

## 라돈농도 측정을 위한 고체 핵비적 검출기형 라돈컵 설계

### Design of Radon Cup with Solid State Nuclear Track Detector for Radon Concentration Measurement

조찬희, 신상운, 손중권, 송명재

전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

고체 핵비적 검출기는 견고하고 단순하며 안전성이 뛰어나기 때문에 수동적 라돈농도 측정법으로 널리 이용되고 있다. 상용되고 있는 고체 핵비적 검출기형 선량계의 기하학적 형태와 특성을 살펴보고, 단점을 보완하여 라돈 검출효율을 극대화시킬 수 있는 선량계인 KEPRI-라돈컵을 개발하였다. KEPRI-라돈컵의 재질은 폴리카보네이트이며 80 mm의 직경을 가진 반구형 챔버로 되어 있다. 챔버의 직경은 라돈 검출효율을 증진시킬 수 있도록 몬테칼로 모의 결과와 라돈 및 라돈 딸핵종들의 비정을 고려하여 결정하였다. 폴리카보네이트 원반상의 공기 유입구에는 멤브레인 필터를 설치하여 방사성 에어로졸이나 입자가 선량계 내부로 들어오는 것을 방지할 수 있도록 하였고, 확산이 지엽적인 공기 흐름의 요동에도 교란되지 않도록 하였다. 검출기는 공기 유입구를 교차하는 검출기 지지체에 장착된다. KEPRI-라돈컵은 공기 유입구가 확산 챔버 하부에 위치해 있어 검출기와 멤브레인 필터의 손상이나 오염이 거의 없다. 또 핵비적 검출기는 장기간 동안 설치하여야 하기 때문에 설치기간 동안 안전성을 유지할 수 있도록 6개의 다리가 달린 지지체를 설치하였다.

#### Abstract

A solid state nuclear tract detector(SSNTD) has been widely used for passive measurement of radon concentration because of its durability, simplicity and stability. Geometries and characteristics of conventional SSNTD samplers were reviewed, and the optimal SSNTD sampler so-called KEPRI-Radon Cup was developed to maximize the detection efficiency for radon by means of modification of their non-effective problems. The KEPRI-Radon Cup is made of polycarbonate, which has a hemispheric chamber of 80 mm in diameter. The size of diameter was determined to enhance the detection efficiency for radon based on the Monte Carlo simulation results and the ranges of radon and its daughters. Air inlets are provided on the polycarbonate disk which are covered with membrane filters to prevent radioactive aerosols or particles from entering the detector housing and the diffusion from fluctuating by local flow perturbation. The detector is placed on the holder which intersects the air inlets. The detector or membrane filter in the KEPRI-Radon Cup is rarely damaged and fouled because air inlets are placed at the bottom of the diffusion chamber. The six-legged stand supports the sampler to maintain its stability during the long-term exposure period.

## 1. 서 론

공기중 라돈농도를 측정하는 방법으로는 연속 측정법(Continuous Method)과 시간-평균 측정법(Time-averaging Method)으로 분류할 수 있고, 또 공기의 수집 방법에 따라 능동적 측정법과 수동적 측정법으로 나눌 수 있다. 연속 측정법에 사용되는 라돈 감시기는 보통 ZnS(Ag)의 형광체가 코팅되어 있는 섬광 셀로 구성되어 있다. 대표적인 수동적 측정법이면서 시간-평균 측정법으로 사용되는 검출기로는 고체 핵비적 검출기(Solid State Nuclear Track Detector: SSNTD)와 활성탄 검출기를 들 수 있다. 활성탄 검출기는 보통 1일~7일 정도의 단기간 동안 시간-평균 라돈 농도를 측정하는데 사용되고, 핵비적 검출기는 60일~90일 정도의 비교적 장기간 동안의 시간-평균 라돈농도를 측정하는데 사용된다.

본 연구에서는 상용되고 있는 핵비적 검출기형 라돈 선량계의 종류와 특성에 대하여 살펴 보고 기존 선량계의 문제점을 검토하여 라돈 검출의 효율을 극대화시키고 장기간 동안 설치하여도 건전성을 유지할 수 있는 핵비적 검출기형 라돈컵을 설계하였다. 최적의 성능과 건전성을 유지할 수 있도록 설계하여 제작한 이 핵비적 검출기형 라돈컵은 원자력발전소내 라돈농도를 측정하는데 사용되고 있다.

## 2. 상용화된 라돈컵의 형태 및 특성

SSNTD를 이용하여 라돈농도를 측정하기 위해 초기에 사용되었던 라돈컵의 형태는 그림 1 (a)에 나와 있는 것과 같은 확산 선량계이다. 확산 선량계는 한쪽 끝에 검출기를 설치한 튜브형 측정기로서 다른 한쪽 끝이 열려 있다. 토론으로 인한 영향을 배제하기 위하여 필요할 경우 검출기 근처의 검출 유효 지역까지 확산해 가는 동안에 토론이 완전히 붕괴되어 없어지도록 튜브의 길이를 충분히 길게 제작할 수도 있다. 휴대가 가능하고 개인 선량계로서 쉽게 사용할 수 있다는 점이 이 확산 선량계의 장점이지만, 검출기의 표면적이 작아 단기간 노출시에는 단지 몇 개의 비적만이 형성되기 때문에 단기간의 라돈피폭 측정에는 적합하지 못하다. 표면적이 큰 검출기를 사용하게 되면 검출기의 검출 하한치가 낮아져 저피폭의 경우에도 사용할 수 있는데, 이 경우 보다 넓은 면적에 대한 비적 밀도를 계수하여야 하는 문제점이 있다. 검출기의 표면적을 넓게하는 방법으로 그림 1 (b)와 같이 확산 선량계의 원통형 벽면 내부에 검출기 박막을 설치하는 방법이 있다. 튜브의 길이를 챔버 하부 가장자리로부터 30 cm 이상이 되도록 충분히 길게 제작하거나 열린 한쪽 끝에 공기가 스며들 수 있는 덤개를 씌움으로써 토론을 구분해 낼 수 있다.

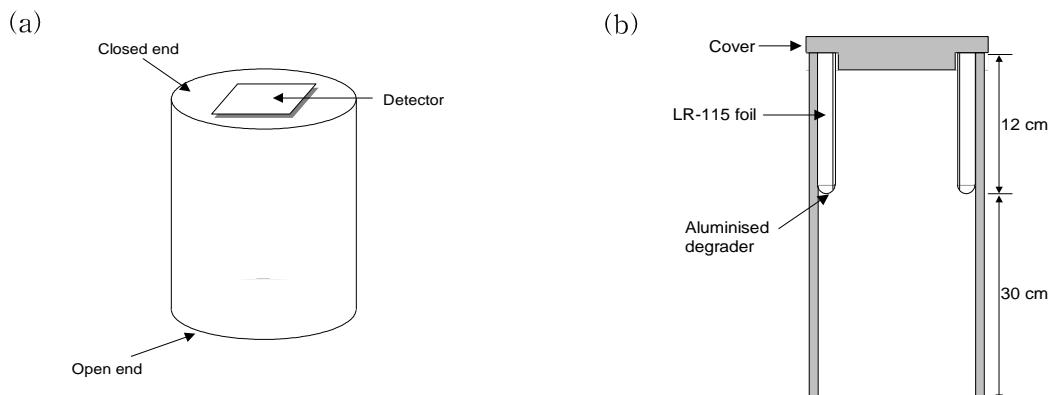


그림 1. 원통형 튜브의 상부와 벽면에 검출기를 설치한 확산 선량계의 예

다음으로는 투과 선량계가 있는데 투과 선량계는 튜브의 열린 한 쪽 끝이 투과성 맴브레인으로 덮여 있다는 것이 근본적으로 확산 선량계와 다른 점이다. 이 맴브레인은 라돈 기체가 감응 부위

까지 들어 오는 속도를 자연시키게 되고, 따라서 토론( $^{220}\text{Rn}$ ) 뿐만 아니라 주변 공기중에 존재하는 라돈 땀핵종까지도 라돈 기체와 분리해 별 수 있다는 특징이 있다. 또한 멤브레인은 공기중에 존재하는 수분이나 먼지로 인해 검출기가 손상되는 것을 방지하는 역할도 한다. 이 경우 모든 비적은  $^{222}\text{Rn}$ 과  $^{222}\text{Rn}$ 이 감응 공간으로 들어온 후 붕괴되어 생성된 라돈 땀핵종들로부터 방출된 알파 입자에 의해 발생된다. 투과 초기단계에서 발생하는 알파 계수치의 손실은 노출기간이 완료된 후 일정 시간이 지난 후에 검출기를 선량계에서 빼냄으로써 보상할 수 있다. 여러 가지 기하학적 형태의 투과 선량계들이 사용되고 있는데, Alter와 Fleischer는 한 쪽 끝의 직경이 6.8 cm이고 다른 한 쪽 끝의 직경은 5.4 cm이며, 높이가 9.5 cm인 플라스틱 컵을 사용하였다[1]. 작은 직경의 한 쪽 끝에는  $0.8 \times 2.5 \times 0.2 \text{ cm}^3$ 의 플라스틱 SSNTD를 부착시켰으며, 다른 쪽 끝에는 반 투과성 멤브레인이나 소수성(Hydrophobic) 미세 필터를 그림 2(a)와 같이 설치하였다.

Tommasino 등은 보다 새로운 방식의 라돈컵을 개발하였다[2]. 이 라돈컵은 1 cm 간격으로 떨어져 있는 플라스틱 지지체에 두 개의 LR-115 플라스틱 비적 검출기를 설치한 것으로서 검출기 표면을 알루미늄이 입혀진 Polycarbonate Degrader로 덮어 검출기의 반응도를 최적화시켰을 뿐만 아니라 검출기가 전도성을 띠도록 하였다. 검출기 시스템 전체가 그림 2 (b)에서 보는 바와 같이 폴리에틸렌으로 만들어진 열(heat)로 밀봉한 플라스틱 백에 들어가 있는데, 플라스틱 백의 재질이 외부의 라돈 땀핵종들과 토론, 먼지와 수분 등을 차단시키기 때문에 라돈만을 측정할 목적으로 이 '백(bag)'이 사용된다.

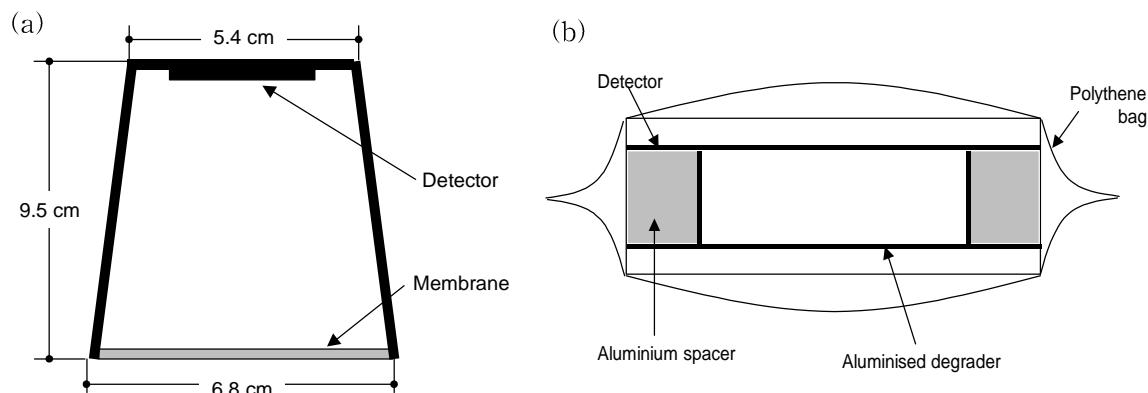
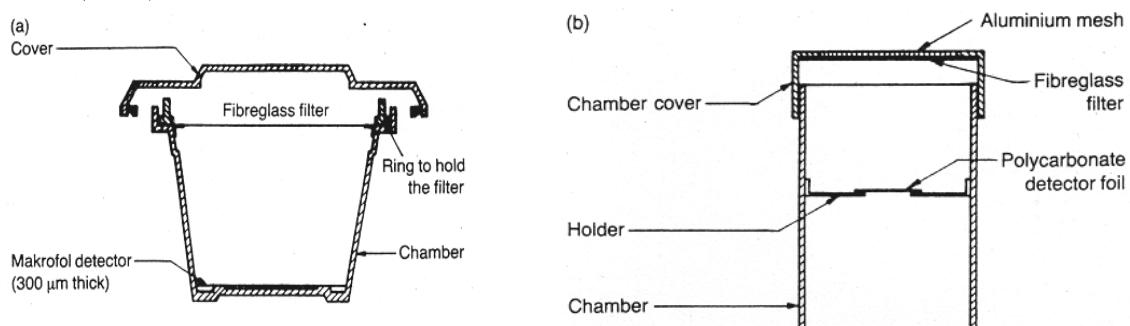


그림 2. 멤브레인이 설치되어 있는 투과 선량계와 폴리에틸렌 백(bag) 형태의 측정기

투과 선량계에 속하는 다른 형태의 측정기 예가 그림 3(a)에서 3(d)까지 제시되어 있다. 그림 3 (a)에 나와 있는 챔버 형태의 측정기는 독일의 KfK에서 전 국토의 라돈농도 측정을 위하여 주로 사용하고 있으며, 그림 3(b)에 나와 있는 라돈 투과 검출기는 이란의 원자력에너지기구(Atomic Energy Organization)가 개발하여 사용중인 측정기 형태이다. 개인 피폭선량 감시를 위하여 KfK는 단면 모습이 그림 3(c)와 같은 선량계를 사용하고 있으며, 그림 3(d)는 영국의 국립 방사선방호청(National Radiological Protection Board)이 개발하여 사용하고 있는 라돈 선량계의 단면 모습을 보여 준다.



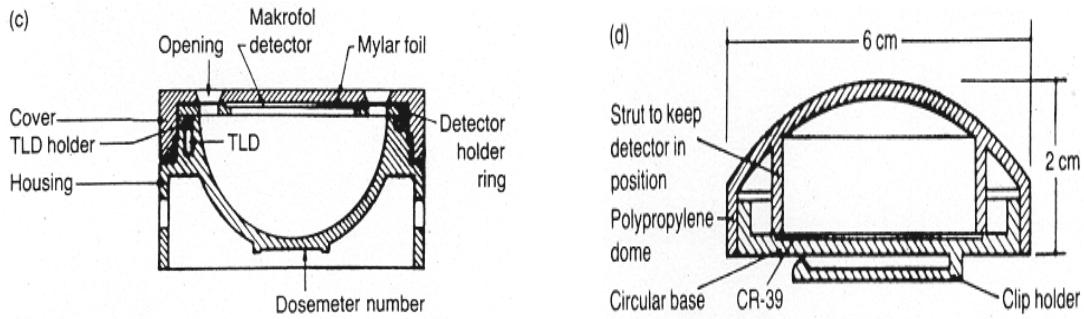


그림 3. 투과 선량계형 라돈 측정기로 널리 이용되는 네 가지 설계 형태

SSNTD를 이용한 또 다른 선량계로서 노출 검출기가 있는데, 노출 검출기의 형태는 그 명칭에서 알 수 있는 바와 같이 지지체에 간단하게 검출기를 붙인 것으로서 측정하고자 하는 지역에 바로 노출시켜 라돈농도를 측정한다. 따라서 라돈과 라돈의 딸핵종들 뿐만 아니라 토론이나 토론의 딸핵종들로부터 방출된 알파 입자가 모두 검출기에 반응을 일으키게 되며, 에어로졸의 분포와 공기 흐름이 검출기 반응에 영향을 주게 된다. 검출기의 크기를 충분히 크게 제작함으로써 비교적 짧은 측정기간 동안에 저농도의 라돈을 측정할 수도 있는데, 이러한 목적으로 개발된 편지봉투 형태의 검출기가 그림 4에 나와 있다. 이 검출기는 봉투 안에다 9 cm×12 cm 크기의 LR-115 조각을 붙여 놓은 것으로서 떼어낼 수 있도록 되어 있는 이 LR-115 조각의 반쪽면은 모든 알파 입자를 저지시키기에 충분한 두께의 플라스틱으로 덮여 있다. 따라서 이 부분은 백그라운드 방사선을 측정하는데 사용된다. SSNTD를 이용한 노출 검출기는 주로 라돈 딸핵종들이 검출기에 침적되는 속도가 주위 여건에 따라 쉽게 변화되기 때문에 라돈농도 측정에 부적합한 것으로 알려져 있다.

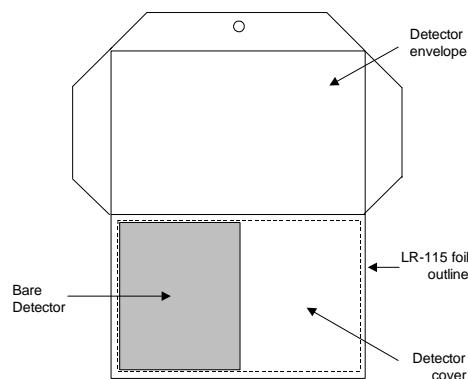


그림 4. 봉투 안쪽에 SSNTD를 설치한 노출 검출기

### 3. KEPRI 라돈컵의 설계

핵비적 검출기형 라돈컵의 설계시 고려되어야 할 인자로는 무엇보다도 라돈의 검출효율을 극대화시켜야 한다는 점이다. 라돈의 검출효율은 선량계의 기하학적 형태에 따라서 영향을 받게되는 테 기준에 개발된 원통형 혹은 직육면체형 챔버에 비해 반구형 챔버가 효율을 극대화시킬 수 있을 것이다. 또 반구형 챔버의 경우 챔버의 직경을 결정하기 위해서는 사용하게 될 검출기의 종류와 알파 입자의 검출기 문턱값을 고려하여 검출기와 반응하는 알파 입자의 수가 최대가 되도록 하여야 한다.

본 연구에서는 Makrofol을 검출기로 선정하였으며, Makrofol의 에칭 피트 생성모델과 라돈컵 내부의 라돈 땀핵종 분포 특성을 고려하여 라돈 검출효율이 높으면서도 안정되도록 라돈컵의 직경을 결정하였다. Makrofol의 에칭 피트 생성모델을 이용한 검출효율 분석자료는 Masahiro의 몬테칼로 분석결과를 이용하였는데, 그 결과는 표 1과 같다.

표 1. 비적밀도의 라돈농도 환산인자(몬테칼로 모의 모델 결과) [3]  
((비적/cm<sup>2</sup>)/(Bq-d/m<sup>3</sup>))

T <sub>CE</sub> (h)	반구형 확산 챔버의 직경 (mm)							
	50	60	70	80	90	100	110	120
0.5	0.0148	0.0255	0.0375	0.0407	0.0417	0.0437	0.0445	0.0457
1.0	0.0203	0.0293	0.0361	0.0357	0.0368	0.0403	0.0410	0.0368
1.5	0.0247	0.0312	0.0316	0.0317	0.0368	0.0380	0.0353	0.0263
2.0	0.0274	0.0309	0.0298	0.0324	0.0356	0.0348	0.0285	0.0213
2.5	0.0279	0.0287	0.0306	0.0327	0.0330	0.0302	0.0226	0.0215
3.0	0.0266	0.0258	0.0302	0.0306	0.0294	0.0238	0.0202	0.0198

표 1에서 라돈 검출효율은 직경이 증가함에 따라 증가하다가 직경이 어느 수준을 넘어서게 되면 다시 감소함을 알 수 있는데, 화학적 에칭 시간이 1 시간일 경우 직경 110 mm에서 최대 효율을 나타내며 에칭 시간이 2 시간으로 증가되면 최대 효율을 나타내는 직경은 90 mm로 감소된다. 따라서 최대 효율을 나타내는 직경은 검출기의 에칭 Protocol과 밀접한 관계가 있으며, 에칭 Protocol이 결정되어야 최적의 직경을 결정할 수 있다. 그러나 에칭 Protocol은 보다 많은 실험을 통하여 결정하여야 하기 때문에, 여기서는 그 동안의 예비 실험자료를 토대로 최적의 직경을 결정하였다.

에칭 Protocol을 결정하기 위하여 본 연구에서 사용하고 있는 두께가 300  $\mu\text{m}$ 인 Makrofol DE1-1 검출기의 화학적 에칭 속도를 구하였다. 에칭액의 조성은 부피 비로 8N KOH 80%와 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 20% 였으며, 40°C에서 검출기 시편을 각각 에칭시킨 후 무게 변화를 측정하여 화학적 에칭 속도를 구하였는데, 화학적 에칭 속도는 3.65  $\mu\text{m}/\text{h}$ 로서 Masahiro가 구한 30°C에서의 3.57  $\mu\text{m}/\text{h}$ 보다 약간 높았다. 따라서 화학적 에칭 시간에 따른 표 1의 라돈농도 환산인자의 평가 결과가 본 연구에서 사용하고 있는 에칭 Protocol에서는 다소 낮아질 것으로 추정된다.

한편 전기화학적 에칭 속도는 문헌에 발표되고 있는 값보다 상당히 높은 것으로 추정되는데, 800 V, 2,000 Hz로 실시한 전기화학적 에칭 실험결과 2 시간 이내에 300  $\mu\text{m}$ 의 검출기에서 전기화학적 에칭 피트의 관통 현상이 일어났다. 따라서 전기화학적 에칭 시간을 1시간 30분 이내로 제한하여야 할 것으로 판단된다.

화학적 에칭시간이 증가되면 저에너지 알파에 의한 비적의 에칭 피트가 감소되므로 화학적 에칭 시간과 라돈컵의 직경은 밀접한 관계를 지니고 있다. 예를 들어 라돈컵의 직경을 10 mm 감소시켰을 경우 검출기에 입사되는 알파 입자의 에너지는 약 0.9 MeV 정도 증가하게 된다. 따라서 라돈컵의 직경을 100 mm에서 80 mm로 감소시키면 검출기에 입사하는 알파 입자의 에너지는 약 2.7 MeV 증가되므로 화학적 에칭 시간을 2 시간 이상 증가시키더라도 큰 문제가 따르지 않는다.

최적의 라돈컵 직경은 측정효율이 높아야 할 뿐만 아니라 측정효율의 안전성이 높도록 결정되어야 한다. 다시 말해 측정 Protocol에 변화가 발생한다고 하더라도 측정효율의 변화율은 가능한 한 낮아야 한다. 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 화학적 에칭이 측정효율에 미치는 영향은 라돈컵의 직경이 감소함에 따라 줄어들게 된다. 그러나 라돈컵의 직경이 감소되면 측정효율이 감소되어 검출 하한치가 높아지게 되므로 바람직하지 않기 때문에 라돈컵의 직경을 무한정 낮출 수는 없다.

한편 알파 입자를 방출하는 주요 라돈 땀핵종인 <sup>218</sup>Po의 공기중 비정이 46.7 mm에 불과하다는 점에 비추어 볼 때 표 1의 분석결과는 <sup>218</sup>Po의 영향에 대한 의문이 따른다. 예를 들어 라돈컵의 직경이 90 mm 이상 증가하게 되면 라돈컵의 내부 표면에 부착된 <sup>218</sup>Po로부터 방출된 알파 입자

는 검출기 방향으로 방출된다고 하더라도 검출기까지 도달하지 못하게 되며, 도달한다고 하더라도 에너지가 낮아 화학적 예칭과정에서 비적이 소멸되고 만다. 따라서 직경이 90 mm 이상 증가될 경우 오히려 라돈 환산인자가 어느 정도 감소되는 현상이 나타날 것으로 예상된다.

이러한 특성을 고려하여 본 연구에서는 라돈컵의 직경을 80 mm로 결정하였으며, 라돈컵의 직경이 90 mm 이상 증가되었을 경우의 효율 변화를 보다 정확하게 평가하기 위하여 라돈컵의 직경은 그대로 유지하면서 반구체의 높이를 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm로 제작하여 실험을 수행 중에 있다.

두번째로 고려하여야 할 사항은 라돈컵 내부로의 공기 교환속도이다. 공기 교환속도는 멤브레인을 통한 확산 속도와 공기 유입구의 크기에 의해 결정되는데, 확산속도는 라돈과 토론의 분별 특성을 결정하는 주요한 요소가 되며 공기 유입구의 크기는 라돈컵 내외부의 라돈농도 비를 결정하는 주요 인자가 된다. 본 연구에서 라돈컵에 설치한 멤브레인은 공극 크기가 0.8  $\mu\text{m}$ 인 Millipore AAWP 09000이었으며, 공기 유입구의 크기가 최대가 되도록 그림 5에서 보는 바와 같이 중앙에  $20 \times 40$  mm의 검출기를 설치하는 공간을 제외한 거의 모든 영역을 공기 유입구로 설계하였다. 라돈컵 내부로의 공기 교환속도는 검출기의 예칭 Protocol을 확정한 후 라돈 챔버를 이용하여 비적 밀도의 시간대별 변화를 추적함으로써 보다 상세하게 평가할 예정이다.

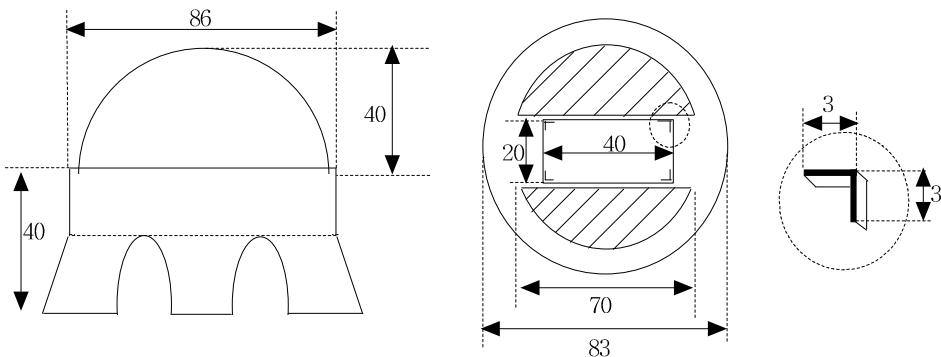


그림 5. 핵비적 검출기형 KEPRI-라돈컵의 모형

핵비적 검출기형 라돈컵은 설치기간이 보통 3개월 정도로 장기간이기 때문에, 설치기간에 걸쳐 라돈농도를 안정적으로 측정할 수 있어야 한다. 따라서 외부 공기가 라돈컵의 하부를 통해 유입되도록 설계함으로써 멤브레인의 오염과 손상을 방지할 수 있도록 하였다. 또 검출기를 라돈컵의 하부에 부착시킴으로써, 상부에 검출기를 설치한 일부 라돈컵에서 발생될 수 있는 검출기의 이탈 가능성을 최소화시켰다.

라돈컵은 공기의 흐름이 거의 없는 실내 공간 뿐만 아니라 옥외에서도 라돈농도를 측정하는데 사용하기 때문에, 공기의 흐름으로 인한 영향이 최소가 되도록 라돈컵을 설계하여야 할 필요가 있다. 일반적으로 공기 유입구에서의 대류 흐름은 유효 확산계수에 영향을 미쳐 라돈 검출효율을 감소시키는 효과가 있다. 따라서 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 공기 유입구의 위치로부터 1 cm 아래까지 라돈컵 하부 몸체가 내려오도록 설계함으로써 대류 흐름의 영향을 감소시켜 라돈의 검출 효율이 안정화되도록 하였다. 대류 흐름이 라돈 검출효율에 미치는 영향에 관한 분석은 원전에서의 라돈농도 측정작업과 병행하여 보다 상세하게 수행할 예정으로 있다.

끝으로 고려하여야 할 사항은 라돈컵의 재질이다. 일반적으로 지상 1 m의 위치에서 옥외 라돈농도는  $5 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 인 것으로 알려져 있으며[4], 이를 고려할 경우 라돈농도에 대한 라돈 선량계의 검출 하한치는  $3 \text{ Bq}/\text{m}^3$  정도가 적당하다. 따라서  $3 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 의 라돈농도를 검출해 내기 위해서는 라돈농도에 대한 환산인자가  $0.03 ((\text{비적}/\text{cm}^2)/(\text{Bq-d}/\text{m}^3))$ 이고 백그라운드 이상의 비적밀도를 검출 하한치로 가정하였을 경우 검출기의 백그라운드 비적밀도는  $0.09(3 \times 0.03)(\text{비적}/\text{cm}^2)$  이하가 되어야 한다. 백그라운드 비적밀도를 최소화시키기 위해서는 라돈컵의 재질 속에 불순물로 들어 있

는 알파 방출체, 즉 라듐과 토륨의 방사능 함량이 가능한 한 낮아야 한다. 또 라돈컵 내부 표면에 라돈 딸핵종들이 침착되는 특성이 라돈 검출효율의 안정성에 영향을 미친다. 예를 들어 라돈컵 재질이 국부적으로 정전하를 띠고 있을 경우에는 라돈 딸핵종들이 불균일하게 침착되어 라돈 측정효율이 라돈컵마다 커다란 차이를 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 방사성 오염도와 정전기적 용량이 낮은 것으로 알려져 있는 폴리카보네이트를 라돈컵의 재질로 선정하여 라돈 측정효율을 안정화시켰다.

## 4. 결 론

고체 핵비적 검출기를 이용하여 라돈농도를 측정하기 위한 기존 선량계의 불합리한 점을 보완하여 KEPRI-라돈컵을 설계하였다. KEPRI-라돈컵은 최대의 라돈 검출효율을 얻기 위해서 반구형으로 설계하였으며, 몬테칼로 모의 결과와 라돈 및 라돈 딸핵종들로부터 방출되는 알파 입자의 비정, 그리고 Makrofol 검출기의 에칭 특성을 고려하여 반구의 직경을 80 mm로 결정하였다. 또 검출기의 손상을 방지하고 라돈 딸핵종과, 토론, 그리고 토론 딸핵종들의 간섭을 줄이기 위하여 Millipore AAWP09000 멤브레인을 공기 유입구에 설치하였다. KEPRI-라돈컵에서는 멤브레인 필터가 부착된 공기 유입구를 선량계 하부에 설치함으로써 기존 선량계에서 해결하지 못한 검출기와 필터의 손상을 방지할 수 있고, 지연적인 공기 흐름의 요동에도 영향을 받지 않도록 설계하였다.

## 참 고 문 헌

1. H. W. Alter and R. L. Fleischer "Passive Integrating Radon Monitor for Environmental Monitoring," *Health Physics* 40, 693-707, 1981.
2. L. Tommasino, D. E. Cherouati, J. L. Seidel and M. Monnin "A Plastic Bag Sampler for Passive Radon Monitoring," *Nucl. Tracks* 12, 681-684, 1986.
3. D. Masahiro and K. Sadayoshi "The Passive Radon-Thoron Discriminative Dosimeter for Practical Use," *Hoken Butsuri* 29, 155-166, Japan, 1994.
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and Effects of Ionizing Radiation, New York, United Nations, 1993.