Table 1]. 가중치는 상대적인 양이므로 단위가 없다. 따라서 등가선량 H의 단위도 흡수선량 D와 같은 J/kg이 기본단위이고 그 특별명칭도 시버트(Sv)로 한다.

Table 1. 방사선의 종류와 에너지에 따른 방사선가중치(ICRP 2007).

방사선의 종류 및 에너지 범위	방사선가중치 W_R
광자(모든 에너지)	1.0
전자[a] 및 뮤온(모든 에너지)	1.0
양성자(반도 양성자 제외)	2
중성자	에너지 함수로 산출
알파입자, 핵분열파편, 무거운 이온	20[b]

a) DNA에 부착된 원자로부터 방출되는 Auger전자 제외. 이 경우는 마이크로선량계측 관점에서 평가 필요

b) LET가 200 keV/μm 이상인 중하전입자의 경우 불확실성 있음.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 선량한도

외부에 피폭하는 방사선량과 내부에 피폭하는 방사선량을 합한 피폭방사선량의 상한값으로 그 값은 다음과 같다[Table 2].[4]

Table 2. 선량한도(원자력안전법 시행령 제2조 제4호 관련) [별표1]

구 분	유효선량한도(㎜Sv)	등가선량한도(㎜Sv)	
		수정체	손·발 및 피부
1. 방사선작업종사자	연간 50을 넘지 않는 범위에서 5년간 100	연간 150	연간 500
2. 수시출입자, 운반종사자 및 법 제96조 단서에 따라 교육훈련 등의 목적으로 위원회가 인정한 18세 미만인 사람	연간 6	연간 15	연간 50
3. 제1호 및 제2호 외의 사람	연간 1	연간 15	연간 50

비고

1. "선량한도"란 매년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간 피폭하는 방사선량을 말한다.
2. 제1호 또는 제2호에 해당하는 사람 중 임신이 확인된 사람과 제3호에 해당하는 사람 중 제79조제1항에 따른 방사성동위원소 등을 제한적 또는 일시적으로 사용하는 사람에 대한 선량한도는 위의 표에도 불구하고 위원회가 정하여 고시한다.
3. 제2호에서 "운반종사자"란 방사선관리구역 밖에서 제2조제12호에 따른 방사성물질 등을 운반하는 사람으로서 방사선작업종사자에 해당하지 않는 사람을 말한다.
4. 제3호에 해당하는 사람에 대하여 연간 1밀리시버트를 넘는 경우가 발생한 경우로서 위원회가 인정하는 경우에는 위 표 제3호의 유효선량한도값에도 불구하고 피폭방사선량의 합을 5년간 평균하여 연간 1밀리시버트를 넘지 않는 범위에서 해당 1밀리시버트를 넘는 값을 유효선량한도로 한다.
5. 제1호의 유효선량한도란 및 비고 제4호에서 "5년간"이란 1998년 1월 1일부터 기산되는 5년마다의 기간을 말한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 실용량

유효선량은 남녀 평균된 가상의 물리량이므로 실측할 수 있는 양이 아니다. 물리량이 실측 가능하다고 하더라도 체내 각 장기나 조직의 위치에 선량계를 두고 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.

ICRU는 표준방사선장에 노출되는 모의체에서 정의되는 실용량으로서 Table 3.에 요약한 것처럼 지역의 방사선장을 측정(area monitoring)하기 위한 양인 주위선량당량(ambient dose equivalent) $H^*(d)$와 방향성선량당량(directional dose equivalent) $H'(d,\alpha)$, 그리고 사람의 피폭선량을 계측하기 위한 개인선량당량(personal dose equivalent) $H_p(d)$을 채택했다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3. 실용량의 종류와 목적

목적	지역감시		개인감시
실용량 명칭	주위선량당량	방향성선량당량	개인선량당량
기호	$H^*(d)$	$H'(d,\alpha)$	$H_p(d)$
정의 방사선장	정렬방사선장	확장방사선장	실제방사선장
지정 점 위치	ICRU구 주축 위 d mm 깊이	ICRU구 주축과 각도 α인 반경 위 d mm깊이	인체에 준하는 물체 위 연조직 d mm 깊이
주목적	심부선량당량률 $\dot{H}^*(10)$로 유효선량률 대체	표층선량당량률 $\dot{H}(0.07)$과 $\dot{H}(3)$로 피부 및 수정체 등가선량률 대체	$H_p(10)$, $H_p(3)$, $H_p(0.07)$ 로 각각 유효선량(또는 체내 깊은 조직의 등가선량), 수정체 등가선량, 피부 등가선량 대체
교정되는 기기	선량률 측정기, 서베이메터	원론적으로 왼쪽과 같으나 실제로 적용은 드뭄	개인선량계

주위선량당량이란 어떤 장소에 선량을 계측하고자 하는 관심 있는 점 P가 있을 때 점 P에서의 방사선장을 정렬확장시킨 방사선장에 직정 30 cm 의 ICRU 표준 조직조성을 가진 구형 모의체(ICRU 기준모의체 또는 ICRU구라 부른다.)를 두었을 때 그 주축상 표면으로부터 지정된 깊이 d에서의 선량당량이다[Figure 1]. 통상 사용되는 주위선량당량은 10 mm 깊이와 0.07 mm(70 μm) 깊이의 것 두 가지로서 각각 H'(10)과 H'(0.07)로 표기한다. 여기서 상첨자 *는 주축상의 양을 의미하며 괄호 내 수치는 mm단위의 깊이를 의미한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

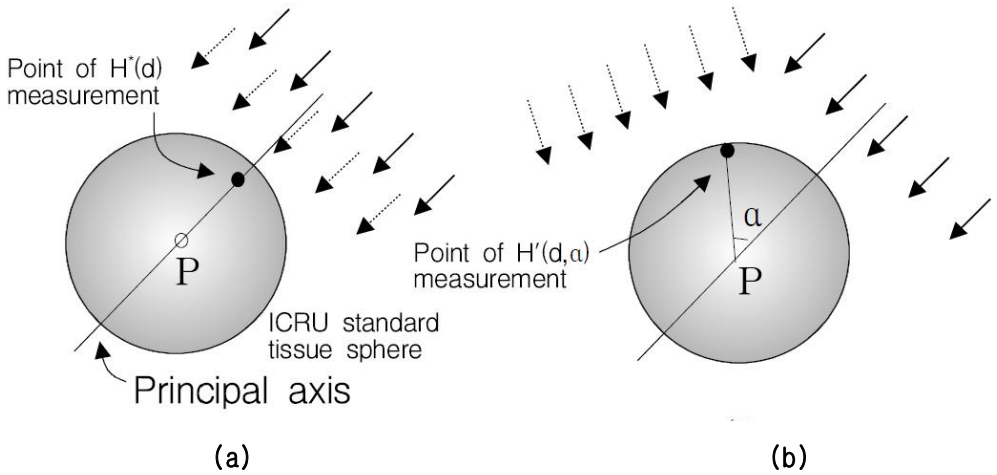


Figure 1. 주위선량당량(a)과 방향성선량당량(b) 측정의 개념도.

$H^*(10)$은 인체 내 깊은 위치에 있는 중요한 조직들의 선량을 대표하며 $H^*(0.07)$은 피부선량을 대표한다. 수정체 선량을 대표하는 $H^*(3)$도 정의되어 있지만 종종 간과되어 왔다. 그러나 2011년 수정체 선량한도가 연간 150 mSv로부터 연평균 20 mSv수준으로 크게 낮아진 후에는 상황에 따라 수정체 선량을 별도로 감시하기 위해 3 mm 깊이의 선량을 측정할 필요도 제기된다.

방향성선량당량 $H'(d,\alpha)$는 투과력이 약한 방사선에서 특별한 의미를 가지는데 확장된 방사선장에서 평가하며 깊이 d는 피부선량을 평가하는 0.07 mm가 주로 사용되지만 필요에 따라서는 수정체 선량을 나타내는 3 mm 깊이도 사용 할 수 있다. 여기서 α는 Figure 1.에서 보인 것처럼 ICRU 표준 모의체 내에서 선량이 평가되는 점이 주축상의 반경과 이루는 각도이다. 비록 방향성선량당량의 본래의 정의는 ICRU 표준 모의체의 내의 양이지만 이 선량의 의미가 중요한 투과력이 약한 방사선-예를 들면 베타나 연질 X선-의 경우 이들에 의해 생성되는 2차 전자의 비정이 짧아 ICRU구의 곡면효과가 무시될 수 있으므로 편의를 위해 같은 조성을 갖는 평판 모의체를 사용해도 무방하다.

개인선량당량 $H_p(d)$는 방사선장에 노출된 인체에 준하는 물체 위의 연조직 깊이 d(mm)에서 선량당량이다. 선량이 평가되는 깊이는 10 mm, 3 mm, 그리고 0.07 mm가 사용된다. 흔히 $H_p(10)$을 심부선량 deep dose라고 부르며 반대로 $H_p(0.07)$을 표층선량 shallow dose이라 부른다. 심부선량은 인체 깊숙이 있는 중요한 조직의 선량을 대신 내며 표층선량은 피부선량을 나타낸다. $H_p(3)$은 수정체 선량에 해당한다. 개인선량당

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

량도 방사선이 입사되는 방향의 영향을 받으므로 $H_p(d)$는 $H_p(d,\alpha)$의 형식으로 표기할 필요가 있을 때도 있다.

개인선량당량은 표면에서 지정된 깊이에서의 선량이므로 이의 측정은 인체에 상당하는 적절한 물체(ICRU 표준모의체를 적용 할 수도 있다.) 위에 설치된 선량계로 측정하게 된다. 이때 지정된 깊이 d는 선량계 위에 해당 두께의 연조직 물질을 배치함으로서 맞출 수 있다. 어떤 위치에서 공기커마 K_a를 알면 이로부터 지역감시를 위한 실용량을 산출하는 환산계수 $H^*(10)/K_a$ 및 $H'(0.07,0)/K_a$를 다음의 실험식으로 산출할 수도 있다.

$$\frac{H^*(10)}{K_a} = \frac{x}{(ax^2+bx+c)} + dtan^{-1}(gx)\,[SvGy^{-1}], 20\,keV \le E \le 250\,keV$$

여기서 $x = \log(\frac{E}{E_0})$이고 $E_0 = 9.85\,keV$, E는 keV단위의 광자 에너지이며 상수는

a=1.465, b=-4.414, c=4.789, d=0.7006, g=0.6519이다.

같은 방법으로 표층선량당량은 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\frac{H'(0.07,0)}{K_a} = a + bx + cx^d \exp(gx^2)\,[SvGy^{-1}],\ 10\,keV \le E \le 250\,keV$$

여기서 a=0.9505, b=0009432, c=0.2302, d=5.082, g=-0.6997 이다.[2]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 핵의학과 사용 방사성의약품 및 방출 방사선의 특성

1. ^{99m}Tc 표지 방사성의약품

핵의학에서 쓰이는 진단방사성의약품의 약 80%을 ^{99m}Tc으로 표지된 방사성의약품이 차지하고 있다. 섬광카메라(scintillation camera)로 영상을 만들 때 사용되는 여러 방사성동위원소들 중 ^{99m}Tc은 가장 이상적인 체내 영상용 방사성의약품의 조건을 충족하며, 다른 동위원소들에 비해 ^{99}Mo-^{99m}Tc 발생기로부터 값싸고 손쉽게 구할 수 있기 때문에 핵의학과에서 가장 널리 사용되고 있는 방사성동위원소이다.

2. ^{99m}Tc의 특성

테크네슘은 안정 동위원소가 없고 방사성동위원소로만 존재하는데, 그 중에서 반감기가 가장 긴 ^{98}Tc의 반감기가 420만년이며, ^{238}U이 자발적으로 핵분열 시 생기는 극미량의 ^{99}Tc(반감기 2.1×10^{5}년)만이 자연계에 존재한다. ^{99m}Tc은 ^{99}Mo가 알루미나칼럼에 흡착되어진 발생기에서 반감기가 2.8일인 ^{99}Mo의 베타, 감마붕괴를 통해 반감기가 6시간이고 141 keV의 감마선을 방출하는 ^{99m}Tc로 생성된다.

$$^{99}Mo(t_{1/2}=67h)\rightarrow{}^{99m}Tc(t1/2=6h)\rightarrow{}^{99}Tc(t_{1/2}=210{,}000y)$$

^{99m}Tc의 붕괴방정식은 γ 붕괴와는 차별된 에너지 준위 간의 γ전이(IT; isometric transition)이다. 일반적으로 γ붕괴는 붕괴입자의 방출로 생성된 불안정한 여기상태에서 원자핵이 안정한 기저 상태로 전이되면서 고에너지의 전자선 방출이 됨을 의미한다. 이러한 여기상태에서 기저상태로의 에너지 변화는 수명이 매우 짧아 독립된 붕괴형식으로 간주하지 않지만 ^{99m}Tc과 같이 여기상태에 있으면서 통상적인 방법으로 측정이 가능한(1초 이상) 반감기를 지닌 원자핵일 경우 이를 핵이성체라 하며 이러한 핵이성체를 분류하기 위하여 ^{99m}Tc과 같이 질량수 옆에 m을 붙인다. 이러한 핵이성체는 기저상태의 원자핵과 원자번호, 질량수는 같으나 에너지 상태가 다르다. ^{99m}Tc이 방출하는 141 keV 의 감마선은 조직을 잘 투과하고 (4.6 cm의 조직 통과 시 50%가 흡수됨), 조준(collimation)이 쉽다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 양전자방출핵종 표지 방사성의약품

양전자방출핵종 표지 방사성의약품의 초기 연구는 주로 사이클로트론에서 생산된 방사성동위원소인 ^{11}C 으로 표지된 화합물로 이루어졌으며, 1978년 ^{18}F-FDG의 합성이 처음 보고됨에 따라 ^{18}F으로 표지된 화합물들에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 양전자는 질량과 전하의 크기는 전자와 똑같지만 전하의 부호가 전자와 반대인 양전하를 띠는 원자구성입자로 중성자 대 양성자의 비율이 낮은 원자들에게서 방출된다. 양전자방출핵종은 양성자 하나가 양전자를 방출하여 중성자 하나로 변하며 중성자/양성자 비율이 증가하여 더 안정한 원자로 변하게 된다. 이때 방출된 양전자는 주변의 전자를 만나 함께 소멸(annihilation)하면서 511 keV의 감마선 2개가 정반대 방향으로 방출하게 되는데 이 감마선을 포착할 수 있는 PET장비 등을 이용하여 영상을 만들 수 있다.

4. 양전자방출핵종의 특성

양전자방출핵종은 주로 안정동위원소 선의 아래쪽에 존재하며 안정 동위원소에 비해 양성자가 많거나 중성자가 적은 동위원소로 양전자 방출 후 중성자의 증가로 안정한 동위원소로 변한다.

수많은 양전자방출핵종 중에 체내 사용에 적당한 성질을 가진 핵종으로는 사이클로트론에서 생산되는 ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O, ^{18}F, ^{64}Cu, ^{76}Br, ^{94m}Tc, ^{124}I 등이 있으며 발생기에서 생산할 수 있는 ^{68}Ga, ^{82}Rb 등이 있다.

^{11}C, ^{13}N, ^{15}O 은 짧은 반감기 때문에 주로 사이클로트론이 있는 곳에서만 사용이 가능하며, 또한 자연에 존재하는 각각의 원소와 질량수만 차이가 있으므로 자연에 있는 생활성이 있는 화합물과 동일한 방사성의약품을 얻을 수 있는 장점이 있다. 반면 ^{18}F는 비교적 긴 반감기를 갖기 때문에 ^{18}F로 표지된 방사성의약품을 비교적 가까운 거리에 있는 다른 센터로 운반이 가능하다. 불소를 함유하지 않은 생활성이 있는 화합물은 수소 또는 수산기를 ^{18}F로 치환하는 경우가 많은데 이때 입체적인 변화는 초래하지 않으나 전기음성도 증가에 따른 생화학적인 성질에 변화가 있을 수 있다. 그러나 일반적으로 이러한 변화는 매우 작을뿐더러 ^{18}F의 비교적 긴 반감기는 다단계 표지반응을 할 때 그리고 방사성의약품의 동역학을 연구할 때 장점으로 작용한다.[9]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5. 방출 방사선의 특성

Table 4. 핵의학과 사용 방사성동위원소 핵종정보[9]

핵종	반감기	붕괴 형식	주요 방출 방사선(MeV)		주요생성반응
			β선 혹은 α선 에너지와 방출 비율	γ선 에너지와 방출 비율	
^{18}F	109.8 m	β^+ EC	0.633-96.7% 3.3%	0.511 β^+	$^{18}O(p,n)^{18}F$ $^{20}Ne(d,\alpha)^{18}F$
^{99m}Tc	6.01 h	IT	100%	0.0022-매우 낮음 0.141 -89.1% 0.143 -매우 낮음 0.0184-6.1% Tc-Kα 0.0206-1.2% Tc-Kβ	$U(n,f)^{99m}Tc$ β^-(87.7%) $^{99}Mo \rightarrow ^{99m}Tc$ 65.94h
	딸 ^{99}Tc	β^-	0.347-매우 낮음 0.436-매우 낮음	0.0896- 매우 낮음	

측정대상 방사선 중 ^{99m}Tc에서 주로 방출되는 방사선은 0.141 MeV의 γ선이며 반감기는 약 6시간이다. ^{18}F에서는 0.633 MeV의 β^+선이 방출되고 이로 인해 0.511 MeV의 소멸γ선이 발생되며 반감기는 약 110분이다. ^{18}F에서 방출되는 β^+선은 곧장 주변의 전자와 만나 소멸되므로 측정대상 방사선에는 제외하였다. ^{18}F는 주사기에 담긴 채로 운반되어 환자 체내로 투여 되므로 일반적으로 주사기와 눈과의 거리에서는 베타선에 의한 영향보다는 소멸γ선에 의한 피폭이 주로 발생한다. 개방된 형태의 ^{18}F-FDG의 경우 매우 근접한 거리에서는 양전자에 의한 영향이 존재할 수 있지만 주사기에 담겨있거나 10cm 이상의 거리에서는 양전자에 의한 영향은 거의 없는 것으로 보고 있다. 이 경우 모든 양성자가 눈에 도달하기 전에 소멸방사를 일으키고 눈에 기여하는 방사선은 오직 소멸감마선이기 때문이다.[10] 그러므로 환자에게 방사성의약품을 투여할 때 일반적인 거리인 30 cm 정도의 거리가 유지된다면 양전자에 의한 영향도 받지 않을 뿐만 아니라 피폭하는 총 선량도 크게 감소하게 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3절 수정체 등가선량의 실용량

국제방사선단위측정위원회(International Commission on Radiation Units and Measurement. ICRU) 보고서 51에 따르면 개인감시를 위한 실용량인 개인선량당량 $H_p(d)$로써 눈 수정체 선량을 감시하는 특별한 경우 d=3 ㎜ 깊이가 적합한 것으로 권고하고 있다. 하지만 방향성선량당량 H'(3,Ω)와 개인선량당량 $H_p(3)$는 실제로 거의 사용하지 않으며, 눈 수정체 선량을 다른 실용량으로 평가 할 수 있다면 눈 수정체 피폭감시는 충분히 달성될 수 있으므로 3 ㎜ 길이에서의 선량 사용 중단을 제안하고 있다. 보통 $H_p(0.07)$를 이 특별 목적으로 사용한다.[11] 투과력이 큰 방사선일 경우 3 ㎜ 깊이의 수정체 선량이 0.07 ㎜ 깊이의 피부선량보다 다소 높지만 그 차이는 이전의 선량한도의 차이에 비해 작기 때문이다. 그러나 새롭게 권고된 ICRP의 수정체 등가선량한도가 이전에 비해 크게 낮아짐에 따라 $H_p(3)$와 $H_p(0.07)$의 차이를 고려하면 유효선량한도를 충족하는 것이 반드시 수정체 등가선량한도를 충족하지 못할 우려가 있다. 최근의 연구결과 베타피폭에서는 핵종에 따라 차이는 있지만 $H_p(3)$은 수정체 등가선량을 만족할 수준으로 대표할 수 있으나 $H_p(0.07)$은 용인할 수 없을 정도로 과대평가할 위험이 있는 것으로 나타난다. 하지만 광자 방사선에서는 $H_p(0.07)$과 $H_p(3)$의 차이가 현저하지 않아 $H_p(0.07)$를 대체량으로 사용할 수 있는 것으로 나타났다.[12] 따라서 핵의학과에서 주로 사용되는 저에너지 광자장에서 $H_p(0.07)$이 수정체선량을 대체할 수 있다고 판단하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3장 연구재료 및 방법

제1절 연구재료

1. ED3(Active Extremity Dosimeter)

Figure 2. ED3 Active Extremity Detector

ED3(Active Extremity Dosimeter)는 Rounda S.T에서 나온 제품으로써 에너지별로 디텍터를 다르게 두고 있는 전자선량계이다[Figure 2]. 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 모니터링 할 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[Table 5].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5. ED3 Active Extremity Detector

	ED3D1	ED3D4
검출기	2개의 실리콘 다이오드	2개의 실리콘 다이오드
측정방사선	$H_P(0.07)$ 광자 측정 60 keV ~ 1.25 MeV	감마, X-ray, 베타
용도	$H_P(0.07)$ 광자 선량당량 측정에 적합	저에너지 광자, 고에너지 베타 $H_P(0.07)$ 선량당량 측정에 적합
선량 범위	0.0 μSv ~ 1 Sv $H_P(0.07)$ (0.00 mrem ~ 100 rem)	0.0 μSv ~ 1 Sv $H_P(0.07)$ (0.00 mrem ~ 100 rem)
선량 정확도	± 20% Cs-137	
선량률 범위	0.0 μSv/h ~ 100 mSv/h $H_P(0.07)$ (0.00 mrem/h ~ 10 rem/h)	0.3 μSv/h ~ 100 mSv/h $H_P(0.07)$ (0.00 mrem/h ~ 10 rem/h)
선량률 정확도	± 20% Cs-137	
에너지 반응도	± 30% 60 keV ~125 MeV	X-ray 33 keV ~ 248 MeV
반응(응답) 시간	16초 < 735 μSv/h and 2초 < 735 μSv/h $H_P(0.07)$	16초 < 346 μSv/h and 2초 < 346 μSv/h $H_P(0.07)$
선형성	± 20%	± 20%
방향성	± 30%	± 30%
^{90}Sr + ^{90}Y 베타 반응도		0.31 베타 선량 $H_P(0.07)$
에너지 보상	Tin/lead 필터	
검출기 검출 면적	7 mm^2	7 mm^2
선량 온도 안정성	0° C ~ 40° C ± 20%	0° C ~ 40° C ± 20%
ECM	유럽규정 EMC 2004/108/EC 인증	유럽규정 EMC 2004/108/EC 인증
정기점검	매년 교정 및 물리적 점검	매년 교정 및 물리적 점검

각각의 디텍터 ED3D1은 2개의 실리콘 다이오드로 구성되어 $H_P(0.07)$ 말단선량에 대하여 60 keV ~ 1.25 MeV까지 광자의 선량을 측정하는데 적합하다. ED3D4는 60 keV이하

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

의 저에너지 광자 및 고에너지 베타 측정에 적합하게 되어있다. 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 6]. 교정에 사용된 표준장비는 감마선조사장치 ^{137}Cs을 이용하였고 (주)에스에프테크놀로지에서 개발한 SFTIR-01형식이다.

Table 6. ED3 교정 결과

기준커마율 (mGy/h)	기준선량 (mSv)	측정값 (mSv)	교정인자
0.1	0.1	0.108	0.93
10.0	1.0	1.116	0.90
12.5	3.0	3.367	0.89
교정인자 평균			0.91
*측정불확도(확장불확도)(%)			7.8

*측정불확도는 신뢰수준 약 95%, k=2에서의 값임.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. OSL 및 판독시스템

연구에 사용된 OSL은 실험을 시행한 기관과 동일하게 한일원자력에 판독을 의뢰하였고 판독에 사용된 장비는 Landauer(USA)사의 Auto 200 Dosimetry Reader이다[Figure 3].

Figure 3. Landauer(USA)사의 Auto 200 Dosimetry Reader

Auto 200 Dosimetry Reader의 간략한 특징은 [Table 7]에 나타나있다.

Table 7. Auto 200 Dosimetry Reader의 Technical specifications

Operation:	Al203 with OSL; high-sensitivity photon counting system and dose calculation algorithm
Speed:	Readout in 12-13 sec.
Capacity:	4 magazines, 50 dosimeters each, 200 dosimeters per load
Energy dependence:	Within ± 10% over diagnostic energy; within ± 1% for photons and electrons from 5 MeV-20 MeV(please confirm)
LED array:	36
Size:	24.5"H×17.5"W×15"D(40"×27"×25" with crate)
Power requirements:	120-240 V
Weight:	100 lb.(150 lb. with crate)
Bar code input:	Internal optical reader

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절. 대상 및 방법

1. 측정 대상

방사성동위원소는 전국 핵의학과에서 구입 및 사용량이 가장 많은 ^{99m}Tc, ^{18}F를 대상으로 하였다[Table 8].[2]

Table 8. 전국 핵의학과 동위원소 구입 및 사용 현황(2014년)[13]

구입량			사용량		
핵종	총수량 (mCi)	총수량 (MBq)	핵종	총수량 (mCi)	총수량 (MBq)
Mo/Tc Generator	5,936,817	219,660,342	F-18 FDG	3,951,996	146,223,852
Tc04-99m	681,673	25,221,901	F-18 FPCIT	37,175	1,375,475
합	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
기타	95	3,549	기타	0	225,330

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

핵의학종사자 중 개봉선원을 이용한 작업을 직접 수행하고 종자가 수 가장 많으며 조사된 피폭선량 중 최대치를 기록한 종사자가 있는 방사선사를 대상으로 측정을 실시하였다[Table 9].[6]

Table 9. 핵의학 종사자의 직종별 피폭선량

Job	Number of annual dose records	Average annual dose(mSv)	MIN annual dose(mSv)	MAX annual dose(mSv)
		Mean ± SD		
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

^{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 25~30 mCi 환자에게 정맥주사하고 3~4시간 후에 Gamma camera를 이용하여 전신 scan을 실시하고 필요시 spot, SPECT/CT를 추가적으로 검사하였다. 분배대 작업 외의 차폐는 납치마를 통해서만 이루어졌다.

^{18}F을 사용한 검사는 마찬가지로 검사 건수가 가장 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 용량으로 정맥주사 한 다음 안정실로 안내하여 안정을 취하도록 한다. 1시간 후에 환자에게 소변을 보게 하고 PET/CT를 이용하여 torso scan을 실시한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 측정 방법

2017년 2월부터 2017년 7월 까지 6개월 간 검사 준비 전에 ED3선량계를 착용하여 당일 검사가 모두 끝날 때 까지 측정을 실시하였다. ED3 디텍터는 수정체에 가깝게 위치시키기 위하여 안경테에 부착하여 착용하였다[Figure 4]. 또한 법정 선량계와의 비교평가를 위해 측정을 실시한 기관에서 사용 중인 OSL를 동일한 기간 동안 가슴부위에 착용하였다.

Figure 4. ED3 착용위치

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하루 동안의 모든 작업과정을 포함하는 측정이므로 작업의 분류는 수정체에 영향이 많을 것이라 예상되는 3~4가지 과정으로 단순화하였다[Table 10].

Table 10. 측정대상 검사의 방사선 작업분류

방사성 동위원소	작업	상세작업내용
^{99m}Tc	1. 준비	▷ ^{99}Mo-^{99m}Tc Generator에서 ^{99m}Tc 용출 ▷ 방사성의약품 표지 ▷ 방사성의약품 분배
	2. 투여	▷ 환자에게 방사성의약품 정맥주사 (주사 직전부터 직후까지 설명 및 안내에 관한 시간까지 포함)
	3. 검사	▷ Gamma Camera를 이용한 검사 (검사 직전부터 직후까지 검사에 관한 설명 및 안내에 관한 시간까지 포함)
	4. 기타	▷ 핵의학과 내 대기환자와 복도에서 마주침 ▷ 대기환자의 검사관련 질문에 응답 ▷ 정도관리, 주사기의 폐기물 정리 업무 등.
^{18}F	1. 투여	▷ Auto dispenser를 이용한 분배. ▷ 환자에게 방사성의약품 정맥주사 (주사 직전부터 직후까지 설명 및 안내에 관한 시간까지 포함) ▷ 정맥주사 직후 안정실로 안내
	2. 검사	▷ PET/CT를 이용한 검사 ▷ 안정실 내 환자를 검사실로 안내
	3. 기타	▷ 핵의학과 내 대기환자와 복도에서 마주침 ▷ 대기환자의 검사관련 질문에 응답 ▷ 정도관리, 주사기의 폐기물 정리 업무 등.

^{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 피폭 등을 포함하는 '기타'로 분류를 하여 측정을 실시함과 동

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

시에 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 분배 직후에 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 피폭 등을 포함하는 '기타'로 분류를 하여 측정을 실시함과 동시에 작업노트를 작성하여 시간대별로 작업을 구분하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4장 결과

제1절. 방사선작업 분석에 따른 수정체등가선량 평가

1. ^{99m}Tc-Bone scan

Bone scan은 방사성동위원소를 환자에게 투여 후 3~4시간 후에 검사가 시행 되므로 환자에게 투여작업이 집중되어 있는 오전시간에 많은 피폭이 나타났다. 투여작업이 종료되고 검사작업만 주로 이루어지는 오후 시간에는 상대적으로 낮은 피폭이 주를 이루었다[Figure 5]. 누적선량 그래프에서 관찰할 수 있듯이 투여작업이 주를 이루었을 때는 가파른 상승을 보이다가 검사작업이 주를 이루는 오후시간에는 완만한 상승을 보이고 있다[Figure 6]. 해당 날짜의 그래프에서 투여작업이 주를 이루는 오전 11까지를 기준으로 나누었을 때 오전 26.046 μSv, 오후 5.416 μSv로 4.8배 차이가 났다.

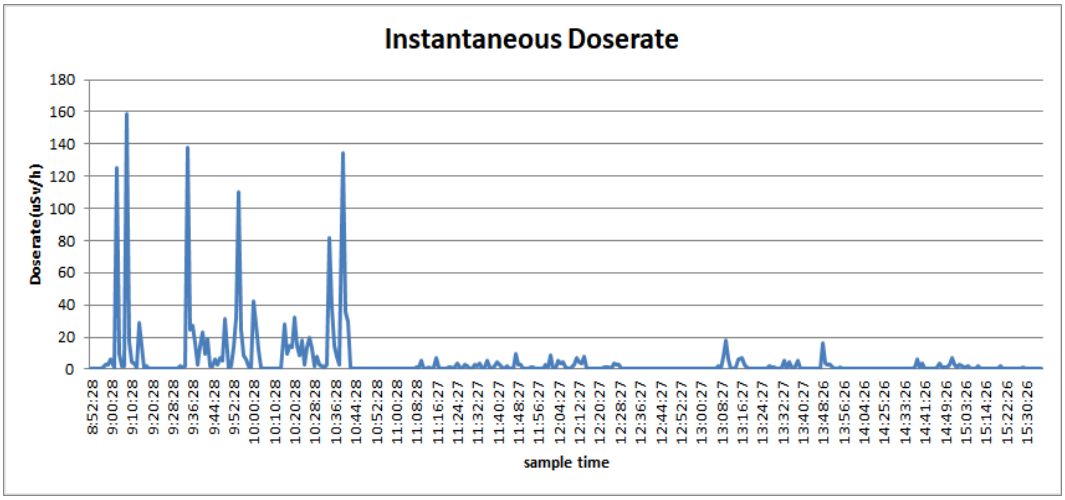


Figure 5. 전형적인 ^{99m}Tc-HDP Bone scan Doserate 그래프

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

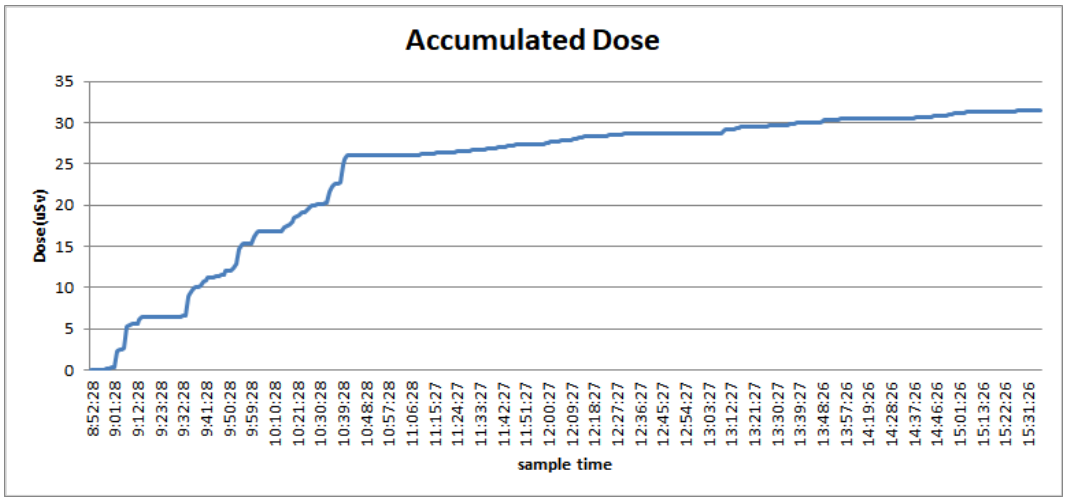


Figure 6. 전형적인 ^{99m}Tc-Bone scan Accumulated Dose 그래프

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.

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 μSv(2.3%) 순으로 투여작업이 가장 많았다[Table 11]. 또한 환자 1명당 평균 2.05 ± 1.078 μSv를 피폭하는 것으로 나타났다.

Table 11. ED3로 측정된 ^{99m}Tc-Bone scan시행 시 수정체선량

측정횟수	총피폭 (uSv)	준비 (uSv)	투여 (uSv)	검사 (uSv)	기타 (uSv)	환자수 (명)
1회	10.275	0.126	7.113	2.593	0.442	7
2회	9.899	0.417	5.296	3.685	0.501	3
3회	25.936	0.795	19.322	5.551	0.268	10
4회	26.471	0.075	16.340	9.770	0.287	10
5회	24.694	0.795	18.636	5.084	0.178	8
6회	11.888	0.242	10.621	0.951	0.075	9
7회	28.630	0.219	20.484	7.540	0.387	11
8회	22.404	0.137	14.452	7.664	0.151	8

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

9회	11.145	0.096	7.795	2.959	0.294	5
10회	9.278	0.082	6.000	2.889	0.308	6
11회	11.865	1.158	6.780	3.214	0.713	6
12회	16.561	0.264	9.218	6.465	0.614	10
13회	22.757	0.123	16.809	5.674	0.152	10
14회	12.836	0.346	9.306	2.668	0.516	5
15회	18.524	1.082	13.594	3.285	0.562	9
16회	24.055	1.097	15.743	6.955	0.260	11
17회	16.382	0.186	6.884	9.099	0.213	4
18회	12.561	1.235	8.477	2.283	0.566	8
19회	17.981	1.706	9.297	6.038	0.939	10
20회	16.174	1.417	8.488	5.597	0.672	10
21회	10.319	0.287	7.144	2.736	0.152	5
22회	15.289	3.441	7.922	3.214	0.713	7
23회	24.442	0.409	17.459	6.187	0.387	12
24회	23.058	0.929	16.798	5.091	0.241	12
25회	7.364	0.629	4.092	2.320	0.323	8
26회	9.301	0.082	5.743	3.169	0.308	6
27회	21.137	0.829	12.479	7.525	0.304	12
28회	32.389	0.774	15.971	14.448	1.197	13
29회	20.962	0.662	12.067	7.982	0.252	10
30회	8.011	0.901	5.212	1.822	0.076	3
31회	22.724	1.921	17.114	3.178	0.511	12
32회	22.828	1.850	17.215	3.491	0.272	13
33회	18.642	1.119	10.071	7.088	0.364	9
34회	5.101	0.331	2.483	2.214	0.072	6
35회	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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. ^{18}F-FDG PET

^{18}F-FDG PET은 방사성동위원소를 환자에게 투여 후 약 1시간 후에 검사가 시행되며 대체적으로 투여와 검사가 순차적으로 이루어진다. Figure 7.에서 두 작업의 선량률이 비슷한 수준으로 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 피폭선량이 시간경과에 따라 대체적으로 일정하게 증가하게 된다. 이는 누적선량 그래프에서도 확인 할 수 있다 [Figure 8].

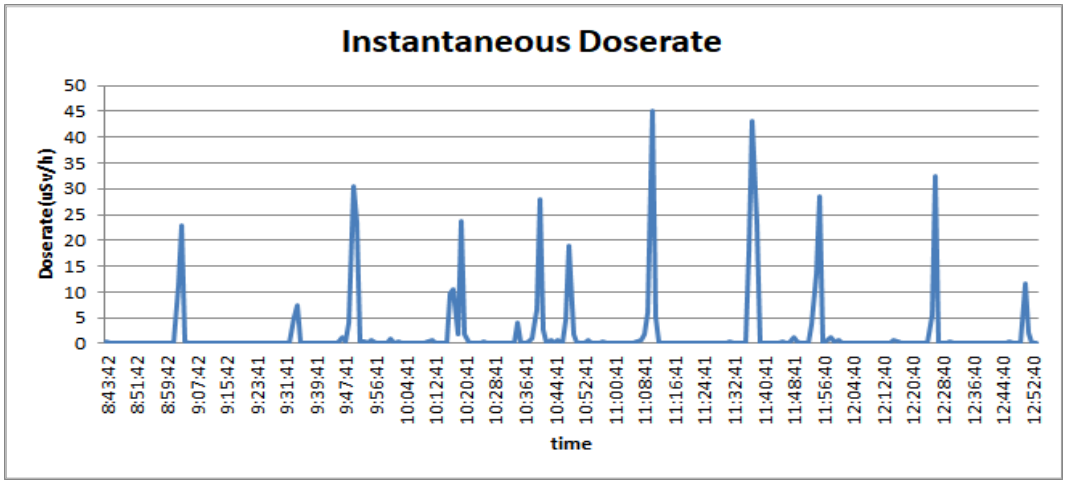


Figure 7. 전형적인 ^{18}F-FDG PET Doserate 그래프

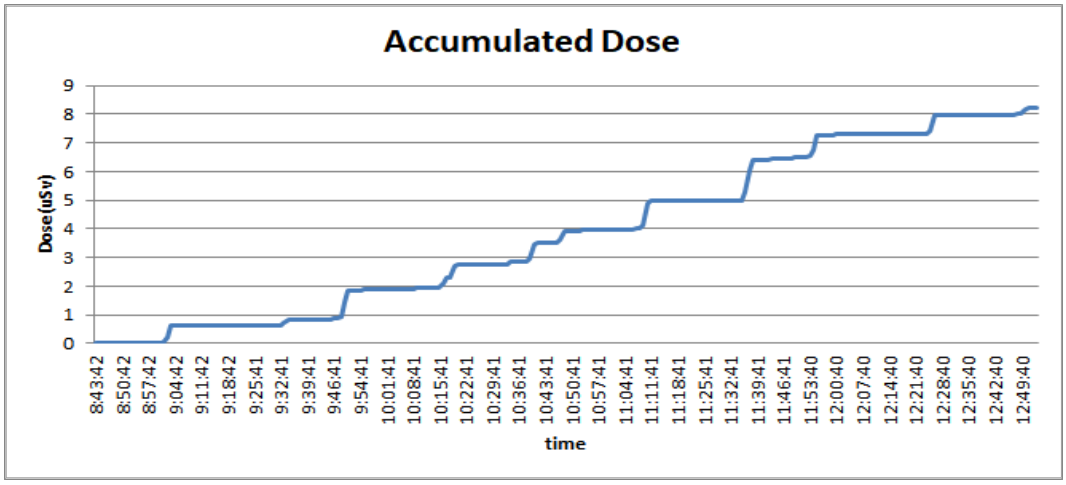


Figure 8. 전형적인 ^{18}F-FDG PET Accumulated Dose 그래프

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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

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%) 순으로 검사작업이 가장 많았다[Table 12]. 또한 환자 1명당 평균 1.876 ± 0.88 μSv를 피폭하는 것으로 나타났다.

Table 12. ED3로 측정된 ^{18}F-FDG PET 시행 시 수정체선량

측정횟수	총피폭 (uSv)	투여 (uSv)	검사 (uSv)	기타 (uSv)	환자수 (명)
1회	4.044	1.813	1.803	0.429	4
2회	5.643	0.911	3.733	0.999	4
3회	13.040	3.405	7.975	1.660	6
4회	11.873	2.758	8.399	0.715	7
5회	6.435	2.189	3.301	0.945	4
6회	9.877	3.587	5.345	0.945	5
7회	19.799	6.754	12.197	0.848	6
8회	11.163	3.964	5.931	1.268	4
9회	3.784	1.583	1.970	0.230	3
10회	11.316	2.844	8.078	0.394	4
11회	7.331	2.847	3.060	1.423	3
12회	7.758	3.085	3.683	0.990	6
13회	10.632	3.469	6.463	0.700	6
14회	5.777	1.034	4.189	0.554	5
15회	14.643	5.530	7.841	1.272	6
16회	14.590	3.877	9.725	0.988	5
17회	9.847	2.178	7.015	0.654	4
18회	12.088	3.646	7.753	0.689	3
19회	8.658	1.802	5.669	1.187	6
20회	11.330	4.953	5.744	0.633	6
21회	9.082	2.037	6.535	0.511	5
22회	7.465	3.777	3.027	0.662	3
23회	15.334	5.579	8.765	0.989	7
24회	16.062	4.434	10.634	0.994	5

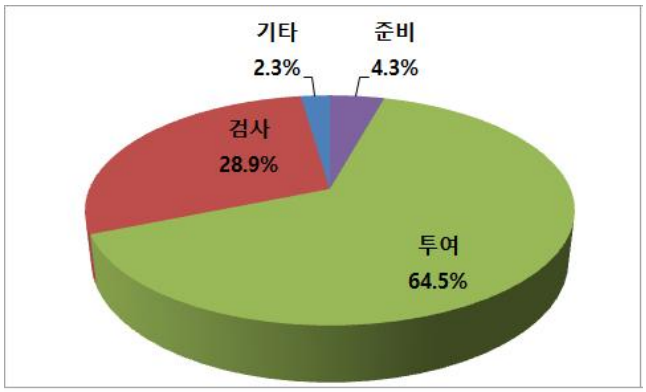
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

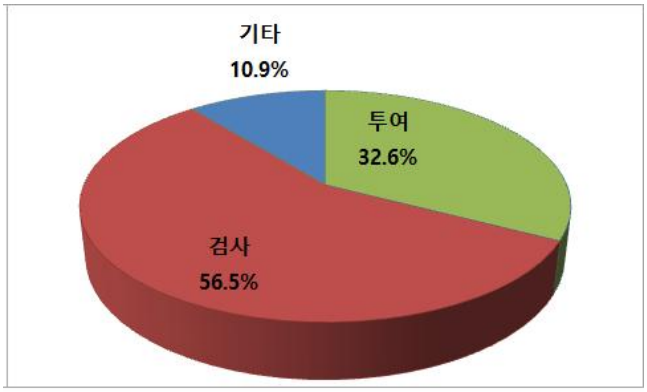
25회	14.989	4.445	9.215	1.329	8
26회	7.490	2.007	4.986	0.497	5
27회	10.557	5.101	3.307	2.149	5
28회	10.389	2.469	6.053	1.867	7
29회	9.093	4.038	3.438	1.617	7
30회	16.419	6.709	7.969	1.742	7
31회	8.631	1.981	5.350	1.300	4
32회	10.345	1.915	6.390	2.040	5
33회	14.453	4.535	7.537	2.381	5
34회	10.227	3.791	4.643	1.793	6
35회	3.602	0.788	2.632	0.182	3
36회	7.743	2.734	3.967	1.043	6
37회	8.383	3.026	3.674	1.684	5
38회	11.093	5.101	4.735	1.258	6
39회	10.656	4.869	4.242	1.545	8
40회	9.892	2.566	6.517	0.809	6
41회	21.241	6.880	12.551	1.811	8
42회	11.594	2.392	7.655	1.547	8
43회	5.568	1.785	2.126	1.658	6
44회	6.903	0.922	5.620	0.361	4
45회	13.163	7.250	5.158	0.755	6
46회	8.483	1.975	5.350	1.158	9
47회	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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



a. ^{99m}Tc-bone scan



b. ^{18}F-FDG PET

Figure 9. 작업별 피폭기여도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절. 환자 수에 따른 수정체 피폭선량

1. ^{99m}Tc-Bone scan

하루 평균 8.371 ± 2.819명의 환자를 검사하는 동안 17.159 ± 6.931 μSv/day 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 1년 동안 매일 8.371명의 ^{99m}Tc-Bone scan를 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 13]. 연간수정체선량은 방사선사 1명이 1년간 매일 bone scan을 수행할 때 하루 환자 수를 10명으로 가정하면 약 5125 μSv, 20명으로 가정하면 약 10250 μSv로 예상 할 수 있다.

Table 13. ^{99m}Tc-Bone scan 시행 시 연간수정체선량

환자 수	수정체선량 (μSv/day)	연간수정체선량 (μSv)
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

2. ^{18}F-FDG PET

하루 평균 5.468 ± 1.485명의 환자를 검사하는 동안 평균 10.239 ± 3.925 μSv/day 의 피폭이 발생하였다. 방사선작업종사자의 일반적인 근무시간인 2,000시간을 기준으로 연간피폭선량을 환산하면 2.559 ± 0.981 μSv (약 2.56 mSv)가 된다. 즉,

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

방사선사 1명이 1년 동안 매일 5.468명의 ^{18}F-FDG PET를 시행한다면 연간수정체선량은 약 2.56 mSv로 예측할 수 있다. 기관마다 하루 동안에 검사하는 환자수가 다를 수 있으므로 환자 수에 따라 피폭선량을 예측해 보면 다음의 표와 같다[Table 14]. 연간수정체선량은 방사선사 1명이 1년간 매일 PET 검사를 수행할 때 하루 환자 수를 10명으로 가정하면 약 4690 μSv, 20명으로 가정하면 9380 μSv로 예상 할 수 있다. 2014년 대한핵의학회에서 발간된 전국 PET 검사 및 대수 통계에서 장비 대수가 기재 되지 않은 1기관을 뺀 129기관에서 장비1대당 하루 평균 검사건수는 10.11건으로 나타났다.[14] 통상적으로 PET실 근무자가 2명이지만 1명이 근무한다고 가정하였을 때에도 수정체등가선량한도인 연평균 20 mSv에는 미치지 못하는 수치였다.

Table 14. ^{18}F-FDG PET 시행 시 연간수정체등가선량

환자 수	수정체선량 (μSv/day)	연간수정체선량 (μSv)
1	1.876	469
5	9.360	2345
10	18.720	4690
15	28.080	7035
20	37.440	9380
25	46.800	11725

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3절. 사용량에 따른 수정체 피폭선량(1 mCi 환산)

핵의학 방사선작업종사자는 동일한 양의 방사성동위원소를 사용하더라도 검사환경에 따라 피폭선량이 달라질 수 있다. 그러나 일반적인 환경에서는 사용량에 따른 피폭량을 미리 알고 작업계획을 세운다면 더욱 효과적인 피폭관리를 할 수 있다. 검사 종류별, 환자 체중별로 사용되는 방사성동위원소의 투여량이 각각 다르기 때문에 사용되는 선원 1 mCi당 피폭되는 수정체 선량을 분석하여 체계적인 피폭관리에 도움이 되고자 했다.

^{99m}Tc를 이용한 검사를 시행하였을 때는 1 mCi당 전체 피폭선량은 0.071 ± 0.021 μSv 이고, 준비는 0.003 ± 0.003 μSv, 투여는 0.045 ± 0.014 μSv, 검사는 0.021 ± 0.012 μSv, 기타는 0.002 ± 0.001 μSv로 나타났다[Table 15]. 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 mCi당 전체 피폭선량은 0.257 ± 0.099 μSv 이고, 투여는 0.083 ± 0.040 μSv, 검사는 0.147 ± 0.069 μSv, 기타는 0.027 ± 0.012 μSv로 나타났다[Table 16]. 이 중 근접한 거리에서 환자를 케어 해야 하는 검사가 피폭선량이 가장 높게 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 15. ^{99m}Tc-Bone scan 시행 시 동위원소 사용 1mCi 당 피폭선량 환산

피폭상황	ED3 측정값(uSv)	사용량(mCi)	1mCi 당 피폭선량 (uSv/mCi)
총피폭	17.159 ± 6.931	246.857 ± 83.009	0.071 ± 0.021
준비	0.745 ± 0.697		0.003 ± 0.003
투여	11.062 ± 5.030		0.045 ± 0.014
검사	4.964 ± 2.768		0.021 ± 0.012
기타	0.387 ± 0.244		0.002 ± 0.001

Table 16. ^{18}F-FDG PET 시행 시 동위원소 사용 1mCi 당 피폭선량 환산

피폭상황	ED3 측정값(uSv)	사용량(mCi)	1mCi 당 피폭선량 (uSv/mCi)
총피폭	10.259 ± 3.925	42.02 ± 11.95	0.257 ± 0.099
투여	3.340 ± 1.660		0.083 ± 0.040
검사	5.801 ± 2.626		0.147 ± 0.069
기타	1.118 ± 0.529		0.027 ± 0.012

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4절. 차폐종류에 따른 수정체선량 비교

선량값이 다소 높게 나왔던 ^{99m}Tc-Bone scan 투여작업을 대상으로 수정체 보호에 가장 효과적인 차폐체를 선별하기 위하여 ED3 선량계를 이용하여 차폐를 사용하지 않았을 경우와 차폐체 종류별로 각 30회 측정을 실시하였다. 사용된 차폐체는 Syringe shield, Lead glass, L-block 이다[Table 17]. 환자에게 방사성의약품 투여 절차는 모든 차폐체에서 동일하게 ① 환자 주사라인확보, ② 검사 절차 및 시간 설명, ③ ^{99m}Tc-HDP 투여, ④ 환자에게서 주사바늘제거 순서로 구성하였다. 수정체 선량 측정에 포함된 시간은 피폭이 선원의 노출이 시작되는 ③ ^{99m}Tc-HDP 투여부터 ④ 환자에게서 주사바늘제거 까지 이다. 측정은 투여 중 시간에 따라 달라지는 피폭량의 변동을 고려해 투여시간은 80초 이내, 투여량은 환자 체중에 따라 25~31 mCi 사이로 제한하였다.

Table 17. 차폐체의 종류 및 특징

차폐체의 종류	사진	특징
Syringe shield		Syringe : 2 mm W(텅스텐) Lead glass: 1.5 mm Pb
Lead glass		Lead glass: 0.5 mm Pb
L-block		L-block : 2 mm pb Lead glass : 2 mm pb

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

네 가지 경우의 수정체선량 측정값을 SPSS (ver21.0 for Windows, SPSS Inc, Chicago, IL, USA)를 이용하여 기술통계 값은 백분율(%) 또는 평균 ± 표준편차(Mean ± SD)로 표시하였다. 네 군 간의 연속변수는 One-Way-Anova(일원배치분석)을 이용하여 검증하였다. 통계적 유의성은 p value가 0.05 미만인 경우로 간주하였다. 실험결과 수정체선량은 평균적으로 Non-Shield 일 때 0.782 ± 0.334 μSv이고 Syringe shield 0.459 ± 0.122 μSv, Lead glass 0.282 ± 0.093 μSv, L-block 0.087 ± 0.026 μSv로써 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$)[Table 19]. 이 중 수정체에 대한 차폐 성능이 가장 우수한 것은 L-block이었다. Non-Shielding 상태를 기준을 비교했을 때 각각 차폐체 별로 Syringe shield 41.3 %, Lead glass 63.9 %, L-block 88.9 % 수정체에 대한 피폭선량을 감소시키는 효과가 있는 것으로 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 18. ^{99m}Tc-Bone scan에서 방사성의약품 투여작업 시 차폐체 별 수정체선량

측정 횟수	Non-Shielding			Syringe shield			Lead glass			L-block		
	소요 시간 (sec)	사용량 (mCi)	선량 (μSv)	소요 시간 (sec)	사용량 (mCi)	선량 (μSv)	소요 시간 (sec)	사용량 (mCi)	선량 (μSv)	소요 시간 (sec)	사용량 (mCi)	선량 (μSv)
1회	65	29.7	0.784	68	29.6	0.446	53	29.5	0.364	62	30.5	0.077
2회	61	29.5	0.646	67	29.3	0.155	42	29.3	0.257	60	30.0	0.053
3회	58	29.4	0.903	73	28.9	0.613	69	27.8	0.262	47	29.7	0.090
4회	63	29.3	0.666	76	28.4	0.707	71	29.4	0.327	76	29.5	0.107
5회	66	29.0	0.870	63	28.3	0.335	47	29.1	0.237	69	29.3	0.082
6회	60	28.9	0.699	80	28.1	0.589	35	28.8	0.454	77	27.9	0.073
7회	63	28.7	0.870	65	29.0	0.478	46	28.6	0.339	47	28.8	0.094
8회	61	28.3	0.445	55	28.7	0.462	62	28.5	0.331	63	28.2	0.111
9회	63	27.9	0.789	71	28.3	0.519	58	28.9	0.253	64	28.0	0.094
10회	47	29.5	1.365	56	28.2	0.494	44	28.7	0.352	50	27.7	0.074
11회	46	29.3	0.768	55	28.1	0.494	45	28.3	0.294	67	27.3	0.102
12회	46	29.2	0.686	64	27.9	0.584	56	27.5	0.237	53	26.9	0.042
13회	70	29.0	0.706	67	27.8	0.466	41	27.3	0.491	67	26.8	0.073
14회	45	28.8	1.524	70	27.6	0.363	47	27.0	0.192	65	26.8	0.057
15회	62	28.5	0.482	56	27.4	0.515	50	26.9	0.147	73	29.7	0.143

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

16회	48	28.4	0.861	72	30.0	0.642	62	29.6	0.192	68	29.5	0.074
17회	51	30.5	0.682	73	29.3	0.674	47	29.4	0.237	52	29.3	0.118
18회	62	30.0	0.621	63	29.5	0.294	53	29.2	0.196	57	29.0	0.094
19회	49	29.4	0.593	65	29.2	0.441	63	29.0	0.318	54	29.8	0.086
20회	63	30.1	0.666	68	26.7	0.413	53	28.4	0.286	68	29.2	0.164
21회	45	29.9	1.524	69	29.0	0.503	52	28.2	0.147	66	28.6	0.077
22회	62	29.4	0.800	57	27.8	0.335	66	28.1	0.245	67	29.7	0.122
23회	63	29.3	0.552	64	27.4	0.474	43	30.1	0.511	53	29.5	0.093
24회	61	29.1	0.474	75	27.1	0.375	41	29.8	0.359	64	29.3	0.065
25회	52	29.0	0.482	53	27.0	0.331	47	29.7	0.241	57	29.9	0.094
26회	61	28.7	0.507	55	29.4	0.335	44	29.6	0.355	58	26.9	0.087
27회	45	28.6	1.773	55	29.2	0.474	52	29.4	0.237	63	26.8	0.074
28회	62	29.0	0.560	59	29.0	0.486	46	29.2	0.176	76	28.5	0.057
29회	68	28.9	0.621	63	28.5	0.323	49	29.1	0.229	56	28.4	0.082
30회	62	28.5	0.555	54	29.7	0.466	53	28.9	0.205	63	28.1	0.061
Mean ± SD	57.667 ± 7.836	29.127 ± 0.574	0.782 ± 0.334	64.367 ± 7.554	28.480 ± 0.879	0.459 ± 0.122	51.223 ± 8.866	28.777 ± 0.837	0.282 ± 0.093	62.067 ± 8.296	28.653 ± 1.114	0.087 ± 0.026

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 19. 방사성동위원소 투여작업 시 차폐체 별 수정체 등가선량 비교 분석결과

종속변수	차폐체	평균	표준편차	F값/유의확률	사후검증결과
소요시간 (sec)	Non-Shielding(a)	57.667	7.836	15.073/0.000	b>a, c d>a, b, c (Dunnett T3)
	L-block(b)	62.067	8.296		
	Lead glass(c)	51.233	8.865		
	Syringe shield(d)	64.367	7.554		
사용량 (mCi)	Non-Shielding(a)	29.127	.573	2.949/0.036	a>b, c, d b>d, c>b, c (Dunnett T3)
	L-block(b)	28.653	1.114		
	Lead glass(c)	28.777	.837		
	Syringe shield(d)	28.480	.879		
선량 (μSv)	Non-Shielding(a)	.782	.334	76.896/0.000	b<a, c, d (Dunnett T3)
	L-block(b)	.087	.026		
	Lead glass(c)	.282	.092		
	Syringe shield(d)	.402	.121		

$p < 0.05$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

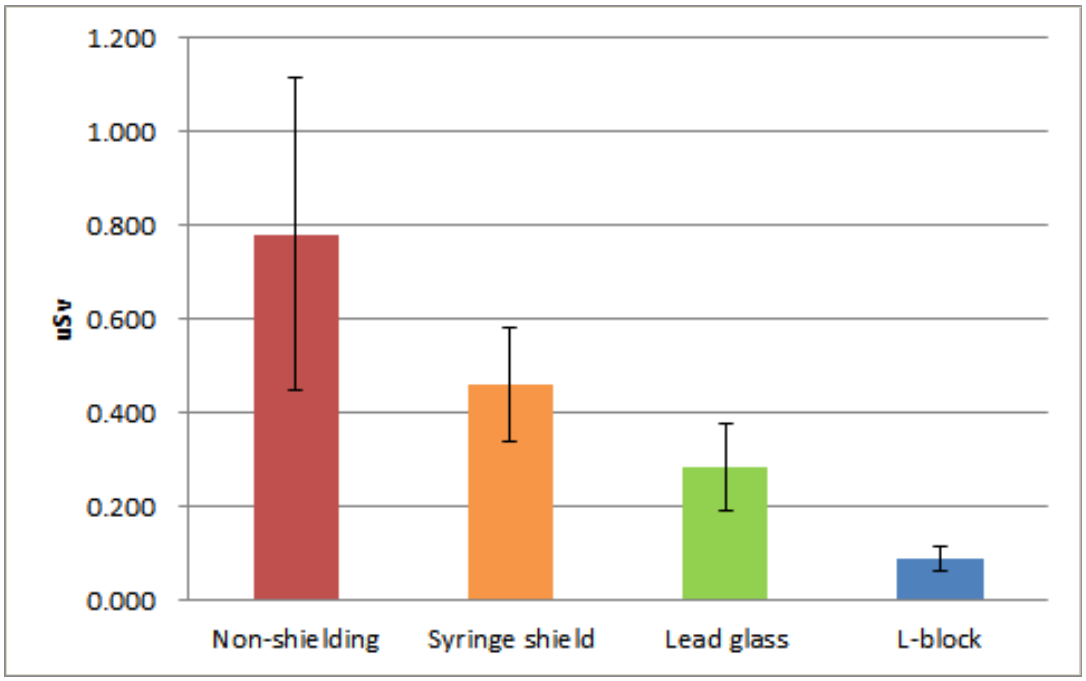


Figure 10. ^{99m}Tc-Bone scan 투여 작업 시 차폐체 별 평균 수정체선량

차폐체 별로 1mCi당 피폭량을 환산한 결과는 평균적으로 Non-Shielding일 때 0.027 ± 0.011 μSv이고 Syringe shield일 때 0.016 ± 0.004 μSv, Lead glass일 때 0.010 ± 0.003 μSv, L-block 일 때 0.003 ± 0.001 μSv로 나타났다[Table 20].

Table 20. ^{99m}Tc-Bone scan에서 동위원소 사용 1mCi 당 차폐체 별 수정체선량

차폐종류	피폭선량 (μSv)	사용량 (mCi)	1 mCi당 피폭선량 (μSv/mCi)
Non-Shielding	0.782 ± 0.334	29.127 ± 0.574	0.027 ± 0.011
Syringe Shield	0.459 ± 0.122	28.480 ± 0.879	0.016 ± 0.004
Lead glass	0.282 ± 0.093	28.777 ± 0.837	0.010 ± 0.003
L-block	0.087 ± 0.026	28.653 ± 1.114	0.003 ± 0.001
Mean ± SD	0.027 ± 0.011	0.016 ± 0.004	0.010 ± 0.003

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제5절. ED3과 OSL로 평가된 수정체 선량 비교

법정선량계로 가장 많이 사용되고 있는 TLD와 OSL은 판독기관에 의뢰하여 소자반응도를 선량평가 알고리즘에 적용하여 수정체선량 평가치를 알 수 있다. 이러한 수정체 선량 평가치와 ED3 실측치와의 관계를 평가하기 위하여 ED3를 측정한 같은 기간 동안 OSL을 가슴부위에 착용하여 1달 주기로 판독된 결과를 비교하였다.

Table 21. ED3과 OSL의 수정체 선량

착용기간	OSL (mSv)			ED3측정값 (mSv)
	심부선량	표층선량	수정체선량	
2017년 2월	0.21	0.2	0.21	0.294
2017년 3월	0.31	0.33	0.31	0.314
2017년 4월	0.3	0.29	0.3	0.177
2017년 5월	0.35	0.36	0.35	0.184
2017년 6월	0.14	0.14	0.14	0.120
2017년 7월	0.09	0.11	0.09	0.092

Table 22. ED3과 OSL의 수정체 선량 비교 분석결과

선량계	평균	표준편차	t	p
OSL	0.233	0.104	0.659	0.525
ED3	0.197	0.088		

$p<0.05$

결과적으로 ED3와 OSL 두 수정체 선량값은 통계적으로 유의한 차이는 없었다. ($t=0.659$, $p=0.525$). 2,3,7월은 ^{99m}Tc 검사실에서 측정이었으며 ED3 측정값이 OSL값 보다 더 높게 나온 것은 투여작업 시 가슴에 착용한 OSL은 납치마로 인해 차폐효과가 있었지만 수정체에 대해서는 별다른 차폐를 사용하지 않은 것이 원인으로 생각된다. 4,5,6월은 ^{18}F 검사실에서의 측정이었으며 ED3 측정값이 OSL값 보다 더 낮게 나온 것은 투여 작업 시는 L-block 사용으로 수정체에 적절한 차폐가 적용되었으나 ^{18}F의 다소 높은 에너지 때문에 검사 작업에서의 납치마의 차폐효과가 거의 나타나지 않은 것으로 여겨진다. 6회의 측정에서 OSL과 ED3 측정간의 정확한 상관관계를 확인하기 어려웠으나 대체적으로 ED3로 실측한 값이 OSL 수정체선량값을 크게 초과하지는 않는 것으로 보였다. 따라서 수정체 선량 측정이 어려운 기관이 있다면 OSL 수정체선량값을 참고하여 적절한 수정체 관리 수준을 마련하는 것도 합리적인 방법이라 생각된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제6절. 동일 기관 방사선사들의 OSL 수정체선량 비교

최근 1년간 동일 기관의 방사선사 12명이 법정선량계로 착용 중인 OSL 판독결과 모든 방사선사들의 평균 수정체선량은 3.37 ± 1.88 mSv로 연간선량한도 평균치인 20 mSv 미만을 기록하였다. OSL의 수정체선량 평가치가 실측치와 유사한 점을 고려하면 동일한 기관에서 수정체등가선량한도를 초과한 방사선사는 없을 것으로 판단된다. 또한 수정체선량이 8.56 mSv를 기록한 1명의 방사선사를 제외한 모든 구성원들의 수정체선량 뿐만 아니라 심부선량도 3.36 ±1.87 mSv로 선량제약치로 제시된 6 mSv이하의 판독치를 기록하였다.

Table 23. 최근 1년간 동일 기관에서 근무한 방사선사들의 OSL 선량

작업자	착용기간	심부(mSv)	표층(mSv)	수정체(mSv)	작업자	착용기간	심부(mSv)	표층(mSv)	수정체(mSv)
A	1분기	1.04	1.1	1.04	G	1분기	0.16	0.18	0.16
	2분기	1.26	1.64	1.42		2분기	0.62	0.6	0.62
	3분기	1	0.95	1		3분기	0.39	0.38	0.39
	4분기	2	1.97	2		4분기	0.7	0.71	0.7
	합계	5.3	5.66	5.46		합계	1.87	1.87	1.87
B	1분기	0.83	0.84	0.83	H	1분기	0.34	0.37	0.34
	2분기	0.88	0.84	0.88		2분기	0.74	0.77	0.74
	3분기	0.61	0.63	0.61		3분기	0.51	0.49	0.51
	4분기	1.01	0.97	1.01		4분기	0.34	0.32	0.34
	합계	3.33	3.28	3.33		합계	1.93	1.95	1.93
C	1분기	0.55	2.94	0.55	I	1분기	0.83	0.88	0.83
	2분기	0.32	0.35	0.32		2분기	0.84	0.88	0.84
	3분기	0.8	0.79	0.8		3분기	1.11	1.11	1.11
	4분기	0.69	0.72	0.69		4분기	0.52	0.54	0.52
	합계	2.36	4.8	2.36		합계	3.3	3.41	3.3
D	1분기	1.34	1.32	1.34	J	1분기	0.36	0.37	0.36
	2분기	2.18	2.22	2.18		2분기	0.47	0.48	0.48
	3분기	3.5	3.6	3.5		3분기	1.14	1.18	1.14
	4분기	1.54	1.56	1.54		4분기	0.93	0.94	0.93
	합계	8.56	8.7	8.56		합계	2.9	2.97	2.91

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

E	1분기	0.92	0.93	0.92	K	1분기	0.28	0.27	0.28
	2분기	0.19	0.18	0.19		2분기	0.87	0.89	0.87
	3분기	0.88	0.91	0.91		3분기	0.7	0.72	0.7
	4분기	0.45	0.43	0.45		4분기	0.57	0.6	0.57
	합계	2.44	2.45	2.47		합계	2.42	2.48	2.42
F	1분기	0.84	0.84	0.84	L	1분기	0.38	0.38	0.38
	2분기	0.57	0.56	0.57		2분기	0.7	0.73	0.7
	3분기	0.86	0.84	0.86		3분기	0.82	0.88	0.82
	4분기	0.88	0.83	0.88		4분기	0.81	0.83	0.81
	합계	3.15	3.07	3.15		합계	2.71	2.82	2.71
Mean ± SD	심부 :3.36 ± 1.87 mSv 표층 3.62 ± 1.94 mSv 수정체 3.37 ± 1.88 mSv								

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제5장 결론

의료기관 방사선작업종사자의 피폭관리의 관심이 높아짐과 더불어 수정체등가선량한도의 하향 권고로 인하여 수정체선량의 평가 및 관리에 필요성이 대두되고 있다. 하지만 현재 국내원자력법에서는 수정체등가선량한도 수치만 제시되어 있을 뿐 그 관리방법에 대해서는 구체적으로 기술되어 있지 않다. 따라서 적절한 관리기준이 마련되기 위해서는 각 기관의 특성에 맞는 수정체선량의 평가가 필요하다.

핵의학 영상검사는 개봉선원을 환자에게 투여하고 추적자의 원리로서 개봉선원이 체내에 섭취되는 양상을 영상으로 만들어낸다. 이 과정에서 불가피하게 방사선작업종사자에게 피폭이 발생하는데 특히 수정체는 위치상 선원과 가깝게 위치하지만 차폐가 어려운 관계로 많은 피폭이 예상된다. 또한 핵의학과는 방사성동위원소를 투여 받은 환자에게서 피폭이 발생하므로 시간, 공간상으로 불규칙한 방사선장이 생성된다. 이러한 환경이 수정체 보호를 더욱 어렵게 만든다.

이에 실제 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 차폐 된 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 mCi당 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 mCi당 수정체 피폭선량은 0.257 ± 0.099 μSv이었다.

투여 작업 시 차폐를 사용하지 않을 경우에는 주사기에 집중되어 있는 방사성동위원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

소에 의해 수정체에 많은 피폭이 발생하므로 Syringe shield, Lead glass, L-block 등을 사용하여 수정체를 보호 하여야 한다. 본 논문의 실험결과 L-block을 사용하였을 경우에는 차폐를 사용하지 않았을 때와 비교하여 수정체에 대하여 평균 88.9 %의 피폭선량 감소효과를 나타냈다. Lead glass, Syringe shield를 사용하였을 경우에도 각각 평균 63.9 %, 41.3 %의 피폭선량 감소효과가 나타났다. 따라서 일반적인 투여작업에서는 차폐효과가 가장 뛰어나며 조작이 간편한 L-block을 사용하는 것이 좋으며 상황에 따라 적절하게 Syringe shield, Lead glass를 사용하는 것이 좋다.

ED3 선량계를 이용한 측정 결과 수정체 등가선량한도에 못 미치는 값이지만 작업환경에 따라 높은 선량에 피폭되는 작업자가 발생할 우려가 있는 만큼 수정체선량에 대한 지속적인 관리가 요구된다. 만약 수정체선량 측정을 위한 선량계가 구비 되어있지 않다면 지난 OSL 판독치를 참고하여 다소 높은 피폭이 발생한 종사자에게는 방사선장해방호를 위한 적절한 조치를 취할 수 있도록 해야 한다.

본 연구가 달라진 선량한도에 따른 수정체선량 평가나 관리체계 구축에 따른 기초자료로 각 의료기관에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] International Commission on Radiological Protection. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 103. 2007.
[2] PRINCIPLES OF RADIATION PROTECTION Vol.1, 방사선방호원론 2016.
[3] International Commission on Radiological Protection. The 1990 recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 60. 1990.
[4] 원자력안전법 시행령. 대통령령 제27678호. 2016.
[5] International Commission on Radiological Protection. 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. Oxford; Pergamon Press. 2012.
[6] Establishment of Dose Constrains for Radiation Workers in Nuclear Medicine. 핵의학방사선작업종사자 선량제약치 설정. 원자력안전위원회. 2016.
[7] 원자력안전위원회고시 제2014-69호. 개인 피폭방사선량의 평가 및 관리에 관한 규정. 2014.
[8] 송하진. 전자선량계를 이용한 핵의학 방사선작업종사자의 피폭선량평가. 조선대학교 대학원 석사학위논문. 2017.
[9] 방사성동위원소 핵종정보. 이명철. (사)한국동위원소협회. 2010.
[10] Sumi Yokoyama and Katsunori Aoki 'Calculation of equivalent dose for the lens of the eye in a positron field using EGS5, Progress in Nuclear Science and Technology Volume 4(2014)pp. 788-792
[11] International Commission on Radiation Units and Measurements. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report 51. Bethesda. 1993
[12] R Behrens and G Dietze. Monitoring the eye lens: which dose quantity is adequate?. Phys. Med. Biol. 2010;55;4047-4062
[13] 2014년 전국 인력 RI 장비 현황 합계. 대한핵의학회. 2014
[14] 2014년 전국 PET 검사 및 대수. 대한핵의학회. 2014

Collection @ chosun