

고선량을 근접치료의 정도관리*

연세의료원 암센터 방사선종양학과

방동완 · 조정희 · 박재일

Quality Assurance for High Dose Rate Brachytherapy

Dong Wan Bang · Chung Hee Cho · Jae Il Park

Dept. of Radiation Oncology, Yonsei Cancer Center, Yonsei University College of Medicine

Accurate delivery of doses using a high dose rate(HDR) brachytherapy, remote afterloading system(RALS) depends on knowing the strength of the radioactive source at the time of treatment, the precision and consistency of the timer, and the ability of the unit to position the source at the proper dwell location along the applicator. Periodic Quality Assurance(QA) on HDR machines is a part of the standard protocol of any user.

The safety of the patient & staff, positional accuracy, temporal accuracy, and dose delivery accuracy are periodically(weekly, quarterly, monthly) estimated using HDR source(Ir-192), treatment planning devices, measurement devices, and overall treatment devices with regard to treatment delivery.

The overall measurement results are estimated successfully and assessed its clinical significance. As a result, our HDR brachytherapy units has been very accurate until now.

The QA program protocol permits routine clinical use and provides a high confidence level in the accurate operation of HDR units. Therefore, regular QA of HDR brachytherapy is essential for successful treatment.

Key word : HDR brachytherapy, RALS, QA, QA program

I. 서 론

근접치료(brachytherapy)는 악성종양 또는 비악성병변의 치료를 위해 표적용적(target volume)으로부터 짧은 거리에 밀봉된 작은 방사

성선원을 이용하여 종양주위의 정상조직에는 선량을 급격히 감소시키는 동시에 종양에는 고선량을 국부적으로 집중조사 할 수 있는 치료법이다.

최근 이러한 치료에 이용되는 컴퓨터로 조정되는 고선량을(HDR) 원격조작후장진법(remote

*본 논문은 대한방사선사협회 제33차 종합학술대회('98. 10. 24 서울중앙병원)에서 제5회 웨빙학술상을 수상한 논문임.

afterloading system, RALS) 장비는 일반적으로 선원저장고(source container)와 환자 사이에 여러 채널을 통하여 이동될 수 있는 단일 고방사능의 소형화된 Ir-192 선원으로 갖추어져 사용되고 있다.

고선량율(HDR) 근접치료는 개인방사선피폭과 전반적인 치료시간의 감소, 잠재적인 비용절감을 포함한 저선량율(LDR) 치료보다 상위의 고유한 장점을 지니고 있다. 하지만 저선량율 치료와 비교하여 고선량율로부터 만기조직효과(late tissue effect)의 증가된 위험율이 재관화되었다. 따라서 정확한 고선량율 치료계획과 선량도출은 잠재적 치료와 관련된 합병증의 예견 및 감소시키는데 특히 중요하다.

또한 고선량율 근접치료를 이용한 선량의 정확한 도출은 치료시간에 방사선선원의 강도, 타이머의 정확성과 일치성, catheter를 따라 정확한 거주위치에서 선원이 위치하도록 하는 장비의 능력 등을 인지함으로써 좌우된다.

근접치료에서 대부분의 실책은 올바른 실행을 위한 치료도출과 치료계획 장치의 오류라기 보다는 종사자의 실수, 잘못된 의사소통 또는 장비작동의 잘못된 이해의 결과이다. 따라서 종사자과실 또는 장비파손으로 인한 선원위치나 선량도출시 실책의 원인이 될 수 있는 선량도출 과정에서의 해결점은 적절한 점검사항이 설계가 되고 확인이 되어야 하는 정기적인 정도관리(periodic quality assurance)가 요구된다.

근접치료 정도관리 프로그램(QA program)의 목표는 각각의 환자에게 투여되는 치료에 있어서 방사선 종양학자의 임상적 처방을 실현하기 위해 계획된 선원이 그 의도된 위치에 도출되고 정확한 시간동안 거주하여 선량이 정확히 조사되는지의 정확성과 치료과정 동안 방사선에 피폭될 수도 있는 환자와 종사자의 안전에 관한 안전성 등의 가능성을 최대화시키는 것이다.

그래서 선원 및 근접치료장비가 실제로 임상 제공에 들어가기 전에 주기적인 정도관리 프로그램 protocol이 개발되어야 한다. 이에 본원에 설치된 근접치료장비와 관련된 시스템을 이용하

여 실질적인 상황에 알맞게 도안된 주기적인(주별, 월별, 분기별) 정도관리 프로그램을 개발하고 실험에 필요한 기구들을 직접 제작하여 측정 실험에 이용·평가하였으며, 이러한 정도관리 프로그램 및 방법들을 소개하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 실험장비 및 기구

- Remote Afterloading System(Gammamed 12i, HDR Ir-192)
- C-arm System(Toshiba)
- Applicator(Manchester, New-Fletcher type)
- AM-6 program & Dosimeter(PTW-FREIBURG 9111/K, 9112/K)
- Farmer type ion chamber(PTW M23323 0.1cc)
- Electrometer(PTW DL/DI 4)
- Survey meter, Alarming digital dosimeter
- Film(Kodak X-omat V)
- Source step viewer
- Source dwell position check device
- Source curvature check device
- Wire plate of badug-plate type
- Stopwatch

본 실험에 이용된 원격조작후장진법(RALS) 근접치료는 applicator를 미리 환자의 병변위치에 삽입하여 고정시킨 후, 조정실에서 원격조작으로 선원을 applicator 내에 전송하여 치료를 행하는 방식인 Gammamed 12Ci 장비로 구성된 고선량율 Ir-192 밀봉소선원을 사용하였다.

정확한 선원위치확인을 위한 선원거주위치 점검장치와 선원이동시 선원곡율을 측정하기 위한 선원곡율반경 점검장치 그리고 X-ray 투시영상의 일그러짐 정도를 점검하기 위한 바둑판식 wire 배열판 등은 본원에서 직접 제작하여 실험에 적용하였고, 각각의 주기적 검사항목들

은 정도관리 프로그램에 준하여 위에 열거한 장비들을 이용하였다.

2. 실험대상

1) 환자 및 종사자의 안전성

환자안전의 사항은 장비의 작동불량이나 근접치료절차의 설계, 평가, 실행과정에서 종사자 과오의 결과로써 발생한 파국적인 치료실책 또는 환자의 안녕(well-being)을 위협하는 다른 상황들의 예방을 필요로 한다.

환자안전 정도관리는 치료상태 지시기, 비상반응 시스템, interlock, 여러 가지 관련된 오차인식의 올바른 기능확인 등을 포함한다. 그 중 자동화된 치료장비의 예견된 비상반응이 필요해질 때 요구된 비상절차의 검증은 정도관리 프로그램의 중요한 요소이다.

종사자 안전의 보호는 비록 종사자들이 환자관리와 직원안녕(well-being)에 위협을 받지 않는다 할지라도 잠재적인 법적 또는 법규상의 책임이 발생하는 상황을 최소화시키는 것을 포함한다.

2) 선원위치 정확성

선원위치 정확도 검증은 방사성선원의 계획된 순서 또는 거주위치가 올바른 applicator내에서 정확한 위치에 도출이 되었는지 확인하는 것을 요구한다.

표적 선원위치는 모의치료(simulation)에 앞서 applicator내에 삽입된 모의선원(dummy source)의 방사선사진상의 영상으로 확인이 된다. 그리고 선원위치 정확도 평가는 방사선사진상의 marker seed에 의해 정의된 catheter 내에서 계획된 위치에 실제선원이 위치하도록 이용된 선원부하지시를 추정하는데 protocol을 확인하는 것이다.

3) 치료시간의 정확성

치료시스템은 각 선원 순서 또는 단일 선원 거주위치가 프로그램에 의해 입력된 치료시간 길이 동안 계획된 위치에 머무르게 된다면 치료

시간의 정확도는 실현되는 것이다.

절대적인 타이머 정확도 검사는 선원교정이 외부시간 기준에 근거를 둘 때에는 언제든지 요구된다. 반면에 상대적인 검사는 장비 타이머가 치료 지속의 통제 및 선원강도측정을 완전하게 하기 위해 사용하는 것이다.

추가적으로, 필요하다면 선량도출 정확도상의 이동선량의 영향도 평가하고 교정하여야 한다. 이동선량이란, 선원이 이동되는 동안 도출된 부가적인 선량이다.

4) 선량도출 정확성

방사능의 공간적·시간적 분포의 도출이 실수 없이 완전하다 하더라도 선원위치와 치료지속의 정확한 실현과 같은 많은 다른 변이성들은 조직 내 흡수된 선량의 정확성을 보장하기 위해서 관리되어야 한다.

만일 예상된 선량과 조직에 흡수된 실제선량이 applicator 내의 선원위치 실책이 없이 기준점(reference point)과 같아진다면 물리적으로 정확한 선량이 조사되는 것이다.

물리적 선량에 관한 선원의 정확한 측정, 즉 공기커마강도(air kerma strength)는 가장 중요한 물리적 선량도출 변수들 중의 하나이다. 다른 요인들은 단일선원 선량분포 계산, applicator 감쇄영향, 선량분포상의 차폐교정 등에 관한 정확한 선량측정 자료의 선택을 포함한다.

3. 실험방법

정도관리 프로그램의 주요한 초점은 치료계획, 치료도출 또는 근접치료의 정도관리를 위해 이용된 모든 software, 방사성 장비, 기계적인 것들의 정확한 작동을 보장하기 위한 것이다.

본 연구에서는 장비의 정도관리 검사를 두개의 범주로 나누어 측정하였다. 그 하나는 주기적인 정도관리 검사인 주별, 월별, 분기별과 같은 세 가지 빈도로 측정한 것이다. 다른 하나는 장비를 이용하여 실행함으로써 얻어지는 허용검사, 이는 장비들의 상태와 기능을 평가하기

위해 허용되는 검사의 전반적인 구성이다.

1) 주별 근접치료의 정도관리

주별 정도관리(weekly QA)는 어느 주일(week)에 시작되어 환자를 치료하기 전인 전주(last week)의 어느 날(day)을 지정하여 정기적으로 시행한다.

본원에서는 주별 검사들을 실행하기 위한 가장 기본적이고 중요한 검사들로서 전반적인 시스템 기능(장치 기능)의 점검들과 비상시 안전장비의 이용가능성 검사 그리고 치료전 준비사항들에 관한 점검 등을 실시하였다(Table 1).

Table 1은 주별 정도관리를 전반적인 치료시스템 기능(장치기능)과 환자 및 종사자의 안전에 관한 장치기능과 장비확인 그리고 치료전 준비물에 대한 수량 및 상태확인 등 주로 점검사

항들을 토대로 근접치료 시행전에 시행하는 검사목적과 방법들에 대하여 간단하게 묘사하였다.

2) 월별 근접치료의 정도관리

월별 정도관리(monthly QA)는 주별(weekly) 검사로 실시한 전반적인 치료장비 기능과 안전등의 점검과 더불어 더 자세한 허용검사(acceptance testing)을 위주로 실시하였다.

원격조작후장진법 장비에 대한 허용검사는 사용자가 장비의 상태와 기능을 평가하고 검증함으로써 환자의 치료제공에 있어서 정확성이나 안전성이 이미 만들어진 기준에 부합되도록 하여 정확한 치료를 하기 위한 것이다. 이러한 허용검사는 장비의 작동검사, 장비의 방사선 안전검사, 선원교정과 이동의 점검 및 치료계획 software의 점검 등으로 나누어 시행하였다(Table 2).

Table 1. Weekly quality assurance tests for a remote afterloading facility.

점검항목	점검방법
전반적인 시스템 기능	<ul style="list-style-type: none"> * 치료장비와 치료계획 컴퓨터의 날짜, 시간, factor 확인 * Simulation된 치료의 시스템 작동 확인 <ul style="list-style-type: none"> - 선원이동 (source ejection & source retraction) - 타이머 정확도 * 치료상태 indicator lights 및 선원이동신호 기능 확인 * X-ray 투시 및 영상 시스템의 기능 교정
환자/종사자 안전	<ul style="list-style-type: none"> * 올바른 기능 확인 <ul style="list-style-type: none"> - Interlock (door interlock, 비상 S/W) - 감시장치 (audio/visual communication system) - 오작동시 indicator lights 및 alarm - Area radiation monitor * 이용가능한 안전장비 확인 <ul style="list-style-type: none"> - 안전응급처리기구 (forceps, 납통) - 선원삽입 handling 기구 - Survey meter, Alarming dosimeter
치료전 준비	<ul style="list-style-type: none"> * Applicator (수량, 상태) 확인 * Transfer tube (수량, 상태) 확인 * Accessory (dummy source, marker, dye) 확인

Table 2. Monthly quality assurance tests for a remote afterloading facility.

점검항목	점검방법
선원위치 정확도	<ul style="list-style-type: none"> * 필름을 이용한 선원의 이동거리 정확도 및 프로그램된 위치에 있는지 확인, 비교 검사 * Source step viewer를 이용한 catheter와 선원위치 확인 * 곡울 tester를 이용한 선원곡울 및 굴곡 Interlock 확인 * Stopwatch를 이용한 선원이동속도 확인
선원선량 정확도	<ul style="list-style-type: none"> * AM-6 프로그램을 이용한 기준점의 선량 확인 * 컴퓨터 계산에 의한 교정 factor 값 확인 * PTW chamber를 이용한 선원의 kerma strength 측정 * Stopwatch를 이용한 타이머 정확도 확인
환자/종사자 안전	<ul style="list-style-type: none"> * 공간 dosimeter를 이용한 치료시 선량기준치 확인 * Survey meter를 이용한 누설선량 측정 * 수동 및 자동 비상선원철수 기능 확인
Applicator/Accessory	<ul style="list-style-type: none"> * 사용, 파손된 수량 확인 * 변형, 굴절, 오염된 상태 확인
X-ray 장비	<ul style="list-style-type: none"> * 투시 및 영상시스템 기능 교정 * Contrast 및 resolution 확인

(1) 선원위치 정확도

① 이동거리 정확도

선원의 이동거리 및 위치 정확도를 평가하기 위해서 저감도 X-ray 필름을 이용하여 선원이 프로그램 된 정확한 위치에 있는지 확인·비교 검사를 하였다. 각 channel에 대한 선원거주 위치를 동시에 확인할 수 있는 source dwell position check device(자체제작)를 이용하여 각 channel에 대한 transfer tube를 device 내에 있는 applicator에 연결하고 필름을 그 위에 올려 놓은 다음 프로그램 된 일정한 선원위치 간격(1 cm)과 일정한 시간(1 sec) 만큼 조사시킨 후 그 필름을 현상한다(Fig. 1).

현상된 필름은 그 오차를 측정하기 위하여 필름상에 감광된 각 선원의 중심과 중심사이의 거리를 자(ruler)로 측정하는 시각적인 방법을 이용하였다. 그 측정된 허용오차 범위는 $\pm 1\text{mm}$ 로 하였다.

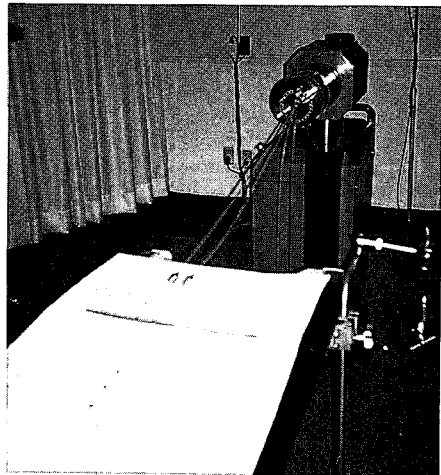


Fig. 1. Source dwell position check using source dwell position check device & X-ray film

② Catheter와 선원위치

Catheter와 선원위치 확인은 source step viewer(length tester)를 이용하여 측정하였다(Fig.

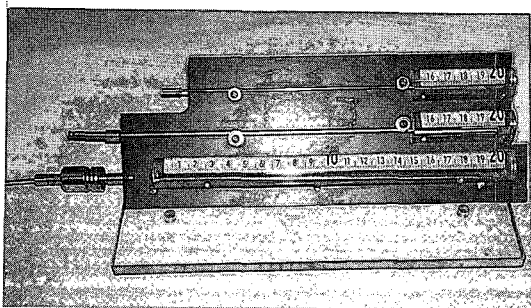


Fig. 2. Source step viewer (length tester)

2). Transfer tube와 applicator를 연결하여 선원이 진행한 총 길이는 200~201cm 이내이어야 하며, dummy source는 200~203cm 이내이어야 한다. 이에 이러한 범위내의 길이까지 실제선원과 모의선원이 실제로 이동하는지의 여부는 본 장비의 프로그램에 있는 function test를 이용하여 source step viewer로 측정하였다. 그 측정된 허용오차 범위는 $\pm 5\text{mm}$ 로 하였다.

③ 선원곡률 및 굴곡 I/L

관내치료(intraluminal radiotherapy)에 사용되는 fine tube(catheter)의 선원곡률 및 굴곡에 따른 interlock을 확인하기 위하여 source curvature check device(자체제작)를 이용하여 측정하였다(Fig. 3). 이 곡률 tester는 반경 1cm 간격으로 원형의 홈을 만들어 각 직경별로 catheter를 삽입하고 일정한 channel에 연결하여 각각 조사시키는 방법으로 측정하였다. 그 측정된 허용오차 범위는 $\phi < 10\text{cm}$ 로 하였다.

④ 선원이동속도 정확도

선원의 이동속도는 항상 일정한 직선성과 항상성을 유지해야 한다. 이에 선원이동속도의 정확성을 측정하기 위하여 stopwatch를 이용하였다. Indexer로부터 출발하여 transfer tube와 연결된 applicator 내의 지정된 첫 번째 위치까지 도달된 거리는 130cm이다. 이 거리를 선원이 출발하여 applicator 내의 지정된 첫 번째 위치



Fig. 3. Source curvature check using source curvature check device

까지 도달하는데 걸린 측정된 시간으로 나누어 준다면 그 선원의 이동속도를 알게 된다. 그 측정된 허용오차 범위는 26cm/sec로 하였다.

(2) 선원선량 정확도

① 기준점의 선량확인

환자의 치료시 정상장기에 대한 기준점(reference point)에서의 선량확인을 위하여 그 기준점에 대한 미리 계산된 선량값들과 실제로 측정하여 얻은 선량값이 일치하는지를 알아보기 위하여 bladder와 rectum의 기준점에 대한 선량확인을 AM-6 프로그램 및 일정한 간격(8cm)으로 일정한 깊이(6cm)만큼 홈이 파여진 $12 \times 12 \times 12.5\text{cm}^3$ 크기의 특수 제작된 polystyrene phantom을 이용하여 측정하였다.

그 측정점들의 간격은 홈에 삽입되어 있는 선원의 위치로부터 각각 8cm 떨어진 곳이며, 방광의 측정점에는 1개의 검출기(detector)가 장착된 single probe를 삽입하였다. 직장의 측정점에는 5개의 검출기가 장착된 five detector probe를 삽입하였으며, 그 검출기의 간격은 각각 1.5cm의 간격으로 배열이 되어 있고, 단지 가운데 3번 검출기만이 선원과의 거리가 8cm을

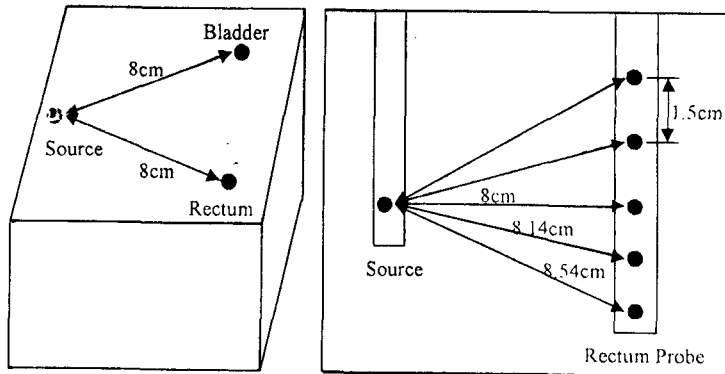


Fig. 4. Geometrical diagram for AM-6 dosimetry set-up

유지하고 있기 때문에 다른 검출기들의 선원과의 거리는 간단한 공식을 이용하여 그 값을 산출하였다(Fig. 4).

먼저 프로그램된 계산된 값을 알기 위해서는 실제 선원의 공기커마율(air kerma rate) 값을 이용하여 측정하고자 하는 시간단위로 산출한다. 새로운 선원이 제작되어 측정된 방사능값은 11.7Ci 였고, 공기커마율값은 47.79 mGym²/h였다. 이 값을 기준치 방사능 10Ci로 환산을 하면,

$$47.79 \text{ mGym}^2/\text{h} \div 1.17 = 40.84 \text{ mGym}^2/\text{h}$$

즉, 10Ci의 공기커마율은 40.84 mGym²/h가 된다.

Bladder probe에 있는 1개의 검출기와 rectum probe에 있는 5개의 검출기들에 대한 선량 계산은 거리역자승법칙(inverse square law)으로 보정하여 그 값을 산출하였다. 이와같이 각 검출기에서 검출될 계산된 예상값들과 일치하는지를 확인하기 위하여 polystyrene phantom을 이용하여 bladder와 rectum probe를 삽입하고 1분간 3회씩 측정하였다. 그 측정오차 범위는 ±3%로 하였다.

② 교정 factor

기준점에 대한 선량확인에 이용된 AM-6 dosimetry에 사용된 각 probe의 교정계수(calibration factor)는 측정시마다 교정을 해야 한다. 방광과 직장에 사용하는 probe는 각각 그 특성

이 다르므로 그 교정 factor 또한 다르게 나타난다. 각각의 probe에 있는 검출기에 대한 교정은 앞서 계산된 공기커마율값을 기준으로 산출하게 된다.

같은 조건상태에서 실제로 측정된 값이 계산된 값과 같지 않은 경우, 앞서 교정된 factor 값을 계산된 기준 측정치에 곱하여 그 값을 실제로 측정된 값으로 나누면 새로운 교정 factor 값이 산출된다.

예를 들면 공기커마율의 계산값이 17.7cGycm²/100sec, 실제로 측정된 값이 15.3cGycm²/100sec, 앞서 입력된 교정 factor 값이 0.00042라면 그 계산식은 다음과 같다.

$$(17.7\text{cGycm}^2/100\text{sec} \times 0.00042) \div 15.3\text{cGycm}^2/100\text{sec} = 0.00049$$

즉, 새로운 교정 factor 값은 0.00049가 된다. 이와 같이 교정 factor 값을 측정시마다 교정하여 측정하였다. 그 측정오차 범위는 ±2%로 하였다.

③ 표준측정치(Kerma)

새로운 방사선원(HDR, Ir-192)을 구입하였을 때 제작회사로부터 받은 decay factor에 따른 방사능의 값이 실제로 측정된 값과 일치하는지의 여부를 평가하기 위하여 절대선량(absolute dose)을 측정하였다.

이 측정에는 인체내의 흡수선량을 측정하는 동일한 조건을 맞추기 위해서 기준점의 선량확인

에 사용한 polystyrene phantom을 사용하였으며, 이온형 전리조(PTW M23323 0.1cc, Farmer-type ion chamber)을 지정된 phantom의 홈에 삽입하고 그곳으로부터 8cm 떨어진 지점의 홈에 선원을 위치시켜 5분간 3회 kerma strength(cGym²/h)을 측정하였다.

측정시간은 선원이 측정점에 들어오고 나가는 동안 조사되는 선량을 고려한 time edge effect와 여러 가지 오차를 최소화 시키기 위해서 초(sec) 단위보다는 분(min) 단위의 긴 시간으로 측정하였다.

본 실험에 사용된 방사선원(HDR, Ir-192)은 solid pellet type의 metal로서 직경 0.6mm, 길이 3.5mm이고, 선원을 감싸고 있는 capsule은 직경 1.1mm, 길이 5.1mm의 제원으로 되어있다.

공기커마율값을 이용하여 계산하면 다음과 같다.

제작시 측정한 방사능값이 11.7Ci일 때 공기커마율값은 47.79 mGym²/h였다. 이 값을 10Ci의 기준치로 바꾸면 40.84 mGym²/h가 된다.

$$40.84 \text{ mGym}^2/\text{h} = 4.0846 \text{ cGym}^2/\text{h} = 680.769 \text{ cGycm}^2/\text{min}$$

Air kerma rate(Nk)

$$\therefore \text{Nk} = 680.769/0.876 = 777.134 \text{ Rcm}^2/\text{min}$$

일때(Ir-192의 $f = 0.971$),

$$= 777.134 \text{ Rcm}^2/\text{min} \times 0.971$$

$$= 754.597 \text{ cGycm}^2/\text{min}$$

$$\therefore D = (754.597/8^2) \times 0.967 = 11.4 \text{ cGy}/\text{min}$$

$D = (A \times f \times \Gamma / d^2) \times \text{WAR}$ 공식을 이용하면,

$$A = 10\text{Ci}$$

$$f = 0.971 \text{ cGy}/\text{R}$$

$$\Gamma = 0.466 \text{ Rm}^2/\text{h} \cdot \text{Ci}$$

$$d = 0.08\text{m}(8\text{cm})$$

$$\text{WAR} = 0.967$$

$$\therefore D = (10 \times 0.466 \times 0.971 / 0.08^2) \times 0.967$$

$$= 683.68 \text{ cGy}/\text{h} = 11.4 \text{ cGy}/\text{min}$$

여기에서 D는 측정점에서의 흡수선량을(cGy/h), A는 Ir-192의 방사능(Ci), f는 roentgen-to-absorbed dose 환산인자(Ir-192, 380KeV), d는

선원으로부터 측정점까지의 거리(m), Γ 는 단위시간·단위거리당 방사능을 roentgen으로 환산해주는 인자이며, WAR은 water air ratio로서 Meisberg 공식이다.

계산된 측정값과 직접 전리조(ion chamber)를 이용하여 얻은 측정값을 비교하기 위하여 먼저 선량측정 절차로써 standard calibration check을 위해 Sr-90 선원이 들어있는 선원저장고의 측정홈에 정확히 전리조를 삽입하고 electrometer(PTW DL/DI 4)를 이용하여 교정하였다. 그 교정된 전리조는 polystyrene phantom내의 지정된 홈에 삽입하고, 8cm 떨어진 지정된 위치에 선원을 삽입시킨 후 5분간 3회 측정하였다(Fig. 5). 그 측정된 허용오차 범위는 $\pm 3\%$ 로 하였다.

④ Timer 시간확인

실제 치료시간과 컴퓨터상의 치료시간을 나타내는 타이머가 정확한지를 검사하기 위해서 stopwatch를 이용하여 측정하였다. 그 측정시간은 선원이 선원저장고로부터 출발하여 지정된 applicator 내의 첫 번째 거주위치에 도달한 치료시작 순간부터 시작하여 지정된 마지막 channel의 마지막 거주위치에서 치료가 끝날 때까지의 시간을 측정하였다. 그 측정된 허용오차 범위는 $\pm 2\%$ 로 하였다.

(3) 안전장치(환자/종사자 안전)

환자치료시 치료실내의 선량기준치를 알아보

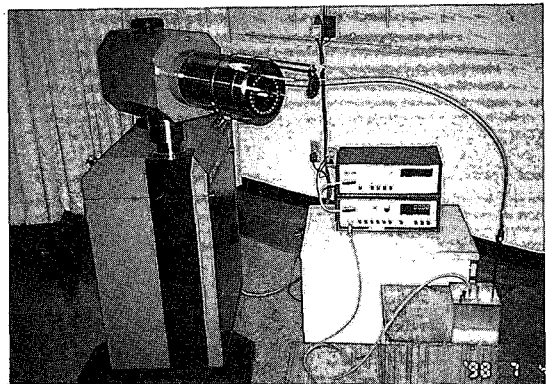


Fig. 5. Experimental set-up for kerma measurement

기 위해 치료실내에 공간 dosimeter를 설치하여 조정실에서 치료시 그 측정된 값을 읽을 수 있도록 하였으며, 실제로 선원이 선원저장고 밖으로 도출되어 조사되었다가 다시 저장고 안으로 안전하게 들어갔는지를 확인할 수 있다.

선원저장고의 차폐능력을 점검하고 안전성을 확인하기 위한 누출선량(leakage dose) 측정은 survey meter를 이용하여 저장고의 표면에서 전후좌우 1m 떨어진 지점에서 측정하였다. 방사선 누출선량은 원자력법에 정한 종사자의 최대허용선량 2mR/h/m 이하인지 정기적 점검을 한다.

선원이 장비의 오작동으로 말미암아 비상으로 선원철수를 시행하고자 할 때는 그 기능으로서 선원삽입 handling기구를 이용한 수동방법과 자동으로 삽입될 수 있게 하는 비상철수 모터의 가동을 확인한다.

(4) Applicator와 Accessory 점검

Tandem & ovoid, transfer tube, dummy 등의 현재 사용 가능한 갯수와 파손된 수량을 확인하고 기록한다. 오랜 사용으로 인한 applicator의 변형, 굴절 또는 부주의한 세척으로 인한 오염, 부식 등의 상태를 확인한다. Transfer tube의 오염이나 막힘, 꼬임여부 등을 확인한다. 또한 모든 transfer tube와 applicator의 연결부위의 완전무결을 점검한다. 모의선원은 applicator assembly을 통한 축의 전위가 될 수 있는 비틀림 또는 굽음에 대한 점검을 한다.

(5) X-ray 장비

Rando phantom을 이용하여 투시하면서 전반적인 영상시스템의 기능과 작동상태를 점검한다. 이는 영상의 일그러짐과 scaler의 좌우대칭과 배율이 일치하는지의 기능을 교정하는 것이다. 영상의 일그러짐 상태는 바둑판식 wire 배열판(자체제작)을 이용하여 투시상에서 모니터의 원형화면에 나타난 wire의 바둑판 배열을 보고 영상의 일그러짐 상태를 교정한다. Scaler의 좌우대칭 및 배율은 직접 scaler plate을 측정하는 방법과 필름에 X-ray을 조사시켜 나타난 필

름상의 scale을 측정하는 방법이 있다.

대조도와 해상도는 특수하게 제작된 high contrast resolution phantom을 이용하여 투시하면서 화질을 점검하고 교정한다.

3) 분기별 근접치료의 정도관리

분기별 정도관리(quarterly QA)의 간격은 고선량을 선원(HDR, Ir-192)의 반감기에 준하여 새로운 선원의 교환이 되는 빈도가 되기 때문에 제안되었다. 분기별 정도관리 검사는 선원교체 및 확인과 함께 특별한 작동특성의 측정에 더 집중되어 있다.

선원교체 후 확인은 새로운 선원에 대한 방사선원 제조업체가 제공한 decay table에 나타난 방사능값과 factor값을 확인하고, 위에서 기술한 동일한 방법으로 표준측정치(Kerma)를 측정비교하고, 저감도 X-ray 필름을 이용하여 선원이 프로그램된 거주위치에 정확한 시간동안 지정된 위치에 머무르는지 확인한다.

그리고 엔지니어와 함께 선원의 도출과 삽입에 관계되는 중요한 역할을 수행하는 기계적인 작동과 PC board, batteries 등을 점검한다.

Ⅲ. 결 과

1) 주별 근접치료의 정도관리

① 전반적인 시스템 기능

매주 실시하는 주별 정도관리는 가장 기본적인 면에서도 중요한 검사들이었다. 치료장비와 치료계획 컴퓨터 내에 입력되어 작동하는 날짜, 시간, decay factor 등은 모두 정확하게 입력되어 시행되었다. 모의치료를 실시하면서 치료의 시스템 작동확인을 하는 검사인 선원이동은 선원방출 및 철수가 정상적으로 작동했으며, 타이머 역시 정상적으로 실행되었다. 치료상태를 알리는 indicator lights 및 선원이동신호 기능도 작동이 정상이었다. X-ray의 투시 및 영상 시스템의 기능은 직접 Rando phantom을 투시하면서 화질에 이상이 없음을 확인하였다.

② 환자/종사자 안전

환자 및 종사자의 안전을 위한 안전장치 점검에서는 안전장치들의 기능이 올바르게 작동이 되는지를 알아보기 위한 것으로서 door interlock과 비상 switch와 같은 interlock 장치, audio/visual communication system인 감시장치, 치료 장비의 오작동시 나타나는 indicator lights 및 alarm, 실제로 선원이 선원저장고에서 치료를 위해 선원방출이 올바르게 되었는지를 감지하는 area radiation monitor 등의 정상적인 작동을 확인했다. 비상시 이용가능한 안전장비로서 forceps, 납통과 같은 안전응급처치기구를 준비하였으며, 만일 선원이 방출되어 들어가지 않는 경우 선원 삽입을 위한 수동 handling 기구의 작동을 확인하였고, survey meter와 alarming dosimeter의 준비와 함께 정상적인 작동을 확인했다.

③ 치료전 준비

치료전 준비 점검으로써 applicator(tandem, ovoid)와 transfer tube(source guide tube), accessory(dummy source, marker, dye)의 수량 및 오염, 굴절, 꼬임여부와 같은 상태 등을 확인하고 준비하였다.

2) 월별 근접치료의 정도관리

① 선원위치 정확도

선원의 이동거리 및 위치 정확도를 평가하기 위하여 저감도 X-ray 필름을 이용한 film dosimetry상에서 프로그램된 각 channel과 position에서 선원의 중심과 중심사이의 거리를 자(ruler)로 측정된 시각적인 방법으로 검사한 결과 $\pm 1\text{mm}$ 이하로 나타났다(Fig. 6).

Source step viewer(length tester)와 본 장비의 프로그램상의 function test를 이용한 catheter와 선원위치 확인에서는 선원이 진행한 총 길이는 200~201 cm 이내이며, 모의선원은 200~203cm 이내에 들어가 그 길이의 오차는 $\pm 5\text{mm}$ 이하임을 확인했다. 만일 그 오차가 $\pm 5\text{mm}$ 를 벗어나면 interlock이 발생하여 교정을 해야 한다.

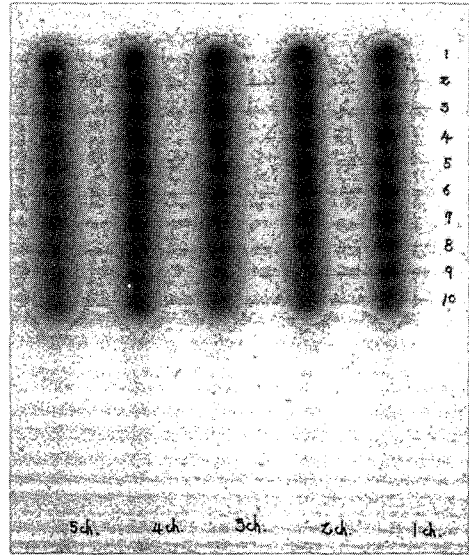


Fig. 6. Film dosimetry image using source dwell position check device.

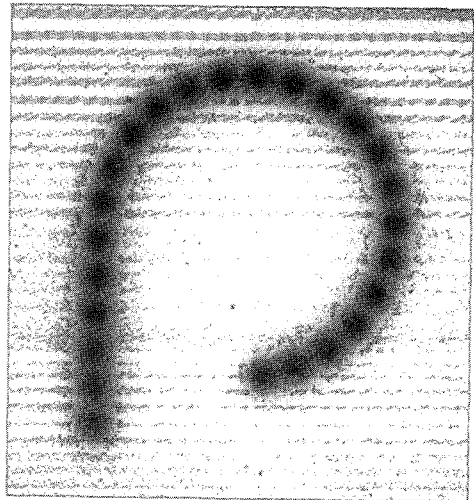


Fig. 7. Film dosimetry image using source curvature check device.

곡률 tester와 관내치료에 이용되는 fine tube(catheter)를 이용한 선원곡률 및 곡률 interlock 확인에서 선원이 일정한 각도를 유지하며 진행되는 원호의 직경은 그 범위가 $\phi = 8\text{cm}$ 으로 나타났다(Fig. 7).

이동속도의 직선성과 항상성을 유지해야 하는

선원이동속도 정확도 검사는 stopwatch를 이용하여 선원이 indexer로부터 프로그램된 applicator의 첫 번째 위치까지 오는 거리가 130cm이고, 선원이 그 위치까지 도달하는데 걸리는 시간이 5초가 걸렸기 때문에 선원의 이동속도는 130cm/5sec, 즉 26cm/sec의 속도로 나타났다.

② 선원선량 정확도

AM-6 프로그램 및 polystyrene phantom을 이용하여 측정된 정상조직(방광, 직장)에 대한 기준점의 선량확인에서 측정점으로부터 선원까지의 거리가 8cm로 지정된 조건에서는 공기커마울 값 11.7Ci가 47.79 mGym²/h로 주어졌을 때 10Ci로 환산하여 계산하면 1분간 8cm 지점에서는 거리역자승법칙을 적용하여 10.62 cGycm²/min이 되어야 한다. 이때 bladder probe의 검출기와 rectum probe의 3번 검출기가 선원으로부터 8cm 지점이기 때문에 10.62 cGycm²/min이 검출되어야 하고, rectum probe의 1번·5번은 9.24 cGycm²/min이 되어야 하며, 2번·4번은 10.32 cGycm²/min이 검출되어야 한다.

본 실험에서는 각각 1분간 3회 측정하여 평균을 구한 값으로 bladder probe에서는 10.6 cGycm²/min으로 0.2%의 오차를 나타냈고, rectum probe의 1번 검출기에서는 9.1 cGycm²/min으로 1.5%, 2번은 10.2 cGycm²/min으로 1.2%, 3번은 10.7 cGycm²/min으로 0.8%, 4번은 10.4 cGycm²/min으로 0.8%, 5번은 9.2 cGycm²/min으로 0.4%

Table 3. Data of calculated dose & absorbed dose. (unit : cGycm²/min)

probe No.	선원과의 거리	계산값	측정값	오차
0 (bladder)	8cm	10.62	10.6	0.2%
1 (rectum)	8.54cm	9.24	9.1	1.5%
2	8.14cm	10.32	10.2	1.2%
3	8cm	10.62	10.7	0.8%
4	8.14cm	10.32	10.4	0.8%
5	8.54cm	9.24	9.2	0.4%

등의 오차를 나타내어 모두 허용오차인 ±3% 이내에 들어감을 확인했다(Table 3).

AM-6 프로그램의 dosimetry에 의한 기준점의 선량확인에 사용된 각 probe의 교정 factor는 측정시마다 나타난 측정값을 미리 입력된 교정 factor값과 비교하여 확인한 결과 위에 나타난 측정값들을 기준으로 하였을 때 rectum probe의 1.5% 오차를 발생한 1번 검출기만이 2.1%의 calibration factor 오차를 나타내었고, 다른 검출기에서는 모두 ±2% 이하의 오차를 나타냈다.

PTW ion chamber를 이용한 선원의 kerma strength 측정은 지정된 공기커마울 값 11.7Ci가 47.79 mGym²/h로 주어졌을 때 10Ci로 환산하여 계산된 측정값과 직접 전리조와 phantom을 이용하여 측정된 값들을 비교하였다. 이때 선원으로부터 8cm 거리에서 5분간 3회 측정된 electrometer에서 읽은 평균값은 0.535 Gy 였으며, 이 reading값은 측정선량값의 유도식에 이용된다. 여기에서 구하고자 하는 선량값은 다음의 공식에 의해 계산된다.

$$D_w = N_w \times R \times K$$

$$N_w = 1$$

$$R = 0.535 \text{ Gy}$$

$$K = 1.05$$

$$\therefore D_w = 1 \times 0.535 \times 1.05 = 0.56 \text{ Gy}/5 \text{ min} \\ = 11.2 \text{ cGy}/\text{min}$$

여기에서 D_w 는 측정점에서의 흡수선량율(cGy/h), N_w 는 물의 교정계수(calibration factor), R 은 전리조 reading값, K 는 보정계수(correction factor)로써 $K = K_P/K_m$ 이다(K_P =primary calibration factor, K_m =measurement calibration factor).

위의 측정결과 프로그램된 계산식은 11.4 cGy/min 이었으나, 직접 측정된 측정값은 11.2 cGy/min으로 1.4%의 오차를 나타냈으며 허용오차의 ±3% 이내에 들어감을 확인했다.

Stopwatch를 이용한 컴퓨터상의 타이머 정확도 확인은 각 channel별 시간과 총시간을 구별하여 측정된 결과 허용오차의 ±2% 이내에서 측정되었다.

③ 안전장치

실제 치료시 선원이 선원저장고 밖으로 도출되고 또 안전하게 삽입되는지의 여부를 확인하기 위한 공간 dosimeter는 조정실에서 정상적으로 선량검출이 되고 있음을 확인했다. 선원저장고에 대한 누설선량 측정은 survey meter를 이용하여 저장고 표면으로부터 상하좌우 1m에서 측정된 결과 0.2mR/h로 나타나 허용오차 2mR/h 이내에 있었다. 비상시 선원을 직접 철수시켜야 되는 handling을 수동점검과 자동 모터도 정상적으로 작동함을 확인했다.

④ Applicator 점검

Applicator(tandem, ovoid)와 transfer tube (source guide tube), accessory 등의 수량을 정확히 파악하고, 변형·굴절·오염으로 인한 각 상태를 점검하여 사용 가능한 것과 파손된 품목들을 구분하여 보관했다.

⑤ X-ray 장비

Rando phantom을 이용하여 투시하면서 전반적인 영상시스템의 정상적인 작동과 양호한 화질을 확인했으며, 바둑판식 wire 배열판을 이용하여 투시하면서 영상의 왜곡과 일그러짐 정도가 양호함을 확인하였다(Fig. 8). Scaler plate 또한 좌우 대칭 및 배율에 오차가 없었고 대조도와 해상도는 high contrast resolution phantom을 이용하여 측정된 결과 양호한 화질을 확인했다(Fig. 9).

2) 분기별 근접치료의 정도관리

분기별 정도관리에서는 선원의 반감기에 준하여 새로운 선원이 교체되므로 이에 따른 제조업체가 제공한 decay factor에 따른 방사능값을 비교하기 위하여 전리조를 이용한 표준측정치(Kerma)를 측정된 결과 허용오차 범위인 $\pm 3\%$ 이내에서 측정이 되었다. 필름을 이용한 선원위치의 정확도 검사에서는 허용오차 범위인 $\pm 1\text{mm}$ 이내에서 측정되었다. 그리고 엔지니어와 함께 전반적인 장비의 기계적인 작동과 컴퓨터

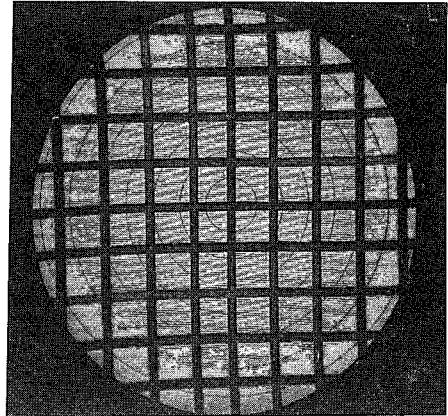


Fig. 8. Fluoroscopy of wire plate of badug-plate type

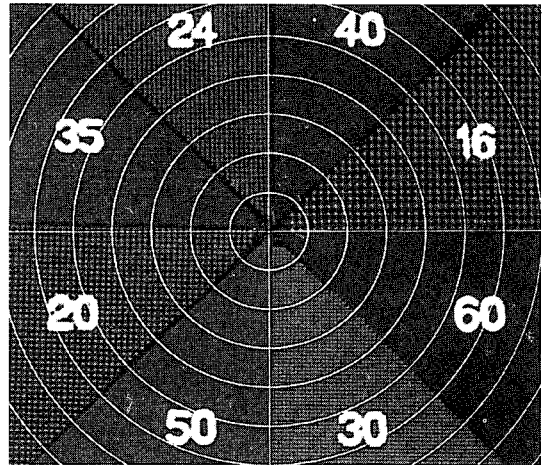


Fig. 9. Fluoroscopy of High contrast resolution phantom.

의 software 등을 확인점검하였다.

IV. 고 찰

근접치료에서 정확한 치료란 선원이 그 의도된 위치에 도출되는지, 정확한 시간동안 머무는지와 방사선 종양학자의 처방을 실현하기 위해 요구되어진 흡수선량이 정확히 도출되는지를 의미한다. 이러한 정확한 치료를 하기 위해서는 선원과 전반적인 치료장비에 대한 정도관리가 요구되며, 그 목표는 각각의 환자에게 제공되는 치료에 있어서 정확성이나 안전성 등이 이미 만

들어진 기준에 부합되도록 제공하는 것이다. 그리고 이들 정도관리의 검사결과는 장래의 참고를 위하여 주의깊게 평가되고 기록되어야 한다.

정도관리 프로그램은 종사자 실책, 잘못된 의사소통, 장비의 작동불량 등의 빈도를 최소화하기 위해 설계된 치료과정에 대한 실행점검, 물리적 측정, 기록수준, 훈련과 경험수준, 지침 등으로 구성되어 있다. 그리고 이 프로그램은 applicator 삽입과정, 치료설계 및 평가과정, 치료도출 과정과 같은 세 가지 기본적인 과정을 통해서 정도관리 검사가 시행되었다. 선원 및 장비의 상태와 기능을 평가하고 검증하는 허용검사는 복잡한 시스템에 대한 검사에 대하여 작동특성과 오인된 검사방법을 올바르게 알게되는 기회가 되기도 한다.

모든 근접치료 장비의 정기적인 정도관리에 대해서 미국의학물리학회(AAPM)에서는 일별, 분기별, 년별의 세 가지 빈도로 정기적인 검사를 권고하고 있으나, 본원에서는 본원에 설치된 근접치료와 관련된 장비와 실질적인 상황에 알맞게 도안된 주기적인(주별, 월별, 분기별) 정도관리 프로그램을 작성하여 시행하고 있다.

주별 정도관리는 치료시스템에 대한 실패의 경향이 있는 정도관리 목표를 평가하기 위하여 종합적으로 설계되어야 한다. 이 검사들을 실행하기 위한 가장 유용하고 중요한 검사들은 전반적인 시스템 기능의 검사들과 비상시 안전장비의 이용가능성 검사들이며, 방사선사가 직접 점검토록 하였다. 월별 검사항목은 크게 선원위치 확인, 선원선량 확인, 안전장치 확인, applicator 점검, X-ray 장비점검으로 나누어 시행하며, 주로 자세한 허용검사를 위주로 점검하므로 방사선사와 물리사가 같이 검사토록 하였다. 핵통제위원회(NRC)에서도 월별 검사항목으로 본원에서 실시하는 항목들과 유사한 검사들을 권고하였다. 분기별 검사는 선원의 반감기에 준하여 선원교체가 되는 시기이므로 선원교체 및 확인과 특별한 작동특성의 측정에 주안점을 두었고, 방사선사와 물리사 및 엔지니어가 함께 검사토록 하였다.

환자와 종사자의 안전을 위한 안전장치 점검

에서 모든 afterloader는 오류와 작동불량 검출 시스템(interlock system)을 갖추고 있어서 target error 상태가 발생했을 때 경종이 울리며 선원이 선원저장고 안으로 삽입될 수 있도록 설계되어 있다. 정확한 누설선량 측정을 위한 survey meter는 정기적으로 교정을 받아야 하며, 치료시 실제로 선원이 방출되고 철수되는지의 여부는 공간 dosimeter를 이용하여 확인하고 있다.

선원위치 정확도를 확인하기 위한 검사방법에는 autoradiograph 방법, double exposure radiograph 방법, 폐쇄회로 TV camera 방법 등이 있다. 선원의 autoradiograph 방법은 active length 뿐만 아니라 방사능의 분포도 알 수 있으며, 선량분포상의 선원 균일성(uniformity)과 대칭성(symmetry)을 점검할 수도 있다. 이들 중 대부분은 필름을 이용한 영상의 시각적인 검사에 의존하고 있다. 본원의 검사방법도 필름상에 나타난 영상에 자(ruler)를 이용한 시각적인 방법을 이용하였다. 이 검사의 허용오차에 관하여 AAPM과 NRC에서는 $\pm 1\text{mm}$ 기준을 권고하고 있으며, 본 실험의 측정결과도 그 허용오차 범위에 들었다.

Source step viewer를 이용한 선원과 모의선원의 진행한 총 길이 점검에서는 허용오차인 $\pm 5\text{mm}$ 를 벗어나면 interlock이 발생하여 자동으로 철수되도록 되어있다. 관내치료시 catheter의 곡률반경을 미리 측정함은 환자의 치료방법을 선택할 수 있는 기회와 치료의 효율성을 높이는 데 도움이 된다. 선원의 이동속도에 대한 항상성은 선원의 거주시간에도 중대한 영향을 미치므로 stopwatch를 이용한 검사가 필요하다.

선원선량 확인시 기준점의 선량확인용 diode를 이용한 in vivo dosimetry에 의해서 평가되었고, phantom을 이용한 기준점에서 계산된 선량과 측정된 선량사이의 일치는 표적용적에 도출된 선량이 예상된 선량이라는 가정하에 측정되었다. 실제로 환자의 기준점이 되는 곳에 diode를 삽입하여 측정한 결과는, 앞서 측정된 기준점에서의 선량오차가 $\pm 1.5\%$ 이내로 허용오차 범위였으나 필름상에서 계산된 선량값과는

실제 측정된 diode의 검출기와 선원과의 거리는 필름상의 같은 조건의 거리를 유지할 수 없으므로 더 큰 오차범위를 보인 것으로 생각된다.

선원의 강도는 선원과 정확한 기하학적 관계에서 교정된 전리조를 이용한 측정을 하여 결정될 수 있다. 그 전리조의 교정은 필수적으로 두 가지 단계의 과정을 거치게 된다. 기준교정계수(reference calibration factor)를 결정하기 위한 standard set-up에서의 교정과 측정이 다양한 실험상의 조건하에서 시행될 때의 차이에 대한 설명을 위한 보정계수(correction factor)의 연속된 설정이다.

선원의 방사능을 평가하기 위한 방법으로 전리조를 이용하여 공기중에서 측정하고 선원에서 측정점까지의 거리는 10cm가 적당하다는 보고도 있으나, 본 실험에서는 실제 환자를 치료할 때와 같은 조건을 유지시키기 위한 조직내 선량을 측정하기 위해 phantom을 이용하여 선원과 측정점까지의 거리가 8cm로 결정된 흡수 선원과 전리조를 삽입하여 측정하였기 때문에 측정 거리에 의한 측정값의 오차는 거의 없을 것으로 생각되며, 단지 전리조의 에너지 의존성에 의한 오차만 있을 것으로 사료된다.

선원의 방사능 평가에서 최동락 등의 연구와 DeWerd 등이 well type chamber를 이용한 측정에서도 본 실험에서와 유사한 오차를 보여 허용오차 범위내에서 측정값을 나타냈다. 이와 관련하여 AAPM에서는 공기커마강도와 관련된 선원선량정확도가 $\pm 3\%$ 를 합리적인 허용오차로 보고있다.

이 측정에서 측정 기준값은 IAEA와 AAPM에서 권고하는 방법과 각각의 측정기 구조에 따라서 약간의 차이를 낼 수 있다. 본 실험에서는 선원의 방사능을 측정하기 위해 Farmer type ion chamber를 사용한 반면, Li 등과 DeWerd 등의 연구에서는 well type ion chamber를 이용하였으며, 이 전리함은 특별히 도안된 QA용 삽입구를 이용하여 비교적 짧은 시간내에 선원위치 확인, 타이머 항상성의 검사와 선원 방사능의 일치성 측정 등에 이용되었다.

총 치료시간의 점검은 선량처방, 처방깊이, 선원 방사능, 치료길이, 치료계획 software에 이용된 물리적 변수에 부주의한 수정 등에 포함된 잠재적인 오류를 내포할 수 있는 치료계획 software에 의해 결정된 치료시간이 큰 오차를 나타낼 수 있으므로 중요하다. 치료시간의 오차는 선원거주시간과 이동시간의 배합에 있어서 변화로써 나타날 수 있다. 그래서 치료시간 오차는 컴퓨터상에 지시된 시간(sec)과 실제시간(sec) 사이의 관계, 타이머 직선성의 실패, 시간에 일정한 offset의 도입, 실제적인 이동시간의 변화, 비정상적인 선원봉고 등의 변화 때문일 수 있다. AAPM에서는 타이머 정확도 기준을 $\pm 2\%$ 로 보고 있으며, DeWerd 등과 Rogus 등이 측정한 오차는 본 실험에서 측정한 결과와 유사한 차이인 2% 이하로 나타났다.

분기별 정도관리에 대해서 AAPM에서는 장비작동의 전반적인 분별을 얻기 위해서 물리학자가 부수적인 분기별 검사와 함께 모든 주별검사를 시행하도록 권고하고 있으며, 이와 관련하여 선원교체 후 엔지니어도 함께 장비작동의 특성 측정에 참여하여 유지보수에 서로 노력해야 한다고 본다.

V. 결 론

본원에서 개발한 정기적인 정도관리를 위한 프로그램 protocol은 본원에 구비된 치료장비와 측정장비에 알맞게 주기적인 프로그램을 작성하고 측정실험을 실시하여 환자에게 정확한 선량도출을 부여함과 동시에 방사성 선원과 치료도출에 관련된 장치시스템의 작동특성 및 검사방법 등을 올바르게 인식하고 사용하게 되는 기회를 마련하였으며, 치료도출상의 실책을 최소화하여 효과적인 치료를 할 수 있도록 도움을 주었다. 따라서 고선량을 근접치료의 정도관리에서 기술한 검사항목들은 환자치료의 성패를 좌우하는 인자들이므로 지속적인 정도관리가 요구된다.

그리고 근접치료의 치료계획과 도출과정에는

의사물리학자방사선사간호사 등의 모든 관련된 종사자들의 협력을 통한 복잡한 치료과정임으로, 상호간의 정확한 의사소통과 각자의 역할에 알맞은 직무를 올바르게 수행하여야 한다.

참 고 문 헌

1. Alecu R, Feldmeier JJ, Court WS, et al. : A method to avoid misadministrations in high dose rate brachytherapy, Med. Phys. 1997 ; 24 : 259-261
2. Bastin KT, Podgorsak MB, Thomadsen BR : The transit dose component of high dose rate brachytherapy : direct measurements and clinical implications, Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 1993 ; 26 : 695-702
3. DeWerd LA, Jursinic P, Kitchen R, et al. : Quality assurance tool for high dose rate brachytherapy, Med. Phys. 1995 ; 22 : 435-440
4. Houdek PV, Schwade JG, Wu X, et al. : Dose determination in high dose rate brachytherapy, Int. J. Radiat. Oncol. Biol.

- Phys. 1992 ; 24 : 795-801
5. Li Z, Mitchell TP, Palta JR, et al. : A quality assurance test tool for high dose rate remote afterloading brachytherapy units, Med. Phys. 1998 ; 25 : 232-235
6. Nath R, Anderson LL, Meli JA, et al. : Code of practice for brachytherapy physics : Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No.56, Med. Phys. 1997 ; 24 : 1557-1598
7. Rogus RD, Smith MJ, Kubo HD : An equation to QA check the total treatment time for single-catheter HDR brachytherapy, Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 1998 ; 40 : 245-248
8. 최동락, 허승재, 안용찬 등 : 고선량을 근접 치료시 사용되는 Ir-192 선원의 방사능 평가, 한국의학물리학회지 1997 ; 8 : 25-29
9. Ezzell GA : Acceptance testing and quality assurance for high dose rate remote afterloading systems, Activity. 1991 ; 5 : 2-6
10. Khan FM : The physics of radiation therapy, 2nd, Williams & Wilkins, 1994 : 527-534