

건축자재 라돈 저감·관리 지침서

2019. 11

관계부처 합동



환경부
환경보건정책과

국토교통부
주택건설공급과

원자력안전위원회
생활방사선안전과

목 차

I. 서 론	1
1. 배경 및 목적	
2. 추진경과	
3. 지침 개요	
II. 라돈의 일반적 특성	3
1. 생활 속 라돈의 특징	
2. 실내공기 중 라돈 측정시의 주의사항	
III. 국내·외 관리현황	5
1. 우리나라 부처별 관리현황	
2. 국외의 건축자재 라돈 관리	
IV. 관리방안 검토 및 분석결과	10
1. 건축자재 라돈 관리 대안별 검토	
2. 주요자재 표본조사	
V. 건축자재 라돈 저감·관리 지침	15
1. 방사능 농도 지수를 활용한 건축자재 관리	
2. 적용범위 및 적용시점	
VI. 부록	17

1. 배경 및 목적

2018년 10월경부터 언론 보도를 통해 공동주택 내 마감재로 사용되는 화강석·대리석 등 석자재로부터 방출되는 '라돈' 관련 이슈가 제기되었다.

이에 따라 관계부처 합동으로 라돈을 방출하는 건축자재의 관리 필요성과 관리방안 등을 검토하였으며, 국민과 관련 업계를 대상으로 정보를 제공하기 위해 본 지침서를 마련하였다.

동 지침서의 제공을 통해 잘못된 정보는 바로잡고 건축자재로부터 발생하는 라돈의 영향은 최소화하여 국민 건강보호 및 사전예방적 관리가 가능하도록 하고자 한다.

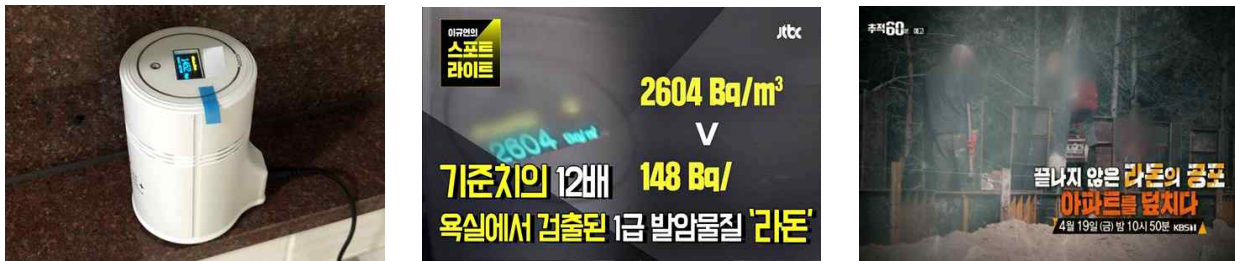


그림1. 건축자재 라돈 관련 보도(출처 : 연합뉴스, JTBC, KBS)

2. 추진경과

환경부는 이와 관련하여 2018년 12월 연구용역 '건축자재 라돈 관리필요성 및 규제방안 검토에 관한 연구'를 발주하였다. 동 연구를 통해 국외의 건축자재 라돈 관리현황을 조사하여 국내에 적용가능한 관리방안 등을 검토하였고, 시중에 유통되는 석재의 라돈 방출량을 측정·분석하여 실내 공기질에 미치는 영향을 확인하기도 하였다.

동 연구용역의 추진과정에서 환경부, 국토교통부, 원자력안전위원회 3개 부처 합동으로 국무조정실 주도하에 관리방안을 검토하였다. 연구에서 얻어진 결과 등을 토대로 국민과 관련 업계에 정보를 제공하기 위한 지침을 마련하는 방향으로 관리를 강화하기로 협의, 전문가·업계 등의 의견수렴을 거쳐 내용을 확정하게 되었다.

3. 지침 개요

- (관리방안) 공동주택의 시공자는 건축 내장재로 사용되는 천연석 기반 자재에 포함된 천연 방사성 핵종(^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K)의 방사능 농도를 분석하여 지수값이 1을 초과하는 자재는 사용하지 않을 것을 권고

◆ 방사능 농도 지수(I)

$$I = \frac{C_{\text{Ra}226}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{\text{Th}232}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{\text{K}40}}{3000 \text{ Bq/kg}} \leq 1$$

- $C_{\text{Ra}226}$, $C_{\text{Th}232}$, $C_{\text{K}40}$ 은 각각 고체 라듐-226(^{226}Ra), 토륨-232(^{232}Th), 포타슘-40(^{40}K)의 방사능 농도(Bq/kg)

- (분석방법) 감마핵종분석법, 유도결합플라즈마 질량분석법(ICP-MS) 중 한 방법으로 방사능 농도 분석을 실시, 지수를 평가

※ 천연석 기반 자재의 방사능 농도 분석에는 분석결과의 대표성 확보를 위해 상대적으로 많은 양의 시료를 사용하는 감마핵종분석법이 보다 적절

- (적용대상) 공동주택에 건축 내장재로 사용되는 천연석 기반 자재

* 예시) 욕실 상판, 현관 바닥재, 아일랜드 식탁 등에 사용되는 화강석·대리석 등 석재

- (적용시점) 2020년 6월 1일부터

1. 생활 속 라돈의 특징

라돈의 생성 및 특성

암석, 토양 등에 자연적으로 존재하는 우라늄(^{238}U)이 방사성 붕괴를 하면서 자연적으로 라듐(^{226}Ra)이 만들어지고, 이 라듐이 붕괴하여 생성되는 자연 방사성 기체가 바로 라돈(^{222}Rn)이다.



라돈은 무색, 무취, 무미의 기체로 사람이 존재를 직접 느낄 수 없는 비활성 기체이다. 다른 물질과 화학적 반응을 하지 않지만, 물리적으로는 불안정하여 방사선을 방출하며 붕괴한다. 반감기는 3.82일 정도이다.

토론(^{220}Rn)은 토륨(^{232}Th)이 붕괴하여 생성되는 라돈(^{222}Rn)의 동위원소이다. 라돈(^{222}Rn)과 비교할 때 반감기가 매우 짧아(55.6초) 실내공기 중에 체류할 가능성이 낮기 때문에 인체 위해성이 상대적으로 낮아지는 물질이다. 국외에서도 토론을 별도로 관리하고 있지 않다.

라돈의 인체 위해성

라돈은 세계보건기구(WHO)에서 1군 발암물질(Group I)로 분류한 물질이다. 라돈 기체 또는 라돈자손¹⁾이 미세입자에 달라붙어 호흡기로 들어간 후, 방사성 붕괴를 계속하면 이 과정에서 방출되는 알파선이 지속적으로 폐포나 기관지에 손상을 일으켜 장기적으로는 폐암을 유발할 수 있다.

다만, 단기간 고농도 노출로 폐암이 발생하기 보다는 수십년간 지속적으로 고농도에 노출되는 경우의 폐암 발생 위험도가 큰 것으로, 이러한 특성을 고려하여 세계 각국에서는 장기(90일 이상)측정을 기본으로 한 실내 라돈 농도 기준을 설정하여 관리하고 있다.

1) 라돈이 방사성 붕괴를 해서 생성되는 물질들로, 폴로늄(^{218}Po , ^{214}Po), 비스무스(^{214}Bi), 납(^{210}Pb) 등이 포함되며, 라돈이 비활성 기체 상태인 것과 달리 라돈자손은 고체입자상태로 되어있고 반응성이 높음

2. 실내공기 중 라돈 측정시의 주의사항

환경부의 실내공기질관리법 상 라돈 권고기준인 148 Bq/m^3 은 실내공기 중 기체상태의 라돈 농도를 대상으로 설정된 값이므로, 건축자재 표면에서의 측정결과와 이 값을 비교하는 것은 적절하지 않다. 실내공기 중 라돈 농도를 정확하게 측정하기 위해서는 건축자재, 벽, 바닥, 천장 등으로부터 50cm 이상 떨어뜨려 측정하는 것이 바람직하다.

- * 간이측정기로 실내 라돈의 수준을 파악하고자 하는 경우에도 정확한 라돈 농도에 근접한 측정값을 얻기 위해서는 측정조건을 준수하는 것이 바람직하며, 고농도 물체 측정 직후에는 물질 잔류효과가 나타날 수 있으므로 충분한 시간을 방치한 뒤 측정해야 함

또한, 건축자재의 표면에는 라돈(^{222}Rn) 뿐만 아니라 토론(^{220}Rn)도 고농도로 존재할 수 있는데, 이 때 일부 측정기기는 토론의 농도를 함께 측정하여 라돈이 고농도인 것처럼 표시할 수 있다. 그러나 토론은 반감기가 55.6초로 짧아 방출 이후 즉시 확산·희석되고, 단기간에 방사성 붕괴를 거쳐 사라지므로 인체에 영향을 미칠 가능성이 낮다. 따라서 건축자재 표면의 측정값을 라돈이 높은 농도로 방출된 것으로 오인하여 건강상 악영향을 우려할 필요는 없다.

실제로 간이측정기로 표면측정시 농도가 높게 나타난 석재를 국립환경과학원에서 분석한 결과, 석재에서 방출 직후 확산·희석되어 농도가 크게 감소하였으며, 표면의 고농도는 높은 토론(^{220}Rn)의 농도가 주 원인이었던 것으로 나타났다.

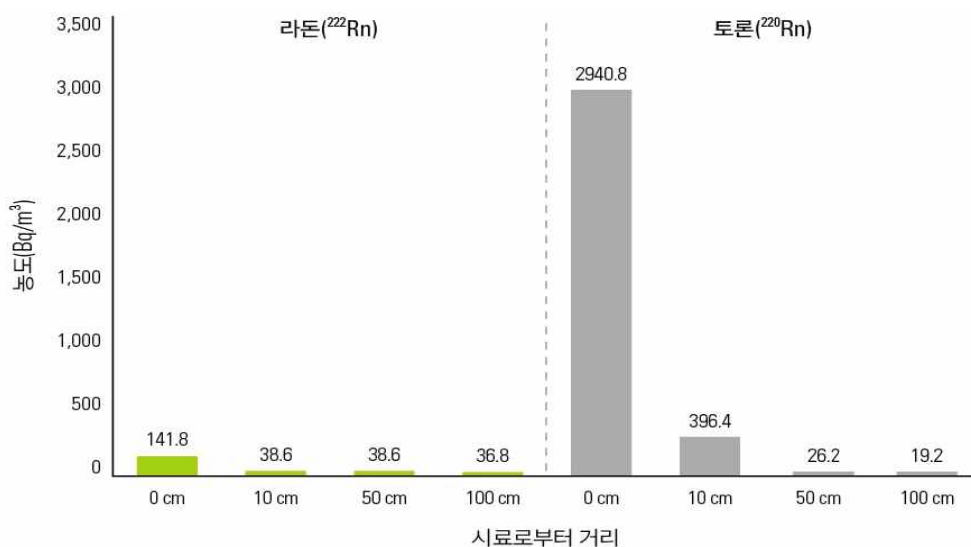


그림3. 아파트 욕실 석재 라돈·토론 측정 결과(챔버내 측정)

1. 우리나라 부처별 제도 현황

환경부

환경부는 「실내공기질관리법」에 따라 공동주택과 다중이용시설의 실내 라돈 농도 권고기준(148Bq/m^3)을 규정·관리하고 있으며, 신축공동주택의 경우 시공자가 주민 입주 이전에 실내공기질을 측정하여 공고·게시할 의무를 부여하고 있다.

◆ 신축공동주택 라돈관리(「실내공기질관리법」 시행규칙 제7조)

- (적용대상) 신축 공동주택 시공자(라돈은 '18.1.1. 이후 사업계획을 승인받은 경우부터 적용)
- (측정세대) 100세대(3지점), 100세대 이상(3지점 + 100세대마다 1지점 추가)
- (조치사항) 측정결과를 주민 입주 7일전부터 60일간 입주민이 잘 볼 수 있는 곳에 게시하고 지자체의 장에게 제출
※ 지자체는 측정자료를 공보 또는 인터넷 홈페이지 등에 공개 가능

또한, 같은 법에서 일부 오염물질의 '건축자재 오염물질 방출기준'²⁾을 설정하고 있으나, 동 기준에는 라돈이 포함되어있지 않다. 건축자재 오염물질 방출기준이 있는 톨루엔, 폼알데하이드 등 타 오염물질과는 다르게 라돈은 측정조건 등에 따른 방출량의 변동이 커 국제적으로도 표준화된 측정방법이 없기 때문이다. 이러한 라돈의 특성 탓에 외국에서도 사람이 호흡하는 최종단계인 실내공기질의 기준을 설정하여 관리하고 있다.

한편, 마감재, 바닥재, 장식재 등 일부 건축자재의 경우에는 환경표지 인증 항목 중 하나로 방사능 지수를 평가하도록 하고 있으나, 이는 환경표지를 취득하고자 하는 자재업자가 자발적으로 신청하는 체계이므로 강제성이 없다.

2) 접착제, 페인트, 실란트, 퍼티, 벽재, 바닥재를 대상으로 폼알데하이드, 톨루엔, 총휘발성유기화합물의 방출기준(기준 면적에서 시간당 방출되는 물질의 양)을 설정

국토교통부

국토교통부는 「건축법」, 「주택법」 등의 법령에서 건축자재의 단열성, 내구성 등 물리적 특성과 관련된 기준을 설정하고 있다. 또한 오염물질의 방출기준 등에 관하여는 일반적으로 「실내공기질관리법」을 준용(「건축법령」)하거나, 일정 세대 수 이상의 공동주택을 대상으로 보다 강화된 기준을 설정(「주택법령」)하여 건축자재를 관리하고 있다.

환경부의 「실내공기질관리법」과 마찬가지로, 동 기준에는 폼알데하이드, 톨루엔 등 물질의 방출기준이 존재하며 라돈은 포함되어 있지 않다.

원자력안전위원회

원자력안전위원회는 「생활주변방사선 안전관리법」에 따라 원료물질, 공정부산물 및 가공제품에 함유된 천연방사성핵종에서 방출되는 방사선을 관리하고 있다. 천연방사성핵종(우라늄-238, 토륨-232, 라돈-222 및 라돈-220, 포타슘-40 등)이 일정 방사능 농도와 수량을 초과하는 물질을 '원료물질'로 정의하고, 원료물질 등의 취급시설에서 부수적으로 발생하는 물질을 '공정부산물', 원료물질 또는 공정부산물을 가공하거나 이를 원료로 제조한 제품을 '가공제품'으로 정의한다.

원료물질·공정부산물은 방사능 농도 기준을 초과할 경우 취급자 등록, 수출입·처리·처분 시 신고 등 관리를 적용하고 있으며, 가공제품은 제품에서 방출되는 방사선에 의해 사람이 피폭되는 양이 기준에 적합하지 않을 경우 제조업자가 보완·교환·수거·폐기 등 조치를 하도록 의무를 부여하고 있다.

◆ 생활주변방사선 안전관리법 상 기준

- (원료물질) 0.1Bq/g 이하(포타슘-40은 1Bq/g), 연간 취급량 100,000 Bq
- (공정부산물) 0.5Bq/g 이하(포타슘-40은 5Bq/g)
- (가공제품) 제품으로 인한 노출 시나리오를 설정하여 계산한 피폭선량이 1mSv/년 이하

다만, 건축자재의 경우, 침대 등 호흡기 밀착형 제품과는 달리 노출 특성이 달라 건축자재별로 호흡기 및 신체와의 거리, 사용·근접시간 등을 고려해야하는 노출 시나리오³⁾ 구성에 현실적 어려움이 존재한다.

3) 호흡기 및 신체와의 거리, 제품을 사용하거나 제품에 근접해 체류하는 시간 등을 고려

2. 국외의 건축자재 라돈 관리

건축자재 라돈의 관리 필요성

국외사례와 문헌 등을 조사한 결과, 라돈과 관련해서는 국외에서도 건축자재를 별도로 규제하기 보다는 호흡기로 들어와 영향을 미치는 라돈의 특성을 고려하여 실내공기질 기준을 설정·관리하고 있다.

국가/기관		내용
국제기구	WHO	100Bq/m ³ 을 권고, 국가여건에 따라 어려울 경우 300Bq/m ³ 이하에서 권고
	ICRP	300Bq/m ³ 을 권고, 각국은 300Bq/m ³ 이하에서 가능한 한 낮게 유지
독일		100 Bq/m ³
미국		148 Bq/m ³
영국		200 Bq/m ³
캐나다		200 Bq/m ³
스웨덴		200 Bq/m ³
체코		신축은 200Bq/m ³ , 기축은 400Bq/m ³
아일랜드		가정은 200Bq/m ³ , 직장·학교는 400Bq/m ³

표1. 주요국가/기관의 라돈 관리기준 현황

대부분 자료에서 실내 라돈의 주요 발생 원인은 토양이므로 이에 대한 관리의 필요성을 언급하고 있으며, 건축자재를 대상으로는 라돈만을 관리하기보다 방사선 전반에 대한 관리를 권고하고 있다.

◆ 건축자재 라돈 관리 필요성 관련 국외 자료

• 국제방사선방호위원회(ICRP)

- 피폭발생 가능성, 피폭자 수 및 개인선량 크기는 경제적, 사회적 인자를 고려해 합리적으로 낮게 유지(최적화)하며, 참조준위(라돈 10mSv/y)이하로 관리 권고

• EU 방사선 방호 지침(RP112, '99)

- 실내 라돈의 주요 원인은 토양이나, 일부 국가에서는 건축자재가 중요한 원인이 될 수 있음
- 건축자재가 실내 라돈의 주요원인일 경우 우선 해당 자재의 사용을 피하는 것이 바람직
- 건축자재 내 천연방사성물질로 인한 일반인의 피폭을 줄이고자 방사능 농도 지수(I)를 개발, 선별도구(Screening tool)로 도입을 권고

• **UN 방사선영향 과학위원회(UNSCEAR, '00)**

- 건축자재는 그 자체로 자연방사성 핵종을 포함하고 있으며, **실내 방사선량에 최대 30%까지 기여할 수 있음**

• **기타 연구자료**

- 건축자재는 **천연 방사성 핵종**을 포함하고 있어 **감마선**에 대한 상당한 노출을 결정하고, **실내 라돈 농도에 기여할 수 있음**(Trevisi 외, '18)

- **화강석, 대리석, 세라믹** 등 상대적으로 높은 방사능을 가지는 자재가 실내 장식용으로 사용될 때 잠재적인 문제가 될 수 있음(Saad 외, '14)

유럽의 건축자재 관리사례

한편, 유럽(EU)의 경우에는 해당 지역의 기반 지질대 등 영향으로 건축자재의 방사능에 대하여 과거부터 관심을 갖고 지속적으로 규제·관리방안 마련을 추진하여오고 있었다.

대표적으로는 1999년 발표한 지침인 'EC RP112 - 건축자재의 자연방사능에 관한 방사성 방호 원칙'이 있으며, 동 지침에서 감마선에 의한 외부피폭을 제한하기 위한 선별도구로 방사능 농도 지수⁴⁾의 도입을 권고하고 있다.

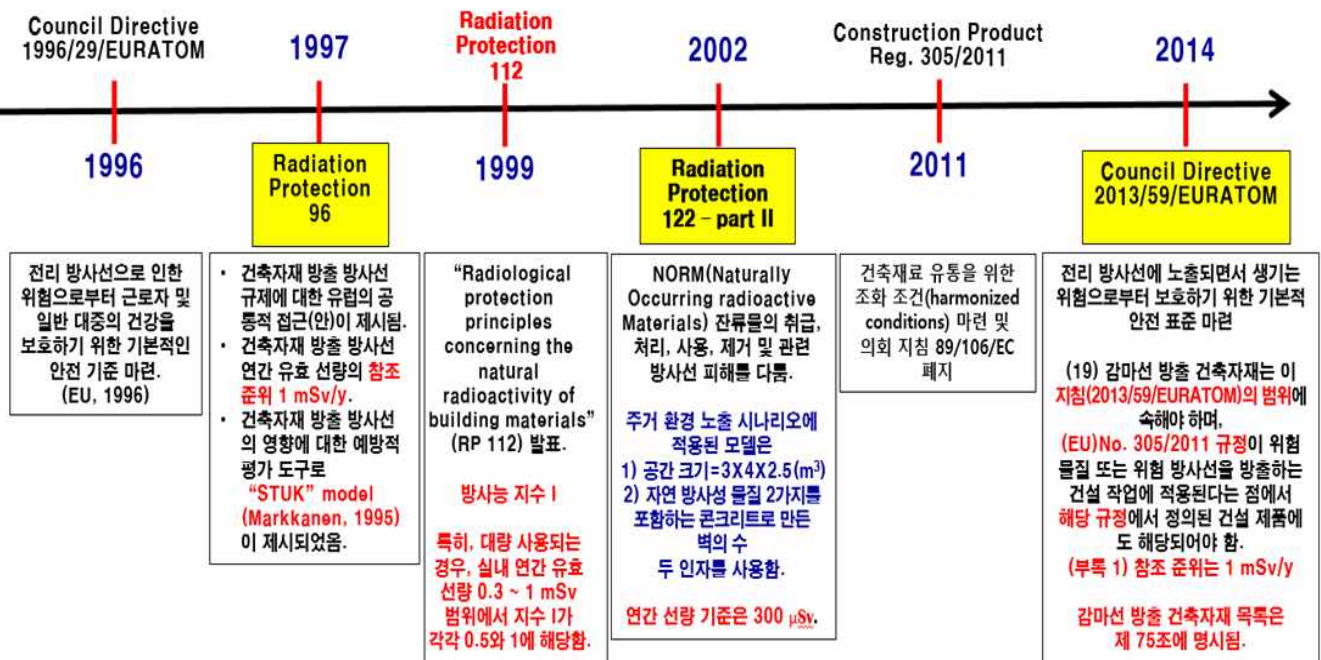


그림4. 건축자재 자연방사능에 대한 EU의 규제연혁

4) 자재에 포함된 천연 방사성 물질(라듐, 토륨, 포타슘)의 방사능 농도(Bq/kg)와 기준값의 비를 나타낸 지수(9p 내용 참고)

각 국가별로 관리하고자 하는 피폭선량에 따라 방사능 농도 지수를 변형하여 적용하고 있다. 자재업자가 지수를 표시하도록 하여 건설업자가 자재를 선별하는 경우에 확인할 수 있도록 하는 형태로, 주로 강제기준 보다는 권고기준의 형태로 운영되고 있다.

체코의 건축자재 관리사례

체코의 경우 전세계적으로 가장 강력한 방식으로 건축자재 방사능을 관리하는 국가로 볼 수 있는데, 이는 우라늄이 풍부한 기반암 지역에 위치하여 1980년대부터 자연 방사능 문제에 관심을 갖고 순차적으로 건축자재 관리를 추진해왔기 때문이다.

체코는 2017년 이전까지는 라돈의 이전단계 모핵종인 라듐(²²⁶Ra)의 함량의 기준을 설정하는 방식으로 건축자재를 관리해왔으나,

2017년부터는 법을 개정하여 방사능 농도 지수를 활용하여 건축자재를 관리하고 있다. 주거용 건물 또는 사람이 이용하는 공간을 가진 건축물에 사용되는 건축자재의 방사능 농도 지수값*이 기준치를 초과하는 경우 또는 당국(SONS⁵⁾의 허가를 받지 못한 경우 자국 내 시장 판매를 금지하고 있다.

$$* I = \frac{C_{Ra226}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{Th232}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{K40}}{3000 \text{ Bq/kg}} \leq 1$$

아울러, 건축자재의 공급자, 제조업자, 수입업자 또는 상인에게 다음의 사항을 준수하도록 하고 있으며, 이를 이행하지 않을 경우 범칙금을 부과하는 방식으로 관리하고 있다.

- 건축자재의 천연 방사성 물질 방사능 농도에 대한 체계적인 측정 및 평가
- 방사능 농도 지수의 측정 및 기타자료의 측정결과를 기록하고 SONS에 보고
- 측정결과를 일반 대중에게 제공

5) SONS : State Office for Nuclear Safety

1. 건축자재 라돈 관리 대안별 검토

현재 건축자재로부터 방출되는 라돈을 평가할 방법이 명확히 정립되지 않은 상황이므로, I~Ⅲ의 내용을 토대로 건축자재의 라돈 관리를 위한 대안을 3가지 선정, 각각의 적용 가능성을 검토하였다.

(1안) 방사능 농도 지수

가장 먼저 고려할 수 있는 방식은 유럽 국가에서 적용하고 있는 방사능 농도 지수로, EU에서 제시하고 있는 지수의 기본형태는 다음과 같다.

◆ 방사능 농도 지수 I (EU RP112 지침)

$$I = \frac{C_{Ra226}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{Th232}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{K40}}{3000 \text{ Bq/kg}} \leq 1$$

- C_{Ra226} , C_{Th232} , C_{K40} 은 각각 고체 라듐(^{226}Ra), 토륨(^{232}Th), 포타슘(^{40}K)의 방사능 농도(Bq/kg)

※ 국가별로 관리목표로 하는 피폭선량에 따라 분모(300, 200, 3000) 또는 우변의 값(1)을 수정할 수 있음

가상의 주거환경을 가정, 이 환경에서 특정 건축자재가 다량 사용되는 경우 그 건축자재에서 방출되는 감마선에 의한 외부피폭을 고려하여 설정된 지수로, 1이하를 만족하면 감마선 피폭선량이 1mSv/년 이하라는 의미이다.

또한, 동 지수를 만족할 때 실내 라돈 농도도 200 Bq/m³을 만족한 것으로 간주할 수 있다고 설명하고 있다. 그러나 라듐이 붕괴하여 기체 라돈으로 방출될 때 환경 조건⁶⁾의 영향을 많이 받으므로 라돈의 방출 정도는 간접적으로만 나타낼 수 있다는 단점이 있다.

장점으로는 국외에서도 제도화된 방식인 만큼 측정방법·기기·분석결과 등이 다수 존재하여, 도입을 위한 근거는 가장 확실한 것으로 볼 수 있다.

< 방사능 농도 지수(1안) >

- ▶ (장점) 국외 관리사례 및 과학적 근거 다수 존재, 표준화된 분석방법·기기 등
- ▶ (단점) 라듐 등 농도를 고려하는 간접적 방식, 낮은 라돈 농도가 담보되지 않음

6) 온도 및 습도, 자재 내부 공극률, 자재 내 방사성 물질의 분포위치(표면일수록 많이 방출) 등

(2안) 라돈 방출량

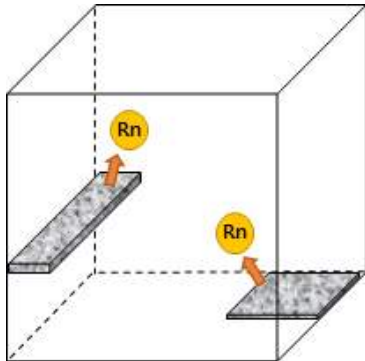
다음으로는 건축자재 오염물질 방출기준을 설정하는 방안을 고려할 수 있다. 이 방식은 환경부의 「실내공기질관리법」에서 건축자재로부터 방출되는 폼알데하이드, 톨루엔, 총휘발성유기화합물을 관리하고 있는 방식이다.

특정 면적 또는 질량에서 방출되는 시간당 오염물질의 양을 챔버실험을 통해 측정하여 관리하는 방식으로, 라돈의 경우 단위를 $Bq/m^2 \cdot h$ 또는 $Bq/kg \cdot h$ 로 나타낼 수 있다.

이 방식의 가장 큰 문제점은 자연 방사성 기체인 라돈의 특성상 측정 조건에 따라 방출량의 변화가 커, 현재 국제적으로도 표준화된 측정방법이 마련되어있지 않아, 새로이 측정방법과 관리기준을 마련해야 하는 점이다.

따라서 측정방법과 기준안 마련을 위한 연구를 실시, 석재로부터 방출되는 라돈에 대하여 다음과 같은 시나리오를 설정하였다.

◆ 건축자재 라돈 방출량 기준안 설정 시나리오



- 표준 평형 모델 공동주택(24평형, 34평형)의 현관 바닥, 욕실 선반에 건축 내장재로 석재가 최대 면적으로 시공
- 해당면적의 석재에서 방출되는 라돈이 공간(욕실 또는 실내 전체)에 미치는 영향을 분석
- 공간의 실내 라돈 농도를 권고기준($148 Bq/m^3$)의 5~10%* 수준으로 만드는 건축자재 라돈 방출량을 기준안으로 설정
- * 건축자재 외의 요인을 배제했을 때, 석재에서 방출되는 라돈만으로 실내 공간의 라돈 농도가 $7.4 \sim 14.8 Bq/m^3$ 을 넘지 않아야 한다는 의미

※ LH의 국민주택 표준 평형 모델에 따른 24평형, 34평형 공동주택의 공간 체적(m^3)을, 석공 관련 협회로부터 석재가 최대 시공된 면적(m^2)을 제공받아 활용하였음

챔버실험을 통해 측정방법의 초안을 마련하였으며, 이 때 욕실과 실내 전체 공간에서의 라돈 방출량 기준안을 다음과 같이 산출하였다.

구분		전체 공간*		욕실 공간**	
		$14.8 Bq/m^3$ (권고기준 10%)	$7.4 Bq/m^3$ (권고기준 5%)	$14.8 Bq/m^3$ (권고기준 10%)	$7.4 Bq/m^3$ (권고기준 5%)
방출량 기준 (단위 : $Bq/m^2 \cdot h$)	24평	84.10	42.05	14.97	7.48
	34평	79.82	39.91	19.16	9.58

* 현관바닥, 욕실 선반 시공 면적에 따른 전체공간에의 영향을 고려

** 욕실 선반 시공 면적에 따른 욕실 공간에의 영향을 고려

표3. 건축자재(석재) 라돈 방출량 기준(안)

< 라돈 방출량(2안) >

- ▶ (장점) 실내 라돈 농도와 직접 관련성, 기존 타 오염물질 관리체계와의 정합성
- ▶ (단점) 표준화된 측정방법의 개발을 위한 장기검토 필요

(3안) 표면농도 간이측정

작년부터 라돈 기준치를 초과하는 것으로 언론에서 보도되었던 사례들을 보면, 건축자재의 표면에 간이측정기를 올려놓고 측정한 뒤 이를 실내공기질 기준과 직접 비교한 경우가 많았다.

이는 측정기기의 본래 목적인 실내공기 중 라돈 농도가 아닌 자재 표면의 농도를 측정한 것이므로 잘못된 비교이다. 또한 많은 간이측정기가 라돈과 토론을 구분하지 못하는 문제도 있다.

다만, 이러한 상황에서도 지침값이 있다면 간편한 측정방법으로 관리가 가능하므로 간이측정기를 활용한 관리기준을 제시할 수 있을지, 제시할 수 있다면 어느 정도 수준을 안전하다고 판정할 것인지에 대한 검토를 진행하였다. 즉, 라돈과 토론의 합산값인 표면농도 간이측정값의 기준 마련 방안을 검토하였다.

이 경우, 자재별로 물질구성에 따라 라돈과 토론이 방출되는 양이 상이할 것이고, 토론의 위험 수준을 판단할 근거가 없으므로, 챔버실험에서 분석되는 라돈 방출량과의 상관성을 통해 아래와 같이 표면농도 기준안을 산출하였다.

구분		전체 공간		욕실 공간	
		14.8Bq/m ³ (권고기준 10%)	7.4Bq/m ³ (권고기준 5%)	14.8Bq/m ³ (권고기준 10%)	7.4Bq/m ³ (권고기준 5%)
표면농도 기준 (단위 : Bq/m ³)	24평	35,486.5	18,105.6	2,581.0	1,652.2
	34평	50,213.9	25,469.3	2,704.5	1,714.6

표4. 건축자재(석재) 표면농도 간이측정 기준(안)

방출량 기준과 마찬가지로 표면농도가 해당 수준일 때 실내 공간의 라돈 농도에 미치는 영향을 보는 것으로, 예를 들어 표면 간이측정 농도가 1,652.2 Bq/m³ 일 때, 24평형 공동주택 욕실의 실내 라돈 농도에 7.4 Bq/m³ 만큼 기여한다는 의미이다.

이 방법은 가장 쉽게 확인이 가능하므로 현장 적용성이 높다는 장점이 있지만, 상관성 분석 등을 실시하는 과정에서 많은 가정⁷⁾이 포함되었고, 간이측정기의 측정 신뢰도 등에 대한 문제가 있어 제도화를 위한 근거는 많이 부족한 것으로 판단된다.

< 표면농도 간이측정(3안) >

- ▶ (장점) 측정방법이 간단하고 쉽게 이해 가능, 현장 활용성이 높음
- ▶ (단점) 기준안 설정을 위한 다수의 가정 포함, 간이측정기의 신뢰도 문제

이상으로 3가지 대안에 대하여 장·단점을 비교·분석하여 검토하였으며, 항목별로 장·단점을 요약하면 다음 표와 같다.

구분	방사능 농도 지수(1안)	라돈 방출량(2안)	표면농도 간이측정(3안)
과학적 근거	높음 - 국제기구(ICRP) 권고사항 - 국외 관리사례 다수(유럽)	보통 - 선행연구자료 일부 존재 - 국제적으로 표준화된 측정방법 부재	낮음 - 토론의 영향 고려를 위한 다수의 가정 필요 - 간이측정기의 신뢰도 문제
측정·분석 방법	보통 - 표준화된 분석장비 활용 - 4~5주 소요(방사평형) - 분석 자체는 간단한 방법	보통 - 보통 3~5일(문헌별로 상이) - 챔버 실험실 구축, 시스템 조작 등이 다소 복잡	쉬움 - 간이측정기 활용 - 즉시 확인 - 가장 간단한 방법
제도화의 용이성	보통 - 환경표지, 원료물질 등 기존 제도에서 일부 고려 - 분석기관 확대 등 관리기반 구축을 위한 유예기간 필요	어려움 - 실내공기질 관리법령 개정을 통해 반영 가능 - 표준화된 측정방법 개발을 위한 장기검토 필요	보통 - 표면농도 수치만 제시하면 되므로 간단 - 지침 제공 수준일 뿐 규제 기준 설정은 불가
국민 수용성	보통 - 라돈이 아닌 라듐, 토륨 등의 함량을 고려하는 간접적 방식 - 기준을 준수해도 표면에서의 라돈(토론) 고농도 발생 가능	보통 - 기준을 준수해도 표면에서의 라돈(토론) 고농도 발생 가능 - 실내공기 중 라돈 농도와 직접 연관자어 설명 가능	보통 - 만원의 원인인 표면농도 값을 직접 제공하므로 이해가 쉬움 - 148Bq/m ³ 와 관계성을 설득하는 과정이 필요

표5. 건축자재 라돈 관리방안별 장·단점 요약

7) △석재 종류에 상관없이 라돈과 토론이 방출되는 비율이 일정하고, △간이측정기의 측정 신뢰도가 형식승인 측정기기와 유사한 수준으로 보는 등 다수의 가정 포함

2. 주요자재 표본조사

각 관리방안별로 기준안 적용시 실효성을 파악하기 위하여 국내 건축 내장재로 사용빈도가 높은 석재 10종에 대한 표본조사를 실시하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
방사능 농도 (Bq/kg)	지수	0.9	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.8	0.8
	C_{Ra226}	74.4	124.7	0.8	1.0	1.3	1.2	32.9	48.8	77.8	69.1
	C_{Th232}	46.5	65.5	1.3	1.5	1.2	1.4	19.8	23.6	69.2	68.2
	C_{K40}	1262.6	764.0	10.4	13.0	24.8	22.0	719.0	706.4	487.2	672.5
라돈 방출량 (Bq/m ² ·h)	0.641	1.247	0.191	0.294	0.318	0.088	0.103	0.183	0.311	0.072	
표면농도 간이측정 (Bq/m ³)	881.9	327.9	9.7	10.6	13.6	9.3	18.3	86.2	19.9	71.4	

표6. 주요자재 표본조사 결과

※ 참고사항

- 측정시료 : 임페리얼브라운(A), 오련회(B), 델라카토크림(C), 머쉬룸크림(D), 볼케닉스(E), 칸스톤(F), 산타세실리아(G), 포천석(H), 고흥석(I), 천연대리석(J)

* 천연자재 특성상 시료채취지점, 측정지점 등에 따라 측정값이 변화할 수 있음

- 기준안(엄격한 기준 적용시)

- 방사능 농도 지수 :
$$I = \frac{C_{Ra226}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{Th232}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{K40}}{3000 \text{ Bq/kg}} \leq 1$$

- 라돈 방출량 : **7.48 Bq/m²·h**

- 표면농도 간이측정 : **1,652.2 Bq/m³**

기준안과 비교하면 B(오련회)의 경우만 유럽의 방사능 농도 지수 기준(1.0)에 해당되는 수준으로 나타났으며, 라돈 방출량 및 표면농도 간이측정 결과는 조사대상 석재 중 가장 엄격한 기준안(7.48 Bq/m²·h 및 1,652.2 Bq/m³)조차도 초과하는 시료가 없는 것으로 조사되었다.

1. 방사능 농도 지수를 활용한 건축자재 관리

1~3안에 대한 검토내용을 종합하였을 때, 현 상황에서 건축자재로부터 방출되는 라돈 영향을 최소화하기 위해 적용할 수 있는 관리방안은 1안 방사능 농도 지수를 활용한 사전관리가 가장 바람직한 것으로 판단된다.

따라서, 자재에 포함된 천연 방사성 핵종(라듐-226(^{226}Ra), 토륨-232(^{232}Th), 포타슘-40(^{40}K))의 방사능 농도 분석을 통한 사전관리를 권고하며, 이 때, 기준값은 유럽기준과 마찬가지로 지수값이 1을 넘지 않도록 한다.

◆ 방사능 농도 지수(I)

$$I = \frac{C_{Ra226}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{Th232}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{K40}}{3000 \text{ Bq/kg}} \leq 1$$

- C_{Ra226} , C_{Th232} , C_{K40} 은 각각 고체 라듐(^{226}Ra), 토륨(^{232}Th), 포타슘(^{40}K)의 방사능 농도(Bq/kg)

◆ 방사능 농도 분석 방법(감마핵종분석법)

검출기 교정

· 분석 시료와 동일한 기하학적 형태의 표준선원을 이용하여 검출기의 채널 및 효율 교정



시료전처리

· 분쇄 → 체질 → 건조 → 혼합 → 충전(계측용기)



시료 밀봉 및 보관 (방사평형 시간 고려)

· ^{226}Ra : ^{222}Rn (라돈)이 계측용기 밖으로 빠져나가지 않도록 밀봉 및 3주 이상 보관 후 측정
· ^{232}Th : ^{220}Rn (토론)이 계측용기 밖으로 빠져나가지 않도록 밀봉 및 5분 이상 보관 후 측정
· ^{40}K : 방사평형이 필요 없어 충전 후 바로 측정



방사능농도 측정·평가

· 방사평형된 시료를 고순도게르마늄검출기(HPGe detector)를 이용하여 방사능 측정
· 시료량을 이용하여 건축자재의 방사능 농도 평가

2. 적용범위 및 적용시점

적용범위

금번 지침의 검토과정에서는 실내에 건축 마감재로 사용되는 석재의 라돈 방출 특성에 대하여서만 고려하였다.

사용량을 고려하면 콘크리트 등 건축물 자체를 구성하는 자재에 대한 검토도 장기적으로 필요할 것이나, 현재 국내 유통·사용되는 건축자재의 방사능 농도 및 건축자재별 라돈 기여도 등 정보가 매우 부족한 실정이다.

따라서 실내 공간에 노출되어 직접적인 영향이 예상되는 천연석 기반 건축 내장재에 대한 관리를 우선 적용하고, 기반자료를 축적한 이후 대상 확대를 검토하도록 한다.

◆ 적용대상

공동주택에 건축 내장재로 사용되는 천연석 기반 자재

예시) 욕실 상판, 현관 바닥재, 아일랜드 식탁 등에 사용되는 화강석·대리석 등 석재

아울러, 유럽 기준은 실내공기 중 라돈 농도 200 Bq/m^3 을 달성하는 것으로 간주하고 있으므로 국내 권고기준(148 Bq/m^3)에 부합하지는 않으나, 유럽은 자재를 다량으로 사용하는 경우 지수를 1이하, 소량인 경우 6이하로 기준을 설정하고 있으므로 동 기준은 국외와 비교 시에도 엄격한 것으로 볼 수 있다.

적용시점

지침 적용시점은 신축 공동주택의 실내 라돈 측정의무가 발생하는 시점과 유사하도록 2020.6.1.부터로 한다⁸⁾.

현재 방사능 농도 분석 인증기관이 국내 4개 기관만이 존재하여 수요를 감당하기 어려우므로, 업계의 분석수요 초기대응 및 분석기관의 확대 유도를 위한 유예기간을 두도록 한다.

8) 일반적으로 사업계획 승인 이후 건설기간이 최소 2년반 정도임을 고려하면, 2018년 1월 1일 이후 사업 계획을 승인받은 공동주택의 경우 2020년 6월 이후 준공이 예상됨

- VI. 부록 -

국가	기준명칭* ※ 임의 번역	방사능 농도 지수(주거시설)
오스트리아	권고기준 (advisory reference level)	$\frac{C_{Ra}(1+0.15\rho t)}{300} + \frac{C_{Th}}{600} + \frac{C_K}{100000} < 1$
핀란드	허용기준 (permitted level)	$\frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000} < 1$
리트비아	강제권고기준 (enforced reference level)	$\frac{C_{Ra} + C_{Th}}{170} < 1; C_K < 1500 Bq/kg$
리투아니아	권고기준 (reference level)	$\frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000} < 1$
노르웨이	권고기준 (advisory reference level)	$\frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000} < 1; C_{Ra} < 200 Bq/kg$
폴란드	강제허용기준 (enforced permissible level)	$0.0027 C_{Ra} + 0.0043 C_{Th} + 0.00027 C_K < 1$ $C_{Ra} < 185 Bq/kg$
슬로베니아	강제권고기준 (enforced reference level)	$\frac{C_{Ra}}{400} + \frac{C_{Th}}{300} + \frac{C_K}{5000} + \frac{C_{artif}}{5000} < 1$
슬로바키아	허용기준 (permitted level)	$C_{Ra} + 1.25 C_{Th} + 0.086 C_K < 370 Bq/kg$
러시아	최대한계 (maximum limit)	$C_{Ra} + 1.31 C_{Th} + C_K < 370 Bq/kg$
독일	강제권고기준 (enforced reference level)	$C_{Ra} < 200 Bq/kg$
룩셈부르크	권고기준 (reference level)	$C_{Ra} < 350 Bq/kg, C_{Th} < 250 Bq/kg, C_K < 5000 Bq/kg$
이스라엘	권고기준 (reference level)	$C_{Ra} < 50 Bq/kg, C_{Th} < 50 Bq/kg, C_K < 500 Bq/kg$ γ 선 $0.7 mSv/y$
크로아티아	최대한계 (maximum limit)	$\frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000} < 1$

* 기준 명칭으로부터 강제조치사항의 유무를 파악하기 어려우며, 국가별 법령 등 확인이 필요

- 세계보건기구(WHO)에서는 유럽, 미국, 중국 등 다양한 국가의 역학연구 결과를 바탕으로, 라돈으로 인한 폐암 발병이 3~14%에 해당되며, 라돈을 흡연에 이어 폐암을 발병시키는 2위의 원인으로 지목
 - ※ WHO의 산하기관인 국제암연구소(IARC)에서는 광부들을 대상으로 한 코호트 연구결과, 동물실험 결과 등을 종합하여 라돈을 1군 발암물질(Group I)으로 분류('88)
- 라돈이 영향을 미치지 않는 역치값은 없으므로, 국가별로 달성할 수 있는 가능한 한 낮은 수준*의 국가 기준을 설정할 것을 권고(WHO Handbook on Indoor Radon, '09)
 - * 라돈 건강 위험을 줄일 수 있는 100 Bq/m³ 수준을 권고하나, 현실적으로 국가가 시행하기 어려운 경우 300 Bq/m³ 이내 수준에서 기준을 설정할 것을 권고
- 국제방사선방호위원회(ICRP)는 라돈 및 자손핵종 노출과 폐암 사이 인과관계에 대한 역학연구들을 검토, 선량계산을 위한 값들을 도출하는 등 라돈 피폭 위험관리의 근거를 제공
 - 국가의 경제사회 여건을 고려하여 거주공간에서의 유도참조준위를 100~300Bq/m³* 범위에서 합리적으로 낮게 설정을 권고(ICRP 간행물126, '14)
 - * 라돈 농도 100~300Bq/m³은 연간 피폭선량 약 1~10mSv에 해당
- 미국 환경보호청(EPA)에서는 연간 약 7,000시간 4pCi/L(=148Bq/m³) 수준의 농도에 평생 노출될 경우 비흡연자 1,000명 중 7명의 폐암 발생 위험도*를 안내하며 해당 수준을 권고기준으로 제시(A Citizen's Guide to Radon, '16)

< EPA의 라돈 농도별 위험도 안내(비흡연자 기준) >

라돈 농도*	1,000명의 비흡연자가 해당 수준의 농도에 평생 노출될 경우...	라돈으로 인한 폐암 발병의 위험도를 다른 위험도와 비교하면...
20 pCi/L	약 36명 폐암 발생 가능	익사 위험의 35배
10 pCi/L	약 18명 폐암 발생 가능	화재 사망 위험의 20배
8 pCi/L	약 15명 폐암 발생 가능	추락사 위험의 4배
4 pCi/L	약 7명 폐암 발생 가능	교통사고 사망 위험 수준
2 pCi/L**	약 4명 폐암 발생 가능	중독사 위험 수준
1.3 pCi/L	약 2명 폐암 발생 가능	(일반적인 실내 라돈 수준)
0.4 pCi/L	-	(일반적인 실외 라돈 수준)

* 1 pCi/L = 37 Bq/m³ 로, 4pCi/L = 148 Bq/m³에 해당

** 라돈 농도를 2pCi/L 이하로 감소시키는 것은 어려움

붙임3

실내 라돈농도 측정방법

※ 참고자료 : 실내공기질 공정시험기준(국립환경과학원 고시 제2018-64호)
실내공기질 측정방법의 오해와 진실('19.6, 국립환경과학원)

□ 측정위치(공통)

○ 측정대상 공간의 공기질을 대표하는 지점의 1.2~1.5m에서 측정

* 건축자재, 벽, 바닥, 천장 등으로부터 50cm 이상 이격하여 측정

□ 주시험방법(알파비적측정법, 90일)

○ (측정대상) 다중이용시설의 실내 라돈 측정 시 적용, 일반 주택은 법적 측정대상은 아니나, 라돈 측정시에는 주시험방법인 동 측정법을 적용

○ (측정방법) 시설의 실제 운영환경에서 수동형검출기(알파비적검출기*)를 설치하고 90일 이상** 경과 후 실험실로 보내어 농도를 분석

* 라돈에서 방출되는 알파입자로 인한 비적(=흔적, 손상)을 계수하여 라돈 농도를 확인

** 라돈 농도는 일·계절 변동이 크고, 연평균을 고려하여 기준이 설정되었으므로 90일 이상 장기측정이 바람직

< 대표적인 수동형검출기(알파비적검출기) >

모델명	라듀엣(Raduet)	RSKS	알파트랙	GE2014-α	GE2014-α(II)
사진					
특징	라돈, 토론 측정	라돈 측정	라돈 측정	라돈 측정	라돈, 토론 측정
제작사/제조국	Radosys / 헝가리		(주)알엔테크 / 대한민국	푸른환경산업연구소 / 대한민국	

□ **부시험방법**(연속측정방법, 48시간)

- (측정대상) 짧은 기간(준공 후~입주 전)내에 측정해야 하는 신축공동주택의 실내 라돈 측정 시 적용
- (측정방법) 측정 전 30분 이상 환기 후 5시간 이상 밀폐한 상태에서 라돈연속측정기로 48시간 이상 측정, 측정 시 밀폐를 유지

< 대표적인 라돈 연속측정기(형식승인기기*) >

모델명	RAD7	RTM1688-2	CRM-510	1028	1030
형식승인 인증 번호	제IAMS-2007-17호	제IAMS-2008-30호	제IAMS-2009-28호	제IAMS-2010-11호	제IAMS-2013-1호
사진					
제작사/제조국	Durridge/미국	SARAD GmbH/독일	femto-tech/미국	Sun Nuclear /미국	Sun Nuclear /미국

모델명	FRD1600	FRD400	FRD400S	ALPHAGUARD DF 2000
형식승인 인증 번호	제IAMS-2016-1호	제IAMS-2016-2호	제IAMS-2016-6호	제IAMS-2010-11호
사진				
제작사/제조국	(주)에프티랩/대한민국	(주)에프티랩/대한민국	(주)에프티랩/대한민국	SAPHYMO GmbH/독일

* 「환경분야 시험검사 등의 관한 법률」에 따라 행정적인 목적으로 사용하기 위한 환경측정기기는 형식승인을 받아야 하며, 형식승인 받은 측정기기로 공정시험기준 상의 측정방법에 따라 측정한 측정값을 인정