

고기능 완충재 R&D 현황 [고효율 처분기술의 가치]



한국원자력연구원

선진처분기술개발부

윤석

2026. 05. 06

01 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 연구개발과제의 목표

고준위폐기물 안전강화 혁신기술개발 사업
(’21.4~’25.12)

- 기술진보를 고려하여 국내 환경에 적합하고, 처분면적 저감과 처분안전성 강화가 가능한 혁신적이고 차세대 고준위폐기물 관리 기술개발

✓ 고효율 처분시스템 설계안 제시 (비에타 2총괄)

안전성 강화 고효율 처분시스템 개발 (비에타 1세부)
고효율 처분시스템 제시·성능평가와 처분부지 저감효과 분석을 통한 최적 개념설계안 확보

고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 (비에타 2세부)
국내 환경에 적합하고 처분안전성 강화가 가능한 혁신적인 공학적방벽재 개발

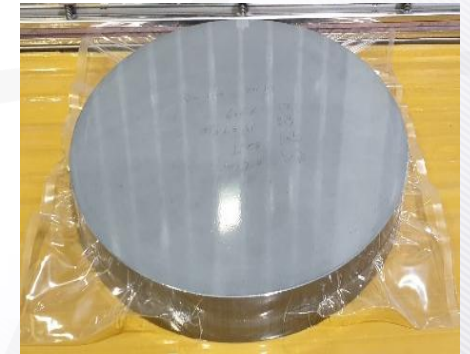
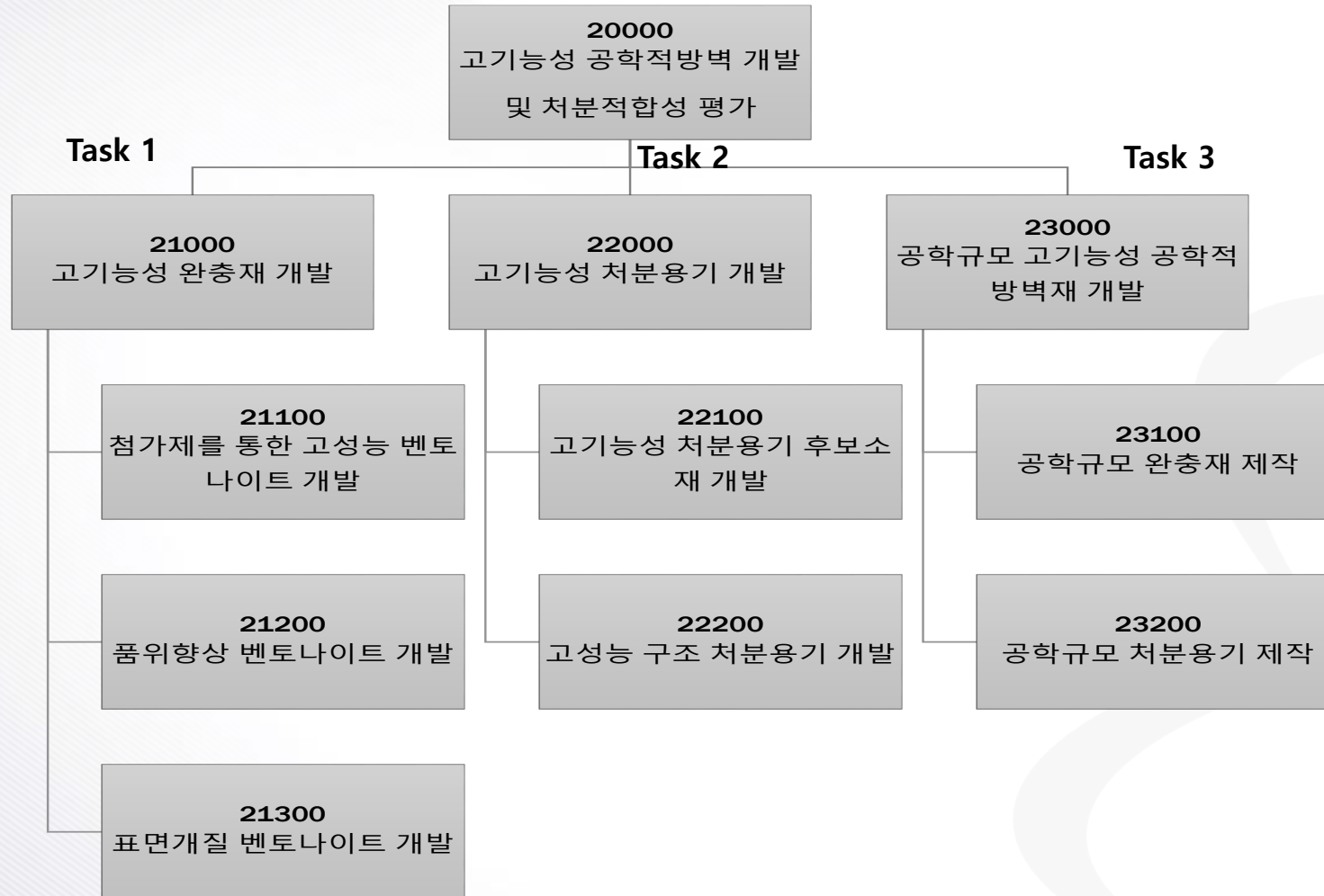
✓ 효율향상 대비 안전성이 강화된 고성능 공학적방벽재 제공

- ✓ 처분면적 저감 한국형 고효율 처분 설계개념 + 평가도구 개발
- ✓ 혁신적인 공학적방벽재 설계기준

- ✓ 고기능성 공학적방벽 대안재료
- ✓ 공학적방벽 처분 적합성 종합성능평가 자료

처분 효율성 및 안전성 강화방안 제시

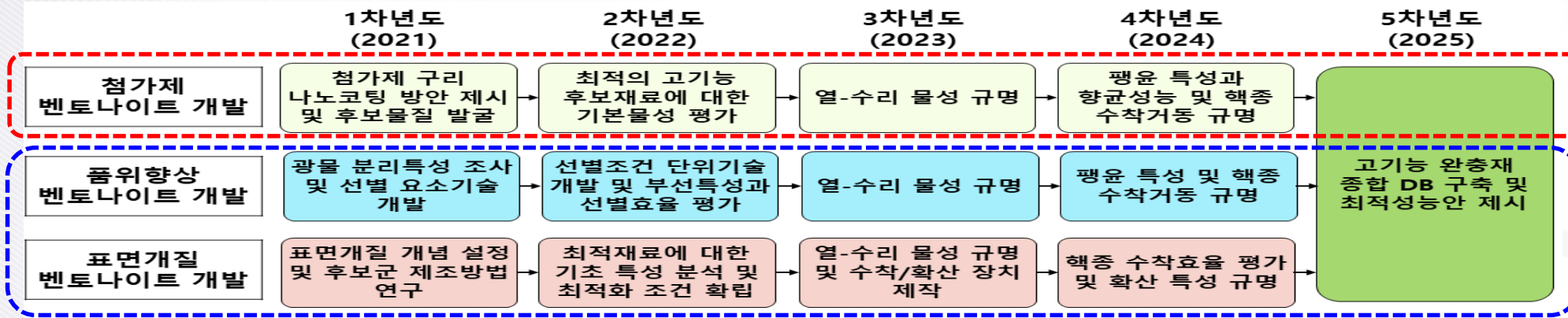
02 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 연구개발과제 구성 체계



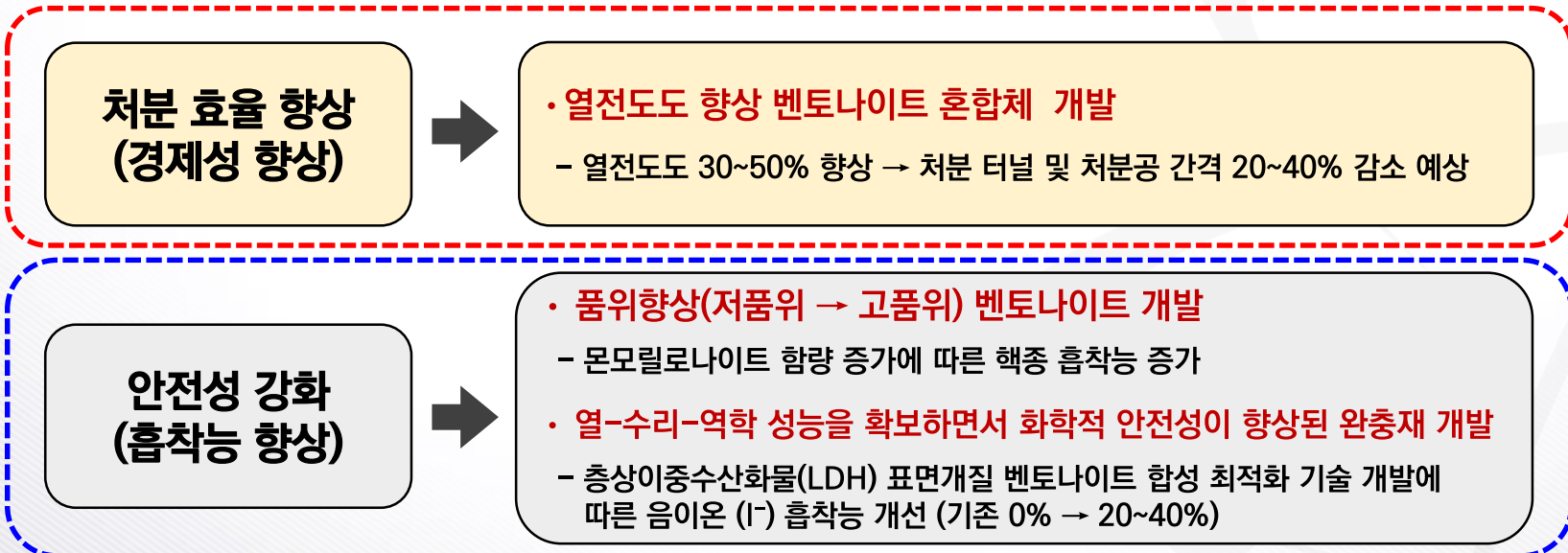
03 고기능 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가

고기능 완충재 개요

고기능 완충재 연구 개요



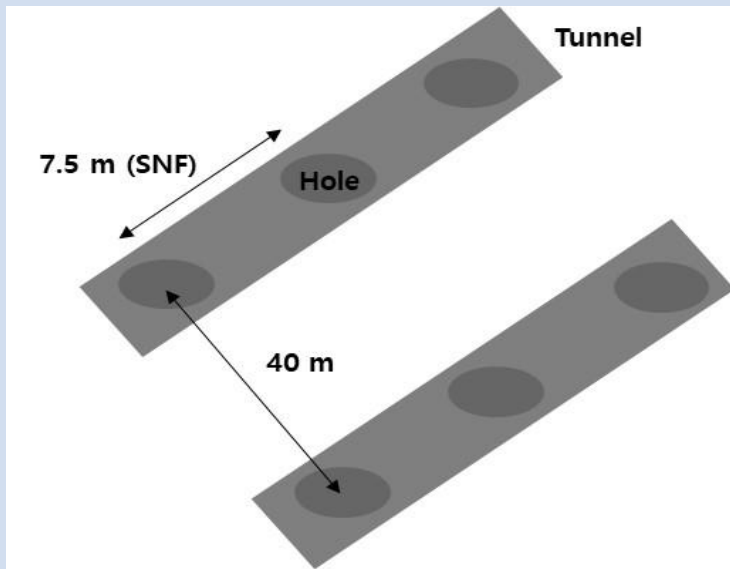
고기능 완충재



04 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 첨가제-벤토나이트 연구 현황

» 첨가제 벤토나이트 필요성 및 연구 방향

연구 필요성

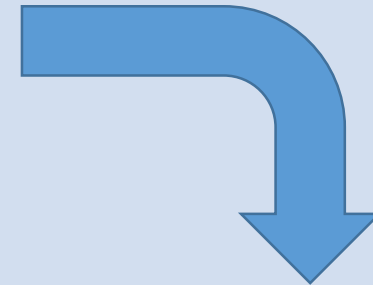
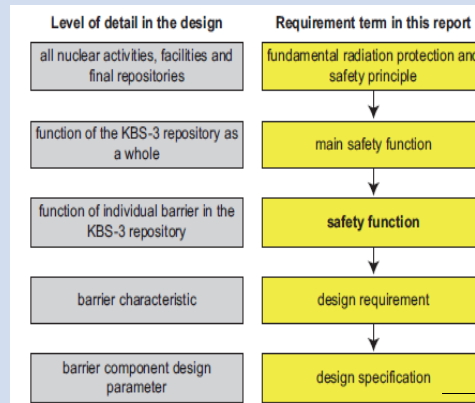


<KRS+ 터널 및 공 간격>

- 완충재 설계 기준 온도: 100
- 완충재의 열전도도를 높이면 온도를 낮출 수 있음

→ 열전도도가 높은 물질을 벤토나이트에 첨가하여 고기능 완충재를 개발할 필요가 있음

연구 방향

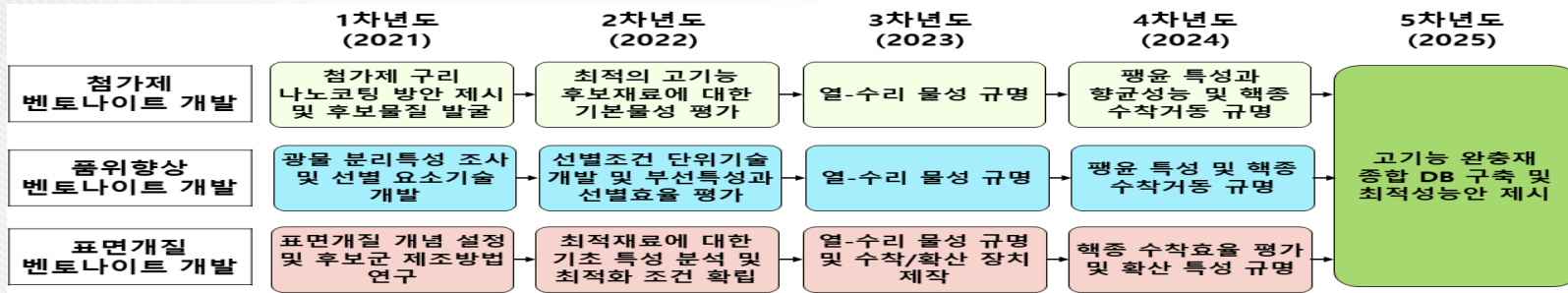


Characteristics	Safety function	Performance target
Hydraulic conductivity	Limit advective mass transfer	$< 10^{-12}$ m/s
Swelling pressure	Keep the canister in position	> 0.2 MPa
	Limit advective mass transfer	> 1 MPa
	Limit microbial activity	> 2 MPa
Temperature	Limit pressure on the canister	< 10 MPa when determined with a specific laboratory test procedure
	Resist transformation	< 100 °C
	Protect the canister from detrimental mechanical loads	> -2.5 °C

- 완충재로서의 성능 타겟을 충족시킬 수 있는 첨가제-벤토나이트 혼합재 설계요건 및 최적의 첨가제와 첨가율 제시

04 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 첨가제-벤토나이트 연구 현황

▶ 첨가제 벤토나이트 연구 진행 현황



1) 21년~23년

. 각종 첨가제 흑연 3%, 실리카 모래 10~30%, 화강암 가루 및 구리코팅 모래 첨가제 발굴 등

2) 23년~25년

. THM 성능 목표가 충족되는 **첨가제 종류 및 최적 비율 선정**

	C content (Organic carbon) (%)	도량형 (%)	주기 함유비 (%)	분말 밀도 (g/cm³)	분말 입자 크기 (μm)	수리전도도 (mS/cm)	양분치수 (Mg/g)	양분함량 (%)	Kd (Cs, mL/g)	Kd (I, mL/g)
KI-II	0.75 (0.25)	0.30	12	0.7	0.85	2.50x10 ⁻¹¹	6.5	284	732.5	0
LDH 개질			0.122	0.113	0.084	4.05x10 ⁻¹⁰				
실리카 30% 혼합			부피비	부피비	-/12.2	1.14 (ρ _p 1.54 g/cm³)	5	1.14 (ρ _p 1.54 g/cm³)	393.00 (배가율 79.73%)	부피비
실리카 20% 혼합			부피비	부피비	-/12.2	1.04 (ρ _p 1.43 g/cm³)		501.40 (배가율 81.87%)		부피비
구리코팅 실리카 10% 혼합			부피비	부피비	-/12.2	1.30x10 ⁻¹¹ (ρ _p 1.58 g/cm³)	5.9	2.05 (ρ _p 1.58 g/cm³)	455.50 (배가율 86.00%)	부피비
흑연 10% 혼합			부피비	부피비	-/12.2	7.34x10 ⁻¹¹ (ρ _p 1.61 g/cm³)	5.5	1.47 (ρ _p 1.61 g/cm³)	1,094.93 (WK 기준)	1.75 (WK 기준)
중간 3% 혼합			부피비	부피비	-/12.2	1.11 (ρ _p 1.59 g/cm³)	6.5	3 (ρ _p 1.626 g/cm³)	810.20 (배가율 89.31%)	부피비
중간 2% 혼합			부피비	부피비	-/12.2	0.92 (ρ _p 1.6 g/cm³)		907.76 (배가율 90.41%)		부피비
중간 1% 혼합			부피비	부피비	-/12.2	1.24 x10 ⁻¹¹ (ρ _p 1.59 g/cm³)	2.67	2.67 (ρ _p 1.61 g/cm³)	846.50 (배가율 90.41%)	부피비
강화유연 1% 혼합			부피비	부피비	-/12.2	1.008 (ρ _p 1.617 g/cm³)		808.78 (배가율 89.01%)		부피비
화강암 가루 10% 혼합			부피비	부피비	-/12.2	1.0178 (ρ _p 1.647 g/cm³)	6	6 (ρ _p 1.63 g/cm³)	633.80 (배가율 86.38%)	부피비
나노구리 10% 혼합			-/12.2	-/12.2	0.84 (ρ _p 1.595 g/cm³)	경형 x	5.6	경형 x	640.90 (배가율 86.52%)	0.61

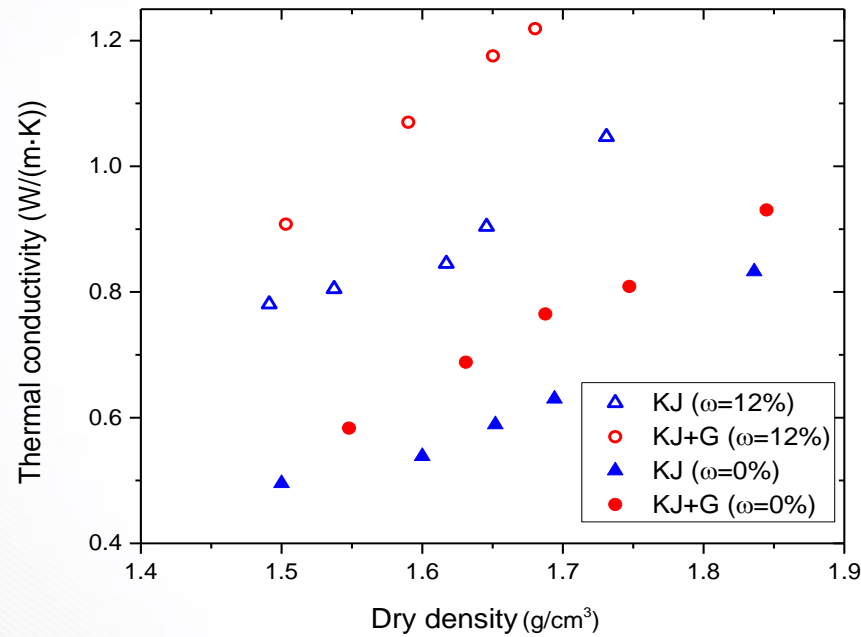
	C content (Organic carbon) (%)	도량형 (%)	주기 함유비 (%)	분말 밀도 (g/cm³)	분말 입자 크기 (μm)	수리전도도 (mS/cm)	양분치수 (Mg/g)	양분함량 (%)	Kd (Cs, mL/g)	Kd (I, mL/g)			
WRK	0.33 (과민형)		과민형		13.26/13.26	-/13.26	0.127 (ρ _p 0.88 g/cm³)	0.91 (ρ _p 1.59 g/cm³)	1.3x10 ⁻¹¹ (ρ _p 1.6 g/cm³)	5	3.38 (ρ _p 1.6 g/cm³)	1665 (94.3%)	1.325 (1.3%)
흡위향상 (WRK 기준)			과민형		13.26/13.26	0.1158 (ρ _p 0.88 g/cm³)	0.7119 (ρ _p 1.45 g/cm³)	2.75x10 ⁻¹¹ (ρ _p 1.6 g/cm³)	6.5	3.91 (ρ _p 1.6 g/cm³)			
흡위향상 (2년)			과민형		-/13.11	-	0.895 (ρ _p 1.59 g/cm³)	1.35x10 ⁻¹¹ (ρ _p 1.6 g/cm³)		3.47 (ρ _p 1.57 g/cm³)			
LDH 표면개질			과민형		-/13.26	0.17 (ρ _p 0.86 g/cm³)	0.7418 (ρ _p 1.60 g/cm³)	1.38x10 ⁻¹⁰ (ρ _p 1.63 g/cm³)	3.5	0.87 (ρ _p 1.61 g/cm³)			
LDH 표면개질 10% 혼합			과민형		-/13.26	-	0.837 (ρ _p 1.59 g/cm³)	1.11x10 ⁻¹¹ (ρ _p 1.6 g/cm³)	4.85				
LDH-Alumina 표면개질			과민형		-/13.26	-	0.98 (ρ _p 1.59 g/cm³)						
CS 복합 표면개질			과민형		-/13.26	-	0.87 (ρ _p 1.6 g/cm³)						
Co 주입 표면개질			과민형		-/13.26	-	0.76 (ρ _p 1.62 g/cm³)						
MgAl-LDH 표면개질			과민형		7.6/13.26	-	0.89 (ρ _p 1.608 g/cm³)	4.92x10 ⁻¹¹ (ρ _p 1.58 g/cm³)	4.75	3.4 (ρ _p 1.58 g/cm³)	2.018 (흡착률: 95%)	31.61 (흡착률: 24%)	
산화유연 1% 혼합			과민형		-/12.2	-	0.89 (ρ _p 1.6 g/cm³)	2.35 x10 ⁻¹¹ (ρ _p 1.6 g/cm³)		3.43 (ρ _p 1.6 g/cm³)			
구리코팅 실리카 10% 혼합			과민형		-/12.2	-	0.83 (ρ _p 1.59 g/cm³)	6.79 x10 ⁻¹¹ (ρ _p 1.59 g/cm³)		2.23 (ρ _p 1.59 g/cm³)	1,095.21 (WK 기준)	1.75 (WK 기준)	

	Gs	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index (%)	USCS	Water content (%)	BET (m²/g)	D ₅₀ (μm)	Z ₂₀₀ passing rate (%)	C content (Organic carbon) (%)	S content (%)	CEC (cmol/kg)
KI-II	2.71	146.7	28.4	118.3	CH	11-12	61.5	3.1	48.4	0.75 (0.25)	0.30	
Bentonit	2.540											86.62
Joomunjin sand	2.69				SP	0	0.2802	540	0	0.04	< 0.001	0.64
Silica Sand	2.69											
Graphite (powder)												
Granular	2.7	130.6	33	97.6								
Cu-coating Sand												
Cu-Fe coating sand												
Granite (powder)	2.68											
SiC	3.272											

05 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 흑연-벤토나이트 혼합재

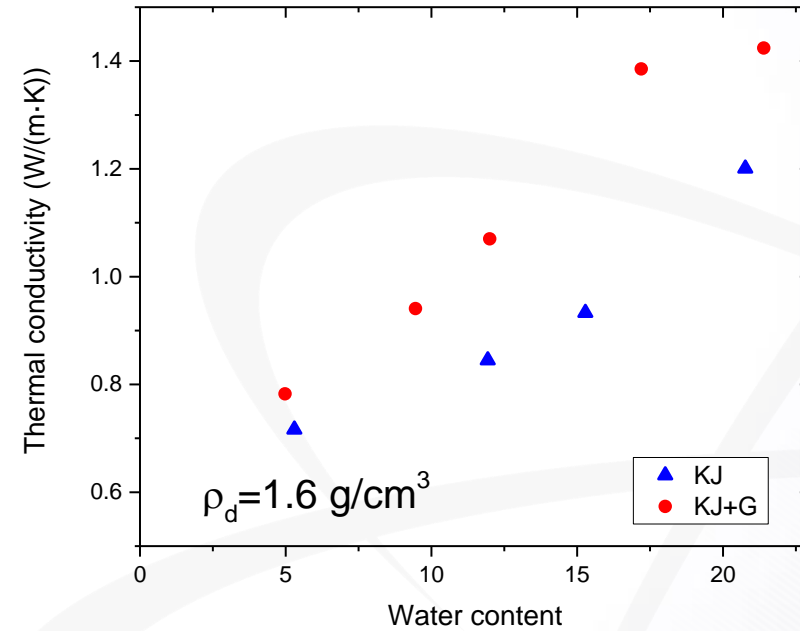
» KJ 벤토나이트+흑연 3%첨가 고기능 완충재-열전도도

건조밀도에 따른 열전도도



열전도도 10~28% **상승**

함수비에 따른 열전도도



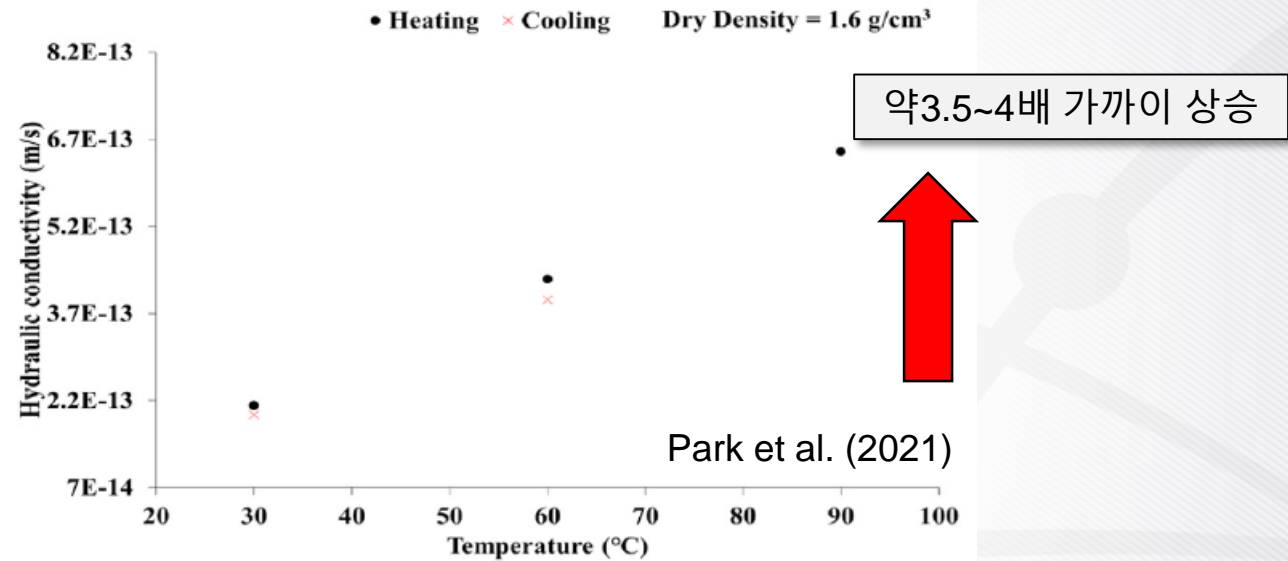
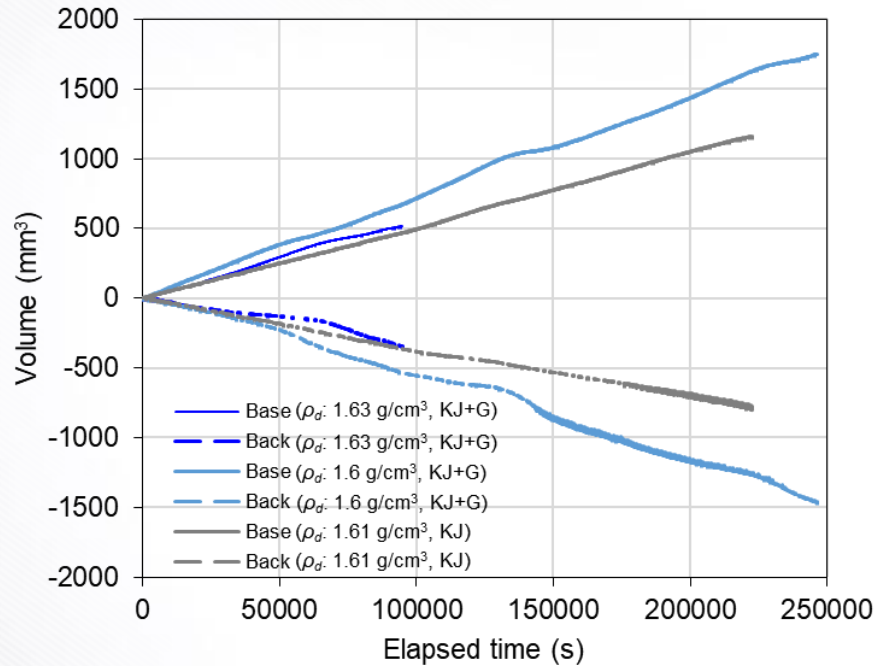
함수비 증가에 따른 열전도도 증가율 **상승**

❖ 포화도와 건조밀도에 따른 흑연 3%첨가 고기능 완충재 열전도도 모델

$$\lambda = -1.094 + 0.897S + 1.089\rho_d \quad (R^2=0.97)$$

05 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 흑연-벤토나이트 혼합재

» 흑연 3%첨가 고기능 완충재-수리전도도

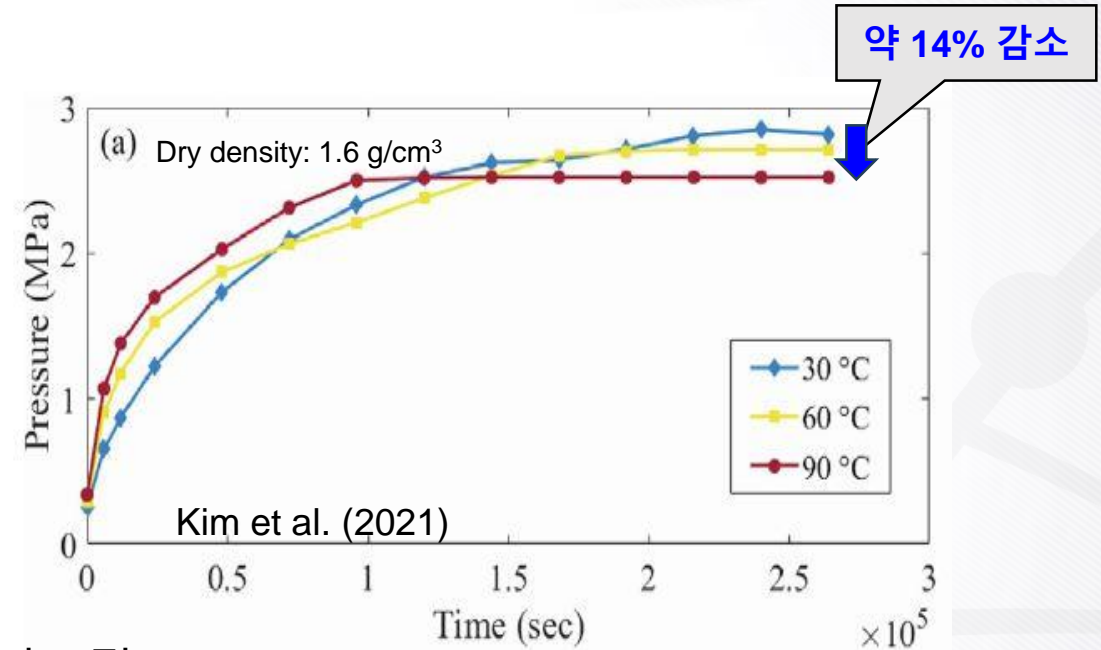
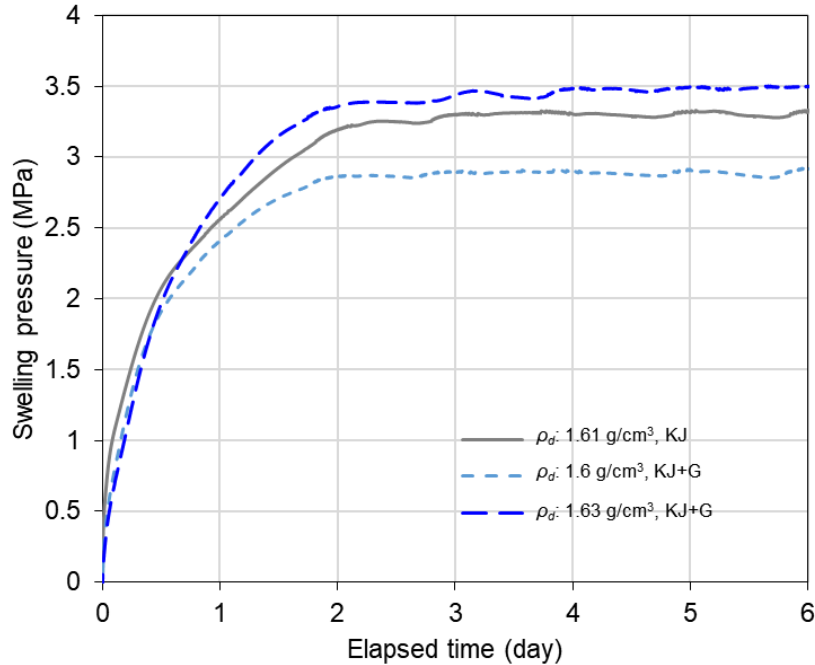


- 건조밀도 1.63 g/cm³
 $1.60 \times 10^{-13} \text{ m/s} \xrightarrow{\times 4} \approx 6.4 \times 10^{-13} \text{ m/s} < 10^{-12} \text{ m/s}$

Specimen	Dry density (g/cm ³)	Hydraulic conductivity (m/s)	Note
KJ-II	1.61	1.73×10^{-13}	Initial water content: 12.2%
KJ-II-3% graphite mixture	1.60	3.00×10^{-13}	
	1.63	1.60×10^{-13}	

05 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 흑연-벤토나이트 혼합재

» 흑연 3%첨가 고기능 완충재-팽윤압



■ 건조밀도 1.63 g/cm^3
 $3.5 \text{ MPa} \xrightarrow{14\% \downarrow} \approx 3.01 \text{ MPa} \approx 3 \text{ MPa}$

Specimen	Dry density (g/cm^3)	Swelling pressure (MPa)	Note
KJ-II	1.61	3.33	Initial water content: 12.2%
KJ-II-3% graphite mixture	1.60	2.92	
KJ-II-3% graphite mixture	1.63	3.5	

05 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 흑연-벤토나이트 혼합재

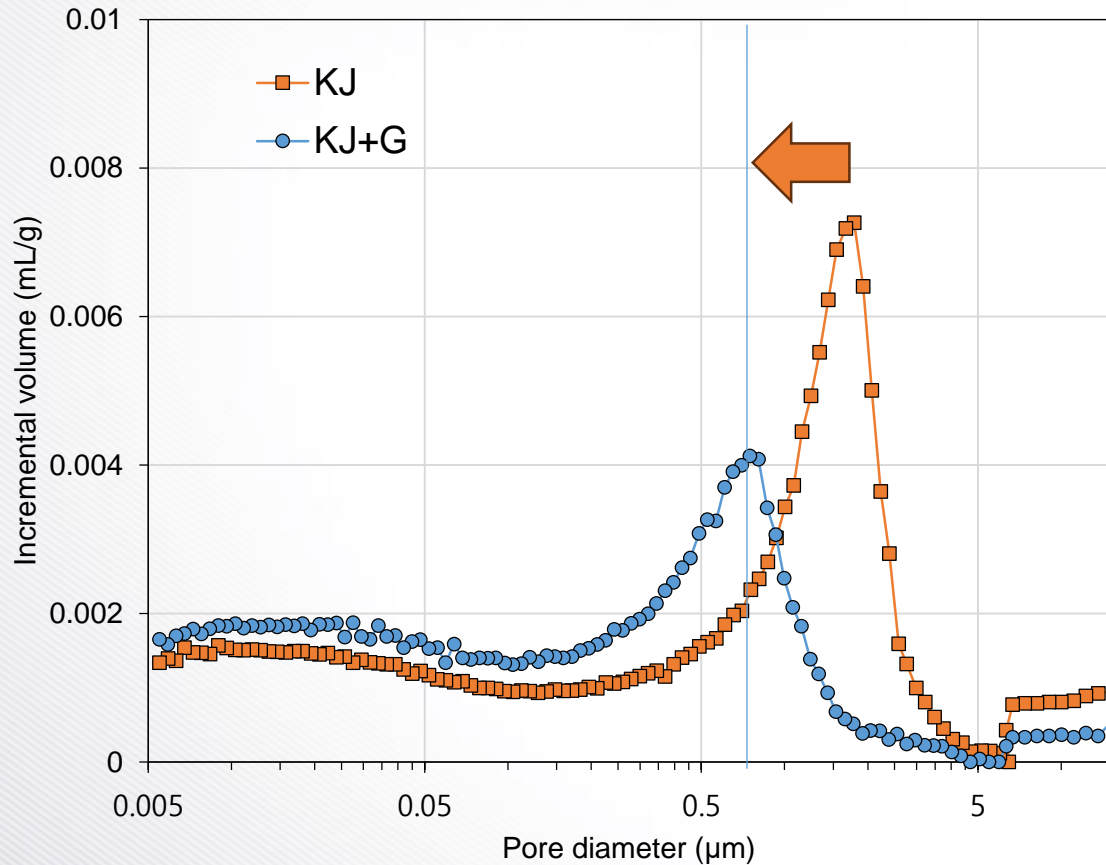
» 흑연 3%첨가 고기능 완충재-일축압축강도

	건조밀도	함수비	일축압축강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	포아송비
Pure Ben	1.75	0.12	14.3	1.33	0.226
Pure Ben	1.79	0.125	12.76	1.818	0.284
흑연3%첨가	1.74	0.12	11.9	1.38	0.238
흑연3%첨가	1.75	0.12	12.2	1.33	0.239

- 흑연3% 첨가시 압축강도는 대략 10% 정도 감소하나 탄성계수나 포아송비는 큰 차이가 없음

05 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 흑연-벤토나이트 혼합재

» 흑연 3%첨가 고기능 완충재-미생물 성장 및 핵종 Cs 제거율



- 흑연3% 첨가 고기능 완충재의 경우 순수 벤토나이트 완충재 보다 공극의 크기가 감소



기존 대비 공극의 크기가 감소함으로써, 미생물 생장의 억제 조건인 공간적 제약측면이 더욱 강화 됨

Material mixed ratio [%]		Cs adsorption	
KJ-II	Graphite	Sorbed amount [mol/g]	Removal [%]
100	-	6.30×10^{-5}	88.3
99	1	6.25×10^{-5}	87.5
98	2	6.19×10^{-5}	86.7
97	3	6.14×10^{-5}	85.9

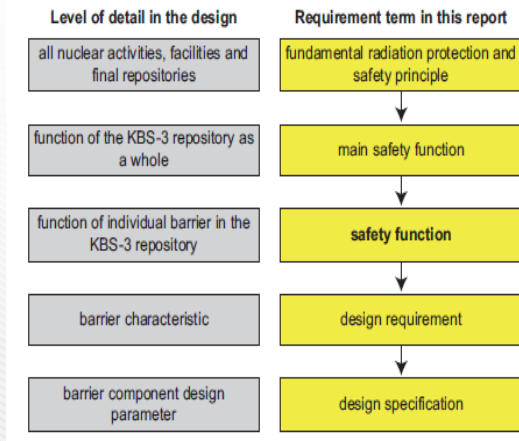
↳ Cs 제거율이 기존 88.3%에서 흑연 3%첨가시 85.9%로 기존대비 2.4% 감소

05 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 흑연-벤토나이트 혼합재

» KJ 벤토나이트+흑연 3%첨가 고기능 완충재-결론

- 건조밀도 1.63 g/cm³의 THMC 성능을 고려하였을 때, 100 °C 기준에서 성능적 여유를 고려하여 흑연 3%첨가 KJ-II 고기능 완충재의 건조밀도는 **1.65 g/cm³** 이상이 되어야 적합함.

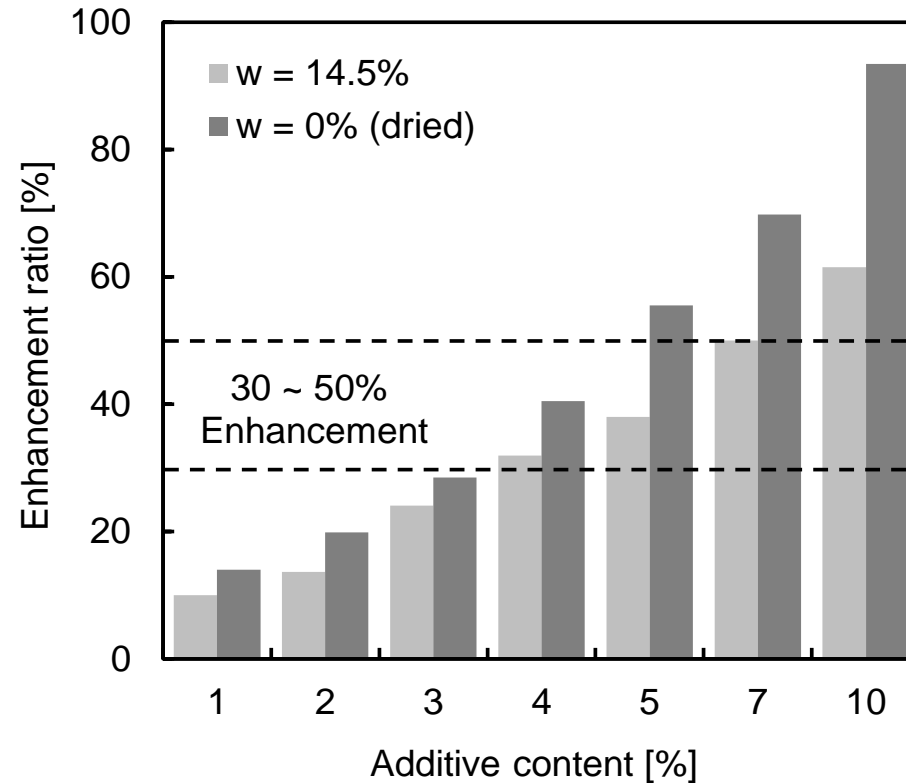
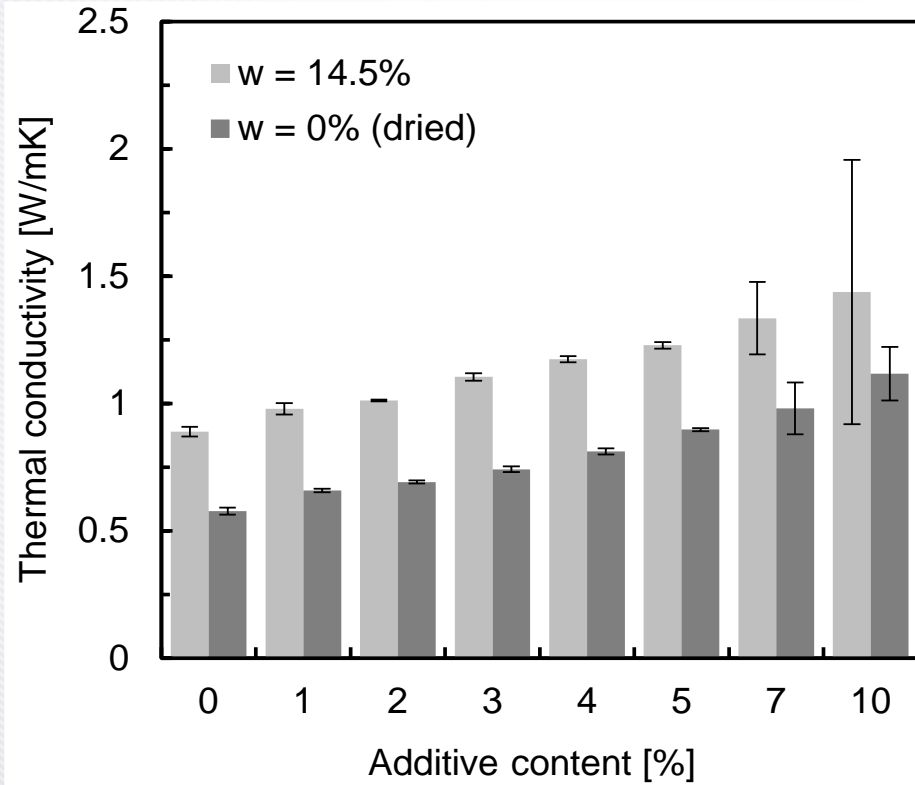
Specimen	Dry density (g/cm ³)	Hydraulic conductivity (m/s)	Swelling pressure (MPa)	Note
KJ-II-3% graphite mixture	1.63	1.60 x 10 ⁻¹³	3.5	Initial water content: 12.2%
	1.65	↓	↑ (Exponentially)	



Characteristics	Safety function	Performance target
Hydraulic conductivity	Limit advective mass transfer	< 10 ⁻¹² m/s
Swelling pressure	Keep the canister in position	> 0.2 MPa
	Limit advective mass transfer	> 1 MPa
	Limit microbial activity	> 2 MPa
Temperature	Limit pressure on the canister	< 10 MPa when determined with a specific laboratory test procedure
	Resist transformation	< 100 °C
	Protect the canister from detrimental mechanical loads	> -2.5 °C

05 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 흑연-벤토나이트 혼합재

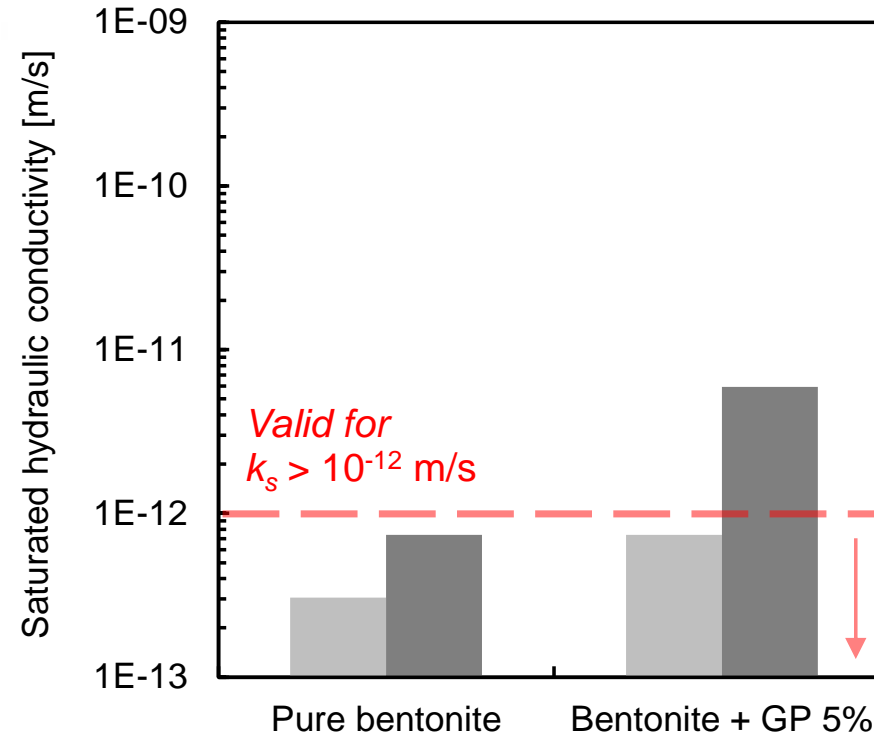
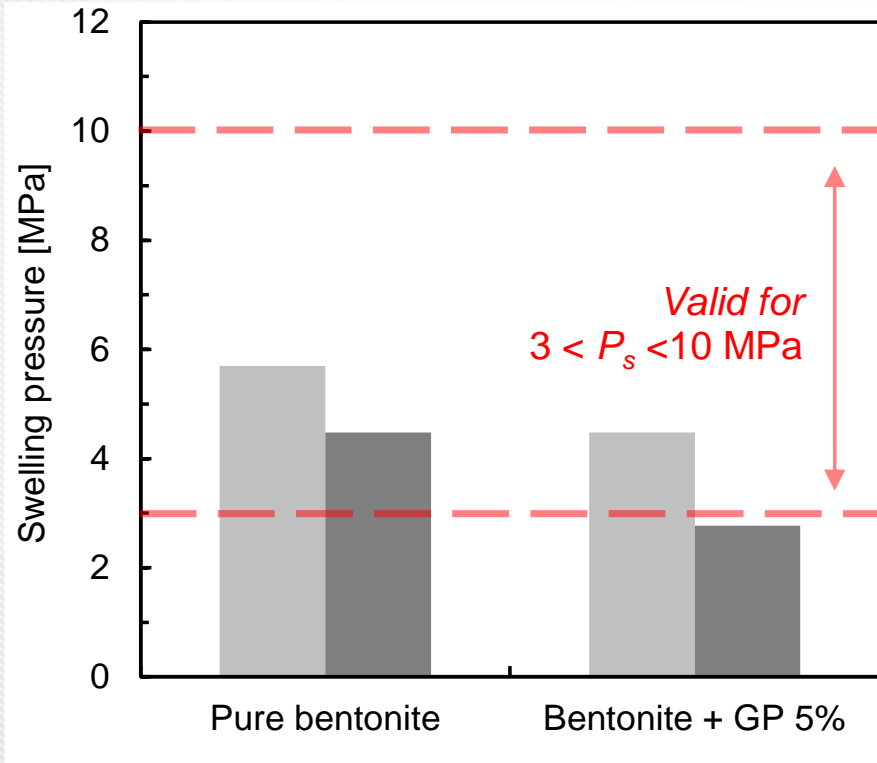
» Bentonil 벤토나이트+흑연 첨가율에 따른 열전도도 규명



- 흑연 첨가율이 증가할수록 열전도도는 비례적으로 증가하였음 (rd=1.6, w=14.5% 조건)
- 흑연 5% 첨가시 30~50% 열전도도가 증가하였음

05 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 흑연-벤토나이트 혼합재

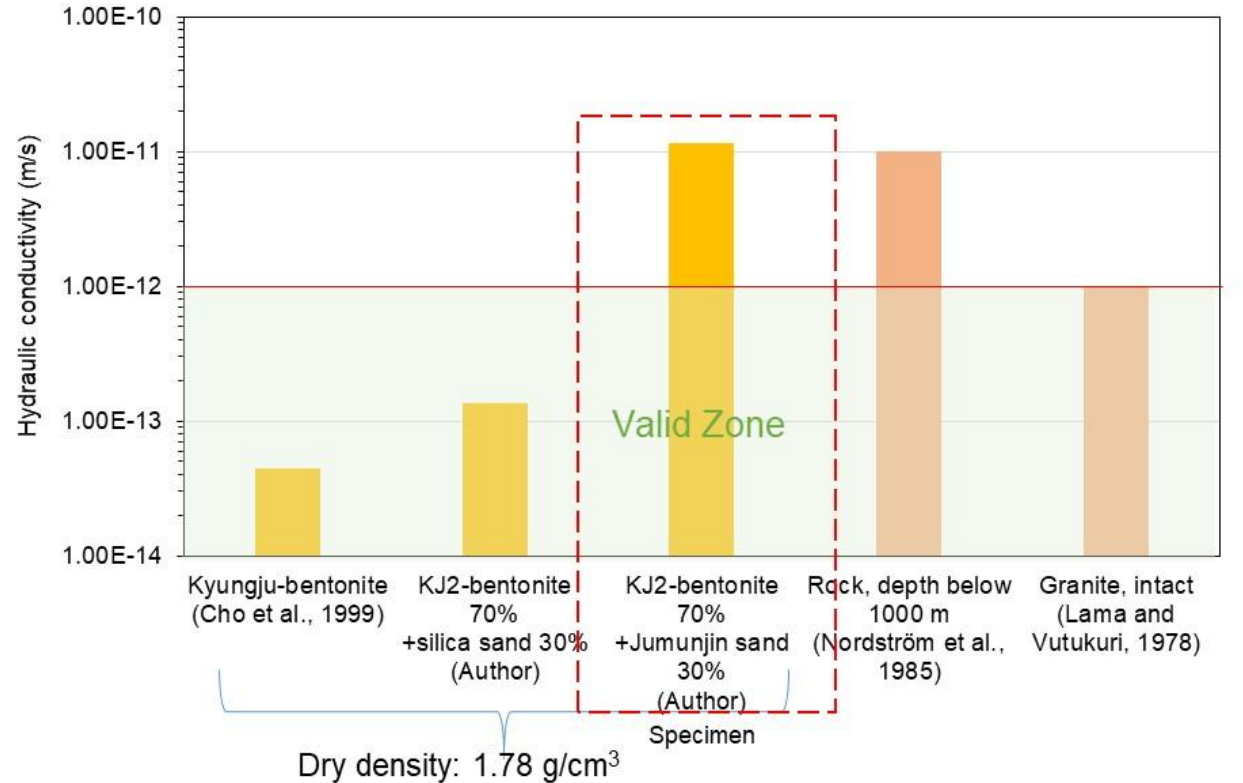
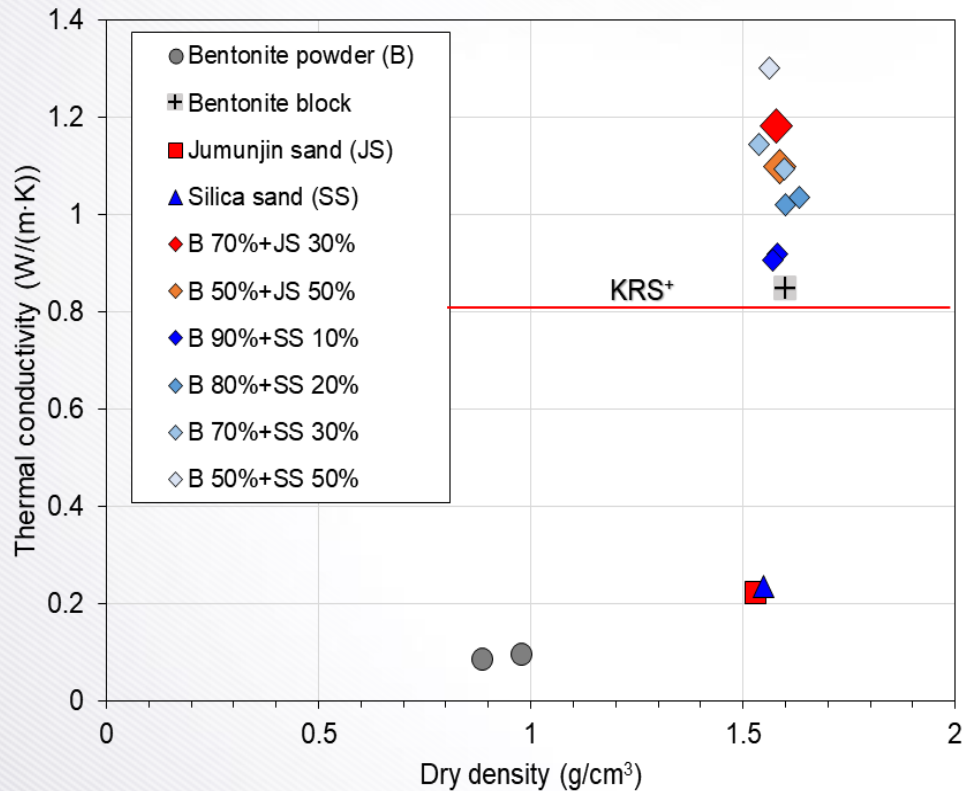
» Bentonil 벤토나이트+흑연 5% 혼합재의 팽윤압/수리전도도



- 흑연 5% 첨가시 rd 1.6일때 상온에서 팽윤압과 수리전도도는 성능 기준을 충족함 (단 90도는 충족 못함)
- 흑연 첨가를 4%로 줄이거나, rd 상승 등의 최적화 필요

06 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 모래-벤토나이트 혼합재

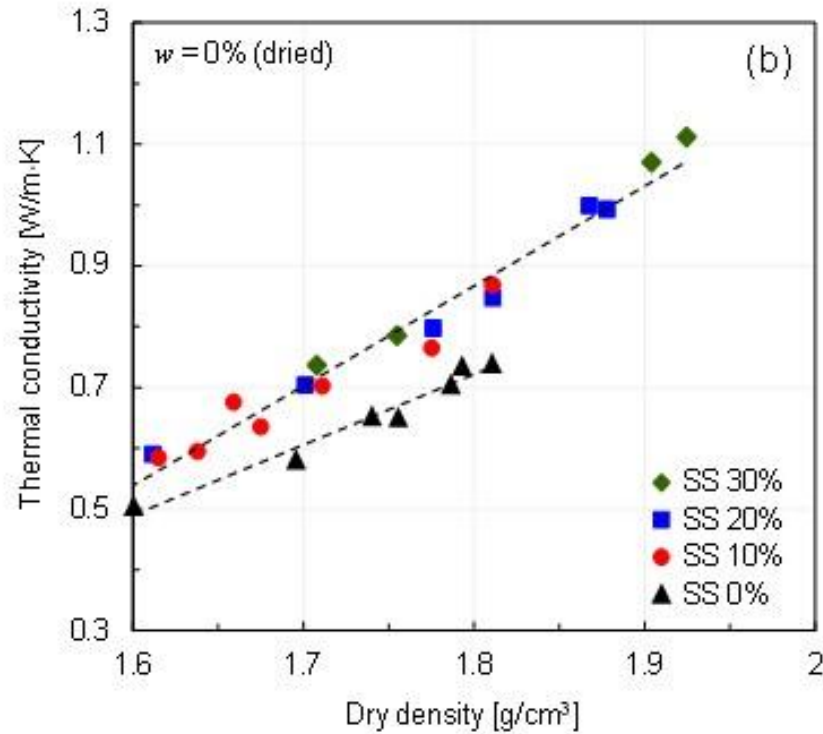
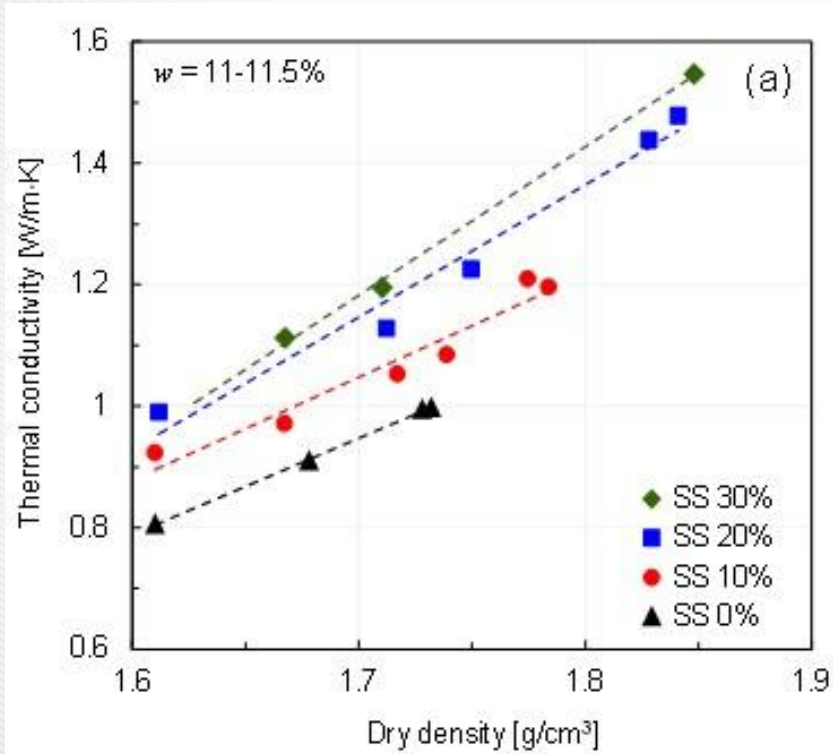
» 모래 첨가 고기능 완충재 연구 현황 (KJ 벤토나이트 활용)



- . 모래 30% 첨가시에는 수리전도도 기준 충족이 어려움
- . 모래 첨가율이 증가할수록 열전도도 증가율도 감소

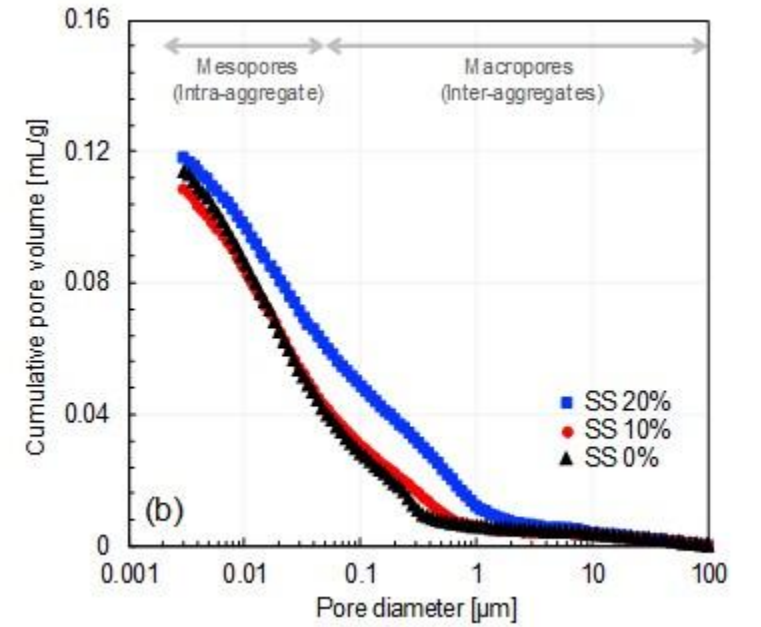
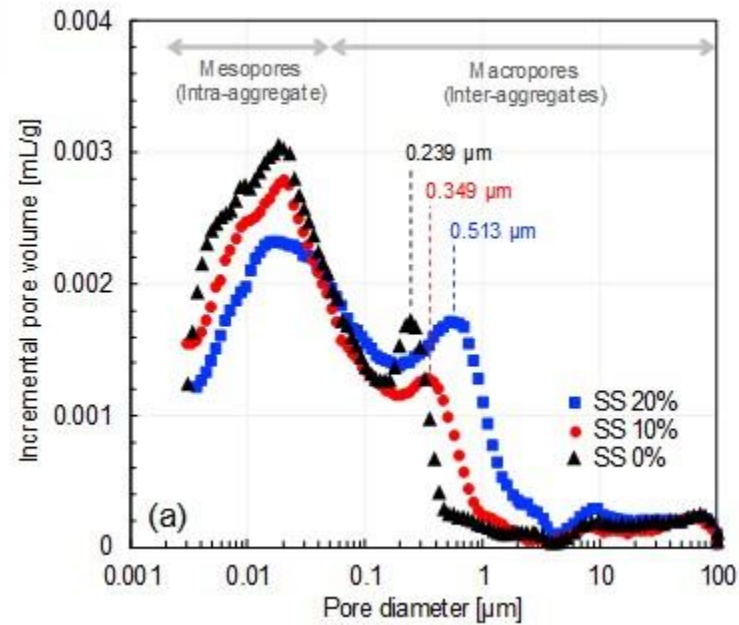
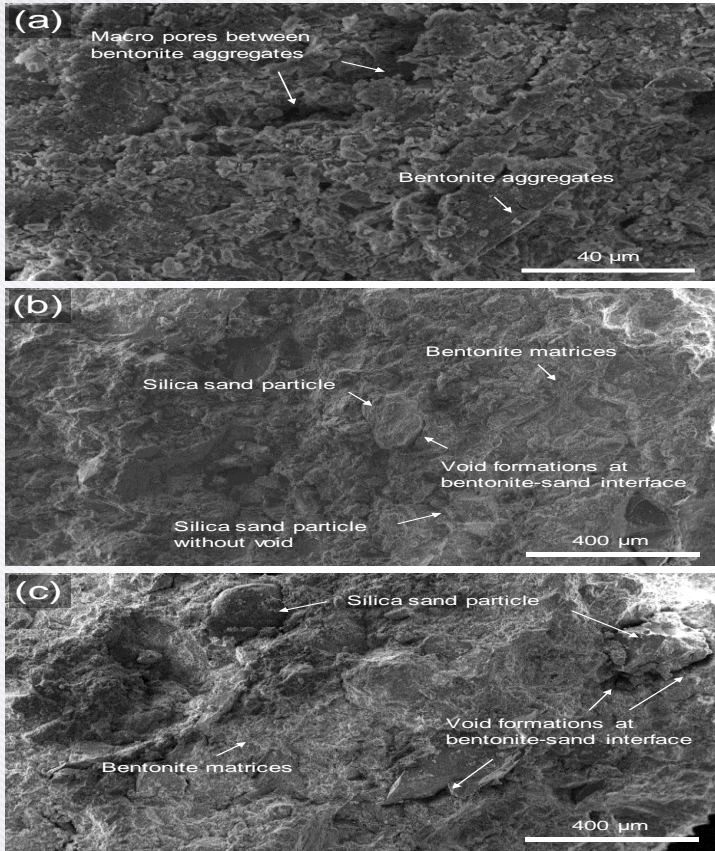
06 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 모래-벤토나이트 혼합재

» 모래 첨가(SS: Silica sand) 고기능 완충재 연구 현황 (Bentonil 활용)



- . 모래 첨가율이 증가할수록 열전도도는 증가함 (건조 조건에서는 크게 차이가 없음)
- . 건조밀도가 클수록 모래 첨가율에 따른 열전도도 차이도 크게 나타남

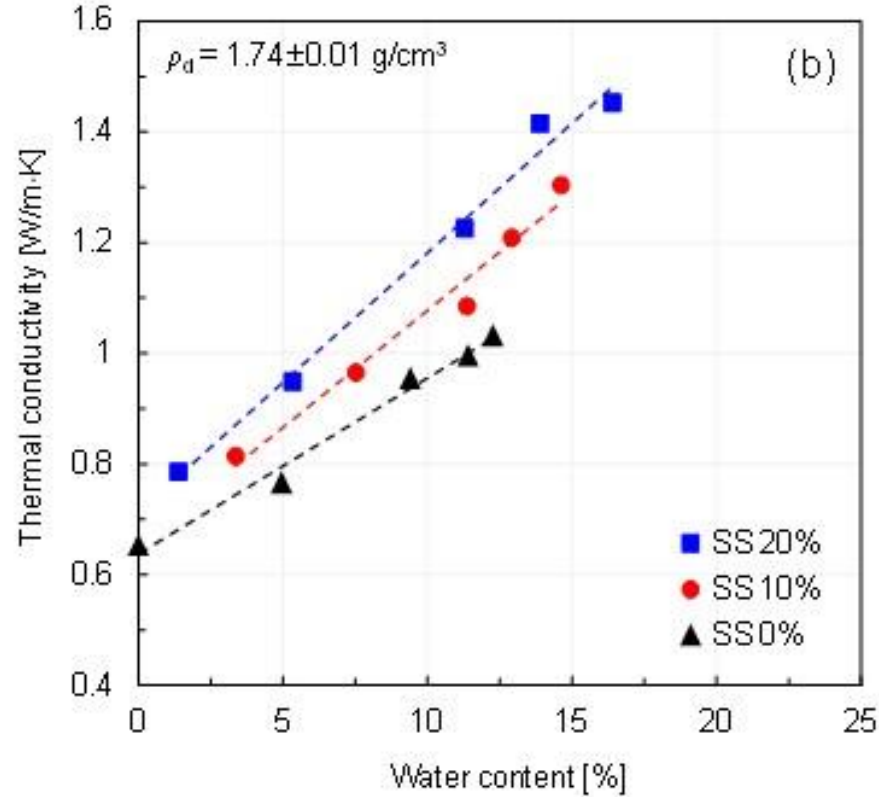
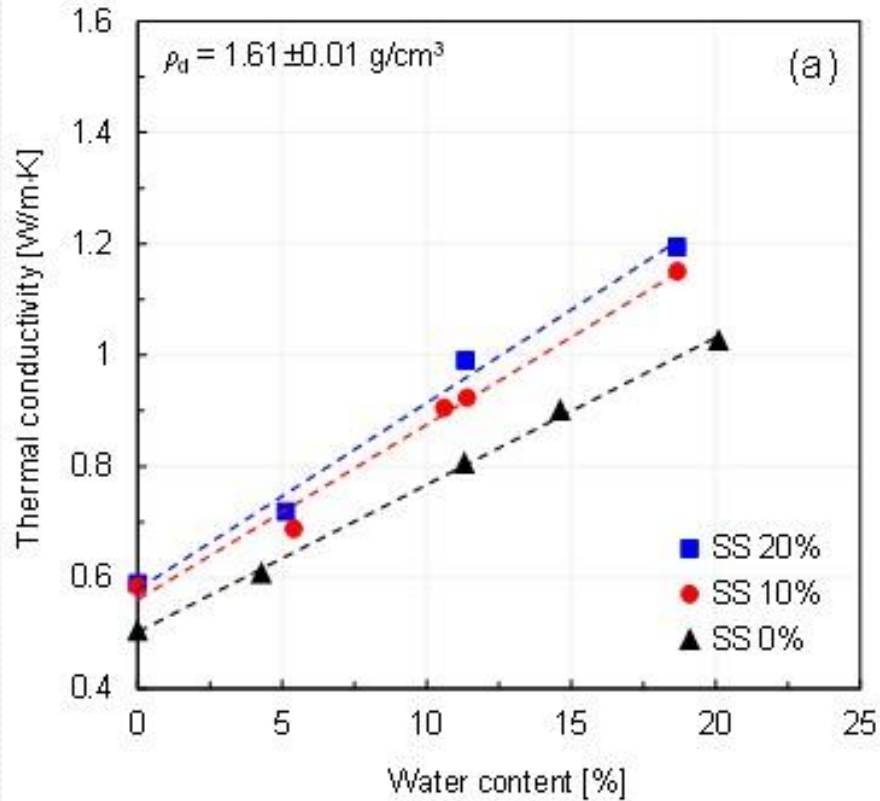
06 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 모래-벤토나이트 혼합재



. 건조 시료에 대한 SEM/MIP 분석

→ SS 함량이 높을수록 pore size가 증가 (macropore 비율이 증가)

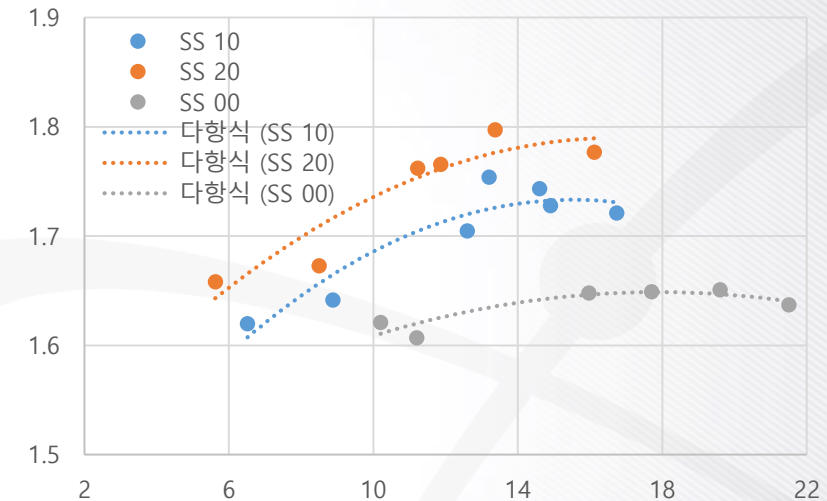
06 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 모래-벤토나이트 혼합재



- . 전체적으로 건조밀도가 증가하고 함수비가 증가할수록 모래 첨가에 따른 열전도도 증가효과가 크게 나타남
- . Ca형 벤토나이트를 고려하여 수리전도도와 팽윤압 특성 고려하여 모래 첨가를 결정 필요

06 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 모래-벤토나이트 혼합재

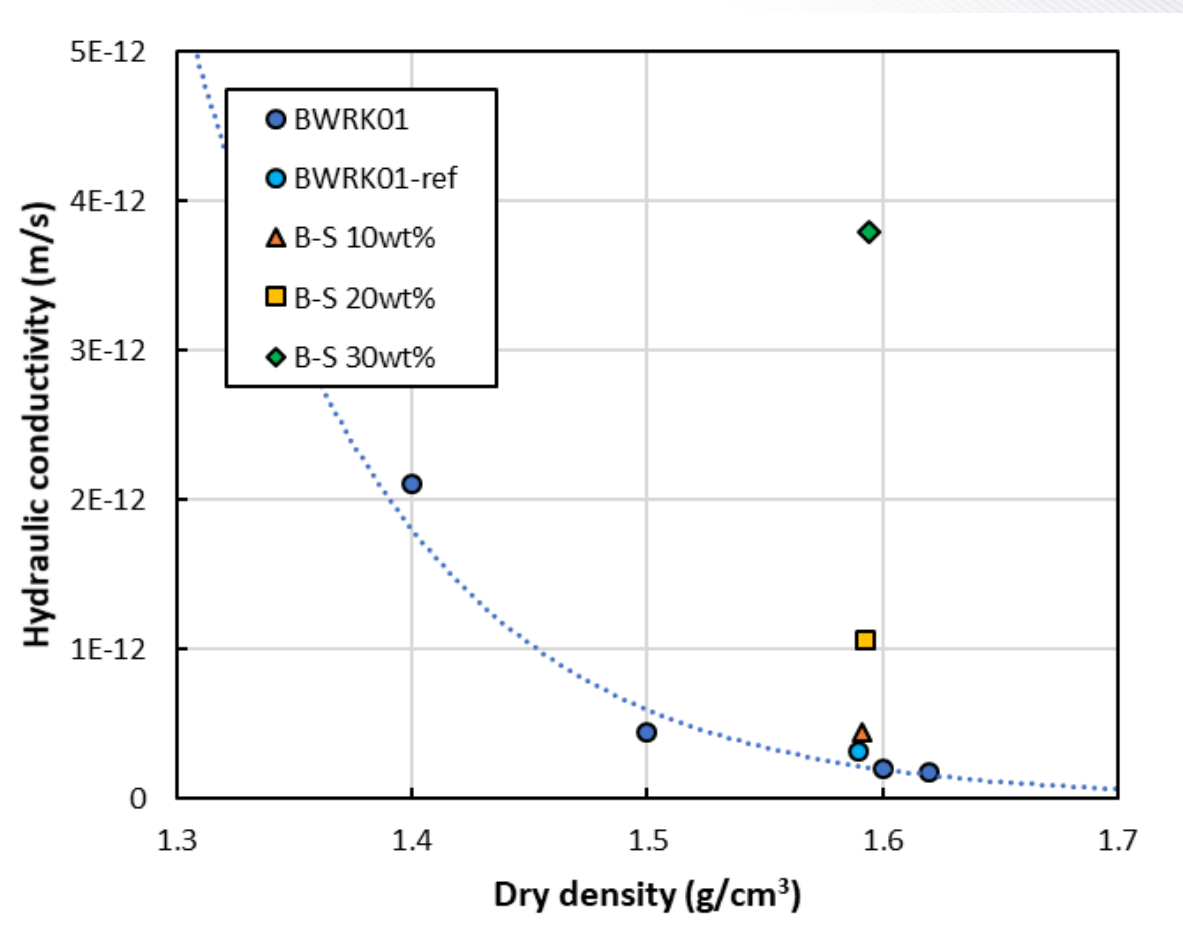
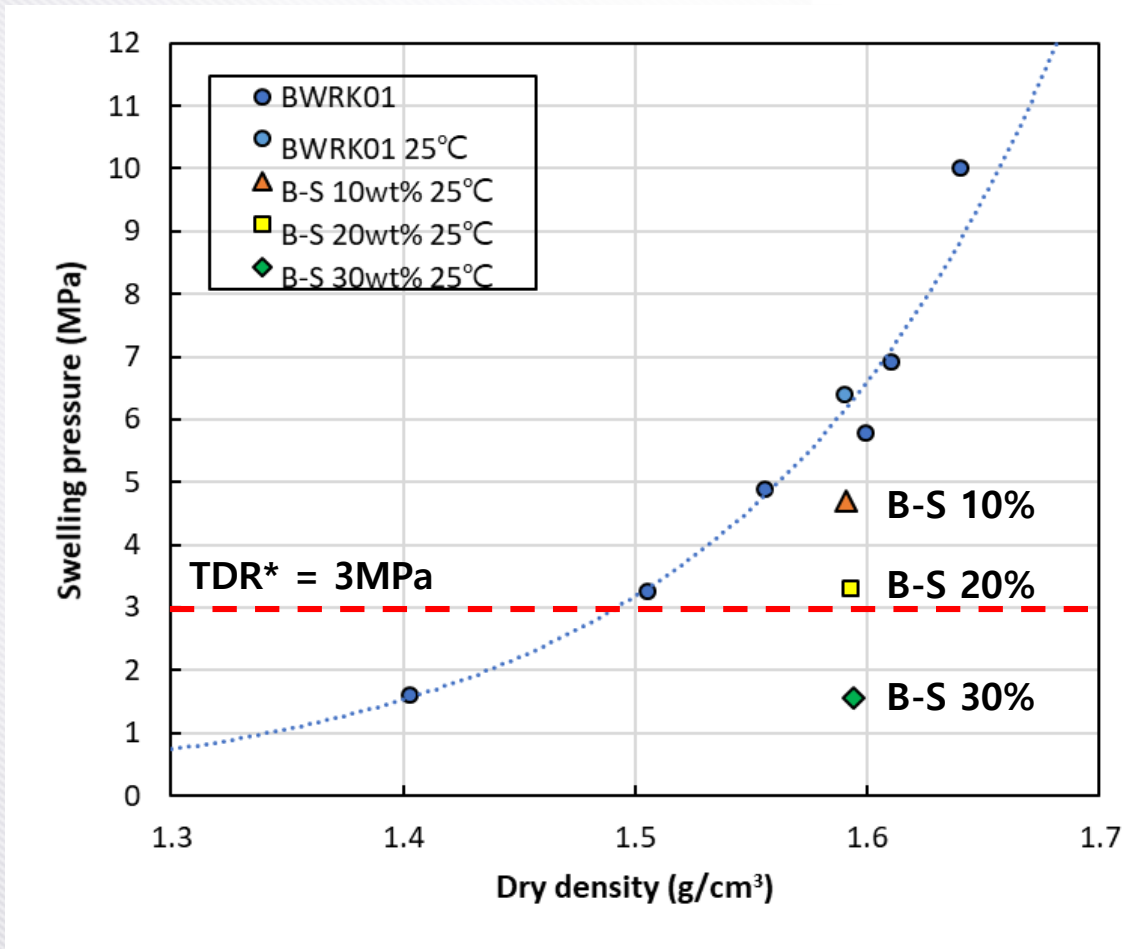
구분	N	거동 모델 (1차 linear)	함수비 범위 (%)	건조밀도 범위 (g/cm ³)
SS 0	50	R ² =0.985	0~21%	1.51~1.81
SS 10	41	R ² =0.970	0~19%	1.57~1.84
SS 20	30	R ² =0.965	0~19%	1.57~1.88



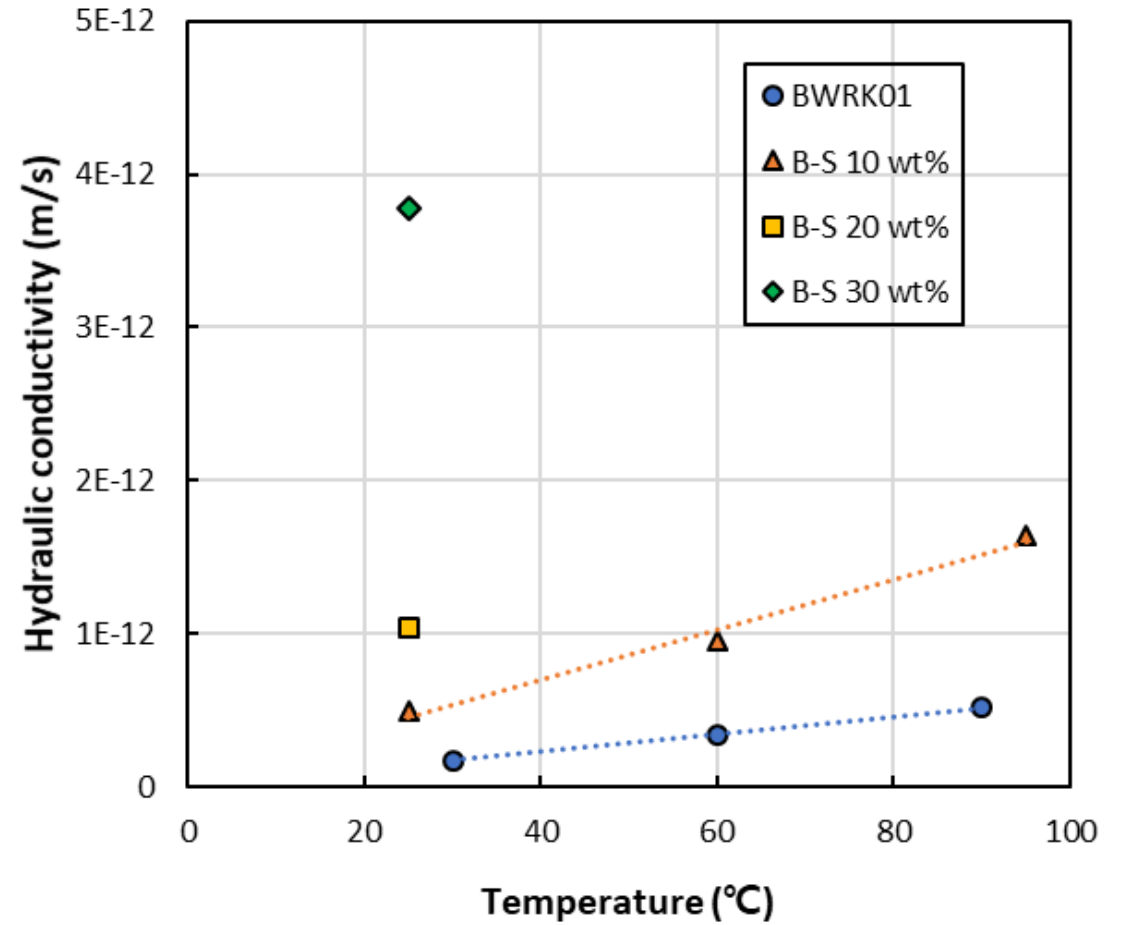
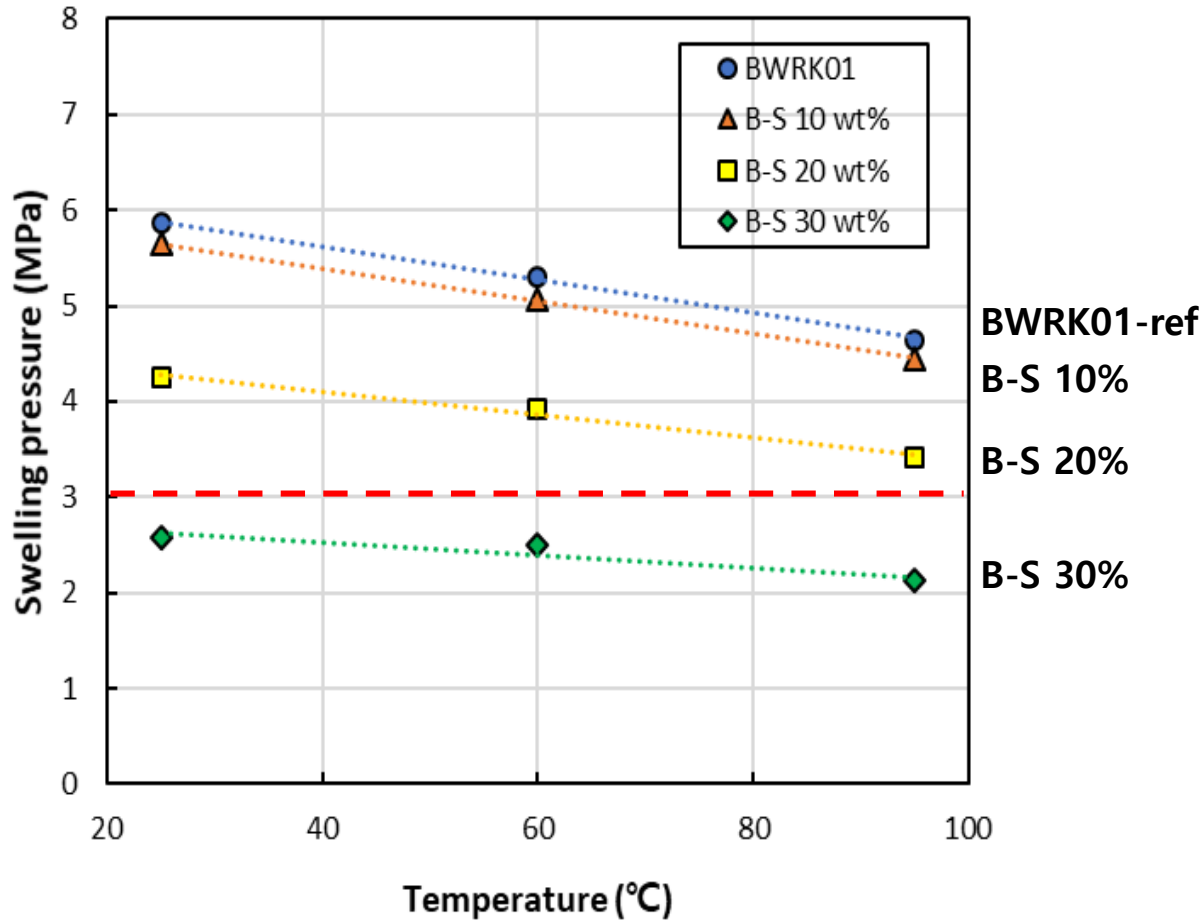
- . 전체적으로 SS 10% 추가시 열전도도는 약 10% 상승, 20% 추가시 약 20% 상승하였음
- . Ca-type을 고려했을 때 (팽윤압 및 수리전도도 성능 타겟 만족을 위해), 30% 이상 추가는 어려울 것으로 판단됨
→ SS 함량을 더미변수로 하여 더미회귀모델 개발

06 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 모래-벤토나이트 혼합재

» 모래 첨가 고기능 완충재 (Bentonil 활용) 팽윤압 및 수리전도도 결과



06 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 모래-벤토나이트 혼합재



- 수리전도도/팽윤압 실험 결과 성능 타겟 충족을 위해서 모래 첨가는 20%에 건조밀도는 1.7 이상이 바람직함

종합 Summary

1. KJ 및 벤토닐 벤토나이트에 다양한 물질을 첨가한 혼합체 벤토나이트 THMC 물성 규명

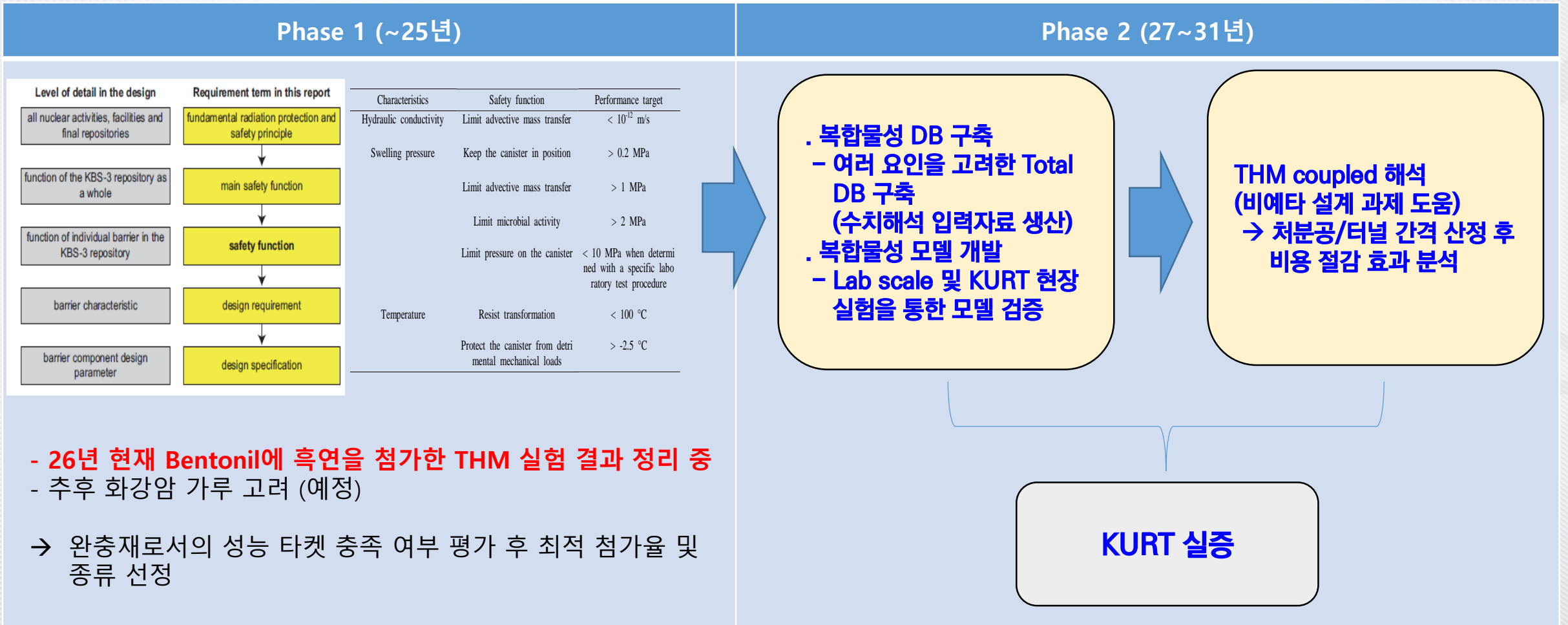
- KJ 벤토나이트 + 흑연 3% 첨가
- KJ 벤토나이트 + 모래 10% 첨가
- 벤토닐 WRK + 흑연 5% 첨가
- 벤토닐 WRK + 모래 20% 첨가

2. 화강암 가루, 나노 입자 등 다양한 첨가제 발굴 필요

3. 열전도도/수리전도도/팽윤압/핵종 제거율 외에 수분보유곡선, 강도 및 압밀 등과 같은 종합성능해석에 필요한 물성 도출 필요

07 고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가 추후 연구 계획

» Phase 2 연계 계획



THANK YOU