

屋内 空氣中の 라돈 測定과 分析에 관한 考察

Study of Radon Measurement
and Analysis in Indoor Air



황 선 태

한국표준과학연구원
방사선연구그룹 책임연구원

1986년 10월, 미국 의회에서 “The Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA, PL99-499)”가 통과되었으며 여기에 “Title IV-The Radon Gas and Indoor Air Quality Research Act”가 포함되어 있어서 환경보호청(EPA)이 포괄적인 옥내공기의 연구프로그램을 떠맡도록 이 법령은 정하고 있다. 이 프로그램의 요구사항들은 특유해서 환경위해물질과 옥내공해준위의 확인, 특성규명, 모니터링 및 측정 등을 포함한다. 특히, 이 법령의 궁극적 목표는 일반 대중에게 발암물질(Carcinogens)에 관한 정보를 보급하는데 있다. 그러나 본 서술논문에서는 옥내 공기중에 존재하고 있는 이른바 라듐(^{226}Ra)의 알파(α) 붕괴생성물인 라돈(^{222}Rn)기체의 측정과 분석에 관하여 옥내에서의 보건 및 환경평가의 일환으로 정리해 보고자 한다.

1. 머리말

일상생활중에 라돈(^{222}Rn)에 노출될 수 있는 세가지의 주요 근원은 (1) 건물자재에 의하여 방출되는 라돈, (2) 토양으로부터 방출되는 옥외라돈 및 (3) 건물의 배선·배관을 위한 좁은 공간을 통하여 옥내로 스며드는 옥외라돈이라 할 수 있다. 기후가 온화한 지역에서 옥내라돈의 농도는 옥외라돈의 농도에 비하여 평균적으로 약 8~10배나 되고 있다.⁽¹⁾ 실례로 Figure 1에서 토양, 건물자재 및 수도물에서 방출되거나 또는 외부환경으로부터 옥내로 스며들어 온 라돈의 평균농도(Bq/m^3) 범위가 주어져 있다. 공기중에 존재하는 라돈은 알파(α) 및 베타(β)붕괴과정에 따라 단수명의 자핵종(^{222}Rn progeny)으로 핵변환됨으로써 옥내에서의 라돈 및 그 자핵종의 농도가 공간적 및 시간적으로 변하게 되어서 옥내 공기시료의 채취 및 분석은 복잡해진다.

따라서 라돈측정에서는 라돈농도의 일주

적(diurnal) 및 계절적(seasonal) 변화를 고려하여 조건에 맞는 측정계획을 세워야 한다. 라돈은 그 자핵종(^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi 및 ^{214}Po) 보다 훨씬 느리게 붕괴하지만 그러나 시료 채취 후 시간에 따른 시료의 조성변화를 최소화 하기 위하여 라돈분석을 가급적 빨리 수행해야 하는 것을 고려할 때 ^{222}Rn 은 반감

기가 3.823일로서 상대적으로 빠른 속도로 붕괴하므로 그 분석이 까다로운 것이다.

2. 시료 채취(Sampling)

라돈측정을 위한 공기시료의 수집은 즉시적 채취, 연속적 채취 및 통합적 채취에 의하여 달성될 수 있다. 즉시적 채취방법으로 수집된 공기시료는 그 시료가 취해진 특정 시각에 라돈농도를 결정하는데 사용된다. 그러나 연속적 시료채취방법은 근접한 시간간격으로 많은 측정을 함으로써 전체 시료채취시간에 걸쳐 전개되는 공기중 라돈농도의 변화양상을 결정해 주는 반면에 통합적 채취방법에서는 장시간에 걸쳐 단일시료를 채취하여 채취기간에 공기중 평균라돈농도를 결정한다.⁽³⁾ 공기시료 채취중 라돈은 그 자핵종으로부터 분리될 수 있는데 라돈의 그 자핵종으로부터의 분리는 라돈을 기포고무(foam rubber)와 같은 수동장벽(passive barrier)을 통하여 확산시킴으로써 달성될 수 있다. 라돈 자핵종은 공기시료중 부유입자와 고체표면에 신속히 흡착되어 그러한 수동장벽을 통과할 수 없다.⁽⁴⁾ 참고로 Table 1에 시료채취시간이 주어져 있는데 채취시간 5분의 경우는 오직 ^{222}Rn 에서 방출되는 α 입자만의 검출을 가정한 것이다.

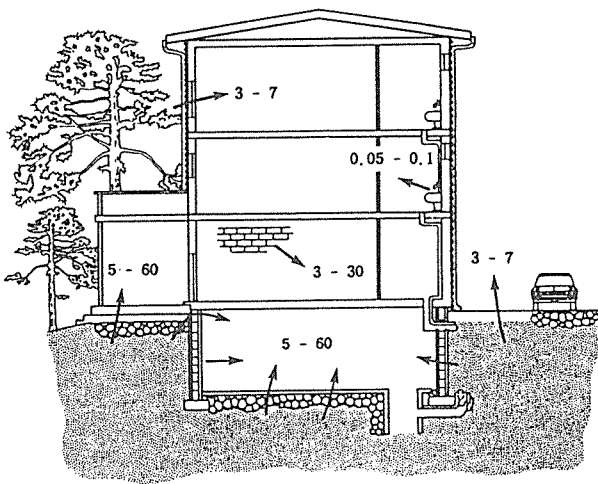


Figure 1 Average Ranges of Indoor Concentration, In Bg/m³, of Radon Emanated from Soils, Building Materials and Waters or Coming from Outside.⁽²⁾

Table 1. Sampling Times for Different Radon and/or Radon Progeny Measurement Techniques⁽⁵⁾

Instrument	Sampling Times
Grab Rn	5 minutes
Grab WL ^(a)	5 minutes
Continuous Rn monitor	6 hours minimum ; 24 hours or longer preferred.
Continuous WL monitor	6 hours minimum ; 24 hours or longer preferred
RPISU ^(b)	100 hours minimum ; 7 days preferred
Charcoal canister	2 to 7 days
Alpha(α) track detector	3 months desirable ; less for some cases
E-PERM ^(c)	Days to months ; can be reused number of times

(a) WL=Working Level ; see text 3.2 for detail.

(b) RPISU=Radon Progeny Integrated Sampling Unit.

(c) E-PERM=Electret-Passive Environment Radon Monitor.

3. 측정과 분석

3.1. 라돈 측정

한 건물내에서도 라돈과 그 자핵종의 농도는 장소에 따라 그 값이 변할 수 있다. Figure 1에서와 같이 옥내에서 라돈농도가 다른 것은 라돈 발생원으로부터의 거리와 각 장소에서의 환기조건이 서로 다른데에서 기인한 것이다. 그러므로 한 건물의 다른 층에서는 각각 별도로 측정을 수행하는 것이 통례적이다. 옥내에서의 라돈 혹은 라돈자핵종을 측정하는 기법은 능동적 및 수동적 방법의 두가지 부문으로 나누어 진다.⁽⁶⁾ 수동적 방법은 능동적 방법에서 필요한 펌프나 전문적 공기시료 채취장비를 필요로 하지 않는다. 활성탄canister와 α 비적검출기는 라돈측정을 위한 수동적 방법에 사용이 편리하며 비교적 저렴한 비용으로 옥내에서 간단하게 사용할 수 있다. 이러한 수동적 방법은 측정기기의 사용시간에 대하여 평균 또는 통합하므로 측정상 편익을 준다. 라돈

측정에서 시간평균치는 라돈농도의 일주변화는 물론이고 계절변화를 고려할 때 매우 중요한 의미를 갖는다. 한편, 능동적 방법에 의한 라돈측정에서는 숙련된 공기시료 채취팀과 전문장비가 요구된다. 능동적 방법에는 연속적 모니터링, 즉시적 시료채취 및 라돈 자핵종통합용 시료채취기가 포함된다. 이와 같이 능동적 방법은 특정한 장비와 숙련된 공기시료 채취팀을 필요로 하므로 비교적 많은 비용의 지출이 수반된다. 따라서 옥내에서의 초기 라돈측정에는 능동적 방법이 별로 도입되지 않는다. 이러한 관점에서 미국 EPA는 옥내에서의 라돈피폭량을 결정할 목적으로 대체 측정방법에 의한 옥내 라돈 측정지침을 정하였다.^(7, 8) EPA지침서에 의하면 2단계의 라돈측정 전략이 추천되고 있다. 즉, 초기선별측정과 추가후속측정이 바로 그것이며 1단계로 선별측정의 결과가 라돈농도로서 약 4 pCi/L(약 0.02 WL)를 초과하면 2단계로 후속측정의 필요성을 추천하고 있다.⁽⁶⁾ 참고로 라돈측정기기를 Table 2에서

Table 2. A Summary of Currently Available Radon Measurement Devices^(3, 4)

Instrument Type	Application	Sensitivity ^(a)	Purpose
<u>Direct measurement</u>			
Scintillation cell	Grab or continuous	<3.7 Bq/m ³	Screening Diagnostic
Ionization chamber	Grab or continuous	<3.7 Bq/m ³	Screening Diagnostic
<u>Passive barrier method^(b)</u>			
Scintillator	Continuous	<3.7 Bq/m ³	Screening Diagnostic
TLD chip	Integrating	0.8 - 8.1 Bq/m ³	Screening Large-scale survey
<u>Two-filter method</u>			
	Grab or continuous	<3.7 Bq/m ³	Diagnostic
<u>Passive sampling</u>			
Activated charcoal	Integrating	7.4 Bq/m ³ for 100 h exposure	Screening Large-scale survey
Alpha(α) track	Integrating	<18.5 Bq/m ³ for 30 d exposure	Screening Large-scale survey

(a) Defined as the lowest quantity which can be distinguished from background with a 95% Large-scale confidence level.

(b) Defined as the passive barrier with collection of radon progeny on scintillator and TLD chip.

요약해 열거한다. 그러나 Table 2의 요약 내용중 Screening, Diagnostic 및 Large-scale survey는 다음과 같이 각각 설명된다.

- Screening : 라돈농도가 높게 나올 수 있는 장소에서 신속하고도 저렴하게 라돈평가를 수행할 수 있음.
- Diagnostic : 자세한 라돈분석을 위하여 단기간의 공간적 및 시간적 변화, 다른 요인과의 연관성, 라돈자핵종의 평형분률 및 개선조치의 효과와 같은 특정한 매개변수의 측정을 수행할 수 있음.
- Large-scale survey : 일반공중에 대한 라돈피폭을 평가할 목적으로 전국적, 지역적, 혹은 다른 광범위의 연구를 수행할 수 있음. 이 목적을 위하여 여러번의 시간평균에 의한 라돈측정이 요구된다. 라돈농도, $1 \text{ pCi/L} = 37 \text{ Bq/m}^3$

3. 2. 라돈 분석

라돈과 라돈자핵종에 대한 분석방법은 Figure 2에서 라돈과 라돈자핵종의 연쇄적 붕괴과정에서 방출되는 전리방사선을 실제적으로 측정하는 것이다. 이 연속붕괴에서 α 입자, β 입자 및 감마(γ)선이 방출되므로 적절한 측정이 가능하다. 라돈의 측정과 분석에서 라돈농도는 보통으로 Bq/m^3 혹은 pCi/L 로 나타내는 반면에 라돈자핵종의 농도는 WLM(working level months)로 나타낸다. Figure 2에 도시된대로 거시적 고체(glass)에서의 폴로늄(^{210}Po)의 방사능을 α 분광분석방법에 의하여 측정함으로써 축적된 라돈농도를 산출할 수 있다.⁽⁹⁾ 옥내의 라돈자핵종의 농도를 표기함에 있어서 1 WLM는 주위의 온도와 압력하에서 궁극적으로 10의 공기중 단수명의 라돈자핵종(^{218}Po , ^{214}Pb , ^{213}Bi 및 ^{214}Po)에 의해서 발생하는 α 에너지의 총합으로써 $1.3 \times 10^5 \text{ MeV}$ 에 해당하는 양으로서 100 pCi의 라돈과 평형을 이루고 있는 단수명의 라돈자핵종에 의하여 장시간에 걸쳐서 방출되는 에너지의 총량과 대략 같다. 따라서 1 WLM은 1개월동안 1 WL에 피폭되는 170 WLhours에 해당된다.⁽¹⁰⁾ 여기서 170

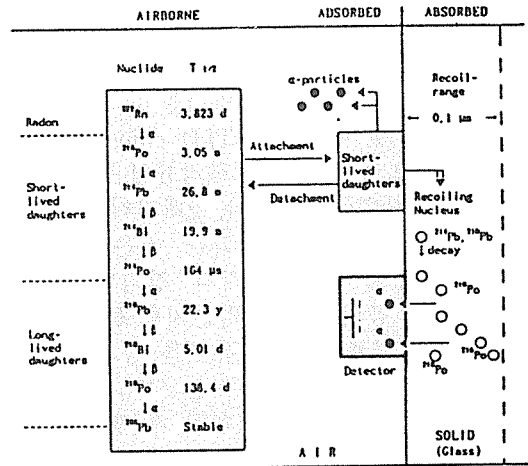


Figure 2. A Schematic Illustration of ^{222}Rn Decay Series and Radon Daughters' Behaviors in Air and Solid (Glass).^(9, 10)

hours는 1개월동안 일하는 시간에서 도입된 값이다. WL의 정의에서 사용된 $1.3 \times 10^5 \text{ MeV}$ 의 잠재적 α 에너지는 공기중 라돈자핵종의 농도를 인간의 폐(lung)에 영향을 끼치게 되는 α 입자 방사선량과 관련하여 사용한 것이다. 그러므로 총 α 에너지는 보건물리에서 일차적 관심의 대상인 단수명 라돈자핵종의 농도측정으로부터 산출되어야 한다. 실제적으로 라돈 및(또는) 라돈자핵종의 분석은 섬광형광체, 이온전리함, 열발광선량계(TLD), 또는 비적영상처리에 의하여 전형적으로 달성된다. Tables 1과 2에 제시된 공기시료의 채취시간과 라돈측정기기를 합당하게 조합하여 라돈과 그 자핵종의 분석에 도입하여야 측정의 정확성을 높일 수 있다. 공기중 라돈분석을 위한 신속한 즉시적 시료채취 방법은 연속라돈monitor를 사용하여 수행된다. 이 방법에서 공기는 필터를 통하여 섬광cell속으로 주입된다. 섬광cell은 황화아연(ZnS)으로 칠해져 있어서 라돈붕괴 α 입자에 의하여 섬광을 발생시킨다. 이 섬광펄스의 강도로부터 확실한 라돈농도를 산출하기 위하여 연속라돈monitor를 정밀하게 교정해야 한다. 한편, 이온전리함은 공기중 라돈을 측정하는데 사용될 수 있다. 이온전

리함에 생기는 전류의 세기는 라돈농도에 직접적으로 비례한다. 열발광선량계(TLD)는 라돈과 라돈자핵종의 방사능을 통합측정하는데 사용될 수 있다. TLD chips의 재료는 전형적으로 플루오르화리튬(LiF) 혹은 플루오르화칼슘(CaF₂)이다. 2개필터 방법에서는 길이가 30~100 cm되는 작은 튜브의 입구와 출구에 필터를 각각 장착함으로써 입구필터는 공기시료중 라돈자핵종을 흡수하고 출구필터를 라돈이 튜브를 통과하면서 α붕괴하여 생성시키는 폴로늄(²¹⁸Po)을 흡수한다. 이와같이 시료를 채취한 후 필터를 제거하고 α방사능을 측정한다. 이 방법은 출구필터에 TLD chips를 부착하여 라돈의 연속 및 통합모니터링에도 적용해 왔다.⁽³⁾ 시료 공기중 라돈은 활성탄의 표면에 흡착될 수 있으므로 섬광cell을 이용하여 활성탄으로부터 라돈의 재방출, 활성탄을 가열하여 생기는 탈착된 라돈의 γ선 방출 및 활성탄을 액체섬광용액에서 용해시켜 라돈의 α입자를 각각 계측함으로써 라돈농도를 분석할 수 있다.⁽³⁾ α비적검출방법에서는 적절한 비적검출물질⁽¹¹⁾을 사용하여 정해진 기간동안 라돈을 포함하고 있는 공기중에 α검출기를 노출시킨다. 라돈측정시간이 경과된 후 α검출기의 비적검출물질을 수집하여 화학적 처리과정(chemical etching)후에 α비적의 총수를 계수함으로써 라돈을 분석할 수 있다. 근래에 라돈농도를 측정하기 위하여 E-PERM이라고 하는 환경라돈 피동모니터가 개발되었다. 이 장치에는 정전기를 갖고 있는 플라스틱 disc형 electret가 필터에 의해서 미립자가 제거된 작은 canister내에 장착되어 있어서 라돈이 필터를 통과하면 공기시료중에 약간의 음성전하를 유도하여 음이온이 electret표면으로 모이게 되어 전압이 발생되며 그 측정된 전압은 채취된 공기시료중의 라돈농도에 비례한다.⁽⁵⁾

라돈자핵종의 측정원리는 라돈측정의 경우와 비슷하다. 그러나 시료채취와 분석을 위한 접근방법은 상당히 변경되어야 한다. 라돈기체는 필터를 통과할 수 있으나 라돈

자핵종은 필터의 부대입자물질에 흡착되기 때문에 필터를 통과하면서 제거된다. Table 3에서는 라돈자핵종의 측정기술에 관하여 요약된다. 그러나 라돈측정의 경우에서 처럼 라돈자핵종을 위한 측정기기의 활용은 역시, 즉시 채취 및 연속측정 혹은 통합측정의 세부문으로 분리될 수 있다.

4. 맺 는 말

이상의 본문에서 서술된 바와 같이 현재 보통으로 활용할 수 있는 라돈측정 기법이 여러가지로 정리되었다. 라돈측정 및 분석데이터를 획득함에 있어서 신속성이 데이터의 신뢰성보다 더 중요할 경우 즉시적 시료채취방법과 활성탄canister의 사용이 유리한 것이다. 그러나 시간통합적 접근으로 양질의 데이터가 요구될 때는 α비적검출기 혹은 장기적 연속모니터링이 반드시 수용되어야 한다. Tables 1, 2 및 3에는 옥내에서의 라돈데이터를 결정함에 있어서 시료 채취시간, 라돈 및 라돈자핵종의 측정과 분석에 관한 유용한 내용들이 요약되어 있다. 그러나 여기서 다음의 두가지 사항이 강조되어야 한다. 즉, 단일의 라돈분석은 어떤 것이라도 한개의 라돈데이터만을 제공한다는 것과 옥내라돈을 위한 예산을 알맞게 결정하는데는 시간이 걸리고 많은 비용을 요구한다는 것이다. 그렇지만 옥내라돈의 측정결과가 4 pCi/L 이상이 되면 주거건물을 보수하라고 미국 EPA는 추천하고 있다. 라돈에 대한 시민 Guide에 의하면,⁽¹⁵⁾ 미국에서 매년 라돈에 기인되는 폐암사망자 수가 약 14,000명에 이르고 있다. 참고로 Table 4에는 라돈자핵종에 의한 폐암유발의 위험성을 예측하는 독립적 연구결과가 연도순으로 주어져 있다. 결국, “라돈측정의 표준화”는 그 중요성과 시급성이 아무리 강조되어도 지나치는 바가 아니라 하겠다. 끝으로, 미국의 국립표준기술원(NIST)이 국제적 1차 라듐질량표준⁽¹⁶⁾과 연계하여 라듐 및 라돈표준을 세계적으로 보급하고 있는 유일한 연구기관임을 강조하고자 한다.

Table 3. A Summary of Currently Available Radon Progeny Measurement Devices⁽³⁾

Instrument type	Application	Sensitivity ^(a)
Kusnetz-Tsviglou ^(12, 13) and modifications	Grab or continuous	0.0005 WL
Passive alpha(α) track	Integrating	Several WLh
Alpha(α) track with pump	Integrating	1 WLh
TLD with pump	Integrating	0.0005 WL
Filter and pump with surface barrier	Integrating	0.005 WL or less

(a) Defined as the lowest quantity which can be distinguished from background with a 95% confidence level.

Table 4. Estimates of Lung Cancer Risk Among Population Exposed to Radon Daughters(1, 14)

Institution	Year	Lung Cancers/ Persons WLM ^(a)
UNSCEAR	1977	200~450
BEIR	1980	730
AECB	1982	600
NCRP	1984	130
EPA	1986	115
BEIR IV	1987	350
ICRP	1987	170
UNSCEAR	1988	150~450
EPA	1989	360
ICRP	1990	360
KAERI	1991	230

(a) 1 WLM = 6.29×10^5 Bq · h/m³(EEC).^(b)

(b) EEC = Equilibrium Equivalent Concentration of ²²²Rn.

참 고 문 헌

- M. Maroni and M. A. Berry, eds., *Pilot Study on Indoor Air Quality*, CCMS Report No. 183, (1989).
- ICRP, *Lung Cancer Risk from Indoor Exposures to Radon Daughters*, ICRP Publication 50, (1987).
- C. R. Cothorn and J. E. Smith, Jr., eds., *Environmental Radon*, Plenum Press, New York, NY, (1987).
- U. S. EPA, *Indoor Air-Assessment*, EPA/600/8-90/041, (1990).
- D. G. Brookins, *The Indoor Radon Problem*, Columbia University Press, New York, NY, (1988).
- U. S. EPA, *Application of Radon Reduction Methods*, EPA/625/5-88/024, (1988).
- U. S. EPA, *Interim Indoor Radon and Radon Decay Product Measurement Protocols*, EPA-520/1-86-4, (1986).
- U. S. EPA, *Interim Protocols for screening and Follow-up Radon and Radon Decay Product Measurements*, EPA-520/1-86-014, (1987).
- C. Samuelsson, *Nature* 334, 338-340 (1988).
- B. Shleien, ed., *The Health Physics and Radiological Health Handbook*, Scinta, Inc., Silver Spring, MD, (1992).
- G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons, New York, NY, (1988).
- H. L. Kusnetz, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 17, 85~88 (1956).
- E. G. Tsviglou et al., *Nucleonics* 11, 40 (1953).
- S. Y. Chang et al., *Radiation Protection Desimetry* 42, 127~132 (1992).
- U. S. EPA, *A Citizen's Guide To Radon*, ANR-464, (1992).
- U. S. NIST, *Journal of Research of the NIST* 98[1], 153 (1993).