

의료분야의 고에너지 베타선원 사용에 따른 방사선량 평가

김 현 조* · 박 제 우**

An Estimation of Radiation Exposure Doses Resulting from the Use of High-energy Beta-ray Sources in Medical Fields

Hyun-Jo Kim* and Jae-Woo Park**

ABSTRACT

Radiation exposure doses resulting from the medical use of the high-energy beta-ray sources have been estimated using MCNP-4C Monte Carlo computer code. The beta-ray sources considered are Sr-90/Y-90, Ho-166 and Re-188, which are currently used as ophthalmic applicator, medical agents of liver cancer therapy and angioplasty therapy, respectively in hospitals. Typical therapeutic procedures are carefully investigated, and eight situations where higher doses are expected are selected for the dose calculation. It is found that in all of the cases considered, the estimated doses are much lower than the dose limit specified in the government regulations.

Key words : High-energy beta-ray, MCNP-4C, Exposure dose, Sr-90, Ho-166, Re-188, Y-90

1. 서론

의료분야의 방사성 동위원소 이용은 새로운 동위원소 생산기술의 개발, 표지화합물 제조기술의 발달, 신속한 공급망의 구축 등으로 점차 그 영역을 확대해 나가고 있다. 이러한 추세는 국민복지 수준이 향상됨에 따라 앞으로도 계속 지속될 전망이다. 이와 더불어 동위원소를 취급하는 의료기관의 의사, 간호

사, 방사선 취급자의 엄격한 안전관리가 각별히 요구되고 있다.

베타선은 인체조직에서 비정(range)이 매우 짧아서 좁은 영역의 병소에 집중적으로 에너지를 전달하기 때문에 암세포나 불필요한 조직의 성장을 저지하는데 매우 효과적이다. 이러한 장점으로 인하여 외국에서는 여러 종류의 베타선원이 개발되었거나 임상실험 중이다. 특히 높은 에너지의 베타선을 방출하는 핵종이 치료용 선원으로 각광을 받고 있다.^{1,2)} 본 연구에서는 최대 에너지가 1.5 Mev 이상인 베타선을 방출하는 핵종을 고에너지 베타선원으로 규정하였다. 여기에 해당하는 핵종으로는 P-32, Sr-89, Sr-90/Y-90.

* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 기계에너지생산공학부, 산업기술연구소

Dep't of Energy Eng., Res. Inst. Indust., Cheju Nat'l Univ.

Ho-166, Re-188이 있고 국내에서는 이들 가운데 밀봉선원 또는 개봉선원인 Sr-90/Y-90과 개봉선원인 Ho-166, Sr-90, Re-188이 현재 병원에서 사용중이다. 이들 선원은 치료용으로 사용하기 때문에 일시에 사용하는 방사능이 높을 뿐만 아니라 최대 에너지가 1.5 Mev 이상인 베타선을 방출하기 때문에 투과력이 큰 제동방사선(bremsstrahlung)이 파생된다.

본 연구는 이러한 고에너지 베타선원의 사용환경을 조사하여 방사선 피폭이 우려되는 다양한 경우에 대해서 몬테칼로 방법을 사용한 MCNP-4C³⁾ 코드로 베타선장을 해석하여 예상되는 개인 방사선피폭선량을 평가하였다.

II. 고에너지 베타선원의 사용현황

현재 국내에서 의료용으로 사용허가가 발급된 고에너지 베타선원은 Sr-90/Y-90, Ho-166, Re-188선원이다.⁴⁾ Sr-90선원은 밀봉선원 및 개봉선원으로 사용되고 있다. 밀봉선원은 안과치료용인 Ophthalmic Applicator로 사용하는 경우이고, 개봉선원은 말기암 환자의 통증완화제로 사용되고 있다. 반감기가 28.8년인 Sr-90은 0.54 Mev인 베타선을 방출하지만 반감기가 64시간인 자핵종 Y-90은 2.27 Mev의 베타선을 방출한다. Y-90은 Sr-90과 영구평형상태에 있기 때문에 Sr-90은 사실상 Y-90 선원으로 작용한다. 각막 내부에 비정상적으로 성장한 양성조직을 제거한 후 재발방지를 위하여 베타선을 조사하는 데 사용된다. Y-90의 베타선은 인체조직 최대 침투깊이가 4mm 정도로 수정체에 손상을 주지 않고서 치료효과를 볼 수 있기 때문에 과거부터 널리 사용되고 있다. 비밀봉 Sr-90은 항골성 핵종으로 인체에 주입하면 약 50%가 뼈로 침투하기 때문에 전립선암, 유방암 등의 말기에 암세포가 뼈로 전이된 환자의 통증완화제로 사용되고 있다.

Re-188은 현재 W-188/Re-188 발생기(generator) 형태로 도입되어 심장혈관이 협착된 환자의 확장 시술후 재발방지용 조사선원으로 사용되고 있다.⁵⁾ 지방이나 콜레스테롤이 부착되어 심장혈관이 협착된 환자는 끝에 작은 풍선모양의 주머니가 달린 모세관

(catheter)을 혈관을 통하여 협착부위까지 주입한 후 모세관으로 공기를 주입하여 확장시키는 시술법(angioplasty)이 널리 사용되었으나 잦은 재발의 문제점이 있었다. 재발을 방지하는 방법으로 확장시술 시과 함께 협착된 혈관부위에 높은 선량의 방사선을 조사하면 효과적이라는 사실이 임상학적으로 입증된 후 베타선조사 시술법이 보편화되었다.

Ho-166선원은 간암치료용 선원으로 사용되고 있는데 동화약품과 한국원자력연구소가 공동으로 DW166HC(밀리칸주)란 약품으로 개발하여 현재 후기 2단계 임상시험중이다.⁶⁾ 홀름-키토산 착화합물은 pH4이하에서는 점조한 용액상태를 유지하나 체내에 투입되어 중성인 체액과 만나 pH가 올라가면 겔화되므로 간암 종괴내에 투여하면 겔상태로 종괴내부에 분포한다. 이때 홀름166에서 방출되는 β 방사선에 의하여 종괴 세포를 괴사시키며 이 착화합물의 물성에 의해 다른 장기로 누출되지 않고 지속적으로 종괴내에 머물러 있으므로 간암종괴의 괴사효율이 높으며 정상조직에는 부작용을 극소화한다.

III. 의료기관의 고에너지 베타선원 사용환경 분석

3.1. 안과 치료용 Sr-90/Y-90 선원

시술할 때 환자의 자세는 대부분 시술대위에 정면으로 누운 상태이며 시술자는 선원함의 두경을 열고 선원손잡이를 잡고서 인출하여 선원의 전면이 아래로 향하게 하여 환자의 안구로 이동한다. 환자의 안구에 접근시킨 직후부터 시간을 측정하여 미리 계산된 시간만큼 조사한 후 선원을 선원함에 넣는다. 시술하는 동안 시술자와 보조자는 납가운(0.5mm)을 착용한다. 선원은 고정체로 스테인레스 금속봉의 끝에 접착되어 있으며 선원의 전면은 얇은 금속막으로 밀봉되어 있어서 누출이 일어나지 않게 되어 있다. 손잡이에는 손의 피폭량을 감소시키기 위한 아크릴 차폐체가 부착되어 있다. 한번 시술에 필요한 시간은 방사능에 따라 다르나 대개 1분 이내이다.⁷⁾

Sr-90선원의 경우 주된 피폭은 선원인출후에 발생

하게 되는데 시술이 정상적으로 이루어지는 경우 선원의 전면이 아래로 향하고 있기 때문에 시술자에게 직접 도달하는 방사선량은 많지 않을 것이다. 그러나 선원을 조작하는 과정에서 실수로 떨어뜨리는 경우를 가정할 수 있으며 이 때 선원의 전면이 시술자에게 향하는 상황을 예상할 수 있다. 이 경우 베타선과 시술자가 착용하고 있는 납가운에 의한 2차 방사선의 영향을 고려하여야 할 것이다. 따라서 Sr-90밀봉선원 사용과 관련하여 방사선장 해석이 필요한 항목을 다음과 같이 설정하였다.

- ① 정상적인 시술자세에서 시술자가 받는 선량
- ② 선원의 전면이 시술자에게로 향한 경우 시술자가 받는 선량.

3.2. Ho-166 선원

Ho-166선원은 한국원자력연구소에서 제조되어 운반용 차폐용기에 넣어서 시술이 있는 당일 배달된다. 차폐된 분배실에서 Ho-166 원액 vial을 집계를 사용하여 운반용 차폐용기에서 인출, vial 차폐용기로 옮긴다. vial의 선원용액을 주사기로 뽑아서 키토산 vial에 주입하고 염산을 혼합하여 주사액을 조제한다. 간초음파검사를 통하여 측정된 종양의 크기에 따라 결정된 주사액의 양(종양직경 1cm당 20mCi)을 Dose Calibrator로 측정한다. 선원용액이 든 주사기를 차폐용기에 담아서 간초음파시술실로 운반한다. 시술자는 초음파검사 영상을 보면서 복부관통 주사바늘을 종양 부위에 꽂은 후 선원용액을 주입한다. 시술자는 수술용 고무장갑과 납가운을 착용한 상태이고, 20 mCi 주입시간은 약 5초간이다. 시술이 끝난 환자는 입원실로 이동하여 4일정도 체류하면서 백혈구수의 변화 등 기본적인 환자의 건강상태가 관찰된다.

Ho-166시술과 관련하여 방사선 피폭이 염려되는 단계는 분배실에서 주사액을 제조할 때와 환자의 복부를 통하여 주사액을 주입할 때이다. 이 과정에서 가장 피폭을 많이 받는 신체부위는 작업자의 손부위이다. 작업자의 경우 납가운과 수술용 고무장갑을 착용하나 Ho-166은 베타선과 함께 감마선을 방출하기 때문에 이것에 의한 영향을 고려하여야 할 것이다. 시술을 받은 환자는 몸속에 방사성 물질이 잔류한 상

태이므로 같은 방을 사용하는 다른 환자에게 피폭을 줄 염려가 있다. 따라서 Ho-166사용과 관련하여 분석되어야 할 항목을 다음과 같이 설정하였다.

- ① Ho-166 선원용액 주입시 시술자의 손에 받는 피폭선량
- ② 입원실로 이동한 환자와 동일한 방을 사용하는 환자의 피폭선량
- ③ vial 차폐용기를 손으로 다루는 과정의 피폭선량

3.3. Re-188 선원

차폐유리로 간막이가 된 공간에서 W-188/Re-188 발생기에 생리 식염수를 주입하여 Re-188 용액을 vial에 용출한다. 용출한 선원용액이 든 vial을 차폐용기에 담아서 운반용카트로 시술실로 운반하여 주사기로 약물을 뽑고 선원주입 기구에 장전한다. 선원주입 기구는 아크릴 상자와 피스톤형 압축기로 이루어져 있다. Re-188 용액을 주입하는 동안 선원은 아크릴상자 속에 들어 있고 시술자는 상자표면으로부터 약 30cm 거리를 유지한다. 선원용액은 피스톤압력에 의해서 약 1m 길이의 링저액 튜브를 거쳐 혈관에 삽입된 catheter에 공급된다. 아크릴판은 제동방사 x-선 발생을 최소화하기 위한 조치로서 사용된다.

Re-188용액(1회주입액 100-150 mCi)을 주입하기 위해서는 시술자는 압축기를 손으로 직접 조작하여야 하는데 이 과정에서 압축기 내의 선원용액과 링저액 튜브를 통과하는 선원용액으로부터 시술자의 상반신에 방사선피폭이 주로 발생한다. 따라서 Re-188 사용과 관련하여 분석되어야 할 항목을 다음과 같이 설정하였다.

- ① 선원용액이 아크릴 압축기 내에 있을 동안 상반신의 피폭선량
- ② 선원용액이 링저액 튜브를 통과할 동안 상반신의 피폭선량
- ③ vial 차폐용기를 손으로 다루는 과정의 피폭선량

IV. 방사선장 해석

고에너지 베타선원인 경우 방사선피폭에 기여하는 방사선은 베타선(전자)과 제동방사선(광자)이다. Ho-

166과 Re-188은 베타선과 함께 감마선도 방출하기 때문에 방사선장 해석을 위해서는 전자와 광자의 수송을 동시에 계산할 수 있는 잔산코드를 사용하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 기능을 갖춘 MCNP-4C 코드를 사용하였다.

4.1. MCNP-4C 코드의 계산모델

MCNP-4C는 중성자, 광자, 전자의 수송을 Monte Carlo 방법으로 계산하는 코드로서 복잡한 3차원 기하학적 구조를 갖는 문제를 푸는 데 적합하다. 코드에서 다룰 수 있는 에너지는 전자 및 광자의 경우 1 keV-1Gev까지이다.

광자의 경우 coherent(Thompson) 산란, Compton 산란, 광전효과, 쌍생성 반응, 광전효과에 의한 형광생성을 다룰 수 있으며 사용자의 선택에 따라 coherent 산란과 형광생성을 제외할 수 있다. 광자와 물질의 반응으로 생성되는 2차전자에 대해서는 3가지의 계산방법이 있다. (1) 전자의 수송을 선택하는 경우 광자의 반응으로 생성되는 모든 전자에 대해서 수송계산을 수행하게 되며 (2) 전자의 수송을 선택하지 않는 경우는 thick target bremsstrahlung 모델이 적용되어 모든 2차전자는 광자의 원래 진행방향으로 조금 이동하다가 곧바로 소멸되는 것으로 가정한다. 이 과정에서 생성되는 제동방사 광자에 대해서는 계속 계산이 수행된다. (3) 전자의 생성을 고려하지 않는 경우 2차전자의 생성이 없는 것으로 가정되며 2차전자가 가지게 될 에너지는 물질에 흡수되는 것으로 계산된다.

전자의 수송계산에서는 Coulomb 충돌, 제동방사(bremsstrahlung) 광자생성, 2차전자의 생성을 고려한다. 전자는 Coulomb력에 의해 짧은 거리에서 매우 많은 충돌이 발생하기 때문에 중성자나 감마에서와 같이 개별적인 반응을 추적하는 계산을 하지 않고 전자의 전체 행로를 몇 단계로 나누어 각 단계별로 계산을 진행한다. 한 단계의 행로길이는 다수의 충돌을 포함할 수 있을 만큼 충분한 크기를 가지는 한편 그 단계에서 에너지 감소가 과대하여 계산의 정확성을 손상하지 않도록 적절하게 설정한다. 각 단계에서의 에너지 감소와 진행방향의 변화

는 전자의 다중충돌이론에 근거한 확률분포로부터 계산된다. 이 방법을 Condensed History Monte Carlo 기법이라 부른다.

제동방사 광자생성 계산은 전자계산에 사용된 단계를 더 세분한 단계별로 이루어진다. 각 세분단계별로 제동방사 광자의 생성여부, 에너지, 진행방향이 결정되고 그로부터 각 세분단계 끝의 전자 에너지가 새로 계산된다. 베타선과 케드전자의 반응에 의한 2차전자의 생성은 Moller cross section에 의거하여 계산된다.

Monte Carlo 방법은 통계적인 방법이기 때문에 가능한 많은 수의 입자가 목표점에 도달할수록 계산결과와의 오차가 감소하여 신뢰도가 증가한다. 목표점에 도달하는 입자의 수는 모의(simulation)하는 입자의 수(history)에 비례하기 때문에 계산결과와 상대오차는 결국 $1/\sqrt{N}$ - N은 모의하는 입자의 수에 비례한다. 그러나 입자의 수를 증가시키면 계산시간이 많이 걸리기 때문에 가능한 적은 수의 history로 오차를 줄이는 효과적인 방법이 필요하다. 그러기 위해서 목표점으로 향하는 입자수를 가공적으로 증가시키면서 가중치(weight)를 반비례하여 감소시키는 variance reduction 기법을 사용한다. MCNP-4C에는 다양한 variance reduction 기법이 제공되어 있다.

4.2. 선원의 에너지 스펙트럼

Table 1은 본 계산에 고려한 베타선원의 최대에너지와 방출비율을 나타내고 있다. 베타선원에서 방출되는 전자의 에너지는 최대에너지를 끝으로 하는 연속 스펙트럼을 가지게 되므로 MCNP-4C 계산을 위해서는 각 선원의 에너지스펙트럼을 별도로 계산하여야 한다. 본 연구에서는 한국원자력연구소의 핵자료 Lab의 에너지스펙트럼 데이터를 사용하였다. Ho-166과 Re-188은 베타선과 함께 감마선을 방출한다. Table 2는 계산에 사용된 Ho-166과 Re-188선원의 감마선 에너지스펙트럼이다.

4.3. 작업환경 모델링

각 선원에 대한 방사선장 해석은 앞서 선정된 8가지 경우에 대해서 실시하였다. 이들은 각 선원별로

Table 1. The energies of β -rays emitted from Sr-90/Y-90, Ho-166 and Re-188

Sources	Maximum energy(Mev)	Emission fraction (%)
Sr-90/ Y-90	0.54	100
	2.28	100
Ho-166	0.191	0.307
	0.394	0.95
	1.778	47.7
	1.868	50.0
Re-188	0.658	0.44
	1.034	0.63
	1.487	1.65
	1.965	25.6
	2.12	71.1

Table 2. The energy spectra of γ -rays emitted from Ho-166 and Re-188

Sources	γ -ray energy (Mev)	Emission fraction (%)	γ -ray energy (Mev)	Emission fraction (%)
Ho-166	8.0574E-02	6.71E-02	1.3794E+00	9.30E-03
	1.8440E-01	2.00E-05	1.4476E+00	9.80E-06
	5.2080E-01	3.30E-06	1.5282E+00	2.00E-06
	6.7400E-01	1.94E-04	1.5819E+00	1.87E-03
	7.0530E-01	1.31E-04	1.6625E+00	1.20E-03
	7.8589E-01	1.19E-04	1.7499E+00	2.77E-04
	1.2631E+00	1.40E-05	1.8305E+00	8.50E-05
Re-188	1.5504E-01	1.5137E-01	8.2947E-01	4.1004E-03
	4.7799E-01	1.0200E-02	9.3135E-01	5.5284E-03
	6.3298E-01	1.2730E-02	1.3080E+00	6.4974E-04
	6.3498E-01	1.4749E-03	1.6104E+00	9.7512E-04
	6.7254E-01	1.1128E-03	1.8020E+00	3.6312E-04

시술과정에서 작업자의 방사선 피폭이 가장 염려되는 경우로서 상세한 내용은 다음과 같다.

Case 1 : 안과치료용 Sr-90/Y-90 선원의 정상 시술 자세에서 전신선량

정상적인 시술조건에서 환자는 시술대 위에 누워 있으며 시술자는 선원 손잡이의 한 쪽 끝을 잡고서 선원의 전면이 아래로 향하게 하여 시술자의 안구에

접근시킨다. 이러한 시술자세를 간단히 나타내면 Fig. 1과 같다. 선원(source)의 직경은 0.9cm이고 두께가 0.008cm인 디스크로 가정하였으며 전면은 0.001cm의 스테인레스박으로 덮여 있으며 측면은 0.05cm 스테인레스막으로 덮여 있다. 선원의 지지물은 지름이 0.9cm이고 높이가 1 cm인 원통형 스테인레스 펠렛으로 가정하였다. 선원과 시술자의 간격은 팔의 길이 정도인 50cm로 가정하였고 인체는 직경이 34cm이고 높이가 80cm인 원통형으로 인체조직은 물로 가정하였다. 시술자가 착용하고 있는 납가운의 두께는 0.05cm이고, 환자가 누워 있는 시술대는 플라스틱으로 가정하여 베타선의 후방산란을 고려하였다. 1회 시술시간은 1분 이다.

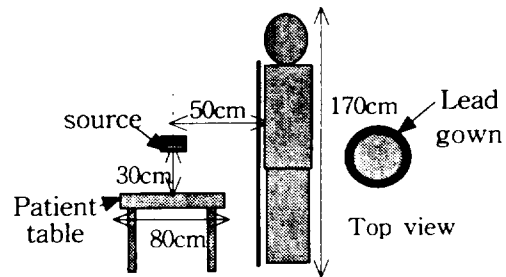


Fig. 1 The geometry of normal therapeutic position of Sr-90/Y-90

Case 2 : 선원의 전면이 시술자에게로 향한 경우의 전신선량

이 경우는 시술자가 선원 손잡이의 끝을 잡고 움직이는 과정에서 실수로 환자의 머리 또는 다른 부위와 부딪혀서 선원이 떨어져 전면이 시술자에게로 향하는 경우를 상정한 것이다. 선원의 방향을 제외한 다른 조건은 case 1과 동일하다. Fig. 2는 이 경우의 기하학적 배열을 나타낸 것이다.

Case 3 : Ho-166 선원액 주입과정의 손에 대한 선량

시술과정에서 작업자의 피폭이 염려되는 순간은 선원용액이 든 주사기를 잡고서 Ho-166 선원액을 주입하는 단계이다. 이 때 가장 많은 피폭을 받는 부위는 시술자의 손이다. 대개 수술용 장갑을 착용하고서 시술을 하는데 1회 시술에 소요되는 시간은 주사기 1개 당 약 5초 정도이며 2단위 투여하는 경우 약 10초가

소요된다. 이 경우에 대한 방사선장 해석을 위하여 Fig. 3과 같이 기하학적 모델을 설정하였다. 주사기는 직경이 0.4cm이고 길이가 7cm인 PVC 원통으로 나타냈으며 하부의 5cm 높이까지 선원용액이 채워져 있는 것으로 가정하였다. 손은 두께가 2cm이고 반경이 7.2cm인 가운데 주사기가 끼워진 원판으로 가정하였고 고무장갑의 두께는 0.05cm로 가정하였다.

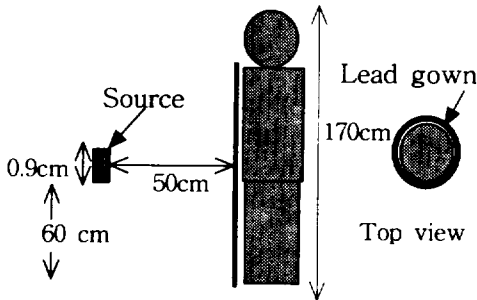


Fig. 2 The geometry of abnormal therapeutic position of Sr-90/Y-90

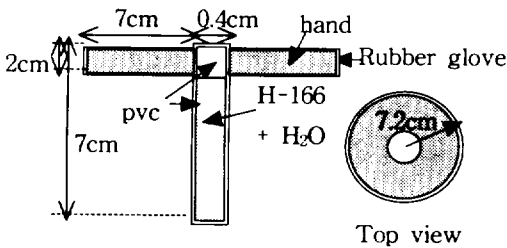


Fig. 3 The geometric model of computing the doses to hand during Ho-166 injection

Case 4 : Ho-166 시술환자로부터 외부선량

Ho-166 시술을 받은 환자는 병실로 옮겨져 치료의 예후를 관찰하기 위하여 3박4일 정도 입원한다. 병원의 입원실 사정파 의료비 문제 등으로 대개 다른 환자와 병실을 같이 사용하게 된다. Ho-166은 체내에 주입되면 젤상태로 오래 동안 간에 잔류하며 반감기가 26.8시간이고 감마선을 방출한다. 따라서 입원기간 동안 같은 병실의 다른 환자나 간병인이 받는 방사선량 계산이 필요하다. 그림 Fig. 4는 이 계산을 위해 설정한 기하학적 모델을 나타내고 있다. 체내에 선원이 포함된 부위는 간암조직으로

직경이 3cm인 구로 가정하였고 다른 환자와 간격은 100cm. 간병인과의 간격은 50cm로 설정하였다. 인체에 의한 차폐효과를 고려하기 위하여 선원은 직경이 34cm인 원통의 중심에 위치하고 있으며 인체조직은 물로 가정하였다.

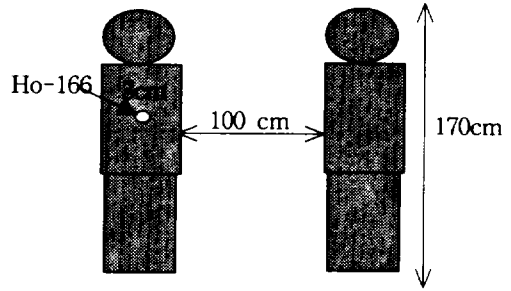


Fig. 4 The geometric model of computing the doses to other patient from a Ho-166 injected patient

Case 5 : H-166 vial 차폐용기의 표면선량

Ho-166은 키토산착화합물 형태로 제조하는 과정 및 제조후에 vial에 봉입된 상태로 vial 차폐용기에 넣어서 손으로 다룬다. Ho-166은 고에너지의 감마선도 소량 방출하므로 vial 차폐용기 표면에서 손에 대한 선량계산이 필요하다. 차폐용기는 보수적 계산을 위하여 TC-99m용 vial 차폐용기를 가정하였다. 차폐용기는 0.5 cm 두께의 아크릴과 1 cm 두께의 납으로 이루어져 있다. Fig. 5는 이 계산을 위하여 설정한 기하학적 모형이다.

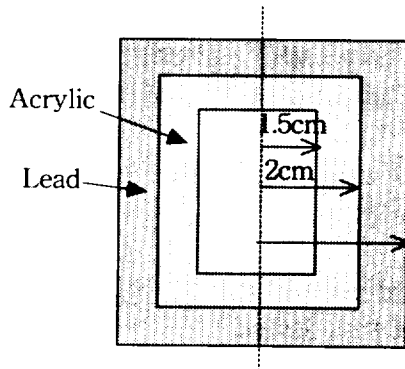


Fig. 5 The geometric model of computing external doses at the vial shield surface

Case 6 : 시술자가 Re-166 선원 주입용 압축기를 조작하는 과정의 선량

Re-188 선원을 주입용 압축기를 사용하여 환자의 혈관에 주입하는 동안 시술자는 선원으로부터 방사선 피폭을 받게 된다. 이 때의 선량을 계산하기 위하여 Fig. 6과 같이 기하학적 모델을 설정하였다. 선원이 장전되는 상자는 아크릴 소재로 제작되었으며 두께가 1cm이고 크기는 30x20x10cm의 육면체이다. 선원은 용액상태로 내경이 0.9cm, 길이가 10cm, 두께가 0.1cm인 주사기에 들어 있다고 가정하였다. 압축기와 시술자의 거리는 약 30cm이며 시술자는 직경이 34cm 높이가 80cm인 원통형으로 가정하였다. Re-188의 1회 주입량은 보통 100-150 mCi이며 주입하는 동안 시술자가 노출되는 시간은 30초로 가정하였다.

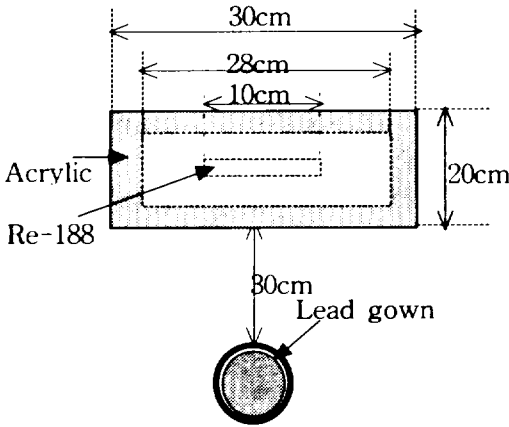


Fig. 6 The geometric model of computing the doses during Re-188 injection

Case 7 : Re-188 용액이 링거액 튜브를 통하여 주입되는 과정의 선량

Re-188 용액이 주입기로부터 흘러나와 PVC 링거액 튜브를 통과하여 환자의 체내로 주입되는 과정에서 튜브가 시술자의 상체 주위를 지나게 되고 이 과정에서 방사선피폭이 발생한다. 방사성 용액이 들어 있는 튜브는 시술자의 가슴 높이에서 수평으로 곧게 뻗어 있는 것으로 가정하였고 튜브의 직경은 0.2 cm 이고, 두께는 0.1cm, 길이는 100cm로 가정하였다.

Fig. 7은 이 경우에 대한 기하학적 배치를 나타낸 것이다. 방사성 용액이 튜브를 통과하는 시간은 15초 정도이다.

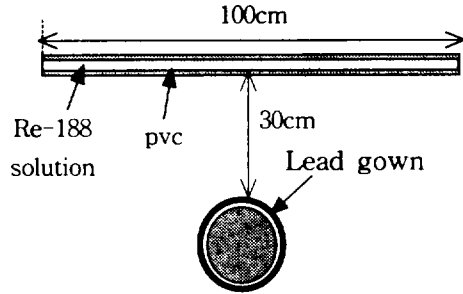


Fig. 7 The geometric model of computing the doses while Re-188 solution is passing through the tube

Case 8 : Re-188 vial 차폐용기의 표면선량

Re-188 용액이 담긴 vial은 차폐용기에 넣어서 운반하거나 취급한다. Re-188은 감마선도 방출하므로 vial용기에 대한 차폐계산이 필요하다. 이 계산을 위하여 Ho-166의 경우와 같이 그림 Fig. 5에 주어진 기하학적 모델을 사용하였다.

V. 방사선장 계산 결과

위에 선정된 8가지 케이스에 대해서 MCNP-4C 계산을 효율적으로 수행하기 위하여 공통적으로 energy cut-off 값을 10 keV로 설정하였으며 weight cut-off 값은 코드에 사용된 default 값을 사용하였다. variance reduction을 위하여 source biasing과 Bremsstrahlung biasing을 선택하였다. 2차 전자의 생성 option을 선택하여 파생된 전자에 대해서 계속 계산을 수행하도록 하였다. 선량을 계산 위해 사용한 선량변환인자는 ICRP-74⁸⁾에서 제공한 값으로서 Table 3에 주어진 바와 같다. Table 4는 선정된 8가지 경우에 대한 방사선량계산결과이다.

광자의 선량률은 선원에서 방출된 감마선에 의한 것과 제동방사선에 의한 것을 합한 값이며 전자의 선량률은 선원에서 방출된 전자와 2차전자에 의한 값을

Table 3. Fluence-to-dose conversion factors

electron 에너지 (MeV)	H/φ (nSv cm ²)	photon 에너지 (MeV)	H/φ (μSv cm ²)
0.07	0.221	0.010	0.048518
0.08	1.056	0.015	0.125424
0.09	1.527	0.020	0.20496
0.10	1.661	0.030	0.299936
0.1125	1.627	0.040	0.338052
0.125	1.513	0.050	0.357238
0.15	1.229	0.060	0.378012
0.20	0.834	0.080	0.439931
0.30	0.542	0.100	0.517174
0.40	0.455	0.150	0.752344
0.50	0.403	0.200	1.004088
0.60	0.366	0.300	1.50834
0.70	0.344	0.400	1.99584
0.80	0.329	0.500	2.46568
1.00	0.312	0.600	2.90816
1.25	0.296	0.800	3.7269
1.50	0.287	1.000	4.48341
1.75	0.282	2.000	7.4896
2.00	0.279	4.000	12.0153
2.50	0.278	6.000	15.9873
3.00	0.276	8.000	19.9191
3.50	0.274	10.000	23.76
4.00	0.272		
5.00	0.271		
6.00	0.271		
7.00	0.271		
8.00	0.271		
10.00	0.275		

합한 값이다. 단위선량률은 코드에서 계산한 결과를 실제 고려한 선원의 방사능으로 나눈 값이다. 1회 적용시간은 의료기관 방문시 파악한 대표적인 시술시간 또는 선원에 노출되는 시간을 나타내며 Case 4의 경우 시술후 환자가 4일간 입원해 있는 것을 고려하였다. vial 차폐용기의 표면선량 적용시간을 30분으로 설정한 것은 보수적인 계산을 위하여 충분한 시간을 고려하기 위해서이다. 사용 방사능은 1회 시술시 사용하는 방사능을 기준으로 결정하였다. 예상선량은 단위선량률(Sv/sec/mCi)에 1회 적용시간과 사용 방사능을 곱하여 구한 값이다.

본 연구에서 고려한 8가지 경우에 대한 계산결과를 보면 1회의 선량값이 가장 높은 경우는 Ho-166을 주입하는 과정에 시술자의 손에 받는 피폭량(Case 3)으로서 1회 피폭량이 1.02×10^{-4} Sv이다. 매주 2회씩 연간 100회 시술한다고 가정하면 연간피폭량이 10mSv(1rem)로서 손에 대한 연간선량한도인 500mSv 보다 훨씬 낮다. 다음은 시술환자와 같은 병실을 사용하는 환자가 받는 선량으로 7.82×10^{-5} Sv이다. 이 값은 일반인의 연간 유효선량한도 1 mSv보다 훨씬 낮은 값으로 Ho-166치료를 받은 환자의 경우 다른 환자와 같은 병실을 사용하여도 아무 문제가 없음을 알 수 있다. 다음으로 선량이 높은 경우는 Re-188을 주입하는 과정에서 주입용 튜브로부터 받는 선량으로 2.66×10^{-5} Sv이다. 이 정도의 선량이라면 매주 2회씩 연간 100회 시술하는 경우에도 약 2.7 mSv정도밖에 되지 않으므로 작업종사자의 연간 선량한도 20 mSv 보다 훨씬 낮음을 알 수 있다.

Sr-90의 경우 정상시술시 1회 선량률은 4.3×10^{-7} Sv

Table 4. The computed results of radiation exposure doses

Case No	unit dose rate (Sv/sec/mCi)			typical therapeutic time	typical handling activity (Ci)	estimated doses (Sv)
	photon	electron	total			
Case 1	8.8×10^{-21}	1.3×10^{-10}	1.3×10^{-10}	60 sec	55	4.3×10^{-7}
Case 2	1.8×10^{-20}	6.9×10^{-10}	6.9×10^{-10}	30 sec	55	1.1×10^{-6}
Case 3	3.3×10^{-9}	3.4×10^{-7}	3.4×10^{-7}	10 sec	30	1.0×10^{-4}
Case 4	1.2×10^{-11}	0.0	1.2×10^{-11}	4 days	50	7.8×10^{-5}
Case 5	2.5×10^{-20}	0.0	2.5×10^{-20}	30 min	500	7.5×10^{-15}
Case 6	3.5×10^{-10}	6.9×10^{-11}	4.2×10^{-10}	30 sec	150	1.9×10^{-6}
Case 7	5.7×10^{-21}	1.17×10^{-8}	1.2×10^{-8}	15초	150	2.7×10^{-5}
Case 8	2.1×10^{-20}	0.0	2.1×10^{-20}	30 min	500	6.3×10^{-15}

이고 1년에 120건 시술하는 경우에도 연간 0.05 mV 정도 밖에 피폭받지 않는다.

VI. 결 론

1.5 MeV이상의 베타선원을 사용하는 대표적인 의료기관을 방문하여 선원사용에 따른 작업환경을 조사하여 이를 바탕으로 방사선 피폭이 염려되는 작업조건에 대해서 MCNP-4C 코드로 개인선량을 평가하였다. 본 연구에서 해석한 결과에 따르면 안과치료용 Sr-90/Y-90 선원, 간암치료용 Ho-166 선원, 혈관확장 시술용 Re-188 선원 모두에 대해서 방사선 피폭이 염려되는 여러 작업조건에서도 예상피폭선량이 선량 한도보다 훨씬 낮은 값을 보임을 알 수 있었다. 또한 방사선피폭에 미치는 제동방사선의 영향이 그다지 크지 않음을 발견하였다.

참고문헌

- 1) 이준일. 1993. 핵의학기술학. 도서출판 대학서림. pp.281-387.
- 2) Coursey, B.M., Colle, R., Zimmerman, B.E., Cessna, J.T., Golas, D.B., 1998. National radioactivity standards for beta-emitting radionuclides used in intravascular brachytherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* Vol. 41, No.1, pp.207-16.
- 3) Briesmeister, J. F., 2000. *MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C*. LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory.
- 4) 한국원자력안전기술연구소, 2000. 의료용 고에너지 베타선원 사용현황. 방사성물질규제실.
- 5) Lee J, Lee DS, Kim KM, Yeo JS, Cheon GJ, Kim SK, Ahn JY, Jeong JM, Chung JK, Lee MC. 2000. Dosimetry of rhenium-188 diethylene triamine penta-acetic acid for endovascular intra-balloon brachytherapy after coronary angioplasty. *Eur J Nucl Med* 2000, Vol. 27, No. 1 pp.76-82.
- 6) 동화약품홈페이지 <http://www.dong-wha.co.kr/report/report0101.htm>
- 7) Sayeg, J. A. and Anderson, R.C., 1991. A New Method for Characterizing Beta Ray Ophthalmic Applicator Sources. *Med. Phys.* pp. 414-418.
- 8) International Commission on Radiological Protection, 1995. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74.