



## 의료용 Ir-192 강내 조사선원 개발

한현수, 조영갑, 조운갑, 박을재 / 최태진

한국원자력연구소 하나로이용연구단 /  
계명대학교 의과대학 치료방사선과

### 서 론

방사성동위원소를 질병의 진단 및 치료에 이용하는 것은 방사성물질이 발견된 이후 꾸준히 증가되어 왔으며, 최근에는 원자료를 이용하여 제조된 고비방사능(high specific activity) 방사선원을 이용하여 종양을 치료하는 방사선치료가 활발하게 이루어지고 있다. 방사선원을 이용한 종양치료는 체외조사 및 강내조사로 구분된다. 강내조사는 체강내를 통하여 종양에 방사선원을 근접 삽입시켜 치료하는 방법으로 종양주위 정상조직의 손상을 최소화 하면서 종양부위에 다량의 방사선을 조사할 수 있어 종양치료의 성적을 향상시킬 수 있는 중요한 치료법이다<sup>(1-3)</sup>. 이러한 강내조사에는 수십 mg의 방사성 Ra-226 이나 Cs-137 선원을 이용한 저선량률 조사와 비방사능이 높은 수 Ci 이상의 Co-60 또는 Ir-192 밀봉선원을 이용한 고선량률 조사가 이용되고 있다<sup>(4)</sup>.

고선량률 조사는 시간당 약 50 cGy 를 조사하는 저선량률 선원에 비해 분당 약 50~200

cGy 를 조사하는 높은 선량률의 방사선원이 이용되며, 원격조사장치를 이용하므로 시술자의 방사선피폭이 거의 없다<sup>(5)</sup>. 또한 고선량률에 의한 원격강내조사선원은 환부가 큰 강내조사에 사용되는 직경이 수 mm 인 선원과 식도 및 폐기관지 조사에 이용되는 직경이 약 1 mm 인 선원이 이용되고 있으며, 점차적으로 시술적용 범위가 넓어져 국내에서는 수작업에 의한 저선량률 강내조사 시술에서 점차적으로 고선량률 원격강내조사에 의한 시술로 옮겨가는 추세이다<sup>(6)</sup>.

국내의 강내조사시설 현황은 43개소 정도가 설치되어 운용중이며 이중 원격강내조사장치는 27대가 설치되어 사용중이다. 원격강내조사장치 27대의 사용선원은 Co-60 선원이 8대, Ir-192 선원이 19대이며 Co-60선원 사용장치 8대중 7대는 Cs-137 선원을 동시에 사용할 수 있는 3채널방식이다. Co-60선원을 사용하는 장비는 대부분 도입 된지 10년이 경과하여 2만 감기 이상이 지난 선원을 사용하고 있어 선원 교체가 시급히 요구되고 있으나 수년 전부터

상업용 Co-60 선원의 생산공급 부진으로 선원을 교체하지 못하여 치료시간이 초기 도입시보다 약 4~5 배나 길어져 이용효율을 떨어뜨리는 원인이 되고 있다.

본 연구에서는 방사능이 극도로 감약된 원격 강내조사용 Co-60 선원을 대체하기 위해 하나로를 이용하여 고비방사능의 Ir-192 원격 강내조사선원을 개발하고 그 방사선량특성을 분석하였다. Ir-192는 치료용으로 사용하기에 적합한 74.2일의 반감기와 평균 400 keV 정도의 비교적 낮은 감마선 에너지, 높은 비방사능 등의 특성으로 인해 치료효과가 좋기 때문에 소형선원으로 높은 선량을 방출할 수 있는 근접치료용 동위원소로서 널리 이용되고 있다.<sup>(7)</sup> 사용중인 Co-60 선원을 Ir-192 선원으로 대체할 원격조사장치는 원격강내조사시설을 갖춘 국내 병원의 1/3 에 해당하는 기관에서 이용하고 있는 조사장치(Buchler 3K unit, Germany)를 선정하였으며 이장치는 모두 동일한 규격의 Co-60 선원을 사용하고 있다. 개발된 Ir-192 원격 강내조사선원으로 기존의 Co-60선원을 대체하면 치료시간을 크게 줄여 환자의 고통을 감소시킬 수 있으며 원격강내조사장치의 이용효율도 향상시킬 수 있을 것으로 전망된다.

Ir-192 원격강내조사선원을 개발하기 위하여 원자로에서 조사시킬 이리듐(iridium)표적의 형태를 선정하고 중성자 조사특성을 평가하였다. 이리듐표적을 원자로에서 중성자조사 시키기 위한 조사표적을 개발하고 조사실험을 수행하였다. 조사된 이리듐표적의 방사능을 평가하고 이를 조립하여 원격강내조사장치(Buchler 3K unit, Germany)에 장착되어 사용될 강내조사용선원을 제조하였다. 이때 이리듐표적을 내장하는 선원캡슐은 최종 방사선원의 선량등방성을 고려하여 설계하였으며 Ir-

192 강내조사선원의 외형크기 및 형태는 Co-60선원과 동일하게 제조하였다. 제조된 최종 선원에 대하여 방사능측정, 오염검사, 밀봉성능검사 등의 품질시험을 수행하였으며, 공기중 조사선량률, 선량등방성 등을 평가하여 Co-60 선원의 선량분포와 비교하고 공급이 원활치 못한 Co-60 선원의 대체용으로 사용할 수 있는지를 검토하였다.

## 이 론

### 1. 원자로에서의 Ir-192 생성반응 및 생성수율

강내조사용선원 제조에 이용하고자 하는 Ir-192는 원자로에서 천연 이리듐(iridium)을 (n,γ)반응시켜 만든다. 천연 이리듐금속은 37.3 %의 Ir-191과 62.7 %의 Ir-193으로 구성되어 있다. Ir-191(n,γ)Ir-192 반응에 대한 열중성자 포획단면적은 Ir-192m 생성반응의 400 barn과 Ir-192가 직접생기는 반응의 540 barn을 합하여 약 940 barn 정도이다. Ir-191(n,γ)Ir-192 반응에 의해 생성된 Ir-192도 다시 1000 barn 정도의 높은 단면적을 가지고 열중성자를 흡수하여 Ir-193을 생성한다<sup>(8)</sup>(Fig 1). Ir-192는 95.3 % 정도가 74.2일의 반감기를 가지고 β 붕괴를 통하여 안정동위원소인 Pt-192로 되고 4.7 % 정도의 Ir-192는 전자포획을 통하여 안정동위원소인 Os-192로 된다. 이때 0.672 MeV(46 %)의 최대에너지를 갖는 β 선과 0.604, 0.468, 0.308 MeV의 에너지를 갖는 γ 선을 방출한다(Fig 2).

천연 이리듐은 또한 62.7%의 Ir-193을 포함하고 있으므로 약 110barn의 중성자 흡수단면적을 가지고 Ir-193(n,γ)Ir-194 반응에 의해 Ir-194(반감기 19.2시간)을 생성한다. Ir-194

는 안정상태로 되기 위하여 1.92, 2.25 MeV 등의 매우 높은 에너지를 갖는  $\beta$ -선을 방출하면서 붕괴하기 때문에 취급과 차폐에 많은 주의가 요구되는 핵종이다. Ir-192와 Ir-194의 포화방사능 생성비는 1 : 0.21 정도이며 Ir-192 방사선원을 제조하기 위해서는 Ir-192와 동시

에 생성되는 Ir-194의 방사능을 제거하기 위해 일주일 이상 냉각시키는 것이 필요하다.

원자로내에서 Ir-191의 중성자 방사화에 의해 생성되는 Ir-192의 비방사능은 다음 식으로 주어진다<sup>(9)</sup>.

$$S_0 = \frac{N\sigma\phi}{3.7 \times 10^{10} (1 + (\sigma' - \sigma)\phi / \lambda)} (e^{-\sigma\phi t} - e^{-(\lambda + \sigma\phi)t}) \quad (1)$$

- 여기에서
- $S_0$  : Ir-192의 비방사능(Ci/g)
  - $N$  : g당 표적핵의 수
  - $\sigma$  : Ir-191의 열중성자 포획단면적( 940 barns)
  - $\sigma'$  : Ir-192의 열중성자 포획단면적(1000 barns)
  - $\phi$  : 열중성자속 밀도 ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
  - $t$  : 조사시간(sec)
  - $\lambda$  : Ir-192의 붕괴상수 이다.

식 (1)을 사용해서 구한 중성자속과 조사시간에 따른 Ir-192 생성 비방사능을 Fig 3. 에 나타내었다.

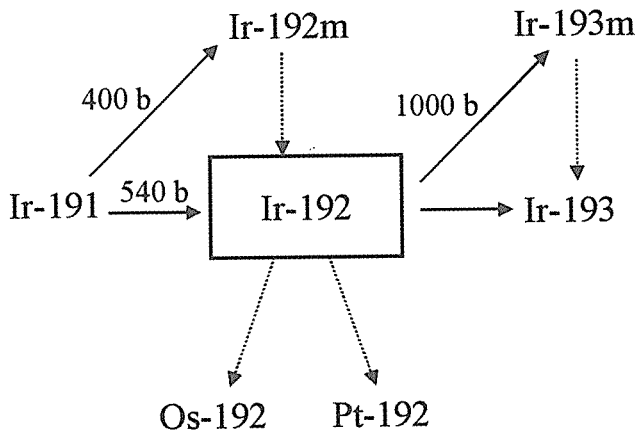


Fig 1. Production process of Ir-192 in nuclear reactor

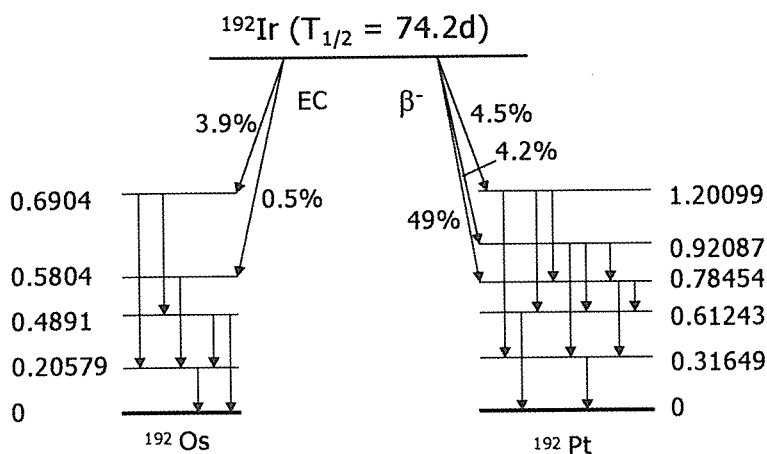


Fig 2. Decay schema of Ir-192

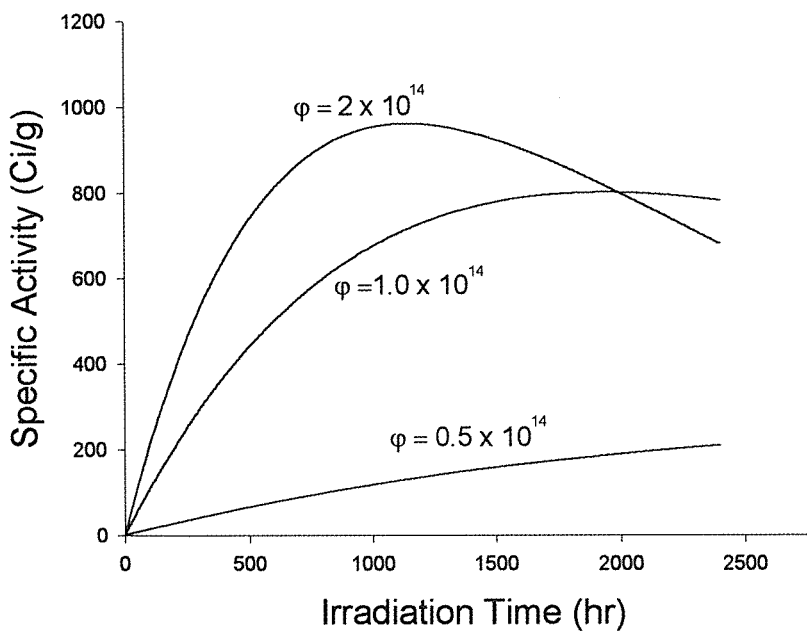


Fig 3. Specific activity of Ir-192 produced as a function of the irradiation time for various values of the thermal neutron fluxes

$$h = \frac{1}{2\epsilon} [1 - \exp(-2\epsilon)] \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{2N\sigma V}{S} \quad (3)$$

여기에서 h : 중성자 자기차폐인자  
 N : 원자밀도(원자수/cm<sup>3</sup>)  
 σ : 흡수단면적(barn)  
 V : 표적부피(cm<sup>3</sup>)  
 S : 표적의 표면적(cm<sup>2</sup>)

## 2. 이리듐의 중성자 자기차폐효과

방사성동위원소의 생성수율은 방사화 단면적의 크기에 비례하는 중성자 자기차폐효과(neutron self-shielding effect)에 의해서 실제 표적의 방사화에서는 계산값 보다 다소 줄어들게 된다<sup>(10-12)</sup>. 이리듐 표적은 열중성자 방사화단면적이 매우 높기 때문에 원자로에서 중성자 조사시킬 때 중성자 자기차폐효과가 매우 크다. 즉 중성자속 중에 이리듐 표적이 놓일 때 그 표면에서는 방사화가 잘 일어나서 생성 비방사능이 높고 표적의 내부에서는 상대적으로 방사화가 덜 일어나서 비방사능이 표면에 비해 낮아지게 된다. 따라서 생성방사능의 표적 내 분포가 일정하지 않고 또 그 분포를 정확하게 알기가 매우 어렵다. 이러한 환경에서 Ir-192의 정확한 생성수율을 얻기 위해서는 식(1)에 의해 구해진 생성수율은 중성자 자기차폐효과를 고려하여 보정 되어야 한다. 이러한 중성자 자기차폐효과로 인한 영향은 표적의 모양과 체적에 따라 크게 달라진다. 임의의 형상을 갖는 표적에 대하여 중성자 자기차폐가 없을 때의 값을 1 로하면 중성자 자기차폐인자 h

는 Nisle이 제안한 다음의 간단한 식에 의해 근사적으로 구할 수 있다<sup>(13)</sup>.

높은 중성자속의 원자로에서는 직경과 두께가 각각 1 mm × 1 mm, 2 mm × 2 mm, 3 mm × 3 mm 등의 원주형 표적을 직접 중성자 조사해서도 충분히 높은 비방사능(specific activity)을 얻을 수 있지만 낮은 중성자속의 원자로에서는 직접 원주형 표적을 사용하여 높은 비방사능의 선원을 얻기가 어렵다. 표적의 중성자 자기차폐효과를 줄이고 비방사능과 최대 방사능을 높이는 방법이 연구되었는데 원판형 이리듐표적을 사용하면 이러한 문제점을 많이 해결할 수 있음이 알려져 있다.<sup>(14-16)</sup>

## 3. 이리듐의 γ선 자기흡수효과

Ir-192로부터 방출되는 γ선의 평균에너지는 400keV 정도로 비교적 낮은 반면에 이리듐의 밀도는 22.5g/cm<sup>3</sup> 로 비교적 높기 때문에 Ir-192 표적에서 방출되는 γ선의 일부는 표적 자체에서 일부 흡수되고 나머지만 외부로 방출되는 γ선 자기흡수효과(γ-ray self-absorp-

tion effect)가 나타난다. Ir-192 방사선원의 실제적인 사용시의 방출 방사능 값을 구하기 위해서는 이  $\gamma$ 선 자기흡수효과를 고려해야만 한다.<sup>(17)</sup>

$$\text{즉 방출방사능(Ci)} = \text{표적의 방사능(Ci)} \times \gamma\text{선 자기흡수인자} \quad (4)$$

로 주어진다. 간편한 고려를 위하여 평판형의 선원에 대하여 선원내 방사능이 균일하게 분포한다고 가정했을 때  $\gamma$ 선 자기흡수가 없을 때의 값을 1로 하면  $\gamma$ 선 자기흡수인자는 다음 식으로 주어진다.

$$f = \frac{(1 - e^{-\mu x})}{\mu x} \quad (5)$$

여기에서  $\mu$ 는 Ir-192에서 방출되는  $\gamma$ 선의 물질내 유효흡수계수( $\text{cm}^{-1}$ )로서 Ir-192의  $\gamma$ 선에너지를 고려하여 계산에 의해 구한 값으로 이리듐매질일 경우 약  $3.995 \text{ cm}^{-1}$  정도이며  $x$ 는 물질의 두께이다.

#### 4. Ir-192 $\gamma$ 선에 의한 조사선량

선원캡슐에 밀봉된 Ir-192 강내조사선원은 선원의 자체흡수와 캡슐벽흡수에 의한 차폐효과에 따라 선량률에 영향을 끼치게 되므로 흡수벽을 통과한 출력선량을 평가하기 위해

$$D(R) = \frac{\Gamma \cdot A \cdot \tau}{R^2} \cdot K \cdot e^{-(\mu_r T_r + \mu_s T_s)} \quad (6)$$

서는 이러한 선원자체 및 캡슐벽에 의한 흡수효과를 고려하여야 한다. 흡수벽을 통과한 Ir-192 강내조사선원의 출력선량은 다음 식

으로 주어진다.

여기에서  $\Gamma$ 는 단위면적을 지나는 입자에 의한 조사선량률상수( $4.69 \text{ R-cm}^2/\text{mCi-hr}$ <sup>(18)</sup>)이며  $A$ 는 선원의 방사능,  $\tau$ 는 조사시간,  $R$ 은 선원과 측정점 간의 거리이다.  $\mu_r$ 과  $\mu_s$ 는 각각 이리듐과 철에 대한 유효흡수계수이며, 각각  $3.995 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.758 \text{ cm}^{-1}$ 의 값을 갖는다.  $T_r$ ,  $T_s$ 는 선원의 자기두께와 벽재질의 두께이며  $K$ 는 산란선 보정항이다.

### 실험 및 논의

#### 1. 중성자 조사표적 제작

##### 가. 이리듐 표적준비

하나로를 이용한 Ir-192 강내조사선원 생산을 위한 표적물질로는 99% 이상의 순도를 가진 직경 2.5mm  $\times$  두께 0.25mm의 원판형 천연 이리듐 금속을 선정하였다. 이는 얇은 표적을 사용하면 표적의 중성자 자기차폐효과와  $\gamma$ 선 자기흡수효과를 최소화 할 수 있으며 비방사능과 최대방사능을 높일 수 있기 때문이다. 선정된 원판형 이리듐 표적은 외국의 제조회사(Engelhard, U.S.A)에 주문하여 구입하였으며 구입된 표적은 규격을 측정하여 직경 0.05mm, 두께 0.01mm 오차 이내, 무게는 27.6mg에서  $\pm 1$ mg 이내의 것만 선별하여 사용하였다. 이는 Ir-192 생성반응에 대한 중성자 방사화단면적이 매우 크기 때문에 표적물질량의 차이가 생성방사능에 큰 영향을 줄 수 있기 때문이다.

##### 나. 표적지지대 및 조사용기 제작

표적지지대는 이리듐 표적의 중성자 자기차폐효과를 최소화 할 수 있도록 각각의 원판형

이리듬 표적을 효과적으로 분산, 조사시키기 위한 지지체로서 조사용기안에 장전한다. 각 표적지지대는 알루미늄(Al-1050) 재질을 사용하여 이리듬 표적과 알루미늄 스페이서(spacer)를 번갈아 끼워서 중성자 자기차폐효과를 줄이고 조사용기에의 장전, 분리 및 조사 후 취급하기 편리하도록 제작하였으며 1개의 표적지지대는 6개의 원판형 이리듬 표적을 장전할 수 있다.

하나로에서 사용되는 조사용기는 표적을 조사하는 동안 냉각수와 직접 접촉하기 때문에 조사중의 안전성 유지, 하나로 냉각수의 방사성오염방지 및 표적물질의 침수방지를 위하여 특별하게 고안된 이중밀봉 조사용기를 필요로 한다. 이리듬 표적을 중성자 조사시킬 하나로의 HTS 조사공에 사용될 조사용기는 내부용기와 외부용기로 구성되어 있으며 재료는 알루미늄(Al-1050)을 사용하여 제작한다. 먼저 내부용기에 원판형 이리듬 표적을 내장한 표적지지대를 넣고 압접밀봉(cold welding)한 후 밀봉된 내부용기는 다시 외부용기에 넣고 He 분위기에서 TIG(Tungsten Inert Gas)용접하여 밀봉한다<sup>(19)</sup>.

HTS용 조사용기는 2개의 표적지지대를 한번에 장전할 수 있으며 따라서 표적의 총량은 표적지지대당 6개씩 총 12개의 원판형 이리듬 표적을 한꺼번에 조사시킬 수 있다. 이리듬 표적의 무게로 보면 331.2 mg에 해당하는 양이다.

#### 다. 조사표적조립

원판형 이리듬 표적은 평판에 올려놓고 비금속성 망치로 두드려 평탄하게 한 후 초음파 세척기에서 증류수로 불순물과 부스러기를 제거하여 건조시킨다. 알루미늄 스페이서(spacer)도 규격을 측정하여 세척한다. 이렇게 준비된

이리듬 표적과 알루미늄 스페이서를 표적지지대에 교대로 장전한 후 알루미늄박으로 포장한다. 이 지지대를 HTS용 내부용기에 넣고 유압프레스를 사용하여  $500 \text{ kg/cm}^2$ 의 압력을 가해 압접밀봉한 후 기포누설시험을 실시한다. 기포누설시험은 에틸렌글리콜 용액이 들어있는 시험용기를 미리 감압시켜 용액자체의 기포를 제거한 다음 내부용기를 용액면 이하로 5cm 이상 잠기도록 넣은 후 시험용기 내부의 절대압력을 15 kPa~25 kPa 까지 감압하여 2분 동안 기포발생여부를 육안으로 관찰한다. 기포발생이 없으면  $10^{-5} \text{ atm.cm}^3/\text{sec}$  이상의 누출구멍이 없는 것으로 판정한다<sup>(20)</sup>. 기포누설시험을 통과한 내부용기는 외부용기에 넣고 He 분위기에서 TIG(Tungsten Inert Gas) 용접하여 밀봉한다. 이렇게 밀봉된 외부조사용기는 검출감도가  $\sim 2 \times 10^{-11} \text{ atm.cm}^3/\text{sec}$ 인 He 누설검사장비(ASM 181T, ALCATEL)로 He 누설여부를 시험하였다. 진공챔버에 밀봉된 외부용기를 넣고 감압하면서 누설되는 He를 질량분석기로 검출하여 누설여부를 측정한다. He 누설이  $1 \times 10^{-8} \text{ atm.cm}^3/\text{sec}$  이하인 경우 밀봉된 것으로 판정하였다. 이와 같이 기포누설시험 및 He 누설시험을 통과한 표적만을 하나로에 장전하여 조사할 수 있다. 조사용기의 밀봉시험결과 기포누설시험에서는 기포가 발생하지 않아  $10^{-5} \text{ atm.cm}^3/\text{sec}$  이상의 누출구멍이 없는 것으로 확인되었으며 He 누설시험에서는  $2 \times 10^{-10} \text{ atm.cm}^3/\text{sec}$ 의 누설율을 보여 허용기준인  $1 \times 10^{-8} \text{ atm.cm}^3/\text{sec}$ 보다 훨씬 낮아서 조사용기의 밀봉 건전성을 확인할 수 있었다. Fig 4.에 표적지지대가 장전되기 전후의 조사용기를 나타내었다.

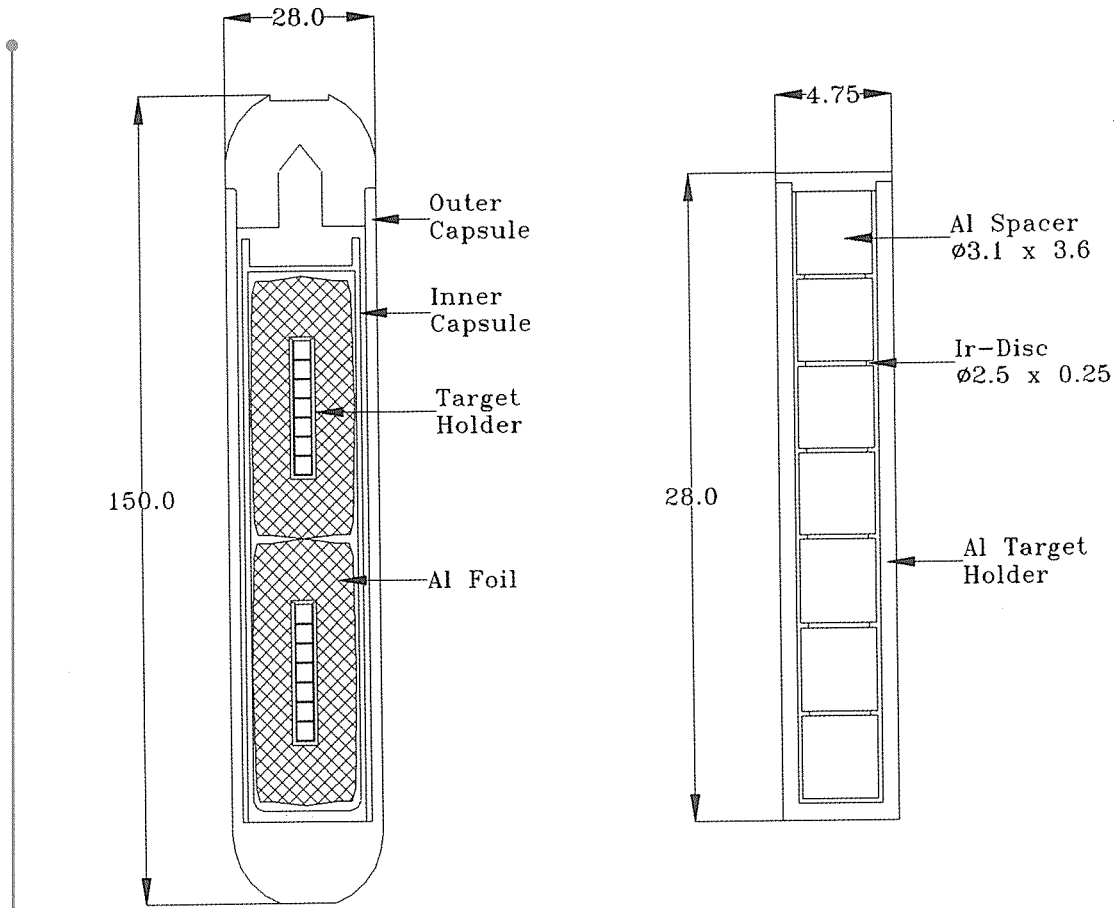


Fig 4. Irradiation capsule for neutron irradiation of iridium targets in HANARO reactor. Two target holders containing 6 iridium discs are loaded into one irradiation capsule.

## 2. 이리듐표적의 중성자 조사 및 방사능측정

### 가. 중성자 조사

일반적으로 사용되는 강내조사용 Ir-192 선원의 방사능은 10~20 Ci 이나 시험용 선원은 1~2 Ci를 생산하기로 하고 하나로 HTS조사공을 이용하여 이리듐 표적을 조사시켰다. 방사성동위원소 제조를 위한 표적물질의 원자로

내 중성자조사는 원자로의 중성자속, 표적물질의 중성자 반응단면적, 목표방사능 등을 고려하여 조사기간을 정한다. 특히 원자로 가동 중에는 표적을 꺼내는데 여러가지 위험이 따르므로 원자로 가동 주기를 고려하여 결정한다. HTS 조사공의 열중성자 속과, 하나로 운전출력 등을 기준으로 (1)식을 사용하여 예상생성 방사능을 계산한 결과에 의하여 조사시간 (irradiation time)을 결정했다. 27.6mg인 원



판형 이리듬 표적을 하나로의 HTS 조사공(열중성자 속은  $3.39 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ , 출력 20 MW)에서 48시간 조사시키면 조사종료시점(EOB : End of Bombardment)에서 표적당 203 mCi 정도의 방사능을 얻을 수 있어서 시험선원을 제조하기 위한 조사시간을 48시간으로 하였다. 실험에 사용된 표적은 1개의 표적 지지대에 6개씩의 이리듬 원판표적을 배열하였고 2개의 표적지지대를 HTS 조사용기에 넣어서 총 12개의 원판형 이리듬 표적을 조사시켰다. Ir-192 방사선원의 방사능은 중성자 조사시의 표적물질에 의한 중성자 자기차폐효과, 중성자 조사후의  $\gamma$ 선 자기흡수효과, 반감기 및 강내조사 선원제조에 필요한 작업기간을 고려하여 사용하는 시점에서 요구되는 방사능보다 충분히 높게 방사화시켜야 한다.

#### 나. 이리듬표적의 방사능 측정

원판형 이리듬 표적(27.6mg)을 하나로 HTS 조사공(열중성자 속은  $3.39 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ , 출력 20MW)에서 48시간동안 중성자 조사시켜 7일 동안 냉각시킨 후 이온전리함(CRC-35R, Capintec)을 사용하여 방사능을 측정하였다. 이리듬 표적을 원자로에서 조사시키면 Ir-192(반감기 74.2일) 외에 Ir-194(반감기 19.4시간)가 생성되지만 7일 정도 냉각시키면 Ir-194의 방사능은 짧은 반감기로 인하여 생성방사능의 0.25%이하로 감소하므로 측정된 방사능은 Ir-192만의 방사능 값으로 볼 수 있다. 시험 조사한 원판형 선원의 평균 방사능 강도는 209.4 mCi 이었으며 개별 방사능 값이 평균 방사능 값으로부터  $\pm 5\%$  이내오차의 방사능 균일도를 갖는 제품의 제조가 가능함을 확인하였다.

### 3. Ir-192 강내조사선원 제조

#### 가. 선원설계 및 구성

본 연구에서 개발한 Ir-192 강내조사선원은 원격강내조사장치(Buchler 3K unit)에 장착되어 사용되는 Co-60 원격 강내조사선원의 대체선원으로서 선원과 선원이송연결고리의 외형적 크기는 Co-60선원과 동일하게 고안, 제작하였다. Ir-192 강내조사선원은 원자로에서 방사화시킨 직경 2.50mm  $\times$  두께 0.25mm 인 원판형 이리듬선원 10장을 쌓아 최종 선원의 크기를 직경 2.5 mm  $\times$  두께 2.5 mm 의 원주형으로 하였다. Ir-192 강내조사선원의 전체적인 구성은 선원캡슐, 선원이송 연결고리, 연결스프링으로 되어 있으며 Fig 5.와 같다.

선원캡슐의 크기는 직경 4.00mm  $\times$  길이 6.05mm 로 설계하였으며 내부에 직경 2.6mm의 홈을 가공하여 원판형 이리듬선원을 내장할 수 있도록 하였다. 선원캡슐의 앞부분은 반구형이며 내부에 반경 1.0mm의 홈을 가공하여 조직선량에 영향을 미치는 선원캡슐의 두께를 용기벽의 어느 방향에서나 동일하게 0.7mm를 유지할 수 있도록 하였다. 이는 Ir-192 강내조사선원에서 방출되는 방사선으로 인한 선량분포가 가능한 한 등방성을 이룰 수 있도록 한 것이다. 선원캡슐의 뒷부분은 캡슐뚜껑을 삽입하고 밀봉 용접되는 구조로 하였으며 캡슐뚜껑이 조립, 용접된 선원캡슐과 선원이송 연결고리 사이는 직경 0.6mm 의 스테인리스 스틸(SUS 304)와이어로 제작한 외경 3.7mm 스프링으로 연결하였는데 선원캡슐뚜껑과 선원이송연결고리의 연결스프링이 삽입되는 부분에 나사산을 가공하여 연결스프링이나사식으로 삽입 연결되어 선원이송 중 풀림을

방지하도록 하였다. Ir-192 강내조사선원은 선원이송연결고리에 가공된 직경 1.4mm의 수고리를 원격강내조사장치의 선원이송장치 암고리에 체결하는 방식으로 원격강내조사장치에 연결된다. 최종 조립하여 연결한 Ir-192 강내

조사선원이 원격강내조사장치의 선원 유도관(내경 5mm)내에서 이송이 원활하고 사용 중 이탈하지 않도록 가공 및 조립정도를 유지하였다. 선원캡슐 및 선원이송연결고리는 SUS 316L로 제작하였고 연결 스프링 부분은 탄성

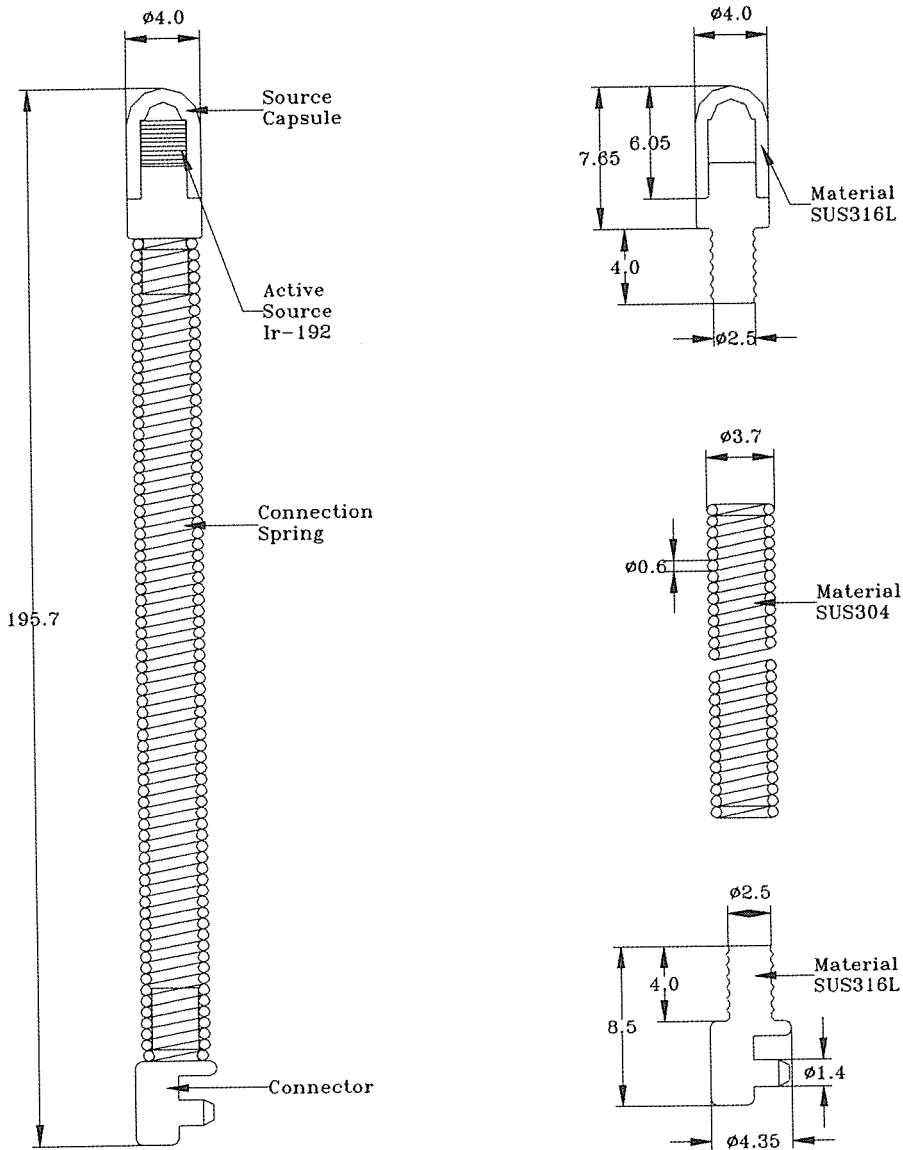


Fig 5. Ir-192 brachytherapy radiation sources

특성이 좋은 SUS 304를 사용하였다.

#### 나. 선원 밀봉용접 및 밀봉검사

선원캡슐을 용접장비에 수평으로 고정하고 중성자 조사된 원판형 이리듐 표적10장을 진공 흡입장치를 이용하여 캡슐에 차례로 장전한다. 이때 점검용 편을 선원캡슐에 삽입하여 원판형 이리듐표적이 바르게 장전되었는지를 확인한다. 선원캡슐에 선원캡슐뚜껑을 조립한 후 용접장비를 회전시켜 선원캡슐이 수직으로 바르게 놓여있는지 확인한다. 선원캡슐에 캡슐뚜껑이 바르게 조립되어 있는 것이 확인되면 TIG 용접으로 선원캡슐을 밀봉, 용접한다.

밀봉용접이 완료된 선원은 먼저 용접부위의 육안검사를 수행하여 용접부위의 용접결함여부를 확인한다. 육안으로 관찰하여 결함이 없으면 밀봉된 선원의 표면오염검사를 위하여 선원의 표면을 에탄올에 적신 시험지(Whatman paper No.10)로 완전히 닦고 그 시험지를 다중 채널분석기(MCA : Multi Channel Analyzer)가 연결된 HPGe(High Purity Germanium) Detector(Oxford)로 방사능을 측정하여 의료용 밀봉방사선원의 방사능누출 허용기준인 200Bq이하인지를 검사하였다. 표면오염검사 결과 Ir-192 선원의 누출 방사능은 31.4Bq 정도로 의료용 밀봉방사선원의 누출 허용기준인 200Bq보다 훨씬 작아서 선원의 안전성을 확인할 수 있었다. 표면 오염검사가 끝난 선원은 기포누설검사를 수행하여 선원 표면에서의 기포 발생여부로 밀봉상태를 확인하였다. 기포누설시험은 에틸렌글리콜 용액이 들어 있는 시험용기를 미리 감압시켜 용액자체의 기포를 제거한 다음 선원을 용액면 이하로 5cm 이상 잠기도록 넣은 후 시험용기 내부의 절대

압력을 15kPa~25kPa 까지 감압하여 1분 동안 기포발생여부를 육안으로 관찰하였다. 시험 제조한 Ir-192 방사선원의 밀봉시험 조건에서는 선원표면에서 기포가 발생되지 않아  $10^{-5}$  atm.cm<sup>3</sup>/sec이상의 누출구멍이 없는 것으로 확인되었다.

#### 다. 강내조사선원 조립 및 방사능측정

선원이송 연결고리와 연결스프링은 핫셀 밖에서 각 부품의 치수를 확인한 후 반 시계 방향으로 돌려 조립하여 연결한 후 핫셀 안으로 반입한다. 밀봉용접 후 오염검사 및 밀봉검사를 통과한 선원캡슐을 나사부분이 위로 향하도록 조립 장비에 고정시킨 후 선원이송 연결고리가 부착된 연결스프링 끝 부분을 나사부분 위에 올려 밀착시킨 후 선원조립용 장비를 반 시계 방향으로 회전시키면서 아래 방향으로 눌러 주면 연결스프링은 선원캡슐의 나사와 결합되어 Ir-192 강내조사선원 조립이 완료된다. 조립이 완료되면 용접장치로부터 분리하여 각각의 연결 부분이 완전히 결합되었는지 육안으로 확인한 후 이온전리함(CRC-35R, Capintec)을 사용하여 조립된 Ir-192 강내조사선원의 방사능을 최종 측정한다. 최종 조립된 시험용 Ir-192 강내조사선원의 방사능은 1012mCi 였으며 이 값은 이리듐에 의한 자체흡수 및 선원캡슐벽에 의한 흡수가 고려된 외양방사능(apparent activity) 값이다.

#### 4. Ir-192 강내조사선원의 방사선량평가

##### 가. 조사 선량률

선량계산의 기본이 되는 공기중 조사선량률

측정은 산란선의 영향을 줄이기 위해 아크릴 지지체에 선원과 검출기를 설치하여 측정하였다. 선원-검출기 지지체는 선원-아프리카이터를 중심으로 한쪽에 10cm 위치에 250kV X선에 대해 교정된 검출용적 0.6cc의 Farmer 형 PR-06(Capintec, U.S.A) 전리함을 설치하였으며, 다른 한쪽에 내경 6mm, 검출용적 0.14cc의 측정전리함 IC-10 (Wellofer, Germany)을 선원-아프리카이터와 평행으로 설치하여 5cm, 10cm 와 20cm 위치에 고정시킬 수 있도록 하였다. 표준전리함과 측정전리

함은 각각 Capintec-192 와 Famer 2570A (Nuclear Entertainment, England) 전위계로 측정하였으며, 선원과 검출기간의 거리오차를 1/20 mm 범위 이내로 조절할 수 있도록 하여 선량을 정밀 측정할 수 있도록 하였고 매 위치마다 5분간 5회 측정하여 조사선량을 평가하였다. 외양방사능 1012 mCi의 시험제조한 Ir-192 강내조사선원을 사용하여 측정한 조사선량을 측정값 및 조사선량률상수, 측정조건을 Table 1.에 요약하여 나타내었다. 선원의 중심으로부터 측방향으로 각각 10 mm 에서 100

Table 1. Measured exposure dose rate and the obtained exposure rate constant( $\Gamma_s$ ) of Ir-192 brachytherapy sources by ionization chamber.

Measured Value	Distance (mm)		
	50	100	200
Dose rate <sup>1)</sup> (R/min)	3.40	0.87	0.23
Dose rate (R-cm <sup>2</sup> /min)	85.10	86.51	92.87
$\Gamma_s^{2)}$ (R-cm <sup>2</sup> /mCi-hr)	5.22		

- 1) Dose correction factor 22.757 R/nC of ion chamber IC-10, ionization correction factor 1.0027 for atmospheric pressure and temperature, decay factor 0.4521 from source preparation to dose rate measurement(85 days) were considered.
- 2) Apparent activity 1012 mCi of Ir-192 source and average exposure dose rate 88.16 (R-cm<sup>2</sup>/min) were considered.

Table 2. Measured exposure dose rate along the lateral direction from 10mm to 100 mm of Ir-192 brachytherapy sources by ionization chamber and the obtained exposure rate constant( $\Gamma_s$ )

Measured Value	Distance (mm) from center of source						
	10	20	30	40	60	70	100
Dose rate <sup>1)</sup> (R/min)	85.93	20.94	9.41	5.32	3.40	1.75	0.82
Dose rate (R-cm <sup>2</sup> /min)	85.93	83.75	84.68	85.20	85.11	85.73	82.37
$\Gamma_s^{2)}$ (R-cm <sup>2</sup> /mCi-hr)	5.02						

- 1) Dose correction factor 22.757 R/nC of ion chamber IC-10, ionization correction factor 1.0052 for atmospheric pressure and temperature, decay factor 0.4521 from source preparation to dose rate measurement(85 days) were considered.
- 2) Apparent activity 1012 mCi of Ir-192 source and average exposure dose rate 84.68 (R-cm<sup>2</sup>/min) were considered.

mm 까지 조사선량을 측정하고 측정값 및 얻어진 조사선량률상수를 Table 2.에 나타내었다. 시험 제조한 Ir-192 강내조사선원으로부터 각각 5, 10, 20 cm 거리에 전리함을 설치하여 일정시간 선원을 노출시켜 측정한 결과와 선원중심 측방향으로 각각 10 mm 에서 100 mm 까지 조사선량을 측정한 결과로부터 이리듐물질 자체 및 선원캡슐 벽을 투과한 공기중 조사선량률상수 5.12 R-cm<sup>2</sup>/mCi-hr을 얻었다. 이 값은 제작선원의 캡슐형과 구조에 의해 결정되는 값으로 향후 제작되는 Ir-192 강내조사선원의 조사선량률의 지침이 된다.

#### 나. 선량등방성

강내조사선원의 선량등방성은 임상 적용시 조직선량평가에서 중요한 변수가 되므로, 본 연구에서 제작된 선원에 대해 공기전리함을 통해 선원 주위의 선량분포를 조사하였다. 공기전리함을 이용한 선량등방성 측정은 내경

6mm와 길이 10mm 이며, 검출용적이 0.14 cc 인 IC-10 (Wellofer, Germany) 공기전리함을 WP-600 수조펜텀의 벽에 아크릴 지지체를 부착시키고, 내경 5.0 mm × 두께 1.1 mm 인 아크릴 애플리케이션을 고정하고 WP-600에서 지원되는 수동-검출기 위치결정 방법을 택하였으며, 선원중심은 검출기를 in-plane, cross-plane 및 선원측방향으로 이동하여 최대선량점을 얻어 결정되었다. 선량평가점은 선원의 3차원적 중심으로부터 측방향, 측방향 및 45도 대각선방향으로 각각 10mm 에서 100 mm 까지 공간선량을 측정하고 선원 측방 1 cm의 선량으로 규격화하여 선량 등방성을 조사하였다.

선원을 중심으로 선원의 측방향과 측방향 및 대각선방향으로 공기중 조사선량률을 각각 구한 결과를 Table 3.에 나타내었다. WP-600 펜텀을 이용한 선량 등방성 조사시 검출위치오차는 ± 0.1mm 이내 였고, 선량분포비교는 선원의 측방 1cm 의 선량을 중심으로 규격화하였

Table 3. Exposure dose rate(R/min) normalized to the 1 cm of lateral distance of source center of Ir-192 high dose rate brachytherapy source

distance (mm)	Scan Direction				
	Lateral	Longitudinal	Diff. (%)	Diagonal	Diff. (%)
10	100.0	104.2	4.2	100.0	0.0
20	26.1	26.2	0.4	26.4	1.1
30	11.8	11.8	0.0	11.9	0.8
40	6.8	6.6	-2.9	6.7	-1.5
50	4.3	4.2	-2.3	4.3	0.0
70	2.2	2.1	-4.8	2.2	0.0
100	1.1	1.0	-10.0	1.1	0.0

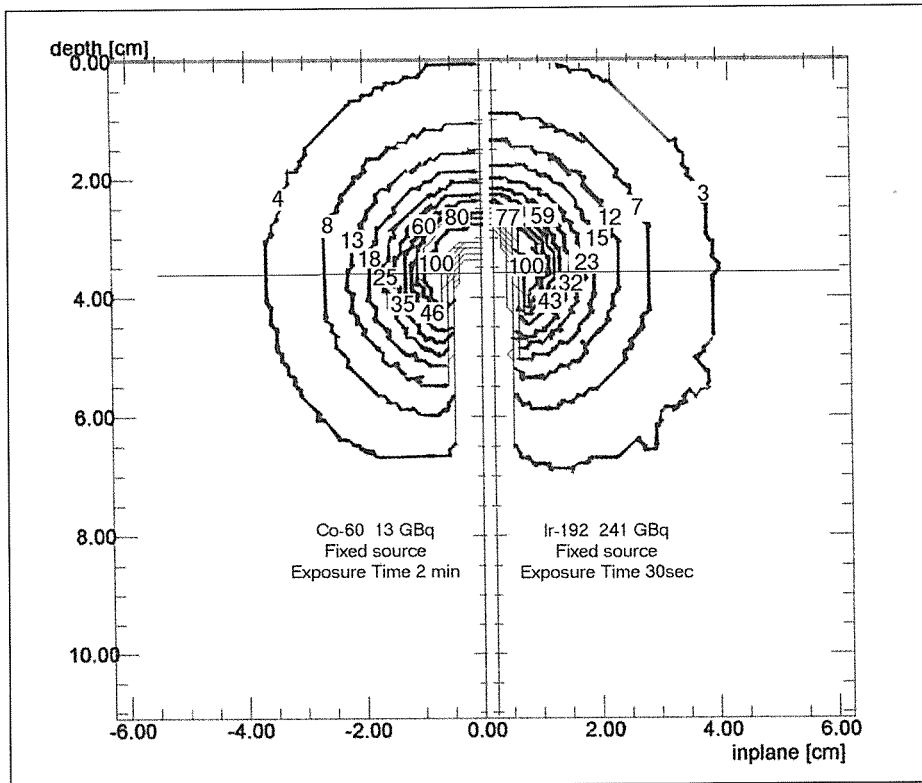


Fig 6. Isodose curves obtained from the films exposed to 13GBq of Co-60 source(Left) for 2 min. and to 241GBq of Ir-192 source(Right) for 0.5 min.

으며, 각각 측방향 선량을 중심으로 선원축의 선량과 45도 대각선방향의 선량을 비교한 결과, 절대선량 값이 현저히 낮은 100mm 위치에서는 최대 10% 차이를 보였다. 특히 유효치료거리인 50mm 이내에서 선량차는 선원축방향의 선량차가 최대 4.2%를 보였으며, 대부분  $\pm 3\%$  이내 선량차이를 보여 선량등방성이 잘 유지됨을 확인하였다.

Fig 6.은 폴리스탈린 고체팬텀에 삽입된 아프리케이션(재질 철, 내경 5.0 mm, 두께 0.5 mm)의 중심축에 필름(Kodak X-omat V2)을 아프리케이션의 외경과 같이 잘라 필름이 아프리케이션을 둘러싸도록 한 후 암실상태에

서 선원을 고정하여 일정시간 노출시킨 다음, WP-102 흑화도 측정기로 구한 선원주위의 선량분포이다. 선량분포의 좌측은 Co-60(13 GBq)이며, 우측은 Ir-192(241 GBq)의 선원으로 각각 측방 1 cm 위치의 흑화도로 규격화하여 백분율로 나타낸 선량분포이다. Ir-192 선원의 선량분포는 Co-60의 선량분포와 아주 유사한 분포를 보이고 있으며, 선량등방성이 잘 유지됨을 알 수 있다.

### 결론

하나로를 이용하여 의료용으로 사용되는 Ir-

192 강내조사선원을 개발하였다. Ir-192 강내 조사선원은 최근 Co-60 선원의 공급부진으로 인하여 적기에 선원교체가 이루어지지 않아 치료 도입시의 치료시간에 비하여 4~5배의 치료 시간이 소요되는 고선량률 Co-60 원격강내조사용 선원을 대체하기 위해서 개발되었다.


Ir-192 강내조사선원을 개발하기 위하여 직경 2.50mm × 두께 0.25mm의 원판형 이리듐 표적 12장을 하나로 HTS조사공에서 48시간 동안 조사하여 10장을 쌓는 방식으로 방사능 1012mCi의 시험선원을 제조하였다. Ir-192 강내조사선원 제작을 위한 조사표적제작, 이리듐 표적의 중성자조사, 조사된 이리듐표적의 방사능 측정 및 밀봉선원제조 등의 제작기술을 확립하고 향후 실제 임상치료에 적용될 고선량률 Ir-192 강내조사선원의 상용생산을 위하여 필요한 자료를 확보하였다. Ir-192 강내조사선원은 선원캡슐, 선원이송 연결고리, 연결 스프링으로 되어 있으며 의료용으로 사용하는데 문제가 없도록 조립정도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다.

개발된 Ir-192 강내조사선원의 안전성은 밀봉시험, 표면오염검사 등을 수행하여 확인하였다. 시험 제조한 Ir-192 방사선원의 방사능 누출검사에서 밀봉시험 조건에서는 선원표면에서 기포가 발생되지 않아  $10^{-5}$ atm.cm<sup>3</sup>/sec 이상의 누출구멍이 없는 것으로 확인되었다. 표면오염검사 결과 Ir-192 선원의 누출 방사능은 31.4 Bq 정도로 의료용 밀봉방사선원의 누출 허용기준인 200 Bq보다 훨씬 작아서 선원의 안전성을 확인할 수 있었다.

개발된 Ir-192 강내조사선원에 대한 방사선량특성을 조사하여 자궁경부암치료에 사용중인 고선량률 원격강내조사장치의 Co-60 선원

대체용으로 사용할 수 있는지 조사하였다. 조사된 선량특성 중 공기중 조사선량률은 5.12 R-cm<sup>2</sup>/mCi-hr로 측정되었으며, 이 값은 향후 제작되는 고선량률 Ir-192 강내조사선원의 선량률 지침으로 이용될 수 있다. Ir-192 강내조사선원에 대해 전리함을 이용하여 조사한 선량 등방성은 ± 3% 범위에서 균등한 선량이 조사될 수 있음을 알 수 있었으며 필름선량계에서 Co-60 선원의 선량분포와 비교한 결과 Ir-192 선원은 에너지가 낮음에도 불구하고 Co-60의 선량분포와 아주 유사한 분포를 보이고 있으며, 선량 등방성이 잘 유지됨을 알 수 있었다. 개발된 Ir-192 강내조사선원의 선량 등방성이 입증됨에 따라 개발된 Ir-192 선원이 Co-60 선원의 대체용 강내조사선원으로써 조금도 손색이 없음을 알 수 있었다.

이번 연구를 통하여 하나로를 이용하여 원격강내조사용으로 사용되는 고선량률의 Ir-192 선원을 안정적으로 공급할 수 있음을 확인하였으며, 선원캡슐 직경 4.0 mm의 치료용 밀봉방사선원 제작기술을 확보하였다. 개발된 Ir-192 강내조사선원은 Buchler 3K 장치를 이용하는 국내 5-6개 병원에 고선량률 Co-60 원격강내조사선원 대체용 선원으로 공급할 계획이며 본 연구에서 개발된 직경 4.0mm의 치료용 밀봉방사선원 제작기술은 최근 그 적용범위 및 수요가 급증하고 있는 직경 1.1~1.6mm의 폐기관지 및 식도내부 치료용 강내조사선원을 개발하는 데 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글 : 본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중장기사업의 일환으로 수행되었습니다. 

## 참고문헌

- [1] Utley J.F., Essen C.F. et al., "High-Dose Rate Afterloading Brachytherapy in Carcinoma of the Uterine Cervix", *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys* Vol 10, 2259-2263(1984)
- [2] Joslin C.A.F. "Brachytherapy: A Clinical Dilema", *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys* Vol 19, 801-802
- [3] ICRU Report No. 38, "Dose and Volume Specification for Reporting Intracavitary Therapy in Gynecology" (1985)
- [4] Koch K, Schumacher W. et al., "Iridium Afterloading Technique. Basic Principles and Effects", *Tumor Diagnostik & Therapie* Vol 7, 36-38(1986)
- [5] Glasgow G.P. et al., "Remote Afterloading Technology", *AAPM Report* 41, 6-30 (1993)
- [6] 대한치료방사선과학회, "대한치료방사선과 전국통계", *대한치료방사선과학회지* Vol 15, No 3, 277-281(1996)
- [7] Roger A. Potish et al., "Technological basis of radiation therapy", Chap. 6, Lea & Febiger(1984)
- [8] Lederer C.M., et al., "Table of Isotopes", 7th Ed., P. 1229, John Wiley & Sons(1978)
- [9] Hisashi Katoh et al., "Production of radioisotopic gamma radiation sources in JAERI", *JAERI/M-8810*(1980)
- [10] J. Gilat, Y. Gurfinkel, "Self-Shielding In Activation Analysis", *Nucleonics*, Vol. 21, No. 8, 143 (1963)
- [11] P.F. Zweifel, "Neutron Self-Shielding", *Nucleonics*, Vol. 18, No. 11, 174 (1960)
- [12] H. Nakamura, H. Yamabayashi, "Estimation of Self-Shielding Effect for RI Production", *J. of Jap. Nuc. Soc.*, Vol 12, No 1, 2 (1970)
- [13] R.E. Nisle, *Nucleonics*, Vol 18, No.3, 86(1960)
- [14] S. Maeda, S. Enomoto, "Development of a High Intensity Ir-192  $\gamma$ -Ray Radiographic Source", *Int. J. of Rad. & Iso. Soc.*, Vol 27, 447-451 (1976)
- [15] S. Enomoto, S. Maeda, "A Method of Preparing Ir-192 Gamma-Ray Source of High Specific Activity", *J. of Jap. Nuc. Soc.*, Vol 13, No 6, 312 (1971)
- [16] W. K. Cho. et al., "Measurement of  $\gamma$ -ray self-absorption effect of Ir-192 radiation sources", *Proceedings of the Kor. Nuc. Soc. Spring Meeting, Korea, May(1998)*
- [17] S. Enomoto, T. Onodera, H. Kato, "Gamma-Ray Self-Absorption of Ir-192 Radiographic Source", *J. of Jap. Nuc. Soc.*, Vol 12, No 4, 176 (1970)
- [18] Glasgow G.P., "Specific  $\gamma$ -ray constant and exposure rate constant of Ir-192", *Med. Phys.* Vol 6, No 1, 49-52(1979)
- [19] U. J. Park. et al., "Preparation and inspection of irradiation capsule for radioisotope production in nuclear reactor", *Proceedings of the Kor. Nuc. Soc. Spring Meeting, Korea, May(1998)*
- [20] ISO 9978:1992(E), "Radiation protection-Sealed radioactive sources-Leakage test methods" (1992)