

# 라돈 저감형 기능성 보드제작을 위한 흡착재의 라돈 저감 성능

## Radon Reduction Performance of Adsorbent for Making Radon-Reducing Functional Board

김기훈<sup>1</sup>

편수정<sup>1</sup>

김연호<sup>2</sup>

이상수<sup>3\*</sup>

Kim, Ki-Hoon<sup>1</sup>

Pyeon, Su-Jeong<sup>1</sup>

Kim, Yeon-Ho<sup>2</sup>

Lee, Sang-Soo<sup>3\*</sup>

*Master's Degree, Graduate School, Hanbat National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34158, Korea <sup>1</sup>*

*Master's Course, Graduate School, Hanbat National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34158, Korea <sup>2</sup>*

*Professor, Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, yuseong-Gu, Daejeon, 34158, Korea <sup>3\*</sup>*

### Abstract

In this study, an experiment was conducted to evaluate the properties of cement matrix using diatomite and silica gel as adsorbents of radon. The adsorption properties of diatomite of a natural adsorbent and silica gel of an artificial sorbent were examined to confirm the reduction of radon gas concentration of the removal of radon gas in the indoor environment of the human body. We conducted a performance evaluation for the study. The fluidity, air content, density, absorption, flexural failure load, thermal conductivity and radon gas concentration of the specimen using diatomite and silica gel were measured. the fluidity and the air content of the adsorbed matrix with diatomite were decreased as the diatomite replacement ratio increased. Which seems to affect the subsequent matrix by the absorption of the compounding water of diatomite. As the replacement rate of silica gel increased, the fluidity decreased and the air content increased up to constant replacement rate. It is judged that the surface of the silica gel has a critical point at which it can react with moisture.

Keywords : adsorbent, diatomite, silica gel, radon gas, indoor air quality

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경

최근 방사능 물질에 대한 위험성이 큰 화두가 되고 있다. 1996년 일어난 체르노빌 원전사고를 시작으로, 2011년 일본 후쿠시마 원전사고 등에서 대규모 인명피해와 몇 십년간 출입을 통제하는 위험 지역 선정 등 커다란 피해를 입었다. 대중들에게 언론과 미디어 매체를 통하여 방사능 물질의 안전성에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다[1].

하지만 방사능 물질에 노출되는 경로가 이러한 대규모 원전사고를 통해서만은 아니다. 대표적으로 일상에서 노출되고 있는 방사능 물질로 라돈가스를 예로 들 수 있다. 라돈가스의 경우 시사프로그램 및 뉴스를 통해 그 위험성이 밝혀지고 있으며, 자연 방사선 피폭이 주목 받고 있다. 라돈가스란 암석이나 토양, 건축자재 등에서 존재하는 우라늄의 붕괴과정을 통해 발생하는 무색, 무취, 무미의 불활성 가스로, 지구상 어디에나 존재하는 자연방사성의 물질이다 [2,3]. 이러한 라돈은 토양으로부터 건물의 바닥이나 벽의 갈라진 틈을 통해 실내로 유입되거나 건축자재, 지하수, 등에서 유입된다. 유입된 라돈은 밀폐된 실내 공간 내에서 배출되지 못하고 고농도로 축적되어 인체 생물학적 문제를 야기한다. 이에 따라 라돈의 농도는 토양에 인접한 단독주택이나, 바닥과 벽 등에 균열이 많은 오래된 건축물, 밀

Received : January 22, 2019

Revision received : March 8, 2019

Accepted : March 11, 2019

\* Corresponding author : Lee, Sang-Soo

[Tel: 82-42-821-1635, E-mail: sslee111@hanbat.ac.kr]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

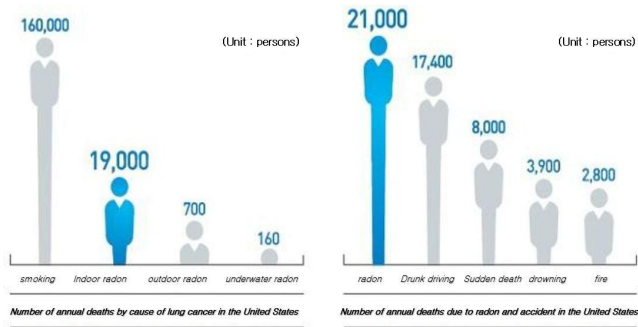


Figure 1. The incidence of lung cancer and annual deaths

폐도가 높고 환기시설이 부족한 실내에서 높게 나타난다. 라돈가스의 위해성 중 하나로 인체에 미치는 영향은 바로 폐암 발병이다. 라돈가스가 폐암을 유발하는 과정으로 실내의 먼지와 결합하여 호흡을 통해 인체 내에 흡입되어 방사선 붕괴를 일으키며 딸핵종이라는 라돈자손을 생성한다. 딸핵종은 체내 세포벽에 부착되어 알파선을 방출하며 알파 붕괴 과정을 거치고, 방출되는 알파선은 세포조직을 변이시키거나 파괴하여 암을 유발하게 한다. 이는 Figure 1과 같이 세계 폐암 발병률 중 약 3~14(%)에 해당하며, 흡연 다음으로 가장 높은 폐암 발병 원인으로 분류하고 있다. 이러한 라돈이 인체에 노출될 경우, 연간 노출 자연방사선의 약 75%를 차지하는 양으로 이에 따라 세계보건기구(WHO)는 라돈을 폐암 유발 1급 발암물질로 분류하여 관리 및 관심을 촉구하고 있다.

최근 정부는 실내 공기질 개선에 관한 법률을 개선하고 라돈 관리 및 감독을 실시하고 있으며, 라돈의 위험성에 대한 국민들의 관심을 촉구하고 있다[4,5,6,7].

### 1.2 연구의 목적

본 연구는 실내·외에서 발생 유입되는 라돈가스를 흡착 및 저감하기 위한 실내 마감재에 관한 기초연구로 구조토와 실리카겔을 사용하여 특성 검토를 목적으로 한다. 현재 흡착제 중 뛰어난 흡착성을 가지고 있는 천연 흡착재인 구조토와 라돈 흡착분야에서 아직 검증되지 않은 인공 흡착재인 실리카겔의 재료적 특성 검토를 통해 흡착 경화체의 기초 특성을 파악하고 비교하며, 흡착제를 사용한 경화체의 성능을 토출한다.

이에 따라, 본 연구는 1급 발암물질로 분류되는 라돈가스에 의한 실내 공기질 오염 수준의 저감을 위하여 실내의 라돈을 흡착 및 저감하는 기능성 건축용 보드 제작을 위한

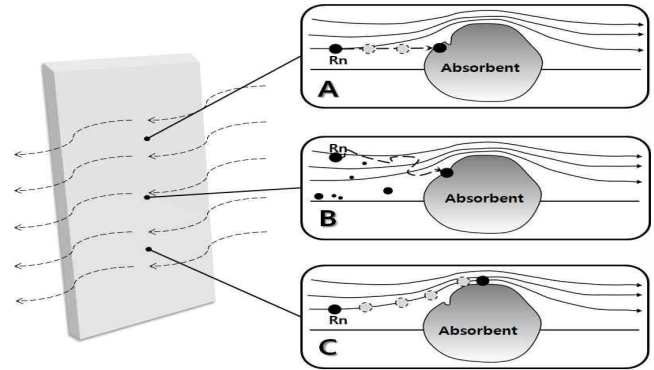


Figure 2. Micropores of anthracite

기초 연구로 흡착제를 사용한 경화체를 제작하여 특성을 검토하고자 한다.

## 2. 흡착제의 라돈가스 흡착 메커니즘

흡착의 역반응으로 흡착이 진행된 분자가 표면에서 분리되는 현상을 탈착이라고 한다. 탈착은 물질 표면의 온도가 높아지거나 기체의 압력이 낮아질 경우 표면의 흡착질 농도가 낮아지면서 나타난다. 흡착과 탈착은 기체 분자의 운동에너지와 기체 분자와 표면 원자 사이의 흡착 세기의 상대적인 크기에 의해 결정되며, 흡착 세기가 약하면 탈착하고, 흡착 세기가 세면 흡착한다. 흡착 특성을 이용하게 되면 기체나 용액에 존재하는 소량의 성분을 물질 표면에 고농도로 농축 혹은 분리할 수 있고, 표면의 성질을 변화시킬 수 있다. Figure 2는 흡착제 표면의 라돈가스 흡착을 모식화한 것이다.

고체의 결정은 모든 원자가 규칙적으로 배열되어 있어 내부 원자들이 동일한 에너지 상태를 가지고 있으므로 대칭 상태에서 원자에 미치는 힘은 모두 상쇄된다. 그러나 표면원자의 경우 상방향에 다른 원자가 존재하지 않으므로 수직으로 작용하는 힘의 균형이 깨져 표면 원자는 내부 원자에 비해 에너지가 높아 다른 원자나 분자와 결합하여 안정하려는 성질을 가지고 있다. 이러한 안정화 과정에서 유체 속에 존재하는 흡착질과 고체 물질인 흡착 물질 표면이 물리 혹은 화학적으로 결합한다.

흡착 방식으로는 물리 흡착과 화학 흡착이 있는데, 이 두 흡착 방식은 흡착을 발생시키는 원리가 달라 흡착이 발생하는 온도나 속도, 흡착층이 다르다. 흡착을 발생시키는 힘은 분자 사이의 인력과 흡착제와 흡착질 사이의 화학적

결합으로 나뉜다. 분자 사이에 인력이 작용하는 물리 흡착의 경우에는 전자가 이동하지 않으나, 화학 흡착의 경우 표면 원자와 흡착한 분자 사이의 전자가 이동하면서 화학적 결합에 의해 흡착이 발생한다.

물리 흡착은 속도가 빠르고 평형이 진행되는 시간이 짧으므로 흡착한 분자 위에 추가 흡착이 발생하여 흡착층이 두꺼워지고, 흡착량이 많아 흡착 농도가 높다[8].

### 3. 실험계획 및 방법

#### 3.1 사용재료

##### 3.1.1 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)

본 실험에서 사용된 포틀랜드 시멘트의 밀도와 분말도는  $3.42\text{g/cm}^3$  및 분말도  $3,539\text{cm}^2/\text{g}$ 의 국내 S사 제품을 사용하였고 Table 1은 시멘트의 화학적 성분을 나타내었다[9].

Table 1. Chemical compositions of OPC

Chemical composition (%)						
MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>
2.01	64.18	21.88	3.66	1.83	5.02	-

##### 3.1.2 구조토

구조토는 흡착제, 흡수제, 건물 바닥의 수분 보유제 혹은 액체의 충전물질로도 사용된다. 보일러나 고로의 킬른 제조시 점토 또는 고령토와 혼합하며 내화재 등이나 생석회, 구조토, 석면 등과 혼합하여 단열재로서도 이용하며 보온단열 효과를 높이기 위해 건축자재로 활용된다. 본 연구에서 사용된 구조토의 밀도는  $2.22\text{g/cm}^3$ 이다[10,11]. Table 2는 구조토의 화학적 성분을 나타내었다.

Table 2. Chemical compositions of diatomite

Chemical composition (%)						
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
84.60	5.30	2.30	0.70	0.30	0.40	4.80

##### 3.1.3 실리카겔

규산이 주성분인 응집형 겔로 수분을 2~10%로 함유한다. 무미, 무취의 반투명한 입자 상태의 고체로, 내부에 체적의 약 50% 정도의 무수한 공극과 큰 표면적으로 인해

수분과 가스 흡착력이 크다. 건조제, 흡착제로 주로 활용되고, 물에 녹지 않으며 독성과 가연성이 없다. 원모양인 것은 공기저항이 적고, 흡착 포화한 것은 150~200(°C)에서 1~2시간 가열로 재생하여 사용할 수 있다[12]. Table 3은 실리카겔의 화학적 성분을 나타내었다.

Table 3. Chemical compositions of silica gel

Chemical composition (%)						
Si	Al	Fe	Ca	S	K	Na
98.60	0.13	0.24	0.12	0.47	0.02	0.16

#### 3.2 실험계획

##### 3.2.1 구조토 치환율에 따른 라돈 흡착형 경화체의 특성(Series I)

Series I에서는 시멘트 기반 구조토 치환 흡착형 경화체 실험을 진행하였다. 구조토는 입자 내 무수한 미세공극이 형성되어 있어 오염물질에 대한 흡착성능이 뛰어나므로 흡착재로서의 활용성과 흡착형 경화체에 대한 성능 평가가 필요하다. 실험항목은 유동성, 공기량, 밀도, 흡수율, 휨과 괴 하중, 열전도율 및 라돈가스 농도를 측정하였다.

Table 4는 Series I의 실험요인 및 수준을 나타낸 표이다.

Table 4. Experimental factors and levels of radon adsorption type specimen with diatomite replacement ratio

Experimental factors	Experimental levels	
binder	OPC <sup>1)</sup> , D <sup>2)</sup>	2
W/B	62 %	1
D <sup>2)</sup> replacement ratio	0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 (wt.%)	10
curing condition	humidity(80±5)%, temperature(20±2)°C	1
test contents	density, water absorption, flow, air content, flexural failure, thermal conductivity, concentration of radon	7

1) OPC : Ordinary portland cement

2) D : Diatomite

##### 3.2.2 실리카겔 치환율에 따른 라돈 흡착형 경화체의 특성(Series II)

Series II에서는 Series I의 구조토를 사용한 흡착형 경화체의 최적배합 및 실험결과를 분석 및 평가하여 실리카

겔을 활용한 흡착형 경화체의 최적 실험값을 도출하기 위한 실험을 진행하였다. 실험항목으로는 구조토 치환 흡착형 경화체와 같은 항목을 측정하였다. Table 5는 Series II의 실험요인 및 수준을 나타낸 표이다.

Table 5. Experimental factors and levels of radon adsorption type specimen with silica gel replacement ratio

Experimental factors	Experimental levels	
binder	OPC <sup>1)</sup> , S <sup>2)</sup>	2
W/B	57 %	1
S <sup>2)</sup> replacement ratio	0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 (wt.%)	10
curing condition	humidity(80±5)%, temperature(20±2)°C	1
test contents	density, water absorption, flow, air content, flexural failure, thermal conductivity, concentration of radon	7

1) OPC : Ordinary portland cement

2) S : Silica gel

### 3.3 실험방법

본 실험의 흡착형 경화체의 특성을 알아보기 위해 KS L ISO 679에 의거하여 경화체를 제작하였으며, 힘과괴 하중 시험체는 KS F 3504에 의거하여 300×400×9.5로 제작하였으며 너비방향으로 건조 상태일 때 시험하였다.

Table 6은 석고보드 제품 ‘KS F 3504’ 규격을 나타낸 표이다.

밀도 및 흡수율 시험은 KS F 2459 「기포콘크리트의 겔 보기 밀도, 흡수율, 흡수율 및 압축강도 시험방법」을 참고하였다. 또한, 유동성 시험은 KS L 5111 「시멘트 시험용 플로 테이블」을 참고하였다. 공기량 시험은 KS L 3136 「수경성 시멘트 모르타르의 공기량 측정 방법」에 의해 실시하였다. 열전도율 측정방법은 KS L 9016 「보온재의 열전도율 측정 방법」에 의해 실시하였다.

라돈가스 농도 측정 방법은 국내에 명확한 측정방법이 전무하여 기존 문헌의 라돈가스 농도 측정법을 토대로 연속 모니터 측정 방법을 활용하였다. 밀폐된 챔버에 라돈가스 발생원과 흡착 경화체, 팬, 라돈가스 농도 측정기를 넣은 후 라돈가스 농도 변화에 대하여 측정하였다. 라돈가스 농도 측정 시 라돈가스를 일정하게 방출하는 방출원이 필요하지만 적절한 방출원이 없으므로 명확한 라돈가스 농도 측정에 의한 데이터 경향을 확인한다[13]. Figure 3은 열전도율 측정기구와 라돈가스 측정챔버에 대한 사진이다.

Table 6. Standard of gypsum board product ‘KS F 3504’

test contents	size of specimen(mm)		thickness of specimen (mm)	count of specimen	strength after drying (MPa)
	length	width			
flexural failure	400	300	9.5	3	over 3.6



Figure 3. Thermal conductivity measuring instrument and radon gas measurement chamber

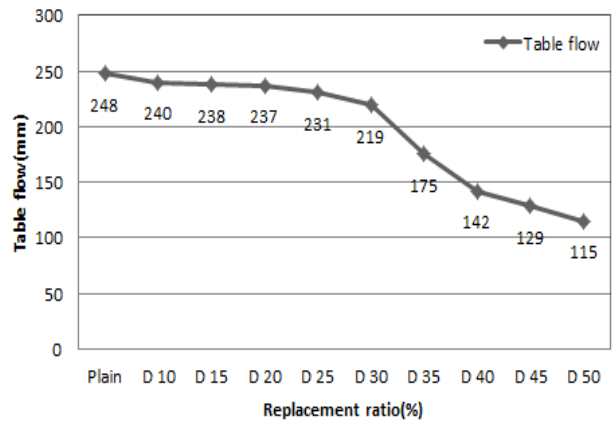


Figure 4. Flow of paste according to replacement ratio of diatomite

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 구조토 치환율에 따른 라돈 저감형 경화체의 특성 (Series I)

#### 4.1.1 유동성

KS L 5111에 의거하여 구조토 치환율에 따른 유동성 시험 측정 결과 구조토의 치환율이 증가할수록 페이스트의 유동성은 감소하는 것으로 나타났다. 흡수율이 높은 구조토 입자는 배합과정에서 배합수를 흡수하므로 시멘트 페이스트 상의 배합수가 줄어들어 유동성은 감소하는 것으로 판단된다. Figure 4는 구조토 치환율에 따른 페이스트의

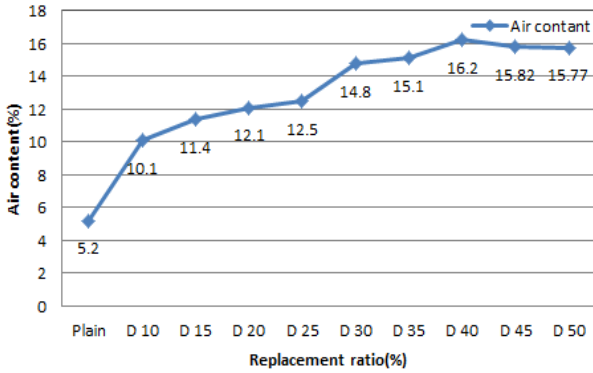


Figure 5. Air content of paste according to replacement ratio of diatomite

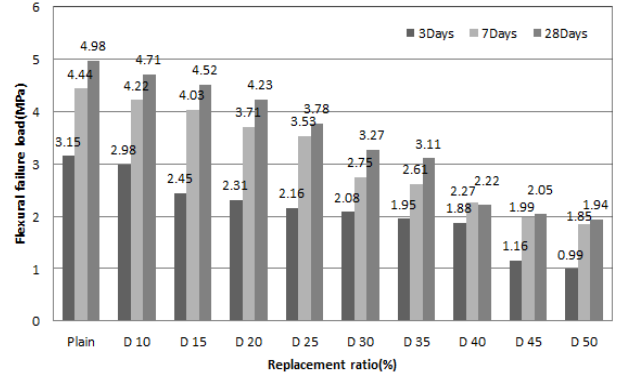


Figure 7. Flexural failure of absorption matrix according to replacement ratio of diatomite

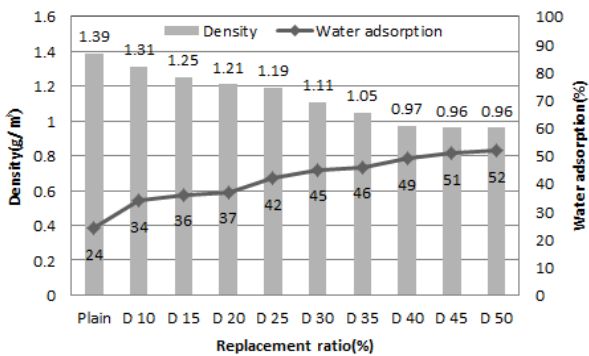


Figure 6. Density and water absorption rate of absorption matrix according to replacement ratio of diatomite

유동성을 나타낸 그래프이다.

#### 4.1.2 공기량

규조토의 치환율에 따른 페이스트의 공기량 시험 측정 결과 규조토의 치환율이 증가함에 따라 공기량은 일정 치환율까지 증가하는 경향을 보였다. 규조토 치환율 40%까지 페이스트 내 공기량은 증가하지만 이후 규조토 치환율에 대한 공기량은 일정한 경향을 보인다. 배합과정 중 시멘트 페이스트 내의 배합수를 흡수한 규조토의 치환율이 증가하고, 이후 규조토 입자 내 압력에 의한 배합수 배출로 입자 사이의 공극이 발생하여 페이스트 내의 공기량이 증가하게 된다. Figure 5는 규조토 치환율에 따른 페이스트 내의 공기량을 나타낸 그래프이다.

#### 4.1.3 밀도 및 흡수율

규조토 치환율에 따른 흡착형 경화체의 밀도 시험 측정 결과 점차 감소하는 경향을 보였으며, Plain은 1.39g/m<sup>3</sup>,

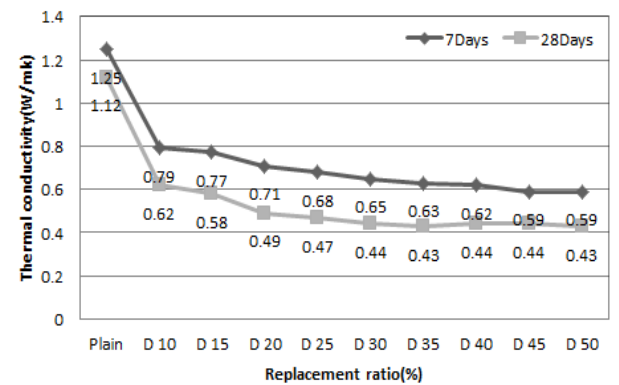


Figure 8. Thermal conductivity of absorption matrix according to replacement ratio of diatomite

규조토 치환율 50%는 0.96g/m<sup>3</sup>으로 감소하는 것으로 나타났다. 흡수율 시험결과, 밀도 시험 결과와 반대로 증가하는 것으로 보이며, 이는 규조토의 입자의 반복적인 수분 흡수를 통해 흡착형 경화체 내에서 공극을 발생시킨 것으로 판단된다. Figure 6은 규조토 치환율에 따른 흡착형 경화체의 밀도 및 흡수율 그래프이다.

#### 4.1.4 휨파괴 하중

규조토 치환율에 따른 경화체의 휨파괴 하중 시험 측정 결과 규조토 치환율이 증가함에 따라 휨파괴 하중은 저감하는 것을 나타내었다. Plain 대비 규조토 치환율 25%는 장기 강도 감소율 약 24%로 나타났으며, 규조토 치환율 50%는 장기 강도 감소율 약 61%로 측정되었다. 페이스트 배합과정 중 다량의 수분을 규조토가 흡수하여 추후 장기 강도 증진에 영향을 미치는 것으로 판단된다. Figure 7은 규조토 치환율에 따른 흡착형 경화체의 휨파괴 하중 그래프이다.

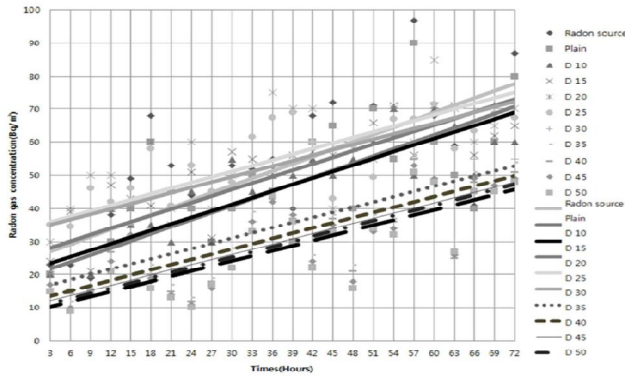


Figure 9. Concentration of radon gas of absorption matrix according replacement ratio of diatomite

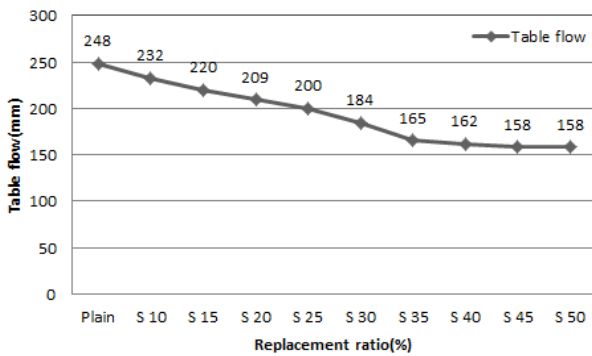


Figure 10. Flow of paste according to replacement ratio of silica gel

4.1.5 열전도율

규조토 치환율에 따른 흡착형 경화체의 열전도율 시험 측정 결과 규조토 치환율이 증가함에 따라 열전도율은 일정 수준까지 감소하는 것으로 나타났다. 규조토 치환율 50%는 Plain 대비 28일 재령 열전도율 증진율 약 52%로 나타났다. 이는 배합과정에서 다량의 수분을 흡수한 규조토가 경화 과정에서 배합수 배출 및 증발 과정에 따른 공극의 형성으로 추후 열전도율에 영향을 미치는 모습을 보여주었다. Figure 8은 규조토 치환율에 따른 흡착형 경화체의 열전도율 그래프이다.

4.1.6 라돈가스 농도

Figure 9는 규조토 치환율에 따른 흡착형 경화체의 라돈가스 농도 측정 그래프이다. 라돈가스 농도 측정 결과 규조토의 치환율이 증가함에 따라 챔버 내 라돈가스 농도는 저감하는 것으로 나타났다. 또한, 라돈가스 농도 그래프의 기울기와 농도 측정값의 평균값이 전체적으로 저감하

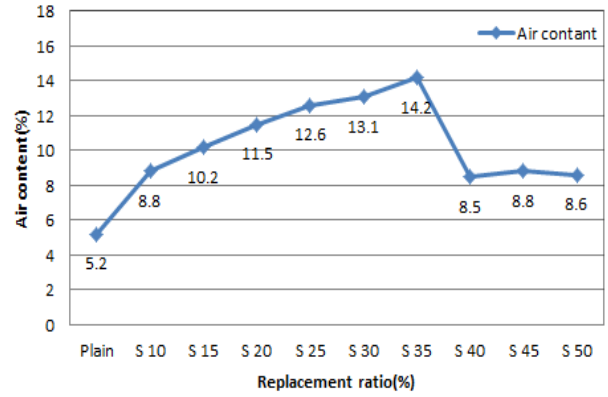


Figure 11. Air content of paste according to replacement ratio of silica gel

였으며, Plain 대비 규조토 치환율 50%는 약 78%의 라돈가스 농도 감소 효과를 보인다.

4.2 실리카겔 치환율에 따른 라돈 저감형 경화체의 특성 (Series II)

4.2.1 유동성

본 실험의 실리카겔 치환율에 따른 유동성 시험 결과를 Figure 10으로 나타낸 것으로 KS L 5111에 의거하여 실리카겔 치환율에 따른 유동성 시험 측정 결과 실리카겔의 치환율이 증가할수록 유동성은 감소하는 경향을 보였다. 실리카겔 치환율 35%까지는 급격히 떨어지다가 40% 이후부터는 감소율의 변동이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 실리카겔의 경우, 실리카겔 표면에서 다량의 수분과 단시간에 반응이 진행되어 실리카겔 입자가 파괴되므로 수분을 흡수하여 유동성은 감소하는 것으로 판단된다. Plain 대비 실리카겔 치환율 50%의 경우, 약 57%의 유동성 저하로 판단된다.

4.2.2 공기량

Figure 11은 실리카겔 치환율에 따른 공기량 측정 결과이다. 실리카겔 치환율에 따른 공기량 시험 측정 결과 실리카겔의 치환율이 증가함에 따라 공기량은 일정 치환율까지 증가하는 것으로 나타났다. 실리카겔은 Plain 대비 실리카겔 치환율 35%까지 약 63%의 페이스트 내 공기량이 증가하였으며, 이후 실리카겔 치환율 40%부터 약 40%의 공기량의 감소를 보여주었다. 페이스트 내 공기량 감소는 실리카겔의 표면이 수분과 반응할 수 있는 입계점을 확

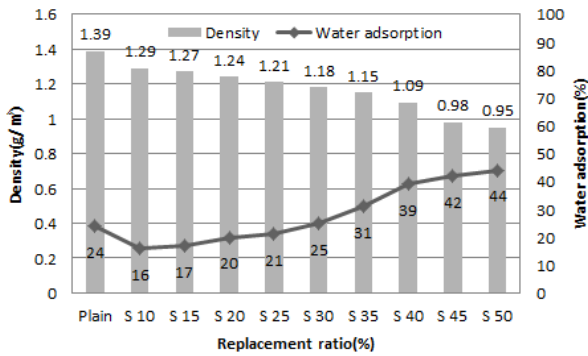


Figure 12. Density and water absorption rate of absorption matrix according to replacement ratio of silica gel

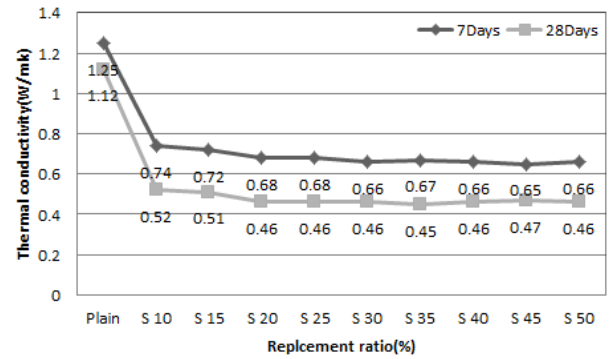


Figure 14. Thermal conductivity of absorption matrix according to replacement ratio of silica gel

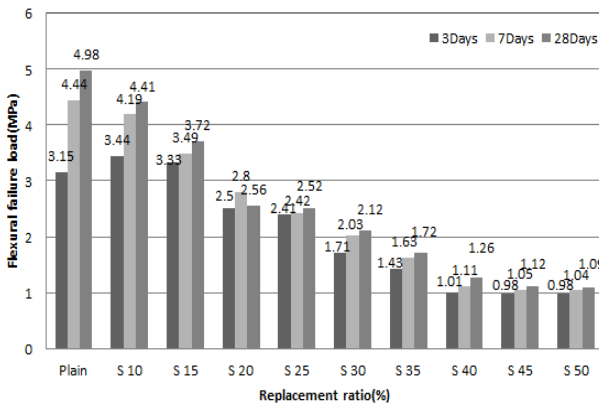


Figure 13. Flexural failure of absorption matrix according to replacement ratio of silica gel

인한 것으로 실리카겔 치환율 40% 이상으로는 공기량이 감소하는 것으로 판단된다.

#### 4.2.3 밀도 및 흡수율

실리카겔 치환율에 따른 흡착형 경화체의 밀도 및 흡수율 특성을 나타낸 것이다. 흡착형 경화체의 밀도 시험결과 실리카겔 치환율에 따라 밀도는 감소하는 경향을 나타내었으며, Plain은 1.39g/m<sup>3</sup>, 실리카겔 치환율 25%는 1.21g/m<sup>3</sup>, 실리카겔 치환율 50는 0.95g/m<sup>3</sup>으로 감소하는 것을 확인하였다. 흡수율 시험결과, 실리카겔의 밀도와 반비례하며, Plain에 비해 실리카겔 치환율 50%는 약 45%의 흡수율 증가를 나타내었다. 실리카겔 치환율 10%는 Plain에 비해 약 33%의 흡수율 저감이 나타나는데 이는 실리카겔 입자 표면과 수분의 과도한 접촉으로 실리카겔의 반응성이 더 이상 나타나지 않는 것으로 보인다. Figure 12는 실리카겔 치환율에 따른 흡착형 경화체의 밀도 및 흡수율 그래프이다.

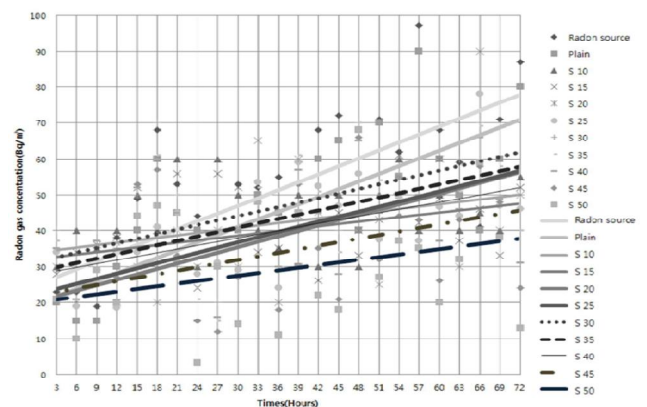


Figure 15. Concentration of radon gas of absorption matrix according to replacement ratio of silica gel

#### 4.2.4 휨파괴 하중

실리카겔 치환율에 따른 휨파괴 하중 시험 측정 결과 실리카겔 치환율이 증가함에 따라 강도는 저하하는 경향을 보였다. 실리카겔 치환율 25% 경화체는 Plain 대비 재령 28일 강도 4.98MPa에서 실리카겔 치환 경화체의 재령 28일 강도 2.52MPa까지 강도가 저하되었다. 또한 Plain 대비 실리카겔 치환율 50%는 약 78%의 강도가 저하되는 모습을 보여주었다. 이러한 시험결과는 실리카겔 입자가 수분과 급격한 반응에 의해 경화체 내 불규칙한 공극을 형성하여 강도가 저하된 것으로 판단된다. Figure 13은 실리카겔 치환율에 따른 흡착형 경화체의 휨파괴 하중 그래프이다.

#### 4.2.5 열전도율

실리카겔 치환율에 따른 흡착형 경화체의 열전도율 시험 측정 결과 실리카겔의 치환율이 증가함에 따라 열전도율이 감소 및 일정 수준을 유지하는 것을 확인하였다. 이는 실

리카겔 입자 표면에 다량의 수분이 급격하게 입자와 접촉할 경우 실리카겔 입자가 파쇄되면서 주변으로 밀려나 경화체 내 공극을 형성하게 된다. 이로 인해 경화체 내 다량의 불규칙한 공극이 형성되어 열전도율이 감소한 것으로 판단된다. Figure 14는 실리카겔 치환율에 따른 흡착형 경화체의 열전도율 그래프이다.

#### 4.2.6 라돈가스 농도

Figure 15는 실리카겔 치환율에 따른 흡착형 경화체의 라돈가스 농도 측정 그래프이다. 라돈가스 농도 측정 결과 실리카겔 치환율이 증가함에 따라 챔버 내의 라돈 농도는 감소하는 경향을 나타내었다. 구조토 치환 흡착형 경화체 대비 라돈가스 농도의 급격한 저감율은 보이지 않지만 측정기간이 증가하면서 챔버 내 라돈가스 농도가 일정한 추이를 보여주었다. 이는, 실리카겔 입자 내로 일정 수준의 라돈 원자가 흡착하는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 구조토와 실리카겔을 흡착재로 활용한 경화체의 특성 평가를 위한 실험을 진행하였다. 천연 흡착재인 구조토와 인공 흡착재인 실리카겔의 재료적인 흡착 특성으로 인체가 거주하는 실내 환경에서 발생하는 라돈가스 농도 저감 혹은 라돈가스의 제거를 확인하고자 하였으며, 본 연구 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 나타낸다.

- 1) 구조토 활용 흡착형 경화체의 유동성 및 공기량 측정 결과는 구조토의 치환율이 증가함에 따라 유동성은 감소하는 것으로 나타났다. 공기량은 구조토 치환율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며 치환율이 증가함에 따라 일정한 경향을 보인다. 구조토의 치환율에 따라 밀도는 감소하는 경향을 보였고 흡수율은 증가하는 것을 확인하였다.
- 2) 구조토 치환율에 따른 흡착형 경화체의 휨과괴 하중은 치환율이 증가함에 따라 저하하는 경향을 보이며 이는 구조토의 배합수 흡수에 의해 추후 경화에 영향을 미치는 것으로 보인다. 구조토를 활용한 흡착형 경화체의 열전도율은 재령 일수에 관계없이 일정한 경향을 보이며, 구조토의 수분 흡수에 따른 입자 공극 형성에 의한 것으로 보인다.

- 3) 구조토를 활용한 흡착형 경화체의 라돈가스 농도 측정 결과는 Plain 대비 최대 약 78%의 라돈가스 농도 감소 효과를 보인다.
- 4) 실리카겔의 치환율이 증가함에 따라 유동성은 감소하는 것으로 보이며 공기량은 일정 치환율까지 증가하였다. 실리카겔의 표면이 수분과 반응할 수 있는 임계점을 확인한 것으로 판단된다. 실리카겔 치환율에 따라 밀도는 감소하는 것으로 보이고, 흡수율은 증가하는 것을 확인하였다.
- 5) 실리카겔 치환 흡착형 경화체의 휨과괴 하중 특성은 실리카겔의 치환율이 높아질수록 강도가 저감하는 것을 확인하였다. 실리카겔 치환 흡착형 경화체의 열전도율 측정 결과는 재령 일수에 관계없이 저감하는 것을 확인할 수 있으며, 치환율이 증가함에 따라 일정 수준의 열전도율 값을 유지하는 것으로 측정되었다.
- 6) 실리카겔을 활용한 경화체의 라돈가스 농도 측정 결과 실리카겔 치환율에 의해 저감되는 경향을 확인할 수 있고 측정기간이 증가하면서 챔버 내 라돈가스 농도의 표준편차는 작으며 일정 수준의 라돈가스 원자를 흡착하는 것으로 보인다.

## 요 약

본 연구는 최근 방사능 물질의 위험성에 대한 관심이 커지며 원전사고 등의 대규모 인명 피해와 위험지역 선정 등의 이유로 인체의 방사능 안전성에 대한 관심이 커지면서 요구되는 실내 건축용 마감재에 대한 것이다. 일상에서 방사능에 노출되는 여러 가능성 중 실내 공기 중 라돈가스에 대한 관심이 커지면서 라돈가스 흡착형 경화체에 대한 기초연구 자료를 제시한다. 본 연구에 흡착재로 활용된 재료는 구조토와 실리카겔로, 천연 흡착재인 구조토와 인공 흡착재인 실리카겔의 기초 성능 및 흡착 성능을 평가하였다. 향후 실내 공기 중 라돈가스 농도 저감에 대한 정밀한 추가 실험에 대한 연구결과가 필요할 것으로 예상되고, 실험 결과에 따른 인공 흡착재인 실리카겔의 라돈가스 흡착 가능성을 기대한다.

**키워드** : 흡착재, 구조토, 실리카겔, 라돈, 실내 공기질



---

## References

1. Lee JH, Measures for national health protection from radiation contamination and tasks to be solved, Environmental health forum of the environmental toxic health society, 2011 Apr;2011(4):57-82.
2. Park SY, Effect of tobacco smoke on exposure of radon and it's daughters [master's thesis], [Seoul (Korea)]: Yonsei University; 2001, 40 p.
3. David B, Maurine AR, David RS, Indoor radon and its hazards, Science of the Total Environment, 1988 Jan;77(1):83-4.
4. Korea Environment Corporation [Internet]. Indoor radon management, 2016 [updated 2017 Feb 6]. Available from: <https://www.keco.or.kr/kr/business/facility/communityid/198/view.do?idx=21514>.
5. Ministry of Environment, Indoor air quality management, 2006 [updated 2005 Nov 8]. Available from: <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10181&boardMasterId=54&boardCategoryId=&boardId=151441>
6. Min DW, Chung KS, Kim YI, A study on the variation of indoor radon concentration due to the ventilation rate in apartment housing, Korea Institute of Machinery and Materials Academic conference; 2015 June; Seoul, Korea, Seoul (Korea): Korea Institute of Machinery and Materials; 2015, p. 431-4.
7. Cha SY, Survey on the radon concentration in multipurpose facilities and residential area(Apartment) in Incheon [master's thesis], [Seongnam (Korea)]: Gachon University; 2014, 32 p.
8. Jung GH, Cho H, Pang SK, Survey on indoor radon concentration in new housing complex, The Architectural Institute of Korea Academic conference; 2014, Oct 23; Busan, Korea, Seoul (Korea): The Architectural Institute of Korea; 2014, p. 443-4.
9. Kim SH, Effect of cement powder degree on concrete engineering properties [master's thesis], [Cheongju (Korea)]: Cheongju University; 2008, 108 p.
10. Kim YB, Study on the practical use of recycled aggregate concrete containing diatomite [dissertation], [Ansan (Korea)]: Hanyang University; 2008, 135 p.
11. Kim JY, A study on the treatment of water by diatomite filtration and activated carbon adsorption process [master's thesis], [Gwangju (Korea)]: Chosun University; 2002, 57 p.
12. Jung JY, Preparation and characterization of silica gel and zeolite-bearing honeycomb dehumidification rotor [master's thesis], [Cheongju (Korea)]: Chungbuk National University; 2010, 108 p.
13. Gang JS, Characteristics of radon adsorption type hardener using diatomite and powdered activated carbon as adsorbents [master's thesis], [Daejeon (Korea)]: Hanbat National University; 2018, 64 p.