

등

향

# 근접치료 (Brachytherapy)의 선량체계 및 안전관리

서태석

가톨릭의대 의공학교실

방사선 치료의 궁극적인 목적은 종양조직에 최대 선량을 투여하고 주위 정상조직은 보호함으로 치료성적을 극대화시키는데 있다. 치료성과와 예후에 수반되는 합병증은 방사선의 선량에 매우 밀접한 관계가 있으므로 국제방사선위원회(ICRU)에서는 투여되는 선량이 계획된 선량의  $\pm 5\%$  이내로 정확하게 유지되는 것을 권고하고 있다. 이러한 목적에 부합하고 방사선치료 성적을 극대화시키기 위하여 선형가속기를 이용한 고에너지 X-선 및 전자선은 물론, 근접치료를 위한 밀봉방사성동위원소의 이용이 날로 증가하고 있는 추세다. 특히 최근 들어 근접치료의 이용이 증가하고 있으며, 새로운 기술의 개발과 더불어 원격자동 근접치료기 등이 등장하게 되었다. 새로운 기기들이 편리하고, 정확히 사용될 수 있는 이점이 많아진 반면, 거기에 따른 위험성도 부각되고 있다.

근접치료는 의료용 방사선 발생장치에서 방출되는 고 에너지 방사선을 이용한 체외 방사선치료와 달리 방사성 동위원소를 인체 내 종양 부위에 직접 삽입하거나 근접시켜 치료하는 방법으로써 종양을 근치시킬 수 있는 방사선량을 국소 부위에 집중적으로 조사하면서 병소 주위에 선량을 급격히 감소시켜 정상조직이나 기관에 대하여 최대한 보호할 수 있도록 치료하는 방법으로서 방사선 치료 효과비를 증가시키기 위하여 고안된 방사선 치료법이다. 밀봉 및 비밀봉 방사성동위원소가 선원으로 사용되며, 특히 밀봉 선원이 방사선 암 치료에 주로 사용되고, 비밀봉 선원은 핵의학 분야에서 주로 영상을 얻기 위한 목적으로 사용되거나, 특별한 경우 암 치료 효과를 높이기 위하여 비밀봉 선원이 사용되기도 한다.

근접치료는 방사성 동위원소를 직접 몸에 주입하고, 다량의 방사선이 인체내 조사되기 때문에 방사

선사고 유발의 위험성이 높아, 방사선 안전에 특히 유의해야 한다. 이를 위하여 방사성 근접치료의 분류방법, 동위원소 선원에 대한 이해와 선량체계, 치료절차는 물론 방사선 안전관리에 관련된 성능검사 방법 등을 이해하고, 사고발생 사전 방지 및 사후 조치 등에 대한 준비가 있어야 한다. 다음은 근접치료에 대한 내용을 소개하고, 국내 현황 및 앞으로의 전망에 대해 모색하고자 한다.

## 1. 근접치료의 분류

근접치료는 선량률 및 선원의 인체 주입 방법에 따라 분류될 수 있다. 근접치료를 분류하는 일반적인 방법은 선량률에 의한다. ICRU 38 보고서에 의하면 선량률에 따라 고선량률(high dose rate:HDR), 중선량률(medium dose rate:MDR), 저선량률(low dose rate:LDR)로 분류되며, 과거에는 주로 저선량률 선원을 이용하여 치료가 이루어졌으며, 최근에는 고선량률 또는 중선량률 선원을 이용하여 치료하고 있다. 고선량률 근접치료는 선량률이 12Gy/hr 이상(보통 2~5 Gy/min)으로 6~15회 분할치료로 진행되며, 중선량률 근접치료는 선량률이 2~12 Gy/hr로 유사한 횟수로 분할 치료 한다. 중·고 선량률 근접치료는 방사선차폐가 되어 있는 근접치료실내에서 어플리케이터(applicator)를 종양 부위에 삽입한 후 원격조정장치를 이용하여 밀봉 방사성동위원소를 장착하는 방법으로 단 시간내에 치료가 가능하여 입원없이 외래형태의 치료가 가능하다. 저선량률 근접치료는 선량률이 0.4~2 Gy/hr로서 통상 1회 연속 조사(1일 내지 3일)로 진행된다. 저선량률 근접치료는 수술실에서 어플리케이터를 종양 부위에 삽입한 다음 밀봉 방사성동위원소를 치료방사선 전문의가 직접 장착하는 방법으로 방사선방어시설이

되어 있는 입원실에서 대략 2~3일 입원하여 치료하는 방법이다. 과거에는 선원을 직접 인체에 주입하면서 선원 위치를 확인하기 때문에(Pre-loading), 시술자에게 많은 피폭이 되었으나, 최근에는 미리 가상 선원을 몸에 주입하고 위치가 확인되면 선원을 몸에 주입시키는 방법(after-loading)이 사용되어 시술자의 피폭을 줄일 수 있었다.

근접치료에서는 선원을 인체에 주입하는 방법에 따라, 강내조사(Intracavitary Implant), 조직내조사(Interstitial Implant), 관내조사(Intraluminal Implant), 접촉치료(contact therapy)등으로 나누어진다. 강내조사는 영어로 cavity를 뜻하는 것하며 한 쪽 끝이 막혀 있는 해부학적 구조를 가진 부위에 생긴 종양을 치료하는 방법이다. 임상적인 예로서는 자궁암 등이 해당된다. 조직내조사는 조직내 마취한 상태에서 표피를 뚫고 끝이 침예한 바늘형의 동위원소 자체 혹은 동위원소를 나중에 삽입할 수 있는 도구를 자입하여 국소 부위에 방사선치료를 하는 방법으로 자입치료라고도 한다. 임상적인 예로서는 구강암, 뇌종양, 유방암, 전립선암, 췌장암, 직장암등을 들 수 있다. 관내조사는 양쪽이 막혀 있지 않은 해부학적 구조를 가진 부위에 생긴 종양을 치료하는 방법으로서 임상적인 예는 기관지암, 식도암, 담도암, 비인두암 등이다. 접촉치료는 직접 종양 부위에 방사성동위원소를 삽입하는 것이 아니고 방사성동위원소 삽입을 위한 치과용 몰드(mould)나 플레이트(plaque)를 제작하여 치료하는 방법으로서 임상적인 예는 안면부 피부암, 구강암등이 해당된다.

## 2. 선량계산체계

근접치료에서 사용되는 선량계산체계는 인체내 선량을 계산하기 위한 종합적 체계로서, 선량계산

시스템, 선원에 대한 정의, 선량계산 알고리즘으로 구성되어 있다. 선량계산 시스템은 근접치료시 처방선량에 대한 조사시간을 계산하기 위하여 개발된 방법이다. 선량계산 시스템에는 Computer를 이용한 계산시스템, Paterson-Parker System (Manchester system), Quimby, Memorial, Paris System등이 있다. 컴퓨터를 이용하는 시스템은 일일이 모든 점을 계산하여 처방선량이 합당한가를 확인하는가에 비해 다른 시스템들은 실험 또는 사전 계산을 통해 테이블로 자료를 만들고, 최적의 선량분포를 예측할 수 있는 선원 배치 및 조사시간에 대한 값을 제공해준다. 그러나 가장 확실한 방법은 역시 컴퓨터를 이용하여 인체내 모든 점에서 선량을 계산하는 방법이다.

컴퓨터로 선량을 계산할 때 근접치료에 사용되는 선원의 종류는 크게 점선원(point source)과 선형선원(line source)으로 구분하여 선량을 계산한다. 자궁암 등 처방이 필요한 치료에서는 치료 처방선량을 A 점, B 점, 직장과 방광의 기준점에 대한 선량을 계산한다. 점선원은 방사선은 선원의 중심으로

부터 방출되고 등방성으로 가정하나 선원의 비등방성 인자를 고려하여 거리역자승 법칙과 조직내에서의 흡수와 산란을 고려하여 계산한다. 선형선원은 선형에 따라 균일한 방사능의 세기를 가지며 시버트 적분(Sievert Integral)을 사용하여 선량을 계산하며, Wires 혹은 ribbons 등은 일련의 점선원으로 간주하여 선량을 계산한다:(interval volume).

마지막으로 선원이 결정되면 선원과 계산하고자 하는 위치에서 선량값을 계산할 수 있는 알고리즘이 결정되어야한다. 선량계산알고리즘은 선량분포를 계산하고 기하학적으로 적당한 치료 용적 및 처방선량을 조사하는데 요구되는 시간 등을 결정한다. 선량계산 알고리즘은 점선원, 선형선원, 움직이는 선원에 따라 달리 적용된다. 점선원의 선량계산은 주어진 시간동안 조사된 전체선량을 시간과 선량률의 결과로 간단하게 나타낼 수 있다. 여기서 선량률은 선원의 물리적, 기하학적 특성에 의존하고, 점과 선원을 모두 포함하는 매질에 의존한다. 임상에서 암환자의 방사선 치료에 널리 사용되고 있는 근접치료용 밀봉선원에 대한 물리적인 특성은 표 1과 같다.

표 1. 외부 및 근접치료용 밀봉선원에 대한 물리적인 특성

선원종류	결합에너지	결합구조	방출에너지 및 종류	반감기	베타붕괴에너지
Co-60	524800±1.424 keV	Hexagonal	1.17, 1.33 MeV	5.271 year	2823±0.481 keV
P-32	270852±0.192 keV	Monoclinic	1.7103 MeV	14.262 day	1710±0.209 keV
Sr-90	782631±2.730 keV	Cubic	0.546 MeV	28.78 year	545±1.409 keV
I-125	1056292±1.892 keV	Orthorhombic	0.0355 MeV	59.408 day	-1652±2.568 keV
Cs-137	1149292±2.991 keV	Cubic	0.662 MeV	30.07 year	1175±0.172 keV
Ir-192	1524288±2.883 keV	Cubic	0.32, 0.47 MeV	73.83 day	1459±2.883 keV
Au-198	1565913±2.941 keV	Cubic	0.412 MeV	2.7 day	1372±0.539 keV
Ra-226	1731609±2.520 keV	Cubic	4.87 MeV	1600 year	-640±3.273 keV
Am-241	1817935±1.984 keV	Hexagonal	5.683 MeV	432.2 year	-767±1.173 keV
Cf-252	1881274±5.106 keV	Cubic	6.217 MeV	2.645 year	-1260±50.00 keV
Pd-103	524800±1.424 keV	Cubic	0.543 MeV	16.991 day	-2687±16.758 keV

점선원에 대한 선량계산식은 다음과 같이 정의된다.

$$k = A + BR + CR^2 + DR^3$$

$$D = k_R \times \phi(r) \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air}^{water}$$

D : dose rate

$k_R$  : reference air kerma rate

$\frac{1}{r^2}$  : inverse square law

$\phi(r)$  : thickness r에서의 effective transmission

$\left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air}^{water}$  : mass-energy absorption coefficient ratio

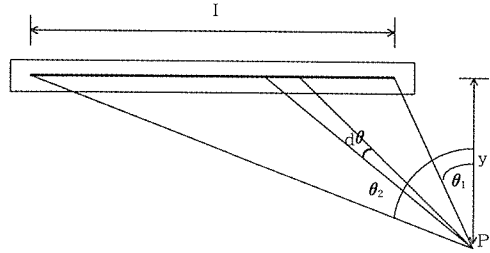


그림 1. 실효길이 I인 선원에 대한 Sievert 적분에 사용된 기하학적인 배열

선형 선원에 대한 선량계산에는 Sievert 적분 및 Interval Volume을 이용하는 방법이 TM이고 있다. Sievert 적분에 의한 선형 선원(그림1)으로부터 임의의 계산점까지 선량률 계산 과정은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{D} = \frac{\Gamma \cdot A \cdot f \cdot k}{\lambda \cdot y} \int_{\theta_1}^{\theta_2} e^{-(\mu d \sec \theta)} d\theta$$

A : 방사능의 세기,

$\Gamma$  : 비감마선 상수

f : R/rad 변환계수

$\lambda$  : active 길이

d : effective 벽두께

k : 조직의 산란과 흡수에 대하여 고려한 계수

$\theta_1, \theta_2$  와  $y$  : (그림 1 참조)

k 값은 아래의 식으로 표현되며, 여기서 R은 선원에서 계산점까지의 거리를 나타내고,  $\mu, \alpha, \beta, A, B, D$  는 주어진 동위원소에 대하여 경험적으로 결정된 상수이다.

$$k = e^{-\alpha R}$$

$$k = 1 - \alpha R^\beta$$

Interval Volume 방법은 선형 선원을 여러 개의 점 선원으로 구성되어 있다고 가계산하는 방법이다.  $^{192}\text{Ir}$ 의 wire형태 같이 유연한 선원은 임의의 모양으로 구부러진다. 여기서 점에서의 선량 계산의 수학적 과정은 일반화되어 있지 않다. 가장 간단한 방법은 curve source를 나누어서 행하는데 이는 선형선원 계산방법을 이용한다. 원격조정 방식의 근접치료기에서는 움직이는 선원을 사용한다. 계산 방법은 여러개의 점선원으로 가정하여 시간별로 머무는 시간을 이용하여 선량을 계산한다. 또한 시간에 따른 가중치를 줄 수 있어 원하는 선량 분포를 얻을 수 있다.

$$D = k_R \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air}^{water} \sum t_i \frac{1}{r_i^2} \phi(r_i)$$

$t_i$  : dwell time

### 3. 안전관리(인수검사 및 주기적인 품질관리)

근접치료의 치료절차(그림 2)는 원격치료에 비해 단계가 복잡하고 실수가 유발될 가능성도 크기 때문에 안전관리가 매우 중요하다. 특히, 고선량률 근접치료를 수행할 때 각별한 주의를 요하고 있으

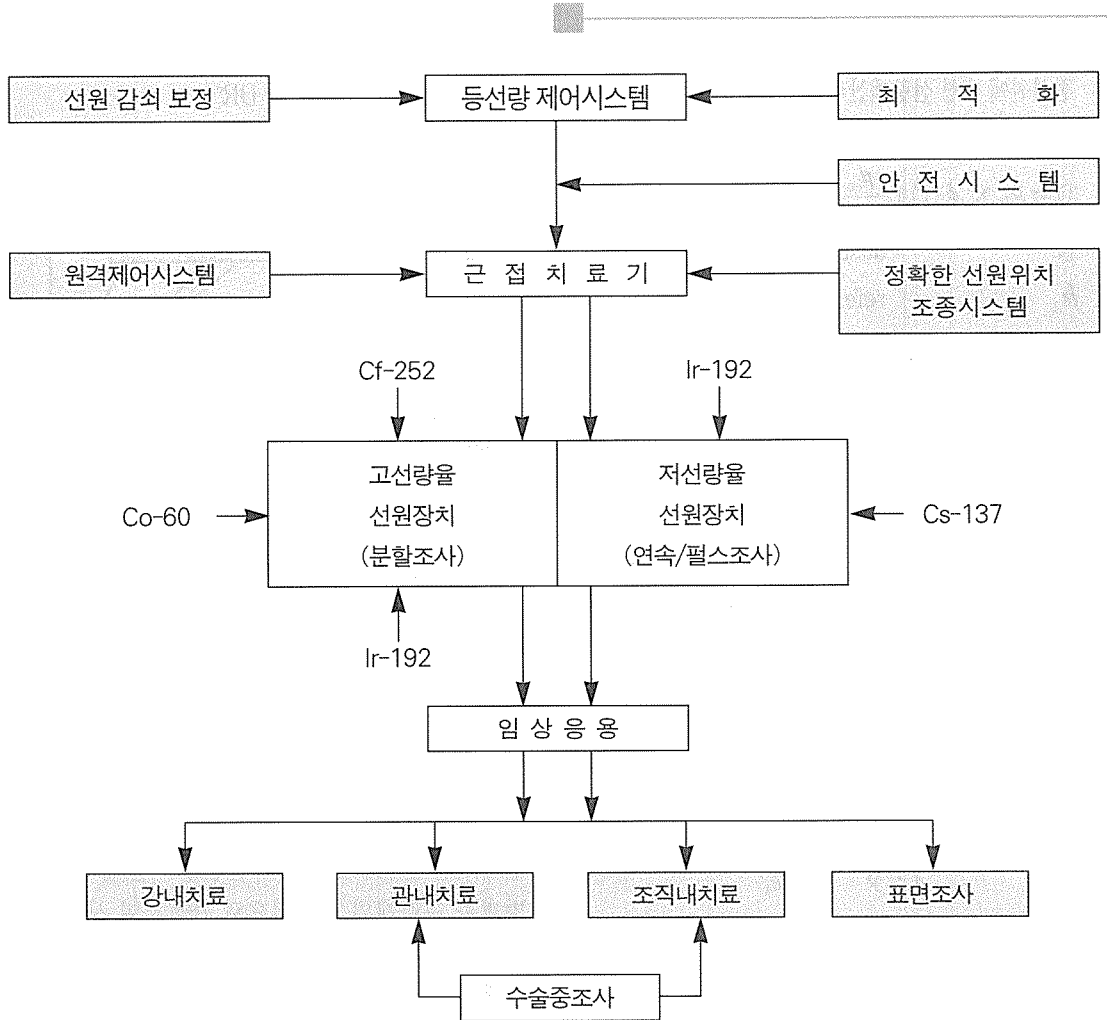


그림 2. 원격제어 근접치료 기술을 설명하는 도식

며, 선원분실 및 선원구동 문제시 응급처치 방법 등이 잘 숙지되어야 한다. 따라서, 사람의 실수를 배제한다 치더라도, 기기 자체의 오류에 의한 사고 발생 가능성이 높기 때문에 항시 기기 및 치료과정에 대한 품질 관리가 매우 중요하다. 안전관리는 초창기의 인수검사와 및 그후 주기적인 관리를 포함한다.

의료용 방사선에 대한 안전관리의 중요성은 널리 인식되고 있으며 특히, 근접치료시 사용되는 선원

에 대해서는 더 말할 나위가 없다. 방사선치료에 관한 정도관리에 관해서는 고 에너지 방사선을 이용한 암 치료기와 이에 수반되는 의료 소송의 증대에 대응할 목적으로 1980년대에 선진 각국에서 급속도로 검토되기 시작하였다. 국제적인 규제의 추세는 의료방사선의 사용에 있어서 정당화, 최적화 및 선량제한이라는 명제아래 체계적이고, 조직적으로 환자 및 작업종사자에 대하여 규제가 강화되

어왔다. 선진국은 이미 의료방사선안전관리법규를 제정하여 규제하고 있으며, 스페인은 1986년에, 프랑스는 1991년에, 그리고 일본은 1992년에 제정하였고, 유럽 의회령84/466/Euratom, 97/43/Euratom 등이 오래 전 만들어졌다. 지금의 의료상황은 진료 전반의 질적 향상과 의료 소송 대응이 절실히 요구되고 있는 실정으로서 방사선 안전관리에 대한 준비가 매우 중요하다.

근접치료시 방사선 안전관리를 위하여 제일 먼저, 품질보증 프로그램 및 절차서를 만들어 주기적으로 점검하여야하고, 기준치를 벗어났을 때는 치료를 중단하고 원인을 분석한 뒤 적절한 조치를 취하여야한다. 제일 중요한 점검사항은 선원 관리로서, 각 시설에서 사용되고 있는 기준 선량계, 타이머, 선원의 방사능 세기 및 선원저장 용기내의 위치 등이다. 두 번째로, 기계적 및 광학적인 정도관리가 수행되어야한다. 어플리케이션 내의 선원의 위치를 점검하고, 모의선원으로 x-선 촬영으로부터 실선원과 모의선원이 동일한 위치에 있는지를 확인하여야한다. 마지막으로, 안전성에 대한 관리를 수행하여야한다. 방사능의 누설을 점검하고, 선원의 분실에 주의해야하며, 모의 선원 및 실 선원의 구별을 표시하고 주기적으로 점검한다.

#### 4. 현황 및 전망

현재 국내 치료방사선과( 혹은 방사선종양학과) 53개 기관 중 저선량률 혹은 고 선량률 근접치료를 수행하고 있는 기관은 36개 기관으로 방사선치료 효과를 향상시키기 위하여 외부 방사선치료와 병용 혹은 단독 요법으로 널리 사용되고 있다. 2001년 4월 조사에 의하면 제작사별로 Nucletron 12대, Buchler 9대, Shimadzu 6대, Isotopen 5대, Omnitron 1대, Varisource 2대로 총 35대였다. 과거에는 밀봉 방사성물질로 Ra-226, Rn-222, Co-60 등이 많이 사용하였으나 현재 국내 및 국외에서 Ir-192, Cs-137, Au-198, I-125 Cf-252 등이 주로 사용되고 있다. 고 에너지를 이용한 외부방사선치료와 병용 혹은 근접치료단독 요법으로 치료 효과를 극대화시킬 수 있어 중앙치료의 중추적인 역할을 하고 있으며, 임상 응용은 더욱 확대될 것이다. 외국에서 고가로 수입하여 사용되고 있는 제작사별 근접치료용 밀봉선원에 대해 의료용 방사성 핵종의 생산을 위한 기반 기술이 이미 마련되고 연구가 진행되어 일부 연구기관에서는 자체적으로 선원을 개발하여 임상에 적용하려하고 있으며, 조만간 순수 국내 기술에 의한 근접치료가 가능할 것으로 사료된다. KRIA

#### 참 고 문 헌

- [Edg86] Browne, E. et al., Table of Radioactive Isotopes, John Wiley & Sons, Inc. (1986).
- [Gri97] Grigoriev, I.S., et al., Handbook of Physical Quantities, CRC Press, Inc. (1997).
- [Lid99] Lide, D.R. Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press LLC (1999)
- [Spe87] Specification of brachytherapy source strength radiation therapy committee task group #32, 21, AAPM. (1987)
- [Dos95] Dosimetry of interstitial brachytherapy sources radiation therapy committee task group #43, 26, AAPM. (1995)
- [Hig98] High dose rate brachytherapy treatment delivery radiation therapy committee task group #59, 29, AAPM. (1998)
- [David00] David Beyer, et al., "American brachytherapy society recommendations for clinical implementation of NIST-1999 standards for palladium brachytherapy.", International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics., 47(2):273-275, 2000