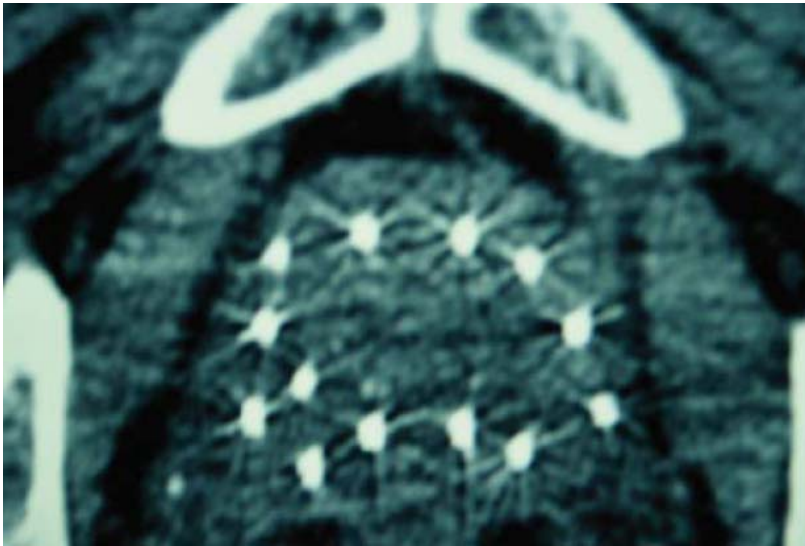




국제방사선방호위원회 간행물 98

영구이식 선원을 이용한 전립선암 근접치료의 방사선안전 특성

Radiation Safety Aspects of Brachytherapy for
Prostate Cancer Using Permanently Implanted
Sources



한양대학교
방사선안전신기술연구센터

ICRP Publication 98

영구이식 선원을 이용한 전립선암 근접치료의 방사선안전 특성

Radiation Safety Aspects of Brachytherapy for
Prostate Cancer Using Permanently Implanted
Sources

ICRP 승인: 2004년 10월

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은
ICRP의 허락(2008년 8월)을 받았으며
ICRP 정신에 따라 무료로 배포합니다.

국제방사선방호위원회

표지 그림

전립선에 시술된 영구이식선원의 CT영상

자료원: R.V. Heysek 등, Brachytherapy, 5, 244-250(2006)

역사 서문

평균수명의 연장으로 암이 주로 진단되는 노령 인구 비율이 높아지고 초음파, CT, MRI 등 의료영상기기의 해상도가 개선되었을 뿐만 아니라 종양표지자 검사와 같은 체외검사기법도 정교해짐에 따라 암 진단 건수도 증가하고 있다. 근접치료기술이 적용되는 전립선암이나 자궁경부암, 유방암도 예외는 아니다. 전통적으로는 우리국민의 전립선암 이환율은 서구 국민에 비해 낮았으나 식생활 등 문화가 서구화됨에 따라 암 역학도 닮아가 근래에는 중년 이후의 남성들이 전립선암을 진단받는 비율이 높아지고 있다.

부인과 암과 함께 체외에서 환부로 접근이 비교적 용이한 전립선암의 경우 체외 빔치료기술(EBRT)과 함께 근접치료 기술이 사용되어 왔다. 투과력이 낮은 방사선원을 암중에 직접 삽입 또는 접촉하는 근접치료 기술은 주변에 정상세포 선량을 줄여 부작용을 경감할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. 높은 선량률로 단시간에 계획한 선량을 부여하는 고선량률(HDR) 근접치료도 이용되지만, 반감기가 짧고 투과력이 낮은 방사선을 방출하는 핵종(주로 ^{125}I 과 ^{103}Pd)을 작은 밀봉선원으로 가공하여 암중에 직접 이식하여 치료하는 씨알 영구이식 근접치료 기술도 이용되고 있다. HDR 근접치료와 씨알 이식 근접치료 각각 장단점이 있고 관점에 따라서는 전자가 낫다는 평가도 있지만 후자의 임상사례도 괄목할 수준에 있다. 한편으로는 전립선암 치료에 레이저를 이용하는 새로운 기술도 방사선치료의 경쟁기술로 발전하고 있어서 영구이식 근접치료의 장래가 불투명한 측면도 있지만, 현행 기술이므로 관련 안전정보는 여전히 가치가 있다.

2007년을 기준으로 국내에 수입된 ^{125}I 씨알 선원은 3450개(총 방사능 47 GBq)이다. 1명의 환자에게 평균적으로 100개 안팎의 씨알을 이식하므로 연간 치료환자는 35명 내외로 추측할 수 있다. 이 수는 미국에서 매년 4만 건 정도인 비율에 비해 매우 낮으나 이 기술의 보급이 늦은 원인도 있으므로 앞으로 증가할 가능성은 있다(참고로 2008년 상반기에 수입된 ^{125}I 씨알은 2640개로 전년 대비 증가했다).

계획한 방사선 조사지만 방사성물질을 인체 내에 영구적으로 이식하고 이러한 환자가 생활 속에서 타인과 접촉할 뿐만 아니라, 이식 후 충분한 기간이 경과하지 않아 아직 체내에 상당한 방사능이 잔류하는 상태에서 사망했을 때 시신을 화장하는 문제 등 파생되는 방사선 안전이슈들이 있다. 이 ICRP 보고서는 방사성 씨알 영구이식에 의한 전립선 근접치료에 관련되는 안전이슈를 검토하고 필요한 권고를 제공하기 위한 것이다.

씨알 선원 영구이식에 의한 전립선암 치료와 관련되는 의료진이나 가족, 보호자, 일반인의 방사선 피폭에 대해서 이 보고서가 몇 가지 중요한 권고를 제공하고 있지만 역자는 일반인들이 이식환자를 대하는 입장에 대해 한 가지 덧붙이고 싶다.

현재 일반인은 방사선에 대해 공포심에 가까운 인식기반을 가지고 있다. 따라서 방사선원을 체내에 이식한 사람이 지하철, 버스, 비행기, 극장에서 옆자리에 앉아 있을 수 있다고 한다면 상당한 저항감을 느낄 수 있다. 다행히 그러한 사실을 모르겠지만 만약 안다면 의식적으로 경외하는 “낙인stigma” 반응을 보일 수 있다. 그래서 당국으로 하여금 이러한 환자의 행동에 일정한 제약을 가하기를 바랄 수도 있다.

방사선방호 원칙에서도 합리적으로 가능하다면 유해할 수 있는 방사선 피폭을 회피하는 것이 옳다. 그러나 이 보고서에 밝히고 있듯이 환자로부터 30 cm 거리에서 선량률은 이식 직후에도 수 $\mu Sv/h$ 수준에 불과하다. 우연히 환자 가까이 10시간 동안 머무르더라도 선량은 수십 μSv 즉, 통상 누구나 받고 있는 자연방사선량의 1개월분 수준, 또는 유럽이나 미국으로 2회 정도 항공여행 중에 피폭하는 우주방사선량 수준에 불과하다. 다시 말해서 아무런 안전 문제를 초래하지 않는 “사소한” 문제이다.

“역지사지”, 내가 또는 내 배우자나 내 가족 구성원이 전립선암을 치료한다고 생각해보자. 내가 그러한 입장일 때 “사소한” 방사선 때문에 내 행동의 자유를 타인에 의해 또는 법규에 의해 제약받는 것을 용인할 것인가를 생각해 보면 그 답은 자명할 것이다. 이 점은 갑상선암을 치료하기 위해 방사성 ^{131}I 을 투여 받은 환자가 주는 선량이나, 이들의 배설물로 인해 강물이 극미한 농도로 오염되는 경우에도 마찬가지이다.

의료전문가가 아닌 역자가 상당한 의료정보를 포함하는 이 간행물을 번역함에 따라 내용에 서투르거나 잘못된 표현이 없지는 않을 것이다. 잘못을 발견한 독자는 역자에게 알려서 바로잡을 수 있도록 도와주기 바란다. 끝으로 이 간행물의 우리말 번역판 보급을 승인하여 준 ICRP에 감사를 표한다.

2008년 8월

이 재 기

국제방사선방호위원회 위원

서문

여러 해 동안 국제방사선방호위원회(ICRP)는 의료에서 방사선 방호와 안전에 관해 조언하는 많은 보고서를 발간해 왔다. ICRP 간행물 73은 이 분야의 일반적 개괄이다. 이들 보고서들은 방사선방호에 대한 일반원칙을 요약하고 의료와 의생명 연구에서 전리방사선의 다양한 이용에 이러한 원칙을 적용함에 조언을 제공한다.

대부분의 기존 보고서는 일반적 특성에 관한 것인데 ICRP는 어려움이 예상되는 몇몇 구체적 상황을 겨누고자했다. 문제가 되는 영역에 관한 보고서가 일상 업무에서 직접적으로 관련된 사람들의 접근이 용이한 방향으로 기술되고, 또 그 보고서가 널리 파급되도록 노력하는 것이 바람직하다.

이러한 보고서 시리즈는 1997년 9월 영국 옥스퍼드에서 열린 ICRP 회의에서 시작되었다. 제3분과위원회의 요청에 따라 ICRP는 의료방사선 방호에 관한 문제 주제에 관한 보고서를 발간하기 위한 여러 작업그룹을 설치하였다.

여러 보고서가 ICRP 간행물 84, 85, 86, 87, 93, 94로 출간되어 있다. 지금 이 보고서는 이러한 집약적이고 초점을 맞춘 문서 시리즈를 이어 가며, 계속해서 여러 조언 보고서가 준비 중이다.

이 보고서를 초안한 작업그룹은 2002년 10월 미국 뉴멕시코 Albuquerque ICRP 회의에서 출발했다. 초기 사업계획은 (1) 가족과 간병인 선량을 적정 수준 이하로 유지함에 필요한 권고를 제공하고, (2) 배출된 선원의 관리에 대한 권고를 제공하며, (3) 후속 골반-하복부 수술에 대해 권고하고, (4) 필요에 따라 화장이나 매장에 대해 권고하는 것이었다. 2003년 11월 아르헨티나 Buenos Aires ICRP회의에서 사업계획이 수정되어 해당 치료(일차적으로 전립선암 치료)와 관련한 보다 일반적인 방사선 안전이슈를 포함하도록 했다.

작업그룹 위원은 다음과 같다.

J.-M. Cosset(그룹장)	D. Ash	M. Hiraoka
T. McKenna	L. Pinillos Ashton	M. Zelefsky

교신위원은 다음과 같다.

L. Dauer	C. Perez	J.C. Rosenwald
W. Yin		

이 보고서를 준비하는 기간의 ICRP 제3분과위 위원은 다음과 같다.

F.A. Mettler, Jr.(위원장)	J.-M. Cosset	C. Cousins
M.J. Guiberteau	I. Gusev	L.K. Harding(간사)
M. Hiraoka	J. Linecki(부위원장)	S. Mattson
P. Oritiz-Lopez	L.V. Pinillos-Ashton	M.M. Rehani
H. Ringertz	M. Rosenstein	C. Sharp
W. Yin		

이 보고서는 위에서 설명한 목적을 추구한다. 그러한 목적에 최대한 유용하도록 보고서의 형식을 ICRP 연보로 발간되는 ICRP 간행물의 통상적 형식과 약간 다르게 했다.

이 보고서 발간은 2004년 10월 ICRP의 승인을 받았다.

요지

영구이식 선원을 이용한 전립선암 근접치료의 방사선안전 특성

ICRP 간행물 98

ICRP 승인: 2004년 10월

요지-선별된 국소 전립선암 환자에 대해 영구 방사성 이식(^{125}I 및 ^{103}Pd 씨알)의 적용은 지난 15년 동안 세계적으로 빠르게 늘어나고 있다. 매년 5만 명의 환자가 이 방법으로 치료받고 있으며 가까운 장래에 그 수는 증가할 것으로 기대된다.

아직까지 의료진이나 환자 가족 일원에게 사고나 악영향이 보고된 바는 없지만 이 근접치료기술은 몇 가지 방사선 안전이슈를 제기하며 ICRP가 구체적 권고를 제시할 필요가 있다.

이식 후 환자에게 접근하는 사람들이 받는 선량에 관한 모든 데이터를 검토했다. 이 선량은 직접 측정되었거나 계산된 것이다. 가용한 데이터는 대부분 경우에 위안자나 간병인에 주는 선량이 권고된 한도인 연간 1 mSv보다 훨씬 낮음을 보여준다. 드물지만 이식 시기에 환자 배우자가 임신 중일 때는 특별한 예방조치가 필요할 수 있다.

소변, 정액 또는 소화관을 통한 선원의 배출은 드물다. 이러한 사건이 일어나는 경우 환자가 적절히 다룰 수 있도록 특별한 권고를 제공해야 한다. 개별 씨알의 방사능이 낮고 그 광자 에너지가 낮아서 씨알 분실과 관련한 사건, 사고는 아직 보고된 바 없다.

이식 후 첫 수 개월에 이루어진다면 시신의 화장(일부 국가에서는 빈번함)은 몇 가지 이슈를 제기하는데 (1) 환자 재에 잔류하는 방사능과 (2) 화장 직원이나 일반인이 잠재적으로 흡입하여 받는 선량이 그것이다. 가용한 자료를 검토한 결과 ^{125}I 의 경우 이식 후 12개월(^{103}Pd 는 3개월)이 지나면 화장을 용인할 수 있다. 이 기간에 지나기 전에 환자가 사망한다면 특별한 조치를 취해야 한다.

골반이나 하복부에 대한 후속 수술에 대비하여 환자에게 외과의의 주의를 환기하도록 권고해야 한다. 해당 이식 정보를 수록한 지갑카드가 유용하다.

대개 근접치료 선량은 환자를 불임으로 만든다. 치료로 인한 정액의 변화는

가임성을 줄이지만 그러한 영구이식 후에도 어느 정도 유전적 영향의 리스크를 안고 임신시킬 가능성에 대해 유념해야 한다.

영구이식한 환자는 일부 보안 방사선감시기 경보를 작동시킬 수 있음에 유의해야 한다. 그런 경우 이식에 대한 주요 정보를 수록한 지갑카드(위 참조)가 도움이 될 것이다.

전립선암에 대한 근접치료나 외부 빔조사에 대한 가용한 경험을 고려하면 방사선 유발 이차 암 리스크는 극히 낮게 나타난다. 근접치료의 입증된 이득이 매우 제한적인 방사선 유발 암 리스크의 증가(주로 이론적)보다 크게 상회함은 분명하다.

중심어: 방사선방호, ^{125}I , ^{103}Pd , 선원 배출, 방사선감시기

논설

안전성 관점

이 보고서는 지난 4년간 발간된 치료방사선 안전을 겨누는 세 번째 보고서이다. 이 과정에서 우리는 일반적 속성과 함께 하나의 특정한 방법에서 발생하는 매우 구체적인 문제도 다루었다.

방사선의 유해한 영향으로부터 방호와 관련한 일반적 권고를 내는 것이 ICRP 본연의 핵심이다. 의료방사선은 지금까지 평균 선량에 가장 큰 인공 기여분이며 빠르게 증가하고 있고 상대적으로 또는 매우 높은 선량을 줄 수 있다(진단에서 1회의 전신 CT 스캔은 약 10~20 mSv의 유효선량을 주는데 이것은 직무피폭에서 선량한도와 같은 크기 수준이다. 치료방사선에서 표적 밖 조직이나 장기에서 원하지 않은 부작용이 나는 선량은 종종 이 값의 10배 이상이다.)

그렇다고 이것이 그러한 선량이 정당하지 않음을 의미하는 것은 아니다. 사고 외상을 검사하기 위한 신속한 CT 스캔은 많은 생명을 구하며 치료방사선에서도 마찬가지이다. 의료방사선이 인류에게 주는 집단선량은 1백만 mSv를 넘는다. 아직까지도 많은 사람들이 큰 혜택을 볼 수 있는 이러한 현대 진료절차에 접근하는 소원을 이루지 못하고 있음을 고려하면, 기본적으로는 이 선량이 증가하는 것도 바람직하다. 그러나 보다 잘 정당화되고 최적화되어 환자가 불필요하게 피폭하는 것은 배제되어야 한다. 전임 ICRP 제3분과위 위원장 Fred Mettler가 지적했듯이 의료에서 단 1%의 집단선량만 줄여도 세계의 모든 직무피폭을 없애는 것과 같은 효과를 낸다.

ICRP가 선택된 의료적 방법과 관련한 방사선방호에 대해 매우 구체적이고 현실적인 조언을 제공하는 점이 사용자들로부터 호평을 받고 있다. 다른 분야에서는 그러한 조언이 그리 쉽게 가용하지는 않다. 사실 최근에 특정 의료방사선 문제에 대한 주제보고서 홍수는 ICRP가 의료계에 대해 무엇을 문제로 여기고 있고 어떻게 도울 수 있겠는가라는 질문에 대한 답으로부터 나왔다.

치료방사선에서 방사선안전에 대한 일반적이고 구체적인 취급으로 되돌아가 ICRP 간행물 86(2001)은 치료방사선 환자들의 사고피폭 방지를 다뤘다. 그 보고서는 일반적 성격이며 여러 유형의 치료와 사고를 망라한다.

간행물 86에서 언급한 하나의 문제는 고선량률(HDR) 근접치료 사고였다. ICRP 간행물 97(2005)는 이 주제로 돌아와 보다 상세한 보고와 최신 정보를 다뤘다. 이 보고서에서는 더욱 구체적인 주제로서 영구이식 선원을 사용한 전립선암 환자의 근접치료에서 안전성을 겨룬다.

이 보고서의 필요성은 기본적으로 사고 이력으로부터 도출된 것은 아니다. HDR 근접치료에서 몇몇 언짢은 사고가 있었지만 전립선암 치료에 사용하는 옥소나 팔라듐 씨알과 관련한 사고에는 ICRP가 큰 관심을 두지 않아 왔다. 그러나 이 기술이 널리 확산하여 지금은 매년 5만 명의 환자가 치료를 받고 있어 여러 가지 바람직하지 않은 시나리오 가능성이 있으며 선원이 환자 몸속에 영구적으로 머무른다는 사실로 인해 환자 주변에 근접한 사람들의 방사선학적 상황을 고려할 필요가 생겼다.

환자는 다양한 가족 구성원, 기타 일반인 그리고 의료진을 포함한다. 이 보고서는 치료 후 수개월에 사망한 환자의 화장과 관련된 피폭 가능성에 특히 주목한다. 적절한 예방조치를 취하지 않으면 화장은 일반인과 화장 종사자에게 부당한 피폭을 줄 수 있다.

완전히 다른 주제이지만 대부분 이 보고서 독자들은 2004년에 ICRP가 1990년 ICRP 권고(1991)를 대체할 차기 기본권고에 대해 자문한 것을 알 것이다. 자문에서는 200여 회신자로부터 600 페이지를 넘는 의견(모든 의견은 웹사이트 www.icrp.org에서 볼 수 있다.)이 수집되었다. ICRP 보조지침 4(2004a)는 2004년에 자문한 권고초안 요약과 그 초안에 이르게 한 자료들을 포함하고 있다.

기본권고 프로젝트는 실제 권고뿐만 아니라 “기반문서foundation documents”와 기타 권고를 떠받치는 ‘벽돌building blocks’로 구성된다. 권고에 대한 의견 중 일부는 이러한 벽돌들이 2004년 당시에는 일반에 공개되지 않았다는 것이었다. ICRP는 권고의 범위, 방사선방호의 패러다임, 의료에서 방사선방호 등 몇몇 백그라운드 자료가 더 필요한 것으로 보았다.

이제 ICRP는 기반문서들 초안에 대해 자문을 받았으며 의견을 반영하여 문장을 편집하였고 추가로 필요한 자료를 초안 중에 있다. 이러한 진전으로 계획의 수정이 필요했다. ICRP는 권고에 대해 한 바퀴 더 자문을 생각하고 있고 2006년 말경에 승인할 수 있기를 바라고 있다(그래서 자료를 출판사에 보낸 후 보조지침 4를 “2005 권고초안”으로 바꿔 부르는 편집상 불행을 겪었다).

Jack Valentin(ICRP 과학간사)

목 차

역자 서문.....	i
서문.....	iii
요지.....	v
논설.....	vii
요 점.....	1
요 약.....	3
제1장 서론.....	7
제2장 이식환자에 근접한 사람의 선량.....	11
2.1. 일반인, 환자가족, 위안자 및 간병인.....	11
2.2. 환자로부터 받는 선량의 직접 측정.....	12
2.3. 이론적 계산.....	15
2.4. 가족과 동거인에 대한 직접 선량감시.....	19
2.5. 권고.....	19
제3장 배출 선원.....	21
3.1. 선원의 이동과 배출.....	21
3.2. 배출선원 관련 방사선 리스크.....	22
3.3. 권고.....	22
제4장 화장.....	25
4.1. 국가별 현행 권고.....	25
4.2. 환자 화장재의 잔류방사능.....	26
4.3. 공기 중 방출 잠재성.....	27
4.4. 화장에 대한 권고.....	28

제5장 골반 또는 하복부의 후속 수술.....	29
제6장 자녀 출산.....	31
제7장 방사선감시기 경보 작동.....	33
제8장 이차 암.....	35
8.1. 전립선암 근접치료 후 이차 암.....	35
8.2. 전립선암 치료 후 이차 암.....	35
8.3. 전립선암 외부조사 후 이차 암.....	35
8.4. 이차 암 결론.....	37
부록.....	39
A. 전립선암에 사용하는 주된 영구이식 방사선원의 특성.....	39
B. 전립선암 근접치료용 선원 영구이식 후 선량 측정.....	43
C. 영구이식 씨알로 전립선 근접치료를 받는 환자에게 줄 최소한의 권고 예시.....	47
D. 씨알 영구이식 환자에게 줄 신상확인카드.....	49
E. 전립선암 치료에 사용되는 방사성 씨알에 대한 보조 정보.....	51
참고문헌.....	55

요 점

- 일부 국소 전립선암 치료에 영구 방사성물질 이식술의 이용이 세계적으로 빠르게 늘어나고 있다.
- 이로 인해 의료진이나 환자 가족의 피해가 보고된 바는 없다.
- 거의 모든 경우에 환자 가족이나 동거인에게 주는 연간 선량은 1 mSv보다 훨씬 작다.
- 소변, 정액 또는 소화관을 통해 선원이 배출되는 일은 거의 없다. 환자에게 주는 간단한 권고를 통해 그러한 배출이 있더라도 방사선 위험을 최소화할 수 있다.
- 이식 후 12개월이 지난 후에는 시체의 화장을 허용할 수 있다. 더 이른 시기에 화장을 고려한다면 특별 조치가 필요하다.
- 이상 요점 외에 후속 골반이나 복부 수술, 자녀출산, 보안감시 시스템 경보 작동 가능성 등에 대해 환자에게 안내해야 한다.

<역주> 약어

이 보고서에 사용된 약어는 다음과 같다.

AAPM: American Association of Physicists in Medicine 미국의학물리사
협회

CFR: code of federal regulations 미국연방규정

CI: confidence interval 신뢰구간

CT: computed tomography 전산화단층촬영

GM: Geiger-Muller 가이거뮐러

HDR: high dose rate 고선량률

IAEA: International Atomic Energy Agency 국제원자력기구

ICRP International Commission on Radiological Protection 국제방사선방
호위원회

ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements
국제방사선단위측정위원회

MSKCC: Memorial Sloan Kettering Cancer Center, Sloan Kettering기념
암센터

NCRP: National Council on Radiation Protection and Measurements 미
국방사선방호측정위원회

NRC: Nuclear Regulatory Commission 미국원자력규제위원회

OSL: optically stimulated luminescence 광자극형광

RR: relative risk 상대위험

RSO: radiation safety officer 방사선안전책임자

TL: thermoluminescence 열발광, TL

UNSCEAR: UN Scientific Committee on the Effects of Atomic
Radiation 유엔방사선영향과학위원회

요 약

(a) 일부 국소 전립선암 치료에 영구 방사성물질 이식술의 이용이 세계적으로 빠르게 늘어나고 있다. 미국의 경우 매년 18만 건의 새로운 전립선암이 진단되고, 국소 전립선암에 대해 영구 방사선원 이식이 3만 내지 4만 건 수행되는데 그 건수는 곧 전립선제거술 건수를 초과할 것으로 예상된다(Michalski 등 2003, Smathers 등 1999, Stone과 Stock 2002). 유럽에서도 다른 국가와 마찬가지로 이미 연간 수천 건의 이식이 이루어졌으며 그 수가 빠르게 증가하고 있다. 다음 두 가지 이유로 몇 년 안에 그 수가 더욱 증가할 것으로 예상된다:

- 젊은 환자에게까지 전립선 고유의 항원을 더 많이 사용하여 증상이 없는 환자에서 매우 작은 병변까지 발견하는 수가 증가하는 시대로 접어들었다. 실제로 이러한 작은 병변이 영구이식 기술을 사용하기에 가장 적절한 것이다.

10년 이상의 추적을 바탕으로 미국의 여러 그룹이 최근에 보고한 결과는 이 기술이 전립선암의 국소관리(치료) 관점에서 절제수술과 견줄 수준이었다. 더욱이 이들 보고서는 이식치료가 전립선 절제보다 소변 지속성과 세기에서 유리하다고 평가하고 있다(Buron 등 2004, Kollmeier 등 2003, Kupelian 등 2004, Langley와 Laing 2004, Potters 등 2004, Ragde 등 2000, Stone과 Stock 2002, Sylvester 등 2004a, Woosley 등 2003, Zelefsky와 Whitmore 1997, Zelefsky 등 2000, 2003).

(b) 영구 씨알 이식으로 인해 의료진이나 환자 가족에게 악영향이 보고된 바는 아직 없는데 이는 이미 수천 명의 환자에게 사용된 이 기술이 매우 안전함을 시사한다. 그렇지만 의료계나 환자 가족으로부터 제기된 몇 가지 이슈에 주목할 필요가 있다. 다음과 같은 이슈들이 있다.

- 환자에 접근하는 사람들이 받는 선량. 언제 특별한 방사선방호 단계를 취할 것인지를 알기 위해 필요하다.
- 배출된 선원의 관리(비록 발생은 희귀하지만)
- 환자 시신의 화장과 관련된 문제(일부 국가에서는 중요한 이슈임)
- 기타 보완적 권고

1. 이식 환자에 접근하는 사람의 선량

(c) 직접 측정이나 계산으로 얻은 가용한 자료는 가족이나 동거인에게 주는 연간 선량이 거의 모든 경우에 1 mSv 한도 이하일 것으로 나타나고 있어 간병인에 대

해 IAEA(1996)가 정한 5 mSv 수준에는 전혀 미치지 않을 것이다. 그러나 엄격한 방사선방호 이유보다는 안심을 위해 아동이 환자 무릎에 몇 분 이상 또는 빈번히 앉게 하거나, ^{125}I 를 이식한 경우에 첫 두 달 동안(^{103}Pd 에 대해서는 더 짧음)에는 장시간 임신부와 근접하는 일이 없기를 권고한다. 이점은 환자나 보호자에게 서면으로 제시하여 설명해야 한다(부록C 참조).

2. 배출 선원

2.1. 낱(또는 자유) 씨알 기술

(d) 드물지만 씨알 이탈 때문에 합리적 예방으로서 3일간은 소변을 걸러보기를 권고한다. 이후에는 씨알의 이동이 거의 없을 것이며 만약 있더라도 변기에서 씻어 내릴 수 있다. 물이나 하수관이 이 수준의 에너지에 대해 충분한 방호를 제공한다. 이식 후 2~3주 동안은 성행위 때 콘돔을 사용하기를 종종 권고하지만 첫 5회 사정과 3주까지 기간 중 늦은 시점까지 콘돔을 사용하는 것이 더 적절하다. 이식 후 수일 이내의 이른 기간에는 성교를 피해야 한다. 거의 없지만 소화관을 통해 씨알이 배출된다면 변기에 내릴 수 있는데 여기서 고려하는 방사선 에너지에 대해 물이나 하수관이 충분한 방호를 제공한다. 만약 환자나 가족이 씨알을 발견한다면 맨손으로 다루지 말아야 한다.

2.2. 묶음(또는 리본) 씨알 기술

(e) 이식 직후 환자에 대한 의료관찰 기간에는 소변을 걸러야 한다. 이식 후 여러 주가 지나 리본이 자연적으로 용해되고 나면 씨알의 이동이나 배출이 일어날 수 있다. 이때는 전술한 바와 같이 변기에서 씻어 내릴 수 있다.

3. 화장

(f) 많은 나라에서는 화장이 흔치 않지만 어떤 나라(예: 중국이나 인도)에서는 빈번하며 일본에서는 법으로 요구한다. ^{131}I 이나 ^{103}Pd 선원을 이식한 환자를 화장하는 것은 다음과 같은 이슈들을 제기한다.

- 환자 재에 남아있는 방사능. 화장 직원이나 가족의 피폭을 초래할 수 있다.
- 공기부유진으로 인한 선량. 화장 직원이나 일반인에게 방사성 입자의 흡입을 초래할 수 있으며 환경감시기 경보를 작동시킬 수도 있다.

(g) ^{125}I 을 사용한 경우 이식 후 12개월(^{103}Pd 의 경우는 3개월)이 경과했다면 별

도의 주의 없이 화장할 수 있다. 12개월 이전에는 (1) 씨알 선원을 함유한 시체의 전립선을 적출하여 국가 규정에 따라 보관하거나(예: Japanese societies 2003) (2) 다음과 같은 예방조치를 취할 것을 권고한다.

● 화장 직원은 잔류물을 취급하는 과정에서 우연한 섭취나 흡입을 줄이기 위해 장갑이나 호흡보호기를 착용하는 등 예방조치를 준수한다.

● 환자 잔류물은 이식일로부터 적어도 1년 이상 밀봉된 금속용기에 보관되어야 한다.

화장 잔류물을 이식일로부터 최소한 10 반감기(¹²⁵I의 경우 약 20개월)까지는 환경에 뿌려서는 안 된다.

4. 골반 또는 복부의 후속 수술

(h) 예외적인 경우(수% 이하) 이식 후 소변 정체 때문에 매우 제한적으로 조심스럽게 경요도 절제술을 수행할 필요가 있을 수 있다. 이 수술은 근접치료 이식 기술에 대해 잘 아는 익숙한 외과 의사에 의해 시행되어야만 한다. 가능하다면 이식 후 6개월 이내에는 절제하지 않는 것이 좋다. 적출물을 검사하여 씨알이 있다면 용기에 담아 시술병원으로 보내야 한다. 또 다른 경우로서 전립선 근접치료 후 전립선암과 무관하게 복부나 골반 수술이 필요할 수도 있다. 문제를 예방하기 위해 환자가 이식을 받았음을 알리고 추가 설명을 요청할 수 있도록 병원 전화번호를 수록한 카드를 휴대하도록 해야 한다.

5. 자녀 수태

(i) 영구이식 씨알에 의한 전립선 근접치료로 불가피한 영향의 하나는 사정 양의 현저한 감소인데 종종 색깔과 연속성의 변화도 동반된다. 전립선에 주는 피폭과 함께 이러한 변화는 환자에게 확실한 불임을 강하게 암시한다. 이식 후 자녀를 가질 것 같지 않음은 사실이지만 고환에 주는 선량이 거세의 문턱선량에 이르지 않아 드물게는 변질된 정액에도 활동성 정자가 생존할 수도 있다. 실제로 영구이식 후 임신시킨 소수 사례도 보고되고 있으므로 환자는 그 가능성에 주의하고 필요한 예방조치를 취해야 한다.

6. 방사선 감시기 경보작동

(j) 어떤 방사선 검출 감시기들은 자연방사선 준위의 1.5~2배 정도의 매우 낮은

준위에 설정되어 영구이식을 받은 환자가 경보를 울릴 수 있는데 특히 이식 후 첫달에는 더욱 그렇다. 이러한 감시기들은 원자력발전소나 원자력 연구시설 출입구, 처분장 지역, 그리고 일부 고철 취급시설 등에 설치되어 있다. 근래에는 불법 방사성물질의 운송이나 비고의적(또는 악의적) 방사성물질 이동을 감시하기 위해 공항이나 국경 출입국관리 지역에 그러한 감시기를 설치하고 있다. 환자가 이러한 감시기 경보를 울린 경우 퇴원할 때 받은 지갑카드를 보여 문제를 피하도록 해야 한다.

7. 이차 암

(k) 전립선암에 대한 외부조사로 인한 방사선 유발 이차 암(주로 방광 또는 대장/직장의 암과 육종) 위험은 극히 낮다. 근접치료에서는 지금까지 극소수 사례만 보고되어 있다. 이는 후속 추적이 충분하지 않은 탓일 수도 있으나 이식으로부터 피폭하는 정상 조직이나 장기 체적이 외부 빔치료에 비해 작기 때문에 외부조사보다 위험이 낮을 것이라고 합리적으로 가상할 수도 있다. 따라서 환자에 대해 표준 후속추적 정도만 필요한 것으로 보인다.

제1장 서론

(1) 외부 방사선치료와 병행하여 방사선원을 종양에 직접 삽입하거나 접촉시키는 사용법이 20세기 초에 연구되었다. 이 기법을 영어권에서 근접(brachy: 희랍어로 짧다는 의미)치료라 불렀으며 프랑스에서는 라듐 발견자(피에르와 마리 퀴리)를 기려 “퀴리치료Curietherapie”라 불렀다.

(2) 20세기 첫 10년에는 대부분의 치료는 방사선원(주로 라듐 튜브나 바늘)을 일시적으로 삽입(또는 근접)하는 방법으로 수행되었으며¹⁾ 영구 이식 선원에 대해 관심을 가진 것은 1910년대였다. 처음 사용한 방사성 원소는 라돈이었는데 이 가스는 라듐의 첫 딸핵종(방출물)으로서 단위 방사능 당 작은 체적(그래서 1 mm 정도의 매우 작은 씨알에 넣을 수 있음)과 매우 짧은 반감기(몇 주 내에 방사능이 사소해지므로 영구이식이 가능함)를 갖는 등 흥미 있는 장점을 제공하는 것으로 보았다. 처음에는 영구이식이 직경 0.3 mm, 길이 3 mm 정도의 노출된 유리세관에 담은 라돈 방출물을 이용하여 이루어졌다. 그렇게 작은 유리관을 제작하거나 이식함에 따르는 문제 외에 또 다른 문제는 대부분의 선량이 비정기 짧은 베타입자(전자)에 의해 전달되어 선원에 접촉하거나 가까운 조직에 과선량을 주는 것이었다. 뒷 문제를 해결하기 위해 작은 금 밀봉 씨알을 개발했는데 금 껍질이 대부분의 전자와 연질 X선을 걸러 훨씬 좋은 선량분포를 낼 수 있었다.

(3) 주로 부인과 암이나 전립선암에 걸린 많은 환자들이 “라돈 씨알”이라 불린 것을 영구 이식하여 치료를 받았다. 1920년대에 수행된 라돈 씨알 이식 치료 후 촬영한 방사선 투과영상이 ¹²⁵I 씨알을 사용하는 현대 이식기술과 크게 달라 보이지 않을 정도인 점은 흥미롭다(아래 참조, Aronowitz 2002). 그러나 이 기술은 점차 폐기되었는데 주로 라듐 방출 관리의 복잡함과, 당시에는 대부분의 종양이 많이 진전된 다음 진단되어 종양 크기가 이러한 이식으로 치료할 가능성을 초과하는 문제 때문이었다.

(4) 여러 그룹이 ¹⁹⁸Au 씨알을 이용하여 영구 이식 선원을 다시 활성화시킨 것은 1950년대에 와서이었다. 이 핵종의 짧은 반감기(2.7일)가 영구이식을 가능하게 했다. ¹⁹⁸Au 씨알은 골반 암을 포함한 다양한 치료에 이용되었다. 그러나 1970년

1) 특히 전립선암에 대해 사용했다(Pasteau와 Degrais, 1913).

대에 ^{125}I 씨알이 가용해지면서 ^{198}Au 씨알의 사용은 쇠퇴했다. ^{198}Au 씨알과 비슷한 크기(길이 4 mm)일 때 ^{125}I 씨알은 반감기가 더 길어(60.14일) 전립선암처럼 성장속도가 낮은 종양의 치료에 유리하고 광자 에너지가 낮아(^{198}Au 의 평균 420 keV에 비해 28 keV) 방호에 유리하기 때문이다.

(5) 이때부터 ^{125}I 이 영구이식 방사성물질의 표준이 되어 왔고 근래에야 ^{103}Pd 의 도전을 받고 있다. 많은 종류의 종양에 대해 ^{125}I 이식이 이루어졌다. 예를 들면 많은 환자들이 폐암 절제 후 종양근저에 이식을 받았으며 뉴욕 Sloan Kettering 기념암센터(MSKCC)에서는 1970년대 초기부터 전립선암에 이식을 해왔다(Hilaris 등 1987). 뇌종양 치료에 ^{125}I 사용도 제안된 바 있다(Marchese 등 1984).

(6) 오늘날에도 폐암 절제술 후 종양근저나 기타 일부 암 위치에 대해 외부조사를 실시하고는 있지만 전립선암 치료에는 주로 ^{125}I (또는 ^{103}Pd) 씨알을 영구 이식하는 방법이 사용되고 있다. 지난 10여 년 동안 이 기술이 괄목하게 발전했다.²⁾

(7) 미국에서 매년 18만 건의 전립선암이 새로 진단되고 3만 내지 4만 건의 국소 전립선암에 이식이 이루어지고 있으며 그 수는 곧 전립선 절제술을 초과할 전망이다(Kollmeier 등 2003, Michalski 등 2003, Stone과 Stock 2002, Smathers 등 1999).

(8) 병행하여 고선량률 원격 후장전³⁾ 근접치료high-dose-rate remote afterloaded brachytherapy (HDR)도 널리 사용되고 있는데 주로 보다 진전된 전립선암에 대해 종종 외부조사와 연계하고 있다. HDR 사용에서 방사선안전 특성은 ICRP 제3분과위원회의 다른 권고로 주어지고 논의된다.⁴⁾

(9) 유럽에서도 다른 나라와 마찬가지로 매년 수천 건이 시술되며 빠르게 늘어나고 있다. 다음과 같은 두 가지 이유에서 이식 건수는 계속 증가할 것이다.

● 보다 젊은 환자에 대해 전립선 고유의 항원을 점점 널리 사용함에 따라 매우

2) <역주> 부록 E(원문에 없는 부록)에 이 기술에 대한 간략한 설명을 역자가 편집하여 실었다.

3) <역주> 일부 용어집에는 “후부하”를 사용하고 있으나 근접치료에서 afterload는 치료세팅을 완료한 후 선원이 자동으로 장전된다는 의미이므로 “부하”보다는 “장전”을 채택하였다.

4) <역주> ICRP, Prevention of High-dose-rate Brachytherapy Accidents. ICRP Publication 97, *Ann. ICRP* 35(3), 2005.

작은 병변을 발견하는 수가 늘어나는 시대로 접어들었다. 이처럼 작은 병변이 영구이식 기술을 적용하기에 가장 좋은 지시이다.

● 10년 이상의 추적을 바탕으로 미국의 여러 그룹이 최근에 보고한 결과는 전립선암의 국소관리(치료) 관점에서 이식기술이 절제수술과 견줄 수준이었다. 더욱이 이들 보고서는 이식치료가 전립선 절제보다 소변 지속성과 세기에서 유리하다고 평가하고 있다(Buron 등 2004, Kollmeier 등 2003, Kupelian 등 2004, Langley와 Laing 2004, Potters 등 2004, Ragde 등 2000, Stone과 Stock 2002, Sylvester 등 2004a, Woosley 등 2003, Zelefsky와 Whitmore 1997, Zelefsky 등 2000, 2003).

(10) 오늘날에는 영구이식 방사선원의 혜택을 보는 환자의 90% 이상이 전립선암 치료를 받는 사람들이다. 이것이 ICRP가 특별히 전립선암을 위한 밀봉 방사선원 영구이식과 관련한 방사선안전 이슈를 겨누게 된 이유이다.

(11) 영구이식 씨알과 관련하여 의료진이나 환자 가족에게 유해한 영향이 보고된 것은 아직 없다. 이것은 이미 수천 환자에게 적용된(상기 참조) 이 기술이 매우 안전함을 보여준다. 그러나 의료계나 환자 가족에 의해 몇 가지 이슈가 제기되고 있음을 지적할 필요가 있다. 다음과 같은 이슈들이 있다.

- 환자에 근접한 사람들의 선량. 특별한 방호단계가 필요한지를 밝힌다.
- 배출선원 관리(비록 드문 일이지만)
- 환자 시신 화장과 관련된 문제(나라에 따라서는 중요한 문제임)
- 기타 보완적 권고

(12) 이식을 수행하는 근접치료 의료진과 관련한 방사선 안전 이슈는 후속 ICRP 간행물에서 더 구체적으로 다룰 것이다.

(13) 부록에서는 다음과 같은 특정 내용을 다룬다.

- 부록 A- 빈번히 사용되는 영구이식 방사선원의 특성
- 부록 B- 이식 후 선량 측정기술
- 부록 C- 영구이식 씨알로 전립선 근접치료를 받는 환자에 대한 조연의 예
- 부록 D- 씨알 영구이식을 받은 환자에게 제공할 신상카드 예

제2장 이식환자에 근접한 사람의 선량

2.1. 일반인, 환자가족, 위안자 및 간병인

(14) 이전 ICRP 권고(ICRP 1991, 1996)에 따르면 일반인이나 위안자, 간병인⁵⁾의 선량은 ICRP가 설정하고 대부분 국제기구 또는 국가 규제기관이 받아들인 선량한도 아래로 유지되어야 한다. 이 한도는 일반인에 대해서는 연간 1 mSv이며, 보호자나 간병인에 대해서는 한정된 기간 동안 연간 수 mSv의 “제약치 수준”까지 이를 수 있다(ICRP 1996, 제8.3절 참조). ICRP는 이 제한을 경직되게 적용하지 말도록 주의를 주었는데, 이는 특별한 경우에는 높은 선량도 충분히 수용될 수 있음을 의미한다. IAEA(1996)는 한 환자의 치료를 통한 보호자나 간병인의 선량이 연간 5 mSv를 초과할 우려가 없도록 제약되어야 한다고 했다.

(15) 이 제약은 합리적으로 가능한 범위에서 어떻게 선량을 제한하는지 명시하고 수반되는 위험을 설명하는 상세한 서면 지침을 제공하여 달성할 수 있다. 이 서면 지침은 환자나 가족에게 줄 자료에 같이 포함될 수도 있다(부록 C 참조).

(16) 그러나 특별한 경우 어떤 가정 구성원은 “위안자”로 보기 어려운데 임신 여성이 그렇다. 복중 태아의 선량은 임신 기간 동안 1 mSv 미만이어야 한다.

(17) 과거에는 거의 모든 경우 전립선암은 중년 이후의 암으로 간주되었고 따라서 환자의 배우자가 임신하는 가설은 거의 성립하지 않을 일로 보았다. 이제 상황이 바뀌고 있음을 고려해야만 한다. 전립선암의 조기진단이 점점 빈번해지고 치료받는 환자들의 연령이 오십대 초반 또는 그 이전인 경우도 많아졌다. 나아가 중년 이후 사람들이 아이를 갖는 일도 늘어나고 있다. 더욱이 환자가 퇴원해 집에 올 때 가족 구성원 중 다른 사람(예: 딸)이 임신 중일 수도 있다. 따라서 임신 여성이 전립선암 환자와 한 집을 같이 사용할 가능성을 배제할 수는 없다.

(18) 위안자나 간병인에서 제외되어야 할 또 다른 사람은 유아나 아동인데, 이들의 인지동의informed consent를 구할 수 없고 이들이 통상 환자의 위안이나 간호에

5) 위안자나 간병인이란 자원자(주로 가족)로서 알면서 연간 1 mSv의 일반인 선량한도를 넘는 수준의 방사선을 기꺼이 피폭하며 환자를 돌보겠다는 사람이다.

참여하지 않을 뿐만 아니라 방사선 유발 갑상선암에 특별히 취약하기 때문이다. 임신 여성과 마찬가지로 이들도 대개 일반인으로 취급되어야 한다.

(19) 이러한 의미에서 환자로부터 받을 수 있는 선량을 평가해야 한다. 제한적이기는 하지만 다음과 같은 3 세트의 데이터가 가용하다.

- 통상 이식 직후 환자로부터 거리에 따른 선량을 여러 가지 기법으로 직접 측정할 값
- 거리, 시간, 총 방사능, 이식 깊이 등 관련 변수를 고려한 이론적 계산
- 가족이나 동거인에 대해 직접 측정할 선량.

2.2. 환자로부터 받는 선량의 직접 측정

(20) 표2.1은 환자로부터 받는 선량 측정치에 대한 현재 문헌자료를 요약한 것이다. 강조할 사항으로서 첫째는 ^{125}I 나 ^{103}Pd 에서 방출되는 낮은 에너지 광자에 의해 매우 낮은 선량률로 전달되는 이렇게 낮은 선량을 정확히 측정하는 것이 어렵다는 점이다. 이점은 표2.1에 주어진 자료의 적합성에 적어도 부분적으로는 연관이 있다. 예를 들면 일부 저자는 얇은 창 GM 검출기를 사용했는데 이 검출기는 적절히 보정하지 않으면 위와 같이 낮은 에너지에서 3배까지 과대 지시할 수 있다(IRSН 2003). 일부 저자(Smathers 등 1999)는 평형모자build-up cap 목적으로 베크라이트 차폐를 사용한 반면 일부 저자는 사용하지 않았다. 일부 저자는 공기 중 선량과 조직 중 선량의 보정비를 적용하였다. 일부 저자는 유효 심부선량당량effective deep dose equivalent⁶⁾(ICRP 1997, ICRU 1992, NCRP 1995)을 보고한 반면 일부 저자는 직접 읽음값을 보고했다. 그러나 이러한 차이들은 이식기법, 환자 해부학, 측정 프로토콜을 포함한 다른 인자들에 의해 가려질 것으로 보인다.

(21) 환자로부터 오는 선량을 측정하는 최적 방법에 대한 구체적 권고를 부록 B에 주었다.

(22) 위에서 언급한 차이에도 불구하고 표2.1에 제공된 데이터는 표준 권고를 제안하는 근거로서는 충분히 일관성이 있다.

6) <역주> 유효 심부선량당량이란 ICRP가 정의하는 양은 아니다. 미국 NCRP는 조직의 선량당량에 그 조직의 조직가중치를 곱한 양을 “유효 선량당량effective dose equivalent”라는 용어로 부르고 있으나 ICRP 보고서가 보완 설명 없이 이와 같은 용어를 사용한 것은 적절하지 않다.

표2.1. 환자로 부터 직접 측정된 선량률($\mu\text{Sv/h}$)

핵종	그룹/병원	환자 수	앞면 거리(cm)				측면 거리(cm)			후방 거리(cm)			
			표면	20	30	50	100	표면	50	100	표면	50	100
^{125}I	Smathers 등	19	50 (22-89)	-	-	-	<0.3	0.06	-	<0.3	-	-	-
	Leeds	62	26-72 (2-67)	-	-	2.6 (0.2-5.1)	0.75 (0-1.6)	1.43 (0.1-17.4)	0.3 (0-1.9)	0.1 (0-0.5)	40.3 (0.8-169.7)	4.4 (0.2-10.2)	1.2 (0-3.8)
	Institute Curie	47	115 (17-350)	22 (4-61)	-	-	-	(20명) 0.8 (0.2-1.5)	-	-	-	-	-
	MSKCC	545	37.3 (0.9-221)	-	6.0 (0.9-32.7)	-	1.9 (0.9-19.8)	(41명)	-	<0.9	-	-	-
^{103}Pd	Smathers 등	19	17 (5-49)	-	-	-	<0.3	0.19 ^a	-	<0.3	-	-	-
	MSKCC	72	8.2 (0.9-63.6)	-	(17명) 2.9 (0.9-15)	-	<0.9	(23명) 1.4 (0.9-6.2)	-	<0.9	-	-	-

MSKCC: Memorial Sloan Kettering Cancer Center

a. Smathers 등은 이 값(^{125}I 보다 높음)을 모순이라고 언급했다.

(23) Smathers 등(1999)은 1998년 미국 워싱턴대학에서 치료받은 38명의 선별되지 않은 연속된 근접치료 환자에 대해 보고했다. ^{137}Cs 선원에 대해 일상적으로 교정된 전리함이 측정에 사용되었고, 베크라이트 차폐가 체계적으로 이용되었다. 선량은 ^{125}I 과 ^{103}Pd 에 대해 전면과 측면에서 피부 표면과 거기로부터 1 m 거리에서 측정되었다. 측정치로부터 Smathers 등은 보편적인 경우에 전면 피부표면에서 일반인에 대한 연간 선량한도인 1 mSv를 넘기지 않는 시간으로 ^{125}I 에 대해서는 20 h, ^{103}Pd 에 대해서는 59 h를 산출했다. 1 m 거리에서는 전방피폭으로 연간 선량한도를 넘기지 않는 시간은 ^{125}I 에 대해 1429 h(약 2개월간 계속 피폭)이 되며 ^{103}Pd 에서는 더욱 길어진다고 보고했다.

(24) 영국 Leeds의 Cookridge병원의 한 그룹도 ^{125}I 로 전립선 근접치료를 받은 환자로부터 선량을 전방, 측방 및 후방에서 표면과 50 cm 및 100 cm에서 측정하였는데(D. Ash의 양해) 후방에서 측정한 유일한 그룹이다. 흥미롭게도 많은 환자에서 특히 표면 선량이 전방에서보다 후방에서 높게 나타났다.

(25) 프랑스 파리의 큐리연구소Curie Institute에서 측정한 첫 자료들에서는 얇은 창 GM 측정기와 전리함으로 측정한 결과에 차이가 있었다. 재교정 후 ^{125}I 을 이식한 47명의 환자에 대해 이식 직후 측정을 수행하였다(IRSН 2003). 측정은 전방의 표면과 20 cm 거리에서 이루어졌다. 약간 적은 수의 환자에 대해서는 측방 표면에서도 측정하였다. 환자 간 큰 편차가 있었는데 환자의 체중과 전후방 두께에 상관관계를 조사하였다(제2.3절 참조). 평균값은 다른 연구보다 약간 높았다. 23명의 환자에 대해서 교환 바로 아래서도 측정했는데 선량률은 14~100 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ (평균 43 $\mu\text{Sv}/\text{h}$)의 범위에 있었다.

(26) MSKCC에서는 전립선에 ^{125}I 를 이식한 연속된 545명의 환자에 대해 전리함으로 측정하고 조직에 대한 값으로 보정했다(Dauer 등 2004). 측정은 골반벽의 전방 표면과 30 cm, 그리고 100 cm에서 수행되었다. 같은 환자에 대해 측방 표면에서도 선량을 측정하였다. 환자 간 큰 편차가 있었으며 평균은 다른 연구보다 약간 낮았다.

(27) MSKCC는 ^{125}I 에 대해 측정된 평균 선량과 33% 점유도를 가정하여 전방 표면에 접촉하는 간병인에 대해 유효 선량당량 5 mSv에 이르는 시간을 평가하였는데 19일로 나타났다. 비슷한 계산으로 ^{125}I 에 대해 전방 표면으로부터 30 cm에서, 그리고 ^{103}Pd 에 대해 전방 표면과 30 cm 거리에서 궁극선량lifetime dose⁷⁾을 평가한 결과는 모두 5 mSv 미만이었다.

(28) 마찬가지로 33%의 점유도 가정 아래 ^{125}I 에 대해 측정된 평균 선량률을 근거로 MSKCC가 전방 피부 접촉 시 태어나 일반인에게 유효선량당량 1 mSv를 주는 시간을 평가한 결과는 3.5일로 나타났으며 30 cm 거리에서는 24일로 나타났다. ^{103}Pd 에 대해서는 표면에 접촉 시 유효 선량당량 1 mSv를 주는 시간은 24시간이었다. 또한 ^{103}Pd 의 경우 전방 피부로부터 30 cm 거리에서 궁극선량은 1 mSv 미만이었다.

(29) MSKCC는 위에서 논의한 것이 접촉이나 30 cm 거리 선량 측정치를 근거로 하고 있으므로 일반인에게 대해 대체로 과대평가할 것으로 설명하고 있다 (Dauer 등 2004). 1 m에서 $1\mu\text{Sv}/\text{h}$ 라는 보수적 선량률과 33%라는 보수적 점유도를 사용할 때 일반인에 대한 궁극선량은 ^{125}I 과 ^{103}Pd 에 대해 각각 0.7 mSv와 0.2 mSv이다. 두 값은 모두 일반인에 대한 선량한도 1 mSv보다 낮다.

(30) KSKCC 연구에서는 ^{125}I 씨알 이식으로부터 정규화된 전방 표면선량률 ($\mu\text{Sv h}^{-1}\text{GBq}^{-1}$)이 환자 체중이 증가할 때 감소하였는데 Leeds 연구에서는 체중과 측정된 선량 사이에 유의한 상관성이 발견되지 않았다.

2.3. 이론적 계산

(31) 이식 환자로부터 거리에 따른 선량률은 다음 인자들에 의존한다.

- 환자에 이식한 씨알의 수와 강도
- 관심 지점의 위치에 대한 씨알의 기하학적 분포
- 방사선을 감쇠시키는 외부 조직의 두께(어느 정도까지는 조직 조성까지)

(32) 실제에서는 전립선 크기(평균적 씨알 위치에서 전형적으로 15 cm)의 3배 이상의 거리에서는 실질적 선량률이 이식물의 기하학적 중심에 위치하고 이식한 방사능의 총합과 같은 방사능을 가진 하나의 점선원에 의한 선량률과 같다고 간주할 수 있다. 여러 국가 또는 국제 권고에 따르면 이 강도를 공기커마울 ($\mu\text{Gy h}^{-1}\text{m}^{-2}$ 단위)로 나타내는 것이 유용하며 이것이 공기 중에서 1 m 거리에서 선량률의 일차적 추정치가 된다.

(33) 이 값은 역자승 법칙에 따라 거리에 대해 보정되어야 하며 조직 투과도에

7) <역주> “lifetime dose”란 용어를 사용하고 있지만 대상 핵종의 반감기가 짧기 때문에 “생애”라는 개념보다는 선량률의 무한 시간적분인 궁극적 선량의 의미에 가까워 “궁극선량”이란 용어를 사용했다.

대해서도 보정되어야 한다. 현실적 방사선방호 목적에서 ^{125}I 씨알에 대해서는 물 등가 조직 2 cm가 50%를 감쇠시킨다고 보면 좋은 근사가 될 것으로 본다. 그러면 선량률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{D} = S_k T(t) \left(\frac{100}{d} \right)^2 f$$

여기서 \dot{D} 는 μGyh^{-1} (또는 μSvh^{-1}) 단위의 선량률이고 S_k 는 $\mu\text{Gyh}^{-1}\text{m}^{-2}$ (또는 U) 단위로 나타낸 모든 씨알의 총 강도이다. $T(t)$ 는 두께 t인 조직의 투과율이며 d는 관심점에서 이식 중심까지 거리(cm)이고, f는 공기커마와 조직(또는 물) 선량의 무차원 환산인자이다. 인자 f는 현실적으로 씨알의 선량률 상수 A와 같다 (IAEA 2002b). 실제에서 이 인자 값으로 ^{125}I 에 대해서는 1, ^{103}Pd 에 대해서는 0.7을 사용할 수 있다. 위에서 밝힌 것처럼 ^{125}I 에 대해서는 투과율이 다음과 같이 근사된다.

$$T(t) = 2^{-0.5t}$$

(34) ^{103}Pd 에서는 감쇠가 더 크게 나타난다. 이 식을 사용하면 약 15%까지 될 수 있는 비등방성이 무시됨으로써 선량률이 약간 과대평가될 것이다.

(35) 이 이론적 산출결과를 큐리연구소에서 ^{125}I 씨알로 치료받은 47명의 환자에 대한 측정과 비교하였다. 그림2.1의 속찬심볼은 측정된 선량률을 전립선 깊이의 함수로서 구성한 것이다. 이때 전립선 깊이는 캘리퍼로 측정한 환자 하복부 두께의 반으로 가정하였다. 실선 곡선은 이들 데이터 점의 최적 지수함수 맞춤선이다. 속빈심볼은 각각에 대해 위 식으로 산출한 예상 선량률이고 점선 곡선은 이들의 최적 지수함수 맞춤선이다. 20 cm에서는 예상치와 측정치 곡선이 중첩되어 잘 맞음을 볼 수 있다. 복부 표면과 특히 얇은 깊이에서는 측정된 선량률이 넓은 범위에 분산되고 예상치보다 유의하게 낮다. 여섯 환자에서는 검출기가 포화되어 해당 깊이 배제된 것이 이와 같은 불일치의 부분적 이유가 된다. 나아가 가까운 거리에서는 이식물을 단일 점선원으로 볼 수 없다. 이러한 불일치에도 불구하고 위 식은 주어진 두께를 갖는 환자로부터 임의의 거리에서 선량률을 합리적으로 추정하는 데 사용될 수 있다. 위에 언급한 MSKCC 연구와 마찬가지로 환자 두께의 함수로서 선량률을 도시하면 유사한 경향을 보이는데 모든 환자에 대해 동일한 총 방사능(47명의 환자에게서 24 U에서 60 U까지 변함)에 대해 다시 정규화하면 일치가 더 나아진다.

(36) 앞의 식을 이용하면 \dot{D} 는 환자에 근접한 사람의 피부 선량률에 대한 추정치를 제공한다. 깊이에 따른 선량률의 빠른 감소 때문에 그 내부 조직의 선량률은

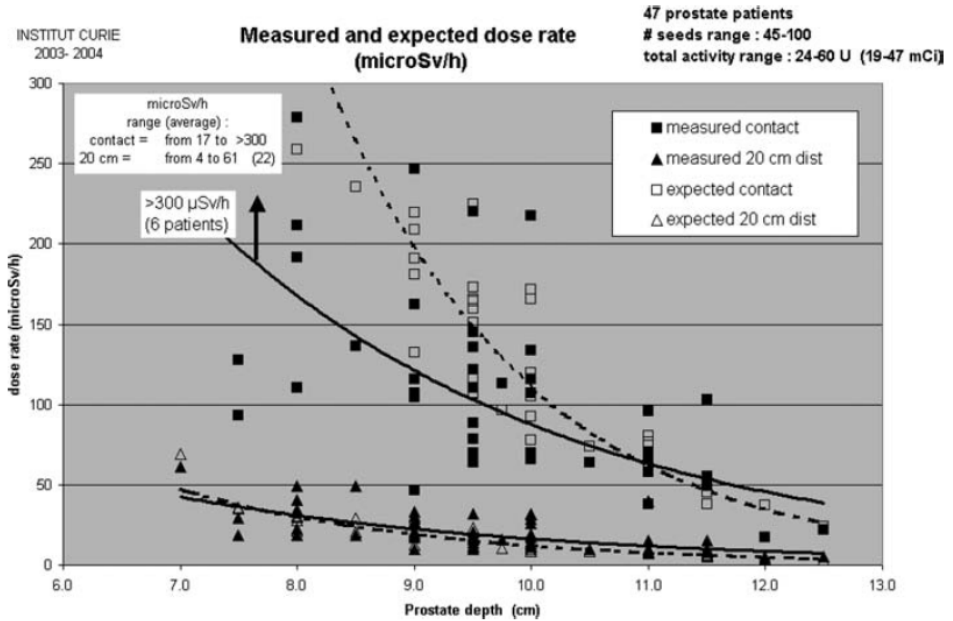


그림 2.1. 큐리연구소의 두께가 다른 연속 47명 환자의 하복부 표면(사각형)과 표면으로부터 20 cm 거리(삼각형)에서 선량률. 전립선 깊이는 환자 두께의 절반으로 가정하였다.

훨씬 작다. 이 사람이 받는 유효선량 산출은 매우 복잡한데 순간 선량률을 방향(즉, 환자의 두께)과 거리의 변화와 방사능의 붕괴를 고려하여 피폭시간에 대해 적분하고 전신에 대해 합산해야 한다.

(37) 측정된 선량은 표 2.2에 재현된 Eckerman 등(미계재)의 흡수선량계수 [$\text{Gy Bq}^{-1} \text{s}^{-1}$]와 비교하여 확인해야 한다. 이 계수들은 조직 가까이 있는 차폐되지 않은 선원으로부터 여러 조직 깊이에서 흡수선량과 신체로부터 1 m 거리에 있는 차폐되지 않은 선원으로부터 활성 골수가 받는 흡수선량을 나타낸다. 측정된 선량은 Eckerman 등(미계재)에 따라 산출한 선량과 잘 일치했다.

(38) 그러나 환자에 의해 방사선이 상당히 자체 차폐되는 임상 이식에 이 결과를 직접 사용할 수는 없다. 표 2.2에 주어진 두께를 이식물 위의 환자 두께로 해석한다면 위 식으로 산출한 선량보다 10배(10 cm 깊이)부터 20배(1 cm 깊이) 높은 선량을 얻게 될 것이다.

표2.2 Eckerman 등(미계재)의 흡수선량 계수[Gy Bq⁻¹s⁻¹]

핵종	조직 두께(cm)			적색골수 1 m
	1	2	10	
¹⁰³ Pd	1.8E-17	7.9E-18	2.3E-19	4.8E-21
¹²⁵ I	8.3E-17	4.8E-17	1.9E-18	2.1E-20

(39) 영구이식 밀봉 방사선원에 의한 전립선암 근접치료의 안전관리에 관한 일본 지침(2003)은 가용한 방호용구에 의한 감쇠, 그러한 방호용구를 착용하는 시간, 해당자가 주어진 거리에서 하루 접촉하는 시간을 고려하는 훨씬 복잡한 접근을 권고한다.

(40) 선량평가에 보다 정확성을 기하려 하고 있지만 지정된 가족 구성원이 환자로부터 1~2⁺ m 거리에 머무르는 시간의 정확한 평가는 어려워 보인다. 이 식의 적합성은 관계되는 사람들에 대한 개인 선량감시를 통해 검증되어야 한다(제2.4 절 참조).

(41) 일반적으로 환자로부터 주어진 거리에서 궁극선량은 다음 식을 이용하여 평가할 수 있다(US NRC 2002).

$$D(\infty) = 34.6 T_p \dot{D}(t_o) E$$

여기서 $D(\infty)$ 는 μSv 단위의 궁극선량, T_p 는 일 단위의 물리적 반감기⁸⁾, $\dot{D}(t_o)$ 는 시간 t_o 에 이식 직후 주어진 거리에서 선량률($\mu Sv/h$), E 는 사람이 이식환자 근처에 머무르는 시간 분율에 근거한 점유도이다(거리는 변하지 않는다고 가정함).

(42) 주어진 기간(시간 t_o 에서 t 까지) 총 선량은 다음 식으로 산출된다(Michalski 등 2003, US NRC 2002).

$$D(t) = 34.6 T_p \dot{D}(0) E [1 - e^{-0.693 \frac{t}{T_p}}]$$

여기서 $D(t)$ 는 주어진 기간(시간 $t_o = 0$ 에서 t 까지)의 총 선량이다.

8) <역주> 반감기 기호로 원문은 T를 사용하고 있으나 아래 제42항 및 제43항에서 사용하는 변수와 통일을 위해 T_p 로 고쳐 쓴다.

(43) 주어진 총 선량에 이르는 시간은 위 식을 재정리하여 t에 대해 풀면 다음과 같이 계산할 수 있다(Dauer 등 2004).⁹⁾

$$t = -\frac{T_p}{0.693} \log\left[1 - \frac{D(t)}{34.6 T_p D(0) E}\right]$$

2.4. 가족과 동거인에 대한 직접 선량감시

(44) 대규모 연구로는 하나의 문헌(Michalski 등 2003)만 있다. ¹²⁵I와 ¹⁰³Pd를 영구 이식한 근접치료 후 44명의 환자가 연구에 참여함에 동의했다. 매 환자에게 두 개의 광자극형광(OSL) 선량계가 주어졌고 매 동거인(배우자, 자녀 및 때로는 애완동물)에게는 하나의 선량계를 주었다. 나아가 환자가 자주 사용하는 네 개의 방에 대해서도 감시하였다. 결과는 유효 심부선량당량(ICRP 1977, 1990, ICRU 1992, Michalski 등 2003, NCRP 1995)으로 주었다. 예상한 바와 같이 가족 구성원의 피폭은 매우 낮았다. 선량계 판독결과에 근거하여 산출한 배우자의 궁극선량은 ¹²⁵I 이식의 경우 0.1 mSv(0.04~0.55 mSv), ¹⁰³Pd의 경우 0.02 mSv(0.015~0.074 mSv)였다. 다른 동거인에 주는 선량은 훨씬 낮았다. 방에 배치된 대부분(94%)의 선량계는 측정한계 미만이었다.

(45) 피폭을 감시한다는 사실이 가족 구성원이 행동제약에 충실할 것을 상기시켜 선량이 감소했을 것으로 가상할 수 있다. 그러나 보다 적절할 것으로 보이는 방에 대한 측정결과도 이 연구에서는 매우 낮았다.

2.5. 권고

(46) 직접 측정 또는 계산으로 얻은 가용한 자료는 보고된 거의 대다수 경우에 가족이나 동거인에 주는 선량이 1 mSv 한도보다 훨씬 낮으며 IAEA(1996)가 환자의 위안자나 간병인에 대해 설정한 선량제약 5 mSv보다는 더욱 낮았다. 따라서 체계적인 선량측정은 필요하지 않다.

(47) 그러나 엄격한 방사선방호 이유보다는 안심을 위해 아동이 환자 무릎에 몇 분 이상 또는 빈번히 앉게 하거나 ¹²⁵I를 이식한 경우에 첫 두 달 동안(¹⁰³Pd에 대해서는 더 짧음) 장시간 임신부와 근접하는 일이 없기를 권고한다. 이점은 환

9) <역주> 식에서 log는 자연대수이다.

자나 보호자에게 서면으로 제시하여 설명하여야 한다(부록C 참조).

(48) 이 법칙에 예외는 이식 시점에 환자의 배우자가 임신 중인 경우인데 이때는 최악의 상황(예: 이들이 야위고, ^{125}I 이식 방사능이 높고 같은 침대에서 잠자는 등)을 고려하면 태아선량이 1 mGy에 달하거나 초과할 수도 있다.¹⁰⁾

(49) 이 경우에는 ^{103}Pd 를 선택하는 것이 부인과 태아에 주는 선량을 유의하게 줄일 수 있다. 선원이 무엇이든 이런 경우에는 이식 후 수 시간 후에 환자로부터 선량을 측정을 수행해야 한다. 측정 위치는 적어도 전면 골반벽으로부터 30 cm 거리의 지점을 포함해야 한다(어떤 환자는 후방 측정치가 더 높은 선량을 보일 수도 있음을 고려해야 한다. 표2.1의 Leeds 자료 참조). 이 측정 결과가 표2.1에 주어진 범위의 상한에 가깝다면(예를 들어 30 cm 거리에서 약 30mSv/h . 표2.1의 신뢰구간 참조) 잠잘 때 환자와 배우자의 거리를 증가(둘 사이에 베개를 둠) 시키거나 출산까지 별도 침대를 사용하는 등 추가 예방조치를 고려할 수 있다.

10) KSKCC(Dauer 등 2004)에서 ^{125}I 와 ^{103}Pd 를 평균적으로 이식한 환자에 접촉하거나 30 cm 거리에서 공극 유효선량당량을 평가하였다. 이 결과를 위 상황에 대한 보수적 총 선량 추정치로 사용할 수 있다. 전면 피부에 접촉하고 33% 점유도(즉, 매일 8시간 동침)를 가정하면 등극 선량당량은 ^{125}I 이식의 경우 25.6 mSv, ^{103}Pd 의 경우 1.6 mSv로 평가되었다. 전면 표면으로부터 30 cm 거리(환자와 배우자 사이에 베개를 둔 것에 해당)에서는 공극 선량당량은 ^{125}I 의 경우 4.1 mSv, ^{103}Pd 의 경우 0.6 mSv로 감소했다.

제3장 배출 선원

3.1. 선원의 이동과 배출

(50) 날 씨알을 영구이식 하는 전립선암 근접치료 초기부터 이들 씨알 중 몇 개가 이동할 수 있음이 알려져 왔다(Ankem 등 2002, Chauveinc 등 2004, Crimm 등 1993, Merrick 등 2000, Nag 등 1995, 1997, Olderr 등 2001, Steinfeld 등 1991, Welle와 Quinn 1992).

(51) 이동한 씨알 대부분은 폐로 이동했는데 이 경우에는 씨알이 환자 몸에 머무르고 배출되지 않는다. 그러나 이러한 폐로 이동으로 인한 임상 증후는 보고된 바 없다(Chauveinc 등 2004, Steinfeld 등 1991). 다른 씨알은 세 경로를 통해 환자 밖으로 배출될 수 있는데 소변(Chauveinc 등 2004, Stutz 등 2003), 정액, 그리고 소화관(이 경우 대개 직장 벽의 궤양이 있어야 하며 매우 드물다)을 통하는 것이다.

(52) 이동 비율은 사용한 기술에 따라 다르다. 날 씨알이 이식된 경우 이동하는 씨알의 비율은 통상 낮고(전형적으로 총 이식한 씨알의 0.5% 이하) 적어도 씨알 하나의 이동을 경험한 환자 비율은 약 15~20%이다. 치료한 배출 씨알의 비율은 더욱 낮는데 큐리연구소에서 치료한 170 연속 환자에게 이식한 12 179개의 씨알에서 12개만 소변이나 정액에서 발견되었다(Chauveinc 등 2004).

(53) “묶음(또는 리본) 씨알”기술을 사용한 경우 씨알 이동은 거의 없다(Tapen 등 1998). 그러나 수주일 후 리본이 녹으면 이때부터 적어도 이론적으로는 소수 씨알이 배출될 수 있다.

(54) 따라서 전립선암 근접치료 후 배출씨알 문제는 날 씨알 기법으로 이식한 수% 환자에게서 기껏 수 개의 씨알에 해당하는 문제이다. 그러나 미국에서만 매년 수백만 개가 이식되기 때문에 그러한 사건에 관한 방사선방호 이슈는 고려되어야만 한다.

3.2. 배출선원 관련 방사선 리스크

(55) 씨알은 통상 이식 후 첫 수일(드물게는 수주)의 기간에 배출된다. 이때에는 씨알의 방사능은 무시할 수준이 아니다. 씨알로부터 1 cm 거리에서 선량률은 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\dot{D}(1 \text{ cm}) = S_k \left(\frac{100}{1} \right)^2$$

여기서 S_k 는 U 단위($\mu Gy h^{-1} m^{-2}$)로 표현되며 \dot{D} 는 $\mu Gy h^{-1}$ (또는 $\mu Sv h^{-1}$) 단위이다. 0.5 U 강도를 갖는 전형적인 ^{125}I 선원으로부터 1 cm 거리에서 선량률은 $5 \mu Sv h^{-1}$ 가 될 것이다(부록 A 참조).

(56) 이 계산을 $70 \mu m$ 거리(피부의 대사층까지 거리)로 확장하면 보수적인 접촉 선량률은 다음과 같이 산출된다.¹¹⁾

$$\dot{D}(0.07 \text{ cm}) = S_k \left(\frac{100}{7 \times 10^{-3}} \right)^2 = 2 \times 10^8 S_k$$

(57) 0.5 U의 강도를 갖는 같은 ^{125}I 선원의 경우 $70 \mu m$ 에서 선량률은 약 $100 Sv h^{-1}$, 즉 $100000 mSv/h$ 가 된다. ICRP가 등가선량을 명목 $70 \mu m$ 깊이에서 평가하도록 권고하고 있는 반면 지속성 결정적 영향은 진피의 보다 깊은 층($300 \sim 500 \mu m$)의 피폭으로 발생함에 유의할 필요가 있다. 따라서 비록 크게 유해하지는 않더라도¹²⁾ 선원을 매우 짧은 시간 동안이라도 직접 접촉하는 것은 바람직하지 않다.

3.3. 권고

(58) 대부분 연구자들이 다음의 두 가지 이유로 배출씨알(또한 폐로 이동한 씨알의 식별) 식별이 필요하다고 보고 있다.

● 표적 체적으로부터 다수의 씨알이 사라지면 선량분포의 품질이 변화되어 암 제어 저하를 초래한다[실제로 유실 씨알 수는 서너 알을 넘는 경우가 거의 없는

11) <역주> 비록 보수적이라는 전제를 사용하고 있지만 이 식은 선원의 크기를 무시하므로 극히 가까운 거리에서는 선량률을 크게 과대평가한다. 선원은 모델마다 차이가 있지만 대체로 반경 0.4 mm, 유효길이 3~4 mm 크기이다. 따라서 실제 접촉 선량률은 대체로 식으로 산출되는 값의 1/40 이하이다.

12) 사고에서 경험(IAEA 2003)에서 보면 심각한 결정적 영향은 단일 씨알에서 다루는 방사능보다 훨씬 방사능이 높은 선원에서만 발견되었다.

데, 문헌에는 이 정도의 유실은 주된 선량계측 변수를 유의하게 변화시킬 만큼 중요하지는 않다고 평가하고 있다(Tapen 1998)].

● 배출씨알을 발견한 사람(특히 어린이)이 씨알에 접촉할 때의 위험(작지만)을 모르면 그들에게 해로운 영향을 미칠 수 있다. 이것이 대개 소변을 거르기를 권고하는 이유이다. 그러나 환자가 소변을 걸러 발견한 선원을 잘못 다뤄 오는 리스크와 변기에서 선원을 씻어 내려서 야기되는 리스크(실제로는 매우 작다) 사이에 균형을 고려해야 한다.

(59) 그러므로 이동한 선원의 식별은 의료관점에서는 유용하지만 방사선 안전 관점에서는 환자가 선원을 보관하다가 의사에게 반납하는 것보다 변기에 씻어 내리는 것이 낫다.

(60) 그렇지만 다음의 권고들이 두 입장을 합리적으로 조정할 것으로 생각한다.

3.3.1. 날 씨알 기술

(61) 통상 소변 거름을 권고한다. 걸러야 할 필요한 시간에 대해서는 문헌에 합의가 부족한데 수일부터 1개월까지 다양하다. 그러나 소변으로 배출되는 대부분의 씨알은 첫 수일 동안임이 인정된다(Merrick 등 2000). 따라서 합리적인 권고는 3일간 소변을 거르는 것이다. 이후 이동할 수 있는 매우 소수의 씨알은 변기에 내리더라도 이 수준 광자 에너지에 대해서는 하수관이나 물이 충분한 방호를 제공할 것이다.

(62) 이식 후 2~3주간은 성교 시 콘돔을 사용할 것을 권고하지만 첫 5회 사정까지와 비교해 낮은 시점까지 사용하도록 조언하는 것이 더 적절해 보인다. 이식 후 몇 시간 이내의 조기 성교는 피해야 한다(이런 상황에서 씨알을 세 개까지 사정한 환자의 사례가 있다).

(63) 매우 드물게 소화관을 통해 배출된 씨알은 변기에서 씻어 내릴 수 있는데 물이나 하수관이 여기서 고려하는 수준의 광자 에너지에 대해서는 충분한 방호를 제공할 것이다.

(64) 환자나 가족 구성원이 씨알을 발견한 경우 씨알에 접촉하지 말고 스푼이나 집게를 사용하여 설명과 함께 사전에 환자에게 지급된 용기에 씨알을 담아야 한다. 용기는 병원이 씨알 카트리지를 도입할 때 사용된 것일 수 있다. 예약된 다음 내원 때 담당 의사에게 용기를 반납해야 한다.

(65) 참고로 배출되는 씨알 수는 그 병원에서 이식한 씨알 수가 많을수록 그리고 담당 의사의 경험이 많을수록 감소한다(Eshleman 등 2004).

(66) 일반적으로 씨알이 방광에 너무 가깝게(심지어는 방광 내에) 또는 요도에 매우 가깝게 이식된 경우에는 이동과 소변으로 배출이 일어난다.

(67) 씨알이 정낭이나 정관에 이식되면 정액으로 이동하여 사정될 것이다. 이러한 최적이지 아닌 이식은 경험에 의해 피하거나 적어도 그 빈도가 최소화야 한다.

3.3.2. 묶음씨알 기술

(68) 앞서 지적한 바와 같이 묶음(리본)씨알을 사용하는 경우에는 이동이나 배출이 매우 드물다. 이식 후 환자가 의료관찰 아래에 있는 동안만 소변을 거르기를 권고한다. 그러나 이식 후 수주일 지나 리본이 저절로 용해되었을 때 소수 씨알이 이동, 배출될 수 있다(Merrick 등 2000). 이때 배출된 씨알은 변기에서 내릴 수 있다.

제4장 화장

(69) 많은 나라에서는 화장이 상대적으로 드문 반면 어떤 나라에서는 빈번하며 (예: 중국과 인도) 일본에서는 법이다. ¹²⁵I이나 ¹⁰³Pd 선원을 이식한 환자의 화장 은 몇 가지 이슈를 제기하는데 (1) 화장 직원과 환자 가족에게 피폭을 줄 수 있는 환자 재의 잔류방사능, (2) 화장 직원이나 일반인의 방사성 입자 흡입이나 일부 환경감시기 경보작동을 초래할 수 있는 공기 중 방사능 등이다.

(70) 이들 이슈에 대한 관심의 정도는 화장 기술과 밀접하게 연관된다. 예를 들면 고온/고유량 화장에서는 화장 직원이 받는 선량은 고려할 필요가 있을 것이지만(Que 2001, Yumoto 2000) 다른 우려는 사소할 것이다. 저온/저유량 화장에서는 화장 직원이 받는 선량이 부주의한 흡입이나 경구섭취로부터 방호를 위해 추가적인 예방조치가 필요한 수준에 근접할 수 있으며, 환자 재의 잔류방사능은 차폐나 특수 취급을 요구할 수도 있다.

(71) 이 이슈들에 초점을 맞춘 연구는 한둘에 불과하다(NCRP 1970, Que 2001). 이렇게 정보가 부족한 것이 현재 나라마다 정부 권고가 상당히 다른 이유로 설명될 수 있다.

4.1. 국가별 현행 권고

(72) 미국 원자력규제위원회(US NRC)는 그러한 경우 방사선 안전 전문가에게 조언을 받도록 규정하고 있다. 연방규정 10CFR35는 '사업자¹³⁾는 환자나 의학연구 대상자가 위급하거나 사망한 경우에는 가능한 한 빨리 방사선안전책임자(RSO) 또는 그 대리인, 그리고 한 사람의 인가사용자¹⁴⁾에게 알려야 한다.'고 규정하고 있다.¹⁵⁾ 이렇게 하여 근접치료 절차에 사용된 방사선택종의 종류와 양(방사능)을 평가하여 화장 직원이나 일반인의 안전을 확인하도록 한다. US NRC는

13) <역주> 방사성물질 사용허가를 받은 사업자로서 이 경우는 해당 병원이 된다.

14) <역주> 인가사용자(authorized user)란 소정 자격을 갖춰 의료 방사선 취급인가를 받은 의사, 치의사 등을 의미한다.

15) <역주> 미국 연방규정 10CFR35.410은 이러한 사건이 발생한 경우 환자 보호자가 안전관리책임자나 인가사용자에게 알리도록 보호자에게 지침을 줄 의무를 규정하는 것인데 이 본문에서는 사업자가 알려야 한다고 약간 달리 기술하고 있다.

국가방사선방호측정위원회(NCRP) 보고서 37(1979)을 참조하고 있다. NCRP는 원칙적으로 그러한 시신의 화장을 용인한다. 보고서는 만약 방사성핵종이 단수명이고 한 화장장에서 연간 7.4×10^{10} Bq(74 GBq 또는 2000 mCi)을 넘지 않는다면 ‘... 방사선위해가 없는 것으로 나타났다.’고 기술하고 있다. ^{125}I 나 ^{103}Pd 이식에 이를 적용할 수 있다. NCRP는 ‘치료목적으로 방사성핵종의 사용을 신중히 고려한다면 방사성물질에 대한 이 연간 화장 기준을 넘는 경우는 거의 없을 것이다. 그래서 현재로서는 시신의 화장에 대해 추가적인 일반 규정을 수립할 필요는 없다.’고 논의를 결론지었다. 그러나 1970년대에는 씨알 이식이 오늘처럼 널리 보급되지 않았기 때문에 이 NCRP의 논의와 결론을 지금 적용하기는 어려울 수도 있다.

(73) 영국에서는 3년 동안은 화장을 억제할 것을 권고(아직 미발간)하고 있다. 이 기간 이전에 화장을 고려한다면 개별 리스크 평가가 있어야 한다.

(74) 프랑스도 그 이하에서는 물질이 방사성물질 규제를 받지 않는 것으로 간주되는 면제 문턱에 근거하여 ^{125}I 은 이식 후 3년 동안 화장을 억제하고 있다.

(75) 중국에서는 암 관리 당국이 전립선암 ^{125}I 이식환자의 시신은 이식 후 2년 동안은 화장하지 말도록 권고하고 있다(Que 2001).

(76) 일본에서는 2003년 일본 방사선의학회, 비뇨기학회, 치료방사선학회가 발행한 지침이 ^{125}I 을 사용한 이식 후 1년 동안은 화장 전에 전립선을 시신으로부터 절제할 것을 권고하고 있다. 절제된 전립선은 해당 병원의 방사성물질 관리 아래 보관한다.

4.2. 환자 화장재의 잔류방사능

(77) 360 MBq(9.8 mCi)의 ^{125}I 을 함유한 시신을 화장한 미국 사례에 관한 Que(2001) 자료를 이용하여 약 18%의 방사능이 잔재에 남는 것으로 평가한다. Yumoto 등(2000)은 저준위 방사능 시료를 시험 소각하여 평균 2.4%의 방사능이 소각 후 남는 것을 발견했다. 영국의 최근 사례(Harding, 개인접촉)에서는 ^{125}I 을 이식했던 환자의 재에 30%의 방사능이 남았다.

(78) 전형적으로 ^{125}I 이식 방사능 1500 MBq(40 mCi)를 가정하면 고온/고유량

화장 후 남는 방사능은 40~450 MBq(1000~12000 μCi) 범위가 될 것이다. 저온/저유량 화장에서는 이보다 훨씬 높은 방사능이 남을 것으로 보인다.

(79) 화장 직원의 피폭 잠재성을 고려할 때 선량환산인자로 흡입에 대해 5.1×10^{-9} Sv/Bq, 경구섭취에 대해 1.5×10^{-8} Sv/Bq을 적용하면 내부 유효선량 1 mSv에 이르는 섭취로 흡입은 185 kBq(5 μCi), 경구섭취는 75 kBq(2 μCi) 수준으로 낮게 평가된다.

(80) 일반인이 외부피폭으로 잠재 유효선량을 받는 경우를 고려하면 잔재를 담은 용기에 접촉(즉 1 cm 거리) 선량률은 10~100 $\mu Sv/h$ 범위가 된다.¹⁶⁾ 그러므로 특히 이식 후 6개월 이내에 환자를 화장한다면 이 잠재 선량 경로에 대해 고려해야 한다.

(81) Que(2001)는 ¹²⁵I 씨알을 10 반감기(약 20개월) 이상 저장한 다음에는 일반 쓰레기로 버릴 수 있다는 미국 의학물리사연합(AAPM) 권고 AAPM TG-56(Nath 등 1997)을 참조했다. 이것은 화장 재를 흘리는 데 실질적 지침으로 사용될 수 있다.

(82) 방사성물질의 안전 운송을 위한 국제 운송규정(IAEA 1996)이 10⁶ Bq(27 μCi) 이상의 ¹²⁵I 방사능에는 적용된다. 따라서 화장재가 이 규정의 적용을 받아야 할 수도 있다. 이 값 미만의 방사능은 운송규정으로부터 면제된다.

4.3. 공기 중 방출 잠재성

(83) 단순한 가우시안 플룸 모델(NCRP 1996)과 현대 화장 변수(예: 굴뚝 높이, 공기 유량 등)를 사용하여 Que(2001)는 2200 MBq(60 μCi)을 함유한 환자를 화장한 경우 최악 조건에서 ¹²⁵I 공기농도를 평가하였는데 약 150 Bq/m³(4.5×10^{-3} $\mu Ci/m^3$)로 나타났다. 나아가 그러한 상황에서 표준인은 3시간에 1 kBq(0.03 μCi)의 ¹²⁵I을 흡입하여 ~7.5 μSv 의 예탁유효선량을 받는 것으로 평가했다.

(84) 지표 준위, 저온, 노천 화장과 같은 매우 희귀한 경우에는 더 많은 분율을

16) <역주> 표면선량 측정에 관한 국내 규정은 표면으로부터 10 cm 거리를 기준으로 하므로 국내에 유사 선량률 기준을 설정한다면 이 값보다는 높아질 수 있다.

흡입 가능한 형태로 방출하지만 총 물질의 1백만 분의 1이 흡입된다고 가정할 때(IAEA 2002b, US NRC 1988) 선량은 50~100 μ Sv 범위에 있어 일반인에 대한 선량한도보다 충분히 낮을 것이다.

(85) 현대 화장에서는 공기 농도 평가치가 낮고 관련된 광자의 에너지도 낮기 때문에 일반적인 환경감시기 경보를 울리지는 않을 것이다. 그러나 이러한 가능성도 완전히 배제할 수는 없다.

(86) 모두는 아니지만 끝으로 새로운 소각로(화장로)는 탄산가스와 물이 아닌 다른 유출물을 내지 않도록 세정기scrubber나 기타 장치를 설치하기도 한다. 이때에는 방사성 유출물이 다른 부산물과 함께 세정기에 잡히므로 필요에 따라 세정기를 관리하고 제염해야 할 수도 있다.

4.4. 화장에 대한 권고

(87) 위에서 논의한 데이터를 고려하면 ^{125}I 이식 후 12개월(^{103}Pd 는 3개월)이 지났다면 특별한 예방조치 없이 화장을 허용할 수 있다. 그러나 일부 국가당국(예: 영국과 프랑스)은 최악의 시나리오를 선정하고 계산도 달리하여 훨씬 긴 시간(3년까지)을 권고하고 있음을 생각해야 한다(제4.1절 참조).

(88) ^{125}I 의 경우 12개월 이전에는 시신으로부터 전립선을 절제하여 그 장기(씨알 포함)를 국가 규정에 따라 저장(예: 일본사회)할 것을 권고한다. 그렇지 않다면 다음을 포함한 예방조치를 취할 것을 권고한다.

- 화장 직원은 잔재를 다룰 때 부주의한 흡입이나 경구섭취 우려를 줄이기 위해 장갑이나 호흡기 방호와 같은 예방조치를 해야 한다.
- 환자 잔재는 이식일로부터 최소한 1년 동안 밀폐 금속용기에 보관해야 한다.

(89) AAPM TG-56에 의거 이식일로부터 최소 10 반감기가 지날 때까지 화장 잔재를 환경에 흩어서는¹⁷⁾ 안 된다(Nath 등 1997).

17) <역주> 화장 후 재를 갈아 숲, 바다 등에 뿌리는 장례로 “산골(散骨)”이라는 용어를 사용하기도 한다.

제5장 골반 또는 하복부의 후속 수술

(90) 여기에는 두 가지 서로 다른 문제가 고려된다. 전립선에 이식 후 1~4개월 사이에 환자가 소변 불편증상(급함, 자주 마려움 또는 따끔함)이나 드물게는 배뇨지연을 겪을 수 있다. 그러한 경우에 비뇨기과 외과의사가 과거의 이식을 알거나 모르거나 전립선 제거나 경요도 전립선절제술을 결정할 수 있다. 때로는 전립선의 이식 씨알이나 절제 시료에 있던 씨알들이 분실되기도 했다.

(91) 수% 이내의 드문 경우로서 매우 제한적이고 신중한 경요도 전립선절제술을 수행할 필요가 있을 수도 있다. 이러한 절제는 이식 근접치료기술에 대해 익히 알고 있는 경험 있는 의사가 수행해야 한다. 긴요하지 않다면 ¹²⁵I 이식 후 6개월 이전에는 이와 같은 절제는 하지 말아야 한다. 전립선을 깎아낸 물질을 걸러 씨알을 찾아내고 집게로 용기에 담아 해당병원으로 보내야 한다.

(92) 다른 경우로서 전립선 근접치료 후 복부나 골반부 수술(전립선암과 무관하게)이 필요할 수 있다. 문제를 예방하기 위해 환자는 자신이 이식을 받았음을 설명하는 카드를 항상 휴대하고 추가 확인에 필요하면 병원 전화번호를 알려 주어야 한다(부록 D 참조).

(93) 이식 후 3년 이상이 경과한 후 전립선 절제나 제거가 수행될 때는 방사선 위험은 해당 없다. 그러나 금속 씨알이 조직절편 준비에 사용되는 절편도를 손상시킬 수 있으므로 해당 정보를 담당 외과의나 병리학자에게 제공할 필요가 있다.

제6장 자녀 출산

(94) 영구이식 씨알을 사용하는 전립선 근접치료로 피하기 어려운 영향의 하나는 대체로 정액의 색깔 변화(이전보다 투명하고 물 같음)나 연속성 저하와 함께 사정 양이 현저히 줄어드는 것이다. 전립선에 부과된 피폭과 함께 이러한 변화는 환자가 확실히 불임으로 생각하게 만든다. 이식 후 자녀를 갖는 일은 거의 없음을 사실이다. 그러나 이식으로부터 고환이 받는 선량은 불임의 문턱선량(통상 6 Gy 정도로 봄)에 미치지 않을 것이며, 변질된 정액에도 활동성 정자가 생존할 수 있을 것이다. 영구이식 후 자녀를 가진 사례가 수 건 보고되어 있다.

(95) 나아가 집중 문헌조사와 고환 선량이 20 cGy에 불과하다는 평가를 근거로 Mydlo와 Lebed(2004)는 전립선 근접치료가 전립선암 환자의 불임에 미치는 영향은 거의 없다고 추측했다.

(96) 끝으로 고환을 피폭한 후 후손에게서 식별되는 유전영향과 관련하여 유전영향의 자연적 발생이 13 생존출생마다 약 1명(UNSCEAR 2001)이 되는 점을 지적하는 것이 중요하다. 방사선으로 인한 유전 리스크에 대한 현재 평가(UNSCEAR 2001)는 환자 고환에 1 Gy가 후손에 300 출생마다 한 건 정도의 초과를 가져올 것으로 본다. 이것은 이러한 유전 영향의 자연적 발생 대비 수%(~4%) 증가로서, 이 수치는 환자가 그들 후손에서 유전영향의 상대적 위험이 낮음에 대한 믿음을 갖도록 하는 데 기여할 수 있다.

제7장 방사선감시기 경보 작동

(97) 어떤 유형의 방사선검출 감시기는 매우 낮은 경보준위(자연 백그라운드 방사선 준위의 1.5~2배)에 맞춰져 있어 특히 이식 후 첫 수개월은 영구 이식환자에 의해 경보가 작동할 수 있다. 이러한 감시기는 보통 원전이나 원자력 연구센터 출입구, 일부 폐기물 처리 지역, 일부 고철 공장 또는 집하장 등에서 볼 수 있다. 그러한 시설에서 근무하는 환자가 근무처로 복귀할 때 경보가 작동할 수 있다. 그러나 이들의 신분이 잘 알려져 있고 일정 수준 보안확인을 거쳤기 때문에 큰 어려움은 없을 것이다.

(98) 근래에는 불법 방사성물질의 이동이나 방사능 선원의 부주의한(또는 악의적인) 운송을 억제하기 위해 공항이나 국경관문에 그러한 검출기를 설치하기도 한다(IAEA 2002a, 2003). 환자가 그러한 방사선감시기 경보를 작동시켰을 때 문제가 복잡해지는 것을 막기 위해 환자는 퇴원할 때 받은 지갑카드(부록 D 참조)를 제시할 수 있어야 한다.

(99) 오늘날의 검출기들이 지극히 민감하여 보건 관심 수준보다 매우 낮은 방사선 준위까지 검출하고 있음을 환자에게 설명해 줄 필요가 있다.

제8장 이차 암

8.1. 전립선암 근접치료 후 이차 암

(100) 영구이식에 의한 전립선 근접치료 후 이차 방사선유발암 이슈에 대한 연구는 극소수이다. 실제로 이식 후 이차암 발생에 대한 보고로는 두 편의 논문이 있을 뿐이다. Yurdakul 등(2003)은 전립선암의 근접치료 11년 뒤 직장 평편세포암을 보고했다. 그러나 홀로인 이 사례는 근접치료와 암의 발생에 직접 연관을 입증할 수 없었다. Miller 등(1995)은 전립선 선암 치료를 위해 씨알 이식 10년 후에 전립선 평편세포 암이 발견된 것을 보고했다. 일상적이 아닌 조직학과 이차암이 조사된 채적에서 발생했다는 사실이 근접치료와 연계를 암시하는 것으로 볼 수 있다.

8.2. 전립선암 치료 후 이차 암

(101) 전립선암을 구체적으로 다룬 데이터가 작음을 고려하면 먼저 전립선암에 대한 모든 형태의 치료 후 이차 암 위험에 대해 연구한 시리즈에 관심을 가질 것이다. 흥미롭게도 여러 연구에서 전립선암 치료 후 이차 암 위험이 낮을 뿐만 아니라 일반인 집단에 비해서도 이차 암이 낮음을 보고했다. Kleinerman 등(1985)은 전립선암이 발견된 18135명의 코네티컷 시리즈에서 모든 이차 암이 15% 낮음을 발견했는데 상대위험(RR)은 0.85[95% 신뢰구간(CI) 0.80-0.90]이었다. 19886명의 전립선암 환자에 대한 덴마크 시리즈에서 Osterlind 등(1985)은 RR 0.51로 이차 암 저하를 보고했다. 스위스에서 Levi 등(1999)이 4503 사례를 추적하여 폐, 인두, 식도, 췌장, 후두의 암 감소를 발견한 반면, 후속 비뇨기 또는 결장직장 암의 증가는 발견되지 않았다. 이러한 감소의 이유에 대해서는 아직 명확히 설명되지 않았다(Kleinerman 등 1985).

8.3. 전립선암 외부조사 후 이차 암

(102) 더 흥미 있는 연구는 이차암 발생에서 방사선 조사(대부분의 경우 외부 방

사선치료)의 역할을 구체적으로 밝히려 시도한 것이다. 18135 사례의 코네티컷 시리즈에 대한 새로운 분석은 Movsas 등(1998)이 전립선 조사 후 10년까지 추적한 결과 기저율에 비해 전립선암으로부터 두 번째 일차 암 위험은 증가하지 않았다고 결론짓게 했다. 거의 대부분(84%)의 이차 암은 실제로 방사선장에 노출된 부위 밖에서 방사선 치료 후 3년 이내에 나타나 방사선에 의한 암이 아님을 강하게 시사한다. 이러한 결론들은 Thellenberg 등(2003)의 결론과 유사한데 후자는 근소한 일차 암 증가를 발견했지만 아마도 진단 후 여러 달 동안 검사의 증가 때문일 것으로 보았다. 이들 결과는 Johnstone 등(1998) 연구와도 일치하는데 Johnstone 등은 전립선암을 위한 전방위 노력으로부터 다른 암들의 진단을 예상하는 편중으로 인해 같이 진행되는 여러 암들을 분명히 관찰할 수 있었다. 이점은 림프종, 방광 및 직장 병변에 대해서는 특별히 맞다.

(103) 이러한 데이터 재평가와 함께 어떤 연구는 외부피폭 후 일부 특정 이차 암의 위험이 증가하는 것을 발견했다. Neugut 등(1997)은 방사선치료를 받은 34889 전립선암 환자와 방사선치료를 받지 않은 106872 명의 환자를 분석하였다. 8년후 방사선 치료를 받은 그룹에서 방광암 리스크가 약간 증가하였다 (RR=1.5, 95% CI 1.1-2.0). 직장암, 급성 비립프구 백혈병, 만성 림프구 백혈병 리스크 증가는 관찰되지 않았다. Neugut 등은 방광암 위험이 전립선암 방사선치료 후 여러 해 이후에 증가했다고 결론지었지만 이 증가는 현저하지 않고 직장암이나 백혈병 증가는 확인되지 않았다고 강조했다.

(104) Brenner 등(2000)은 전립선암에 대해 방사선치료를 받은 51584명을 방사선치료 없이 수술로 치료한 70539명과 비교했다. Brenner 등은 특히 장기간 생존자에게서 작지만 이차성 고형암이 통계적으로 유의하게 증가한 것이 방사선치료와 관계됨을 발견하였다. 조사받은 그룹에서 리스크 증가에 가장 유의한 기여는 방광, 직장, 폐 및 방사선장 내의 육종이었다. 절대치 관점에서는 방사선 연관 이차 암 발전 리스크 평가치는 방사선치료를 받은 모든 전립선암 환자에서는 290명 중 1명이고, 10년 이상 생존자에게서는 70명 중 1명으로 증가했다.

(105) 최근의 캐나다 논문(Pickles와 Phillips 2002)에서는 방사선치료를 받은 전립선암 환자의 증가된 리스크는 220명 중 1명으로서 Brenner 등(위 참조)이 계산한 리스크에 매우 근접했다. 그러나 이 캐나다 연구는 위에 언급한 방광암 리스크에 대한 보고와는 일치하지 않았다. 캐나다 연구의 리스크는 방사선치료를 받은 그룹에서 더 낮게 나타났다. 역으로 같은 그룹에서 결장직장 암과 육종은 증가하였다.

8.4. 이차 암 결론

(106) 결론적으로 전립선암의 외부 조사 후 방사선 유발 이차 종양(주로 방광과 결장직장의 암 및 육종) 리스크는 극히 낮게 나타났다.

(107) 근접치료로 연장할 때 이 기술에서 조사되는 정상조직의 체적이 외부 치료방사선에 비해 작으므로 이차 암 리스크는 더 낮아질 것으로 가정하는 것은 일리가 있다. 그러므로 환자에 대해 표준 추적만 필요한 것으로 보인다.

부록 A

전립선암에 사용하는 주된 영구이식 방사선원의 특성

(A1) 다음 자료는 근접치료 선량계산에 관한 AAPM TG-43의 2004 보완판 (Rivard 등 2004)에서 발췌된 것이다. 방사선방호를 위한 정확도 요건은 임상 선량 계산만큼 높지는 않지만 이 자료가 아마도 가장 적당한 자료원일 것이다.

(A2) ^{125}I 와 ^{103}Pd 씨알의 방출 특성이 선원 설계에 강하게 의존하는 점을 이해해야 한다. AAPM 보고서에 의하면 물 등가로 가정하는 매질의 어떤 점에서 선량률은 다음 몇 인자의 조합으로 계산될 수 있다.

- 공기커마 강도 S_k . 이것은 방사능 대체량으로서 통상 1 m 거리에서 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ 단위($\mu\text{Gy h}^{-1}\text{m}^2 = U$)로 나타낸다.
- 선량률 상수 A. 통상 $\text{cGy h}^{-1}\text{U}^{-1}$ 단위로 나타내며 이것이 $S_k = 1U$ 인 씨알로부터 1 cm 거리에서 수중 선량률을 제공한다.
- 씨알로부터 거리 r에서 기하인자. 통상 거리의 역자승 r^{-2} 으로 근사시킬 수 있다.
- 반경함수 $g(r)$. 수중의 거리 r에서 방사선의 감쇠(그리고 산란)을 고려하는 인자이다.($r = 1\text{cm}$ 일 때 $g(r) = 1$ 이다.)
- 2차원(2D) 비등방성 인자 $F(r, \theta)$. 선원 밀봉이 각도 θ 와 거리 r에 따라 방사선 감쇠를 변경시키는 것을 고려한다.($\theta = 90^\circ$ 즉, 선원 축에 수직일 때 $F(r, \theta) = 1$ 로 한다.)

^{125}I 자료

반감기

$T_p=59.4$ 일

감마 및 X선 스펙트럼(선원성분에서 나오는 형광방사선은 포함하지 않음)

광자 에너지(keV)	붕괴 당 광자
27.202	0.406
27.472	0.757
30.98	0.202
31.71	0.0439
35.492	0.0668
가중 평균 에너지: 28.37 keV	계: 1.476

선량산출 변수(선원 제작사에 따른 값의 범위)

선량률상수 A ($cGy h^{-1} U^{-1}$)	반경함수 $g(r)$			비등방성인자 $F(r, \theta)$	
	$r=2\text{ cm}$	$r=5\text{ cm}$	$r=10\text{ cm}$	$r=2\text{ cm}, \theta=0^\circ$ (선원축)	θ 에 대한 평 균($r \geq 1\text{ cm}$)
0.94-1.036	0.81-0.87	0.35-0.43	0.08-0.10	0.34-0.67	0.87-0.99

전형적 씨알 강도

씨알 당 0.5 U(또는 14.6 MBq[0.4 mCi])의 겉보기 방사능. 1.27 U mCi^{-1} 에 근거함(Rivard 등 2004)

씨알 하나(0.5 U)로부터 공기 중에서 근사적 등가선량률

접촉(0.07 mm)	$100\text{ Sv } h^{-1}$
1 cm 거리	$5\text{ mSv } h^{-1}$
1 m 거리	$0.5\mu\text{Sv } h^{-1}$

^{103}Pd 자료

반감기

$T_p=16.99$ 일

감마 및 X선 스펙트럼(선원성분에서 나오는 형광방사선은 포함하지 않음)

광자 에너지(keV)	붕괴 당 광자
20.074	0.224
20.216	0.423
22.72	0.104
23.18	0.0194
39.75	0.00068
294.98	0.00003
357.5	0.00022
497.1	0.00004
가중 평균 에너지: 20.74 keV	계: 0.7714

선량산출 변수(선원 제작사에 따른 값의 범위)

선량률상수 A ($cGy h^{-1} U^{-1}$)	반경함수 $g(r)$			비등방성인자 $F(r, \theta)$	
	$r=2\text{ cm}$	$r=5\text{ cm}$	$r=10\text{ cm}$	$r=2\text{ cm}, \theta=0^\circ$ (선원축)	θ 에 대한 평균 ($r \geq 1\text{ cm}$)
0.68-0.69	0.55-0.59	0.09-0.10	<0.01	0.52-0.59	0.86-0.92

전형적 씨알 강도

씨알 당 3.5 U(또는 100 MBq[2.7 mCi])의 겉보기 방사능. 1.293 U mCi⁻¹에 근거함(Rivard 등 2004)

씨알 하나(3.5 U)로부터 공기 중에서 근사적 등가선량률

접촉(0.07 mm)	730 $Sv h^{-1}$
1 cm 거리	35 $mSv h^{-1}$
1 m 거리	3.5 $\mu Sv h^{-1}$

부록 B

전립선암 근접치료용 선원 영구이식 후 선량 측정

(B1) ^{125}I 나 ^{103}Pd 씨알을 이식한 환자로부터 거리에 따른 선량 측정에는 다음과 같은 이유로 몇 가지 이슈가 제기된다.

- 방사선 에너지가 낮고 스펙트럼이 복잡하므로 적절한 에너지 반응을 갖는 검출기가 사용되어야 한다.
- 선량률이 낮아 검출기가 고감도이어야 한다.

(B2) 따라서 방사선방호 목적의 표준 서베이미터는 그러한 측정에 적절하지 않을 수 있다. 검출기의 에너지 반응에 대해 읽음값을 적절히 보정하지 않는다면 결과가 과대 또는 과소평가될 우려가 있다. 이러한 이슈에 대한 고려의 부족이 여러 연구자가 보고한 결과에 상대적으로 큰 불일치를 초래한 이유 중 하나일 수 있다.

(B3) 방사선방호에서 다음 유형의 서베이미터들이 종종 사용된다.

- 얇은 창과 고에너지 광자빔에서 약간의 추가를 통해 깊은 위치에서 등가선량을 나타내게 하는 부가 캡¹⁸⁾을 가지는 대용량 전리함(큐티파이Cutie pie). 전리에 의한 전류는 전리함 체적의 평균 선량률과 직접 연계된다.
- 주어진 두께의 창으로 스크린된 GM 계수관으로서 측정된 선량률에 따라 펄스들을 내보낸다. 일반적으로 펄스 계수를 등가선량률(mSv/h)을 나타내는 지시치로 변환한다.
- 섬광검출기 또는 고체상검출기로서 GM계수관과 비슷한 방법으로 등가선량률 읽음값으로 변환될 펄스를 발생시킨다.

(B4) 나아가 통상 개인선량 감시에 사용하는 필름이나 TL물질, 또는 일반적으로 고체상검출기를 바탕으로 하며 종사자 선량감시에 점점 더 많이 사용되고 있는 직접 지시형 전자장치(카드)¹⁹⁾를 사용할 수도 있다.

(B5) 어떤 검출기를 사용하든 검출기의 에너지 반응을 이해하는 것이 기본이다. 예를 들면 50 keV 이하의 에너지에서는 에너지 반응곡선이 급격하게 증가하거나 감소할 수 있다. 그림B1은 세 종류 상이한 검출기의 선량 반응의 예를 보인다

18) <역주> 평형모자(equilibrium cap)이라 부르기도 한다.

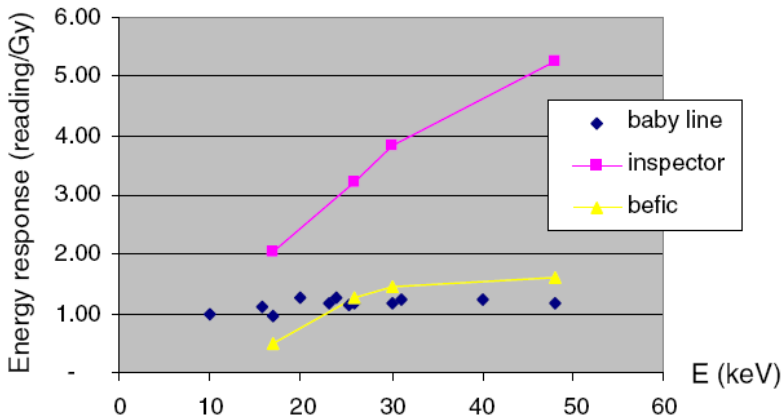
19) <역주> 흔히 말하는 전자선량계를 의미한다.

(IRSN 2003).

(B6) "babyline"은 전리함 서베이미터(뚜껑 없이)이며 "inspector"는 얇은 창 GM계수기, "befic"은 GM관과 조합된 NaI 섬광검출기이다. Babyline은 교정인자가 1이 되도록 대체로 평탄한 반응을 보임에 비해 inspector는 2와 5 사이의 교정인자가 필요한 정도로 선량을 과대평가하며 befic의 교정인자는 0.5와 2 사이에 있음을 알 수 있다.

(B7) ^{125}I 이나 ^{103}Pd 씨알에 대해 사용할 교정인자의 선택은 방사선 에너지 스펙트럼과 검출기 반응의 조합을 통해 구해야 한다. 그러나 방출되는 방사선의 평균 에너지에 대한 교정인자를 택하면 읽음값에 적용할 교정인자의 합리적 평가치를 제공할 것이다. 극단적인 경우 창이 너무 두텁거나 본질적 에너지 반응이 이 에너지 영역에서 적절하지 않다면 검출기 지시가 무시할 수준으로 되어 안전에 잘못된 자신을 제공할 수 있다.

(B8) 에너지 반응에 추가하여 감도 요건이 큐티파이 전리함처럼 큰 검출체적을 요구할 수 있다. 검출기가 커지면 통상 검출기 민감체적의 중심으로 하는 측정점이 부정확하게 된다. 그러한 검출기로는 환자 표면에 충분히 가까이 할 수 없어 접촉 선량을 정확히 잴 수 없다.²⁰⁾ 어떤 검출기는 시간 반응이 매우 길어 지시치가 안정되어 실제 선량률을 대표하게 될 때까지 오래(예: 약 1분까지) 한 자리



그림B.1. 세 종류 측정기의 에너지-선량 반응의 비교(IRSN 2003).

20) <역주> 엄밀한 의미의 “접촉” 선량률을 측정하기 위해 애쓸 필요는 없다. 검출기 크기 문제, 방사선장 측정에 사용하는 주위선량당량이 측정점에 중심을 둔 반경 15 cm의 ICRU 구 내의 선

에 기다려야 할 수도 있다.

(B9) 결론적으로 이식한 환자 주변의 선량평가는 경험 많은 의학물리사나 방사선방호 전문가가 사용할 검출기의 신중한 선택과 에너지 반응에 대한 적절한 보정을 적용하여 수행할 것을 권고한다.

량당량으로 정의되어 있는 사실 등을 고려하여 대개 표면선량률을 표면으로부터 일정한 거리(보통 10 cm)에서 선량률로 정의하고 있다. 그러나 유사한 측정을 비교하기 위해서는 측정점에 대한 정확한 표현이 필요하다.

부록 C

영구이식 씨알로 전립선 근접치료를 받는 환자에게 줄 최소한의 권고 예시

(C1) 당신의 전립선에 심은 씨알이 방출하는 방사선의 대부분은 당신 몸에 흡수된다. 더욱이 당신 몸에서 멀어질수록 방사선은 크게 감소하므로 1m 거리에서는 유의한 선량이 측정되지 않는다. 나아가 씨알의 강도는 시간에 따라 줄어드는데 ¹²⁵I 씨알은 매 2개월마다 방사능의 50%가 감소하며 ¹⁰³Pd는 17일마다 50%가 줄어든다. 따라서 당신이 다른 사람과 짧게 포옹, 키스, 악수하거나 같은 방에 있는 것으로 해로움을 미치지 않는다. 유아는 방사선에 더 민감한데 소량 방사선이 당신의 골반 바로 위 영역에서만 거의 검출되므로 안심을 위해 ¹²⁵I 이식 후 첫 두 달(¹⁰³Pd는 더 짧음) 동안은 어린 아이를 오랫동안 당신 무릎에 앉히거나 가까이 하는 것을 삼갈 것을 권고한다.

(C2) 방사선을 내는 방사성물질은 캡슐(씨알)에 밀봉되어 있어 방사능이 당신 혈액, 소변 또는 다른 체액을 따라 순환할 수는 없으므로 당신이 다른 사람이나 물체를 오염시킬 수 없다. 이 말은 다른 사람도 특별한 예방조치 없이 (당신이 사용한) 침구, 의복, 수저, 식기, 그리고 화장실 설비를 사용할 수 있다는 의미이다. 씨알은 심박동기나 전자레인지와 간섭하지 않는다.

(C3) 당신의 배우자나 동거하는 가까운 가족 구성원이 임신 중이라면 그 사실을 당신의 치료방사선 의사에게 알려야 한다. 이 상황에서는 출산까지 각방을 쓰거나 배우자와 사이에 베개를 두고 자는 등 추가 예방조치가 필요할 수도 있다.

(C4) 낱 씨알이 사용된 경우 씨알이 당신의 소변을 통해 나올 수도 있다. 그 발생은 매우 희소하지만 이를 확인하기 위해 시술 후 3일간은 소변을 걸러 점검하기를 권고한다. 만약 씨알이 발견된다면 손가락이나 맨손으로 다루지 말고 스폰이나 편셋(21)으로 집어 뚜껑 있는 용기에 넣어야 한다. 용기의 씨알은 다음 내원 때 주치의에게 전달한다. 묶음(또는 리본)씨알이 사용된 경우는 씨알의 이탈은 더욱 드물고 늦게(이식 후 여러 주) 일어난다. 이때에는 씨알을 변기에서 씻어 내려도 별 위험이 없다.

21) <역주> 젓가락을 사용해도 좋다. 중요한 점은 씨알을 피부에 직접 닿지 않게 하는 것이다. 피부에 닿거나 가깝게 근접하면 선량률이 매우 높아져 유의한 피폭을 받게 된다.

(C5) 전립선은 정액을 형성하는 일부 액체를 분비하므로 매우 드물게는 사정 때 씨알이 전립선을 통해 나올 수 있다. 따라서 이식 후 1주일에는 성행위를 중지하기를 권고한다. 적어도 첫 5회 사정까지는 콘돔을 사용하되 이때 씨알이 발견되었다면 더 오래 콘돔을 쓰기를 권고한다. 어떤 환자는 처음의 사정을 배우자 없이 하기도 하는데 그러면 시술 후 사정이 가능한지 하는 걱정을 완화하고 정액에 씨알이 있는지 확인하기 쉽다. 만약 배우자가 임신 중이라면 출산까지 콘돔을 사용해야만 한다. 그렇게 하여 사정을 통한 씨알이 자라는 태아 근처에 머무르는 것을 방지할 수 있다. 사정에서 씨알이 나왔다면 C4항의 예방조치 즉, 씨알을 손가락이나 손으로 접촉하지 말고 스푼이나 핀셋으로 집어 용기에 담고 다음 내원 때 주치의에게 반납하는 방법을 따르면 된다.

(C6) 그럴 일 없지만 이식 후 12개월 이내에 당신이 사망하는 경우 당신 시신의 화장은 유해할 수 있다(오염 가능성과 재에 남은 잔류 방사능 때문에). 이때에는 이식을 행한 병원에 자문을 구해야 한다.

(C7) 이식 후 몇 년이 지났더라도 당신이 전립선 수술을 받게 되었다면 외과의사에게 이식 사실을 알려 그 의사가 제거한 씨알의 처분에 대해 자문을 구하도록 해야 한다.

(C8) 이식 후 1년 동안에 당신이 골반이나 복부 수술을 받게 된다면 외과의사가 손가락을 피폭할 작은 위험이 있다. 따라서 당신은 이식 사실을 알리고 퇴원 때 장신에게 지급되는 “지갑카드”를 제시해야 한다.

(C9) 사정할 때 정액의 양과 연속성의 감소를 느낄 수도 있는데 이것이 당신의 생식력의 감퇴로 이어질 수 있지만 당신이 임신시킬 수 없다고 가정해서는 안 된다. 따라서 임신이 문제가 될 때에는 피임 예방조치를 취해야 한다.

(C10) 매우 민감한 방사선감시기는 이식 후 1개월 동안 당신 몸에서 나오는 매우 낮은 방사선 준위를 검출할 수 있다. 이들 보안기기들은 보전에 문제가 되는 수준보다 훨씬 낮은 준위의 방사선을 검출할 수 있다. 이러한 방사선감시기는 원자력발전소, 원자력연구시설, 일부 폐기물처분시설, 그리고 일부 고철 취급시설 등에 설치되어 있다. 나아가 공항이나 국경 관문에서 이들 감시기들이 점점 많이 사용되고 있으며 어떤 도시에서는 경찰관이 이러한 감시기를 휴대하기도 한다. 만약 당신이 검출기 경보를 울렸다면 당신의 “지갑카드”를 내보여야 한다.

부록 D

씨알 영구이식 환자에게 줄 신상확인카드

(D1) 퇴원하는 환자에게 줄 “지갑카드”는 적어도 다음 정보를 수록해야 한다.

- 환자의 정확한 신원: 성명과 생년월일
- 이식선원 유형(^{125}I 또는 ^{103}Pd)
- 이식 날짜 및 부위(즉, 전립선)
- 24시간 구체적 정보를 얻을 수 있는 책임 병원의 주소와 전화번호(가능하면 복수로)
- 이식 후 1년간 의사의 진료를 받거나 입원하는 어떠한 경우에도 이 카드를 제시할 필요를 강조하는 짧은 문장.
- 어떤 수술, 특히 골반이나 복부에 수술을 받을 경우 이 카드를 제시할 필요를 강조하는 다른 문장.
- 적어도 1년간 환자가 이 카드를 항상 소지하여야 함을 알리는 문장.
- 카드에 환자의 사진을 포함하는 것도 고려할 수 있음.

(D2) 악의적 사람(즉, 테러분자)이 감시기를 통과하기 위해 위조 카드를 사용할 수도 있기 때문에 이 카드의 소지자가 일부 보안감시기 경보를 발할 수 있음을 카드에 언급함은 권고하고 싶지 않다. 그러나 환자에게 주어지는 권고(부록 C 참조)에는 보안 감시기 경보작동 가능성에 대해 언급할 필요가 있다.

부록 E²²⁾

전립선암 치료에 사용되는 방사성 씨알에 대한 보조 정보

E.1. 씨알의 외관 및 구조

그림E.1은 전립선암 치료에 사용되는 전형적 영구이식용 방사성 씨알의 외관 사진이다. 씨알은 대체로 직경 0.8 mm, 길이 4.5~5 mm(쌀알 길이)로 끝을 둥글게 처리한 작은 원주형이다. 사진에자와 씨알 이식용 주사바늘(중앙)을 함께 보였다.

씨알은 공급자에 따라 고유한 디자인(특허문제도 있음)을 가지고 있다. 디자인 정보는 선량의 정밀평가에 필요하므로 공개되어 있다. 사용되고 있는 씨알들의 디자인 개요도를 그림E.2에 보였다. Radiomed사의 Radiocoil 모델은 리본형 선원을 나선형으로 꼬아 가공한 다음 적절한 크기로 잘라 만든다. 묽은 씨알은 장기적으로는 체내에서 용해되는 재료로 날 씨알을 연결(소시지 모양)한 모델로서 선원의 이탈을 예방한다.



그림 E.1. 영구이식 방법으로 전립선암 근접치료에 사용되는 전형적 씨알의 외관
(자료원: www.prostatecancercentre.co.uk)

22) <역주> 이 부록(E)은 원문에 없는 것이나 근접치료 씨알에 대해 경험이 없는 독자를 위해 역자가 추가한 것이다. 이 부록에 사용된 그림은 인터넷에서 다운로드된 것으로 저자의 동의를 받은 것은 아니나 자료를 밝혔다.

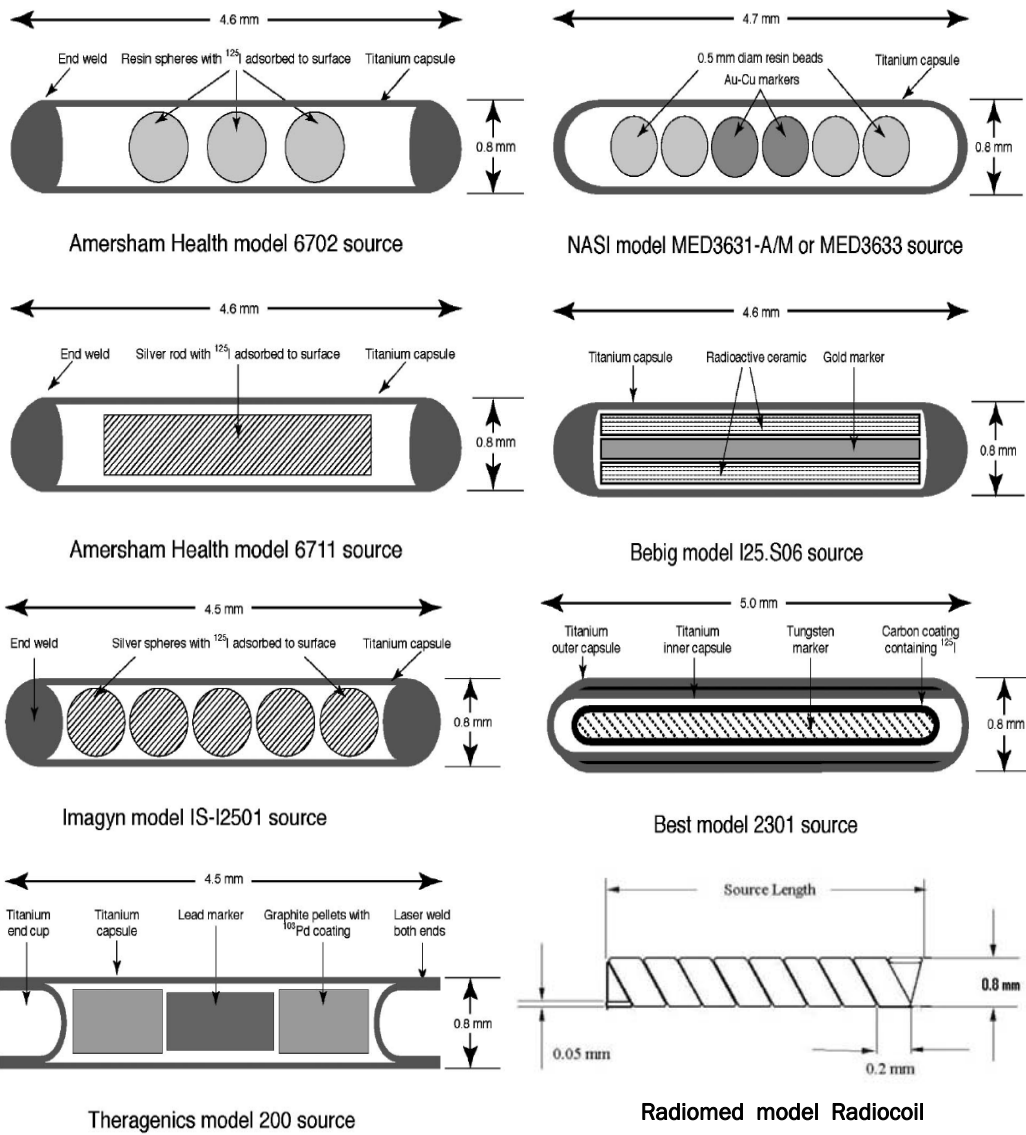


그림 E.2. 영구이식용 씨알의 구조 예시(자료원: Rivard 등 2004. AAPM TG-43 update, Medical Physics, 31(3), 635-674)

씨알은 제작사와 모델에 따라 방사능과 내부구조, 그리고 외형이 다르므로 선 원 주변의 방사선장 강도 분포는 개별 모델마다 구체적으로 평가해야 한다. AAPM TG-43 업데이트(Rivard 등 2004)에서 사용되는 씨알들의 특성 정보를 찾아볼 수 있다.

E.2. 씨알의 전립선 이식

씨알은 주사기를 이용하여 경피적 방법으로 전립선에 이식한다(그림E.3 참조). 이식하는 주사기 위치를 확인하기 위해 초음파 영상과 영상을 이용한다. 중재방사선 기법으로 위치를 확인하는 X선형광투시를 위해서는 전립선에 조영제를 투입하여 영상화하기도 한다. 이식 후에는 CT를 통해 위치를 재확인하기도 한다.

이식하는 씨알의 수는 전립선의 크기 등 환자의 상태에 따라 가변적이거나 60~150개(대체로 100개 안팎)이다. 씨알 하나의 전형적 방사능은 ^{125}I 은 15 MBq(0.4 mCi), ^{103}Pd 는 100 MBq(2.7 mCi) 수준이므로(부록A 참조) 각각 총 방사능은 1.5 GBq(40 mCi)과 10 GBq(270 mCi) 정도가 된다.

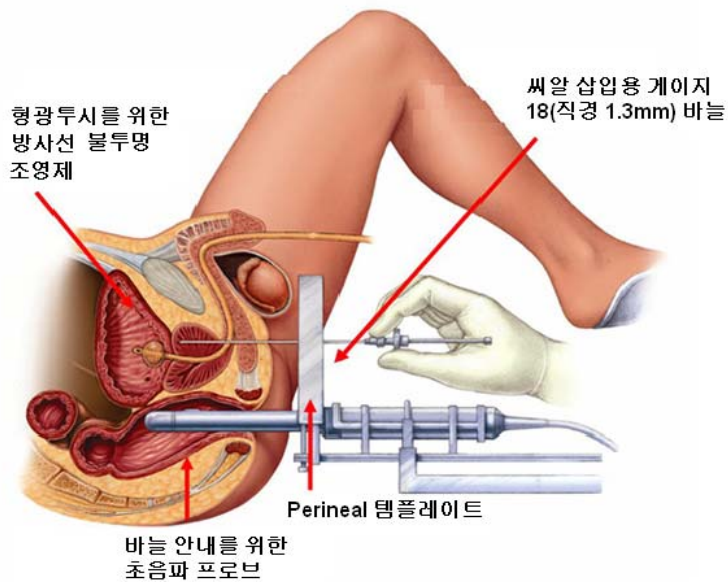


그림 E.3. 전립선암 근접치료 씨알선원 시술 개념도(자료원: www.prostatebrachytherapyinfo.net)

참고문헌

- Ankem, M.K., De Carvalho, V.S., Harangozo, A.H., et al., 2002. Implications of radioactive seed migration to the lungs after prostate brachytherapy. *Urology* 59, 555-559.
- Aronowitz, J.N., 2002. Dawn of prostate brachytherapy: 1915-1930. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 54, 712-718.
- Brenner, D.J., Curtis, R.E., Hall, E.J., et al., 2000. Second malignancies in prostate carcinoma patients after radiotherapy compared with surgery. *Cancer* 88, 398-406.
- Buron, C., Chauveinc, L., Salem, N., et al., 2004. An economic evaluation of interstitial brachytherapy, radical prostatectomy and external beam radiotherapy for localized prostate cancer: results during the first year after therapy. *Radiother. Oncol.* 71 (Suppl. 2), S86.
- Chauveinc, L., Osseli, A., Flam, T., et al., 2004. Migration des grains diode 125 après curiethérapie prostatique: étude d'une série de 170 patients. *Cancer/Radiothérapie* 8, 211-216.
- Dauer, L.T., Zelefsky, M., Horan, C., et al., 2004. Assessment of radiation safety instructions to patients based on measured dose rates following prostate brachytherapy. *Brachytherapy* 3, 1-6.
- Eckerman, K.F., Thompson, E.A., Veinot, K.G. Dose Coefficient for Deterministic Health Effects. ORNL/TM-2003/196. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA (in press).
- Eshleman, J.S., Davis, B.J., Pisansky, T.M., et al., 2004. Radioactive seed migration to the chest after transperineal interstitial prostate brachytherapy: extraprostatic seed placement correlates with migration. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 59, 419-425.
- French Decree No. 2002-460, 2002. *Journal Officiel de la République Française*.
- Grimm, P.D., Blasko, J., Ragde, H., et al., 1993. Migration of iodine-125 and palladium-103 seeds to the lung after transperineal brachytherapy for prostate cancer. *Endocrine/Hypertherm. Oncol.* 9, 90.
- Grimm, P.D., Blasko, J.C., Sylvester, J.E., et al., 2001. 10-year biochemical (prostate-specific antigen) control of prostate cancer with (125)I brachytherapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 51, 31-40.
- Hilaris, B.S., Batata, M.E., Anderson, L.L., 1987 Chapter 26. In: Pierquin, B., Wilson, J.F., Chassagne, D. (Eds.), *Prostate in Modern Brachytherapy*. Masson, New York, pp. 234-247.
- IAEA, 1996. BSS Safety Series No. 115. Food and Agriculture

- Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, World Health Organization, Vienna.
- IAEA, 2002a. Prevention of the Inadvertent Movement and Illicit Trafficking of Radioactive Materials. TECDOC-1311. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2002b. Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials. Safety Standards Series No. TS-G.1.1. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2003. Method for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency. EPR-METHOD. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26, Ann. ICRP.
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection . ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 1996. Radiological protection and safety in medicine. ICRP Publication 73, Ann. ICRP 26.
- ICRP, 2001. Prevention of accidental exposures to patients undergoing radiation therapy. ICRP Publication 86, Ann. ICRP 30 (3).
- ICRP, 2005a. Development of the Draft 2005 Recommendations of the ICRP: a collection of papers. ICRP Supporting Guidance 4, Ann. ICRP 34 (Suppl).
- ICRP, 2005b. Prevention of high-dose-rate brachytherapy accidents. ICRP Publication 97, Ann. ICRP 35(3).
- ICRU, 1992. Measurement of Dose Equivalents from External Radiation Sources -. Part 2. ICRU Report No. 47. International Commission on Radiation Units and Measurement, Bethesda, MD.
- IRSN, 2003. Report SDOS 2003-009. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire.
- Japanese Society for Therapeutic Radiology and Oncology, Japanese Urological Association and Japan Radiological Society, 2003. Guidelines for Safety Control of Brachytherapy with Permanently Implanted Sealed Seed Radiation Sources for Prostate Cancer. Japan Radioisotope Association, Tokyo. In Japanese.
- Johnstone, P.A., Powell, C.R., Riffenburgh, R., Rohde, D.C., Kane, C.J., et al., 1998. Second primary malignancies in T1-3N0 prostate cancer patients treated with radiation therapy with 10-year followup. J. Urol. 159, 946-949.

- Kleinerman, R.A., Liebermann, J.V., Li, F.P., 1985. Second cancer following cancer of the male genital system in Connecticut, 1935-1982. *Natl. Cancer Inst. Monogr.* 68, 139-147.
- Kollmeier, M.A., Stock, R.G., Stone, N., 2003. Biochemical outcomes after prostate brachytherapy with 5-year minimal follow-up: importance of patient selection and implant quality. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 57, 645-653.
- Kupelian, P.A., Potters, L., Khuntia, D., et al., 2004. Radical prostatectomy, external beam radiotherapy \geq 72 Gy, permanent seed implantation, or combined seeds/external beam radiotherapy for stage T1-T2 prostate cancer. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 58, 25-33.
- Langley, S.E., Laing, R.W., 2004. Iodine seed prostate brachytherapy: an alternative first-line choice for early prostate cancer. *Prostate Cancer Prostatic Dis.*
- Levi, F., Randimbison, L., Te, V.C., et al., 1999. Second primary tumors after prostate carcinoma. *Cancer* 86, 1567-1570.
- Marchese, M.J., Nori, D., Anderson, L.L., et al., 1984. A versatile permanent planar implant technique utilizing iodine-125 seeds imbedded in gelfoam. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 10, 747-751.
- Merrick, G.S., Bulter, W.M., Dorsey, A.T., et al., 2000. Seed fixity in the prostate/periprostatic region following brachytherapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Phys.* 46, 215-220.
- Michalski, J., Mutic, S., Eichling, J., et al., 2003. Radiation exposure to family and household members after prostate brachytherapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 56, 764-768.
- Miller, V.A., Reuter, V., Scaer, H.I., 1995. Primary squamous cell carcinoma of the prostate after radiation seed implantation for adenocarcinoma. *Urology* 46, 111-113.
- Movsas, B., Hanlon, A.L., Pinover, W., et al., 1998. Is there an increased risk of second primaries following prostate cancer irradiation? *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 41, 251-255.
- Mydlo, J., Lebed, B., 2004. Does brachytherapy of the prostate affect sperm quality and/or fertility in younger men? *Scand. J. Urol. Nephrol.* 38, 221-224.
- Nag, S., Scaperth, D.D., Badament, R., et al., 1995. Transperineal palladium 103 prostate brachytherapy: analysis of morbidity and seed migration. *Urology* 45, 87-92.
- Nag, S., Singavajhala, V., Martinez-Monge, R., 1997. Pulmonary

- embolization of permanently implanted radioactive palladium-103 seeds for carcinoma of the prostate. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 39, 667–670.
- Nath, R., Anderson, L.L., Meli, J.A., et al., 1997. Cremated remains should not be scattered in the environment until a minimum of ten half-lives has elapsed from the date of the implant (AAPM TG-56). *Med. Phys.* 24, 1557–1598.
- NCRP, 1970. Precautions in the Management of Patients who have Received Therapeutic Amounts of Radionuclides. NCRP Report No. 37. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 1995. Use of Personal Monitors to Estimate Effective Dose Equivalent and Effective Dose to Workers for External Exposure to Low-LET Radiation. NCRP Report No. 122. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 1996. Screening Models for Releases of Radionuclides to Atmosphere, Surface Water, and Ground. NCRP Report No. 123. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Neugut, A.I., Ahsan, H., Robinson, E., et al., 1997. Bladder carcinoma and other second malignancies after radiotherapy for prostate carcinoma. *Cancer* 79, 1600–1604.
- Older, R.A., Synder, B., Krupski, T.L., et al., 2001. Radioactive implant migration in patients treated for localized prostate cancer with interstitial brachytherapy. *J. Urol.* 165, 1590–1592.
- Osterlind, A., Roth, M., Prener, A., 1985. Second cancer following cancer of the male genital system in Denmark, 1943–1980. *Natl. Cancer Inst. Monogr.* 68, 341–347.
- Pasteau, O., Degrais, P., 1913. De l'emploi du radium dans les cancers de la prostate. *J. Urol. (Paris)* 4, 341–345.