

열-역학적 연계해석 모델을 이용한 다중 열저장공동 안정성 분석

김현우, 박도현*, 박의섭, 선우춘

Stability Analysis of Multiple Thermal Energy Storage Caverns
Using a Coupled Thermal-Mechanical Model

Hyunwoo Kim, Dohyun Park*, Eui-Seob Park, Choon Sunwoo

Abstract Cavern Thermal Energy Storage system stores thermal energy in caverns to recover industrial waste heat or avoid the sporadic characteristics of renewable-energy resources, and its advantages include high injection-and-extraction powers and the flexibility in selecting a storage medium. In the present study, the structural stability of rock mass pillar between these silo-type storage caverns was assessed using a coupled thermal-mechanical model in FLAC^{3D}. The results of numerical simulations showed that thermal stresses due to long-term storage depended on pillar width and had significant effect on the pillar stability. A sensitivity analysis of main factors indicated that the influence on the pillar stability increased in the order cavern depth < pillar width < in situ condition. It was suggested that two identical caverns should be separated by at least one diameter of the cavern and small-diameter shaft neighboring the cavern should be separated by more than half of the cavern diameter. Meanwhile, when the line of centers of two caverns was parallel to the direction of maximum horizontal principal stress, the shielding effect of the caverns could minimize an adverse effect caused by a large horizontal stress.

Key words Thermal energy storage, Multiple rock caverns, Thermal stress, Coupled thermal-mechanical model, Sensitivity analysis

초 록 암반공동을 이용한 열에너지 저장은 대용량 저장이 가능하며 열저장매체를 선택할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 사일로 형태의 열저장공동이 지반 내 두 개 이상 배치될 때 공동 사이에 형성되는 암반 필라의 안정성에 대해 3차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC^{3D}를 이용하여 분석하였으며, 저장된 열에너지로 인해 암반에 발생하는 열응력을 반영할 수 있도록 열-역학적 연계모델을 사용하였다. 해석 결과, 열에너지 장기 저장으로 인해 암반 필라에 작용하는 최대주응력이 상당량 증가하였으며, 필라 폭이 좁아질수록 근접한 열원 때문에 열응력 증가량도 커짐을 확인하였다. 필라 안정성에 영향을 미치는 주요인자로서 저장공동 간격, 측압계수, 심도를 선정하고 민감도 분석을 실시한 결과, 측압계수, 저장공동 간격, 심도 순서로 영향력이 크게 평가되었다. 저장공동 간격의 경우 동일한 크기의 공동 건설 시 필라 폭을 최소 저장공동 직경 이상 확보해야 할 것으로 판단되었다. 큰 규모의 저장공동 주변에 소규모 수직갱이 설치될 때는 최소한 저장공동 직경의 0.5배 이상 이격함으로써 크기 차이로 인해 수직갱에 응력이 집중되는 현상을 해소할 수 있었다. 또한 최대수평주응력 작용방향과 공동 중심을 잇는 축이 평행하도록 배치하여 저장공동에 의한 방패효과가 발휘될 수 있게 함으로써 현시응력이 공동 사이 암반 필라에 미치는 영향을 최소화할 수 있었다.

핵심어 열에너지 저장, 다중 암반공동, 열응력, 열-역학적 연계모델, 민감도 분석

Received: Aug. 5, 2014

Revised: Aug. 25, 2014

Accepted: Aug. 27, 2014

*Corresponding Author: Dohyun Park

Tel) +82428683913, Fax) +82428683416

E-Mail) parkdo@kigam.re.kr

KIGAM, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

1. 서 론

지하 열에너지 저장은 에너지의 공급 및 수요 간 시간적, 양적 불균형을 보완하고 이용 효율을 높이기 위해 신재생에너지, 잉여전력, 산업폐열 등을 열에너지 형태로 전도율이 낮은 암반 내 특정 공간에 장단 기간 저장하는 기술이다. 열에너지 저장 공간으로는 주로 대수

층, 시추공, 암반공동이 이용되는데 대수층 열저장은 비열이 높은 지하수를 이용하므로 효율이 높으나 기술적으로 복잡하고 지하수가 오염될 가능성이 있으며(Shim and Lee, 2010), 시추공 열저장은 수요에 따라 확장하기 쉬운 장점이 있지만 지중 열교환기 간격 등 주요 설계요소들이 지반의 열적 특성에 크게 좌우되는 측면이 있다(Pavlov and Olesen, 2011). 한편 암반공동 저장(cavern thermal energy storage) 시스템은 초기 건설비용이 상대적으로 고가이지만 대용량의 열에너지 저장할 수 있으며 목적에 따라 열저장매체를 선택할 수 있는 장점이 있다(Nordell et al., 2007).

열에너지 저장용 암반공동을 설계할 때는 공동의 구조적 안정성과 더불어 저장능력이 고려되어야 한다. 안정성과 저장능력은 다소 상충되는 측면이 있으며, 저장공동의 종횡비(폭에 대한 높이 비)가 커질수록 저장된 열에너지의 성층화(stratification)가 높게 유지되어 저장능력은 향상되지만 공동 폭에 비해 높이가 커짐으로써 역학적 안정성이 저하되는 것으로 분석되었다(Park et al., 2013b). 이에 대한 절충안으로 단일 암반공동을 종횡비가 높고 상대적으로 소규모인 다중공동으로 분할 시공하는 방법이 제안될 수 있다. 그러나 다중공동을 설치하면 주변 암반과 열교환이 일어날 수 있는 표면적이 증가하여 공동 외부로의 열손실도 증가하게 되며, 이를 줄이기 위해서는 가급적 저장공동을 인접 배치하여 저장된 열원으로 히팅(heating)된 암반을 최대한 활용할 필요가 있다. 연구 결과, 지하 열저장공동이 오랜 기간 운영되어 주변 암반 온도가 초기단계보다 높게 유지되면 열저장매체의 열성층도도 높게 유지될 뿐만 아니라 외부로의 열손실 역시 감소하기 때문이다(Park et al., 2013a).

본 연구에서는 이러한 목적에 따라 인접한 다중 열저장공동을 건설 및 운영하고자 할 때 저장공동 간격, 측압계수, 심도 등 주요인자들이 공동 사이 암반 필라(rock mass pillar)의 안정성에 미치는 영향을 수치해석적으로 검토하였다. 먼저 열-역학적 연계해석 모델을 이용한 분석 결과와 열에너지 저장 없이 역학적 측면만 고려된 경우를 비교함으로써 안정성 분석 시 열영향 고려 필요성을 확인하였다. 민감도 분석을 통해 주요인자들이 필라 안정성에 미치는 영향을 비교하였으며, 구조적 안정성을 확보할 수 있는 저장공동 간격 및 배치방향에 대해 상세히 검토하였다.

2. 다중 열저장공동 수치 모델링

2.1 열-역학적 연계해석

본 연구는 3차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC^{3D}

(Itasca, 2009)를 이용하여 수행되었으며, 열-역학적 연계해석을 위해 적용된 구성방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = 2G \left(\frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} - \alpha_t \frac{\partial T}{\partial t} \delta_{ij} \right) + \left(K - \frac{2}{3}G \right) \left(\frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial t} - 3\alpha_t \frac{\partial T}{\partial t} \right) \delta_{ij} \quad (1)$$

여기서, σ_{ij} 와 ε_{ij} 는 각각 전응력(Pa) 및 전변형률이며, K 와 G 는 각각 암반의 체적탄성계수(Pa) 및 전단계수(Pa), α_t 는 선형열팽창계수(linear thermal expansion coefficient, K^{-1})이다. T 는 온도(K), t 는 시간(s), δ_{ij} 는 크로네커 델타(Kronecker delta)이다. 한편 암반의 온도 변화는 다음 식 (2)에 제시된 바와 같이 에너지(ξ)와 체적변형(ε)에 의해 일어나게 되며, 에너지는 전도(conduction) 등에 의한 열유속(heat flux)이나 열원(heat source)을 의미한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = M_{th} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} - \beta_{th} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \quad (2)$$

여기서, ξ 는 단위체적당 축적된 열(J/m^3)이며 ε 은 체적변형이다. M_{th} 와 β_{th} 는 물질상수(material constant)로서 $M_{th} = 1/(\rho \cdot C_v)$ 이며, ρ 는 암반의 밀도(kg/m^3), C_v 는 비열($J/kg \cdot K$)이다. FLAC^{3D}는 준정적(quasi-static) 해석으로 역학적 해석 및 열해석을 반복하면서 연계해석을 구현하는데, 이 과정에서 온도에 거의 영향을 미치지 않는 수준에서 역학적인 변화가 발생하도록 매우 세분화된 시간간격(time step)을 적용한다. 따라서 해석 과정 중 체적변형이 온도에 미치는 영향은 미미하다는 전제 하에 물질상수 β_{th} 를 0으로 가정하며, 결과적으로 본 해석 모델에서 열원으로 인한 암반의 온도 변화는 열응력을 유발하지만 반대로 역학적인 변화가 암반 온도에 영향을 미치지 않는다.

2.2 온도에 따른 암반 물성의 변화

암반의 열적, 역학적 물성은 온도 증가에 따라 변하게 되며, 이와 관련된 연구들이 습곡, 지열활동, 마그마 관입 등 고온 환경에서 일어나는 지각작용을 이해할 목적으로 상온에서부터 1000°C 이상 광범위한 온도 조건에서 수행되어 왔다. 그 중에서 Fig. 1은 해외 여러 연구에서 대표적 화강암 시료로 사용되는 Westerly granite의 온도에 따른 특성 변화를 보여준다. 선형열팽창계수는 대기압 조건일 때 화강암을 구성하는 석영의 α - β 전이 발생 온도(573°C) 전까지 증가하였으며, 작용하는 압력이 커지면 감소하는 것으로 나타났다(Heuze, 1983;

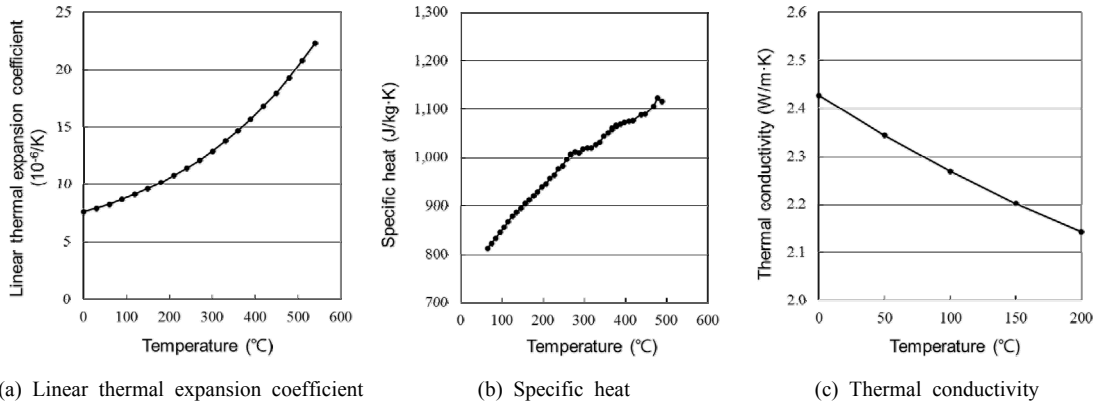


Fig. 1. Properties of Westerly granite vs. temperature (Birch and Clark, 1940; Heuze, 1983; Robertson and Hemingway, 1995)

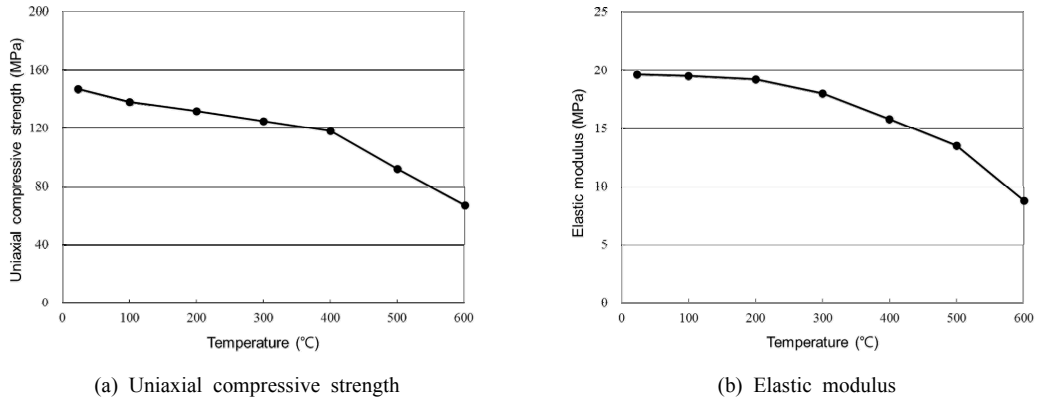


Fig. 2. Mechanical properties of Hwangdeung granite vs. temperature (Lee and Lee, 1996)

Van der Molen, 1981). 비열도 α - β 전이 발생 전까지 증가한 반면(Robertson and Hemingway, 1995), 열전도도(thermal conductivity)는 200°C까지 수행된 시험에서 조금씩 감소하는 것으로 나타났다(Birch and Clark, 1940). 국내에서도 고준위 방사성 폐기물의 지하처분을 고려하여 암석의 역학적 물성에 대한 온도 의존성 연구가 수행된 바 있다. Lee and Lee(1996)는 상온부터 100°C 간격으로 600°C까지 가열된 화강암, 토날라이트, 돌로마이트 암석 시편을 대상으로 일축 및 압열인장시험을 실시하여 압축강도 및 탄성계수, 인장강도를 구하고 추정식으로 점착력을 구하였다. 황등화강암의 경우 Fig. 2와 같이 일축압축강도는 400°C까지 선형적으로 20% 가량 감소하다가 이후 급격한 강도저하를 보였으며, 탄성계수는 거의 변하지 않다가 열파괴 개시온도 이후 급격히 감소하는 경향을 보였다. Bauer and Johnson(1979)가 Westerly granite를 대상으로 수행한

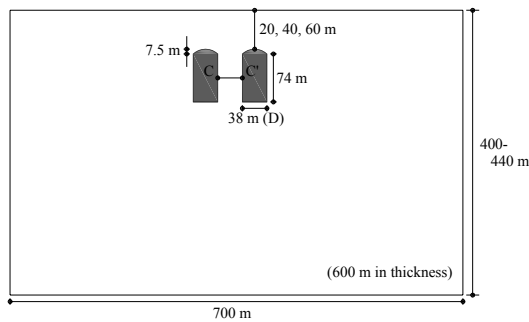
고온 시험에서도 암석 온도가 300°C일 때 상온 점착력의 90%, 500°C일 때 83% 수준으로 감소하는 결과를 보였다.

2.3 적용 물성 및 해석 모델

본 연구에서는 황등화강암에 대한 암석시험 결과(KIGAM, 2012)를 토대로 Hoek et al.(2002)의 방법을 이용하여 RMR(rock mass rating) 기준 보통암(41-60)에 해당하는 암반 물성을 산정하고 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb 모델을 적용(Table 1)하였다. 공동 굴착 시 발파로 인해 발생할 수 있는 암반 손상 및 응력 이완 등은 손상계수(disturbance factor)를 통해 물성에 반영되며(Hoek et al., 2002), 본 모델에서는 조절발파 또는 기계굴착으로 암반 손상이 거의 없는 조건과 발파로 인해 비교적 손상이 많이 된 조건의 중간에 해당하는 경우(손상계수 0.4)를 가정하였다. 상온에서의 비열 및 열전

Table 1. Mechanical and thermal properties of the rock mass used in numerical analysis

Property	Value
Density (kg/m ³)	2650
Deformation modulus (MPa)	6200
Poisson's ratio	0.34
Cohesion (MPa)	1.5
Internal friction angle (°)	47.0
Specific heat (J/kg·K)	880
Heat conductivity (W/m·K)	2.5
Linear thermal expansion coefficient (/K)	7.9×10 ⁻⁶

**Fig. 3.** Schematic diagram of numerical model

도도 역시 KIGAM(2012)의 실내시험 결과를 이용하였으며, 선형열팽창계수는 Westerly granite에 대한 측정값(Heuze, 1983)을 적용하였다. 암반 온도가 증가하게 되면 Fig. 1에 제시된 경향을 따라 열적 물성(비열, 열전도도) 및 선형열팽창계수도 함께 증가하거나 감소하도록 해석 모델을 구성하였다. 선형열팽창계수는 구속 압력의 영향을 받지만 열저장공동의 침도가 깊지 않은 점을 고려하여 반영하지 않았다. 본 연구에서 검토하는 열에너지 저장 온도는 100℃를 넘지 않으며, 그러한 온도 범위에서 탄성계수는 상온의 99% 수준을 유지하고 점착력 및 내부마찰각 역시 크게 감소하지 않기 때문에 온도 증가에 따른 역학적 물성 변화는 고려하지 않았다.

측압계수(K_0)는 국내 암반을 대상으로 다년간 수행된 수압파쇄시험 결과에 근거하여 Choi et al.(2008)이 제안한 식 (3)에 따라 산정되었다. 식에 따르면 지표면으로부터 암반공동 바닥부까지의 거리가 102-142 m(Fig. 3)일 때 측압계수는 0.54-2.45이며, 본 연구에서는 측압계수가 저장공동의 안정성에 미치는 영향을 비교할 수 있도록 이 범위 내에서 0.5, 1.0, 2.0을 적용하였다.

$$\frac{6}{Z} + 0.5 < K_0 < \frac{240}{Z} + 0.1 \quad (3)$$

여기서, K_0 는 최대 및 최소수평주응력의 평균값이며 Z 는 침도(m)이다.

다중공동 모델은 Fig. 3과 같이 직경 38 m, 높이 74 m, 아치부 높이 7.5 m로 중형비 1.95, 저장용량 약 84,000 m³인 사일로 형태 암반공동 한 쌍이 나란히 배치되는 경우를 가정(Park et al., 2013c)하였으며, 저장공동 사이 암반 필라 폭이 각각 0.5, 1.0, 1.5, 2.0배(이하 각각 0.5D, 1.0D, 1.5D, 2.0D로 표기하며, 여기서 D는 저장공동의 직경)인 4개 사례를 가정하였다. 저장공동과 모델 경계 사이 거리가 저장공동 직경의 7배 이상 되도록 해석영역의 크기를 폭 700 m(지면방향 길이 600 m), 높이 400-440 m로 설정하였으며, 지표면으로부터 공동 천단부까지 거리는 20, 40, 60 m로 설정하였다. 상부 지표면은 대기온도 25℃, 대류열전달계수(convective heat-transfer coefficient) 9 W/m²·K 조건에서 열교환이 일어나며, 암반 온도는 19℃로 설정하였다.

이러한 초기조건 하에서 암반공동 굴착(무지보 가정) 후 지반이 안정된 상태에 이른 다음 열에너지로 열수(hot water)가 저장되며, 열수 온도가 비교적 높지 않기 때문에 단열재는 설치되지 않는 것으로 가정하였다. 열수 온도는 저장 초기에 바닥부 50℃, 상층부 95℃로 열성층화가 이루어지지만 시간이 지남에 따라 성층화 정도가 약해지면서 혼합되므로 열저장공동 아치부 및 측벽부, 바닥부의 온도 경계조건으로 72.5℃가 유지되는 경우를 가정하였다.

3. 열저장공동 필라의 안정성 평가

3.1 열응력 검토 필요성

터널, 지하공동을 비롯한 일반적인 지반구조물은 사용 온도가 높지 않기 때문에 지하수의 영향이 크지 않은 조건에서는 주로 역학적 해석을 통해 안정성을 평가하지만, 사용 온도가 높은 열에너지 저장공동은 연계해석을 통해 열응력의 영향까지 검토할 필요가 있다. 먼

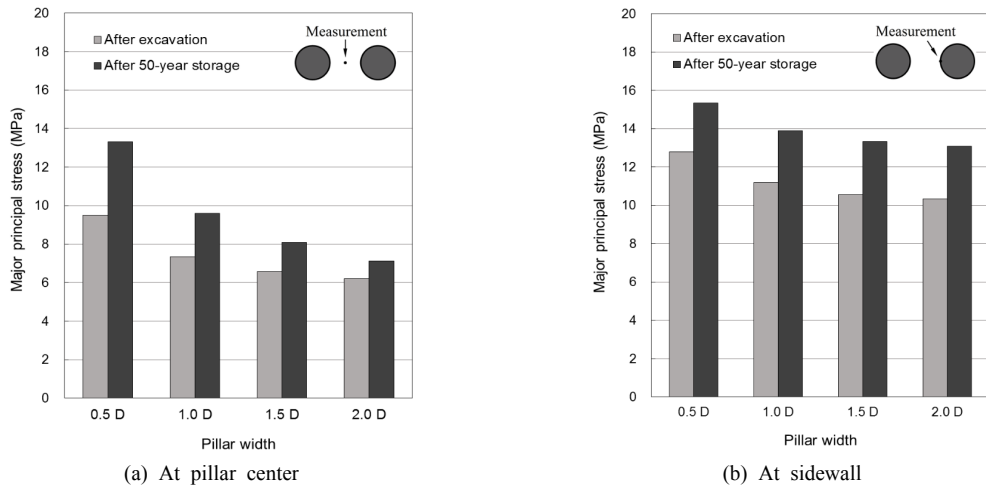


Fig. 4. Comparison of major principal stresses before and after thermal energy storage

Table 2. Average major principal stresses on pillar centerlines

Conditions		Major principal stress (MPa)			
Cavern depth	In situ stress	W=0.5D	W=1.0D	W=1.5D	W=2.0D
20 m	$K_0=0.5$	5.1	3.7	3.1	2.8
	$K_0=1.0$	6.8	5.1	4.3	3.8
	$K_0=2.0$	10.2	7.8	6.8	6.1
40 m	$K_0=0.5$	5.9	4.3	3.8	3.5
	$K_0=1.0$	8.1	6.1	5.2	4.6
	$K_0=2.0$	12.2	9.5	8.3	7.6
60 m	$K_0=0.5$	6.5	5.1	4.6	4.2
	$K_0=1.0$	9.2	7.0	6.0	5.3
	$K_0=2.0$	14.3	11.2	9.8	9.0

저 역학적 해석만 고려된 경우로서 공동 천단부와 지표면 간 거리 60 m, 축압계수가 2.0인 조건에서 두 개의 저장공동 굴착 후 지반이 안정된 상태를 살펴보면, 필라 중심(Fig. 3의 C-C'선의 중심)에서는 6.2-9.5 MPa 크기의 최대주응력이 발생하였으며 상대적으로 더 큰 응력이 집중되는 필라의 측벽부에서는 10.4-12.8 MPa의 최대주응력이 발생하는 것으로 평가되었다(Fig. 4).

이후 저장공동을 장기간 운영할 때 발생하는 열응력을 고려하면 최대주응력은 필라 중심에서 7.1-13.3 MPa, 필라 측벽부에서 13.1-15.4 MPa로 저장 전 응력보다 각각 15-40%, 20-26% 증가하였다. 특히 필라 폭이 좁을 수록 Fig. 4a와 같이 역학적으로 더 큰 응력이 작용하는 동시에 암반 온도도 상대적으로 더 높게 상승하여 열에 의한 응력 증가량 역시 큰 것으로 나타났다. 이러한 열응력은 그 크기가 크지 않더라도 응력상태에 따라 구조물 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 실례로 Äspö Pillar Stability Experiment(Andersson, 2007) 프로젝트에서는 중형비가 큰 수직갱 사이 필라 주변에 전기 히터를

설치하고 인위적으로 암반의 온도를 높이는 실험이 수행되었으며, 그 결과 큰 축차응력(deviatoric stress)이 작용하는 수직갱 측벽부가 임계응력상태(critically stressed state)에 가까울 때 이러한 열응력이 더해지면 약 1 MPa 크기의 작은 응력 증가에도 암반 파괴가 발생할 수 있는 것으로 확인되었다.

3.2 민감도 분석

본 연구에서는 저장공동의 간격(W), 축압계수(K_0), 심도(D_e)를 암반 필라의 안정성에 영향을 미치는 주요 인자로 선정하고 분산분석법을 이용하여 민감도 분석을 실시하였다. 실험계획법 가운데 모든 인자의 수준 조합에 대해 실험을 수행하는 삼원배치법(three-way factorial design)을 적용하여 총 36개 해석을 수행하였으며, 필라 안정성을 비교하기 위해 저장공동 중간 높이에서 최단거리로 두 공동을 잇는 필라 중심선(Fig. 3의 C-C'선) 상에 발생하는 최대주응력의 평균값(Table 2)을 구하였다. 분산분석법은 특성치의 산포를 제곱합(sum of squares)

Table 3. Analysis of variance table for major principal stresses

Factor	Degree of freedom	Sum of square	Mean square	F-value	F (0.05)	Remark
Pillar width (W)	3	63.349	21.116	1026.58	3.49	
Lateral pressure coefficient (K)	2	158.167	79.084	3844.71	3.89	
Cavern depth (De)	2	29.735	14.867	722.79	3.89	
W×K	6	4.743	0.790	38.43	3.00	
W×De	6	0.352	0.059	2.85	3.00	Statistically insignificant
K×De	4	4.140	1.035	50.31	3.26	
Error	12	0.247	0.021			
Total	35	260.732				

으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 요인마다의 제곱합으로 분해함으로써 오차에 비해 특히 큰 영향을 미치는 요인이 무엇인지 찾아내는 방법이다(Park, 2009). 분산분석에서 각 요인의 평균제곱(mean square, 제곱합을 자유도로 나눈 값)이며 자유도는 요인 수준에서 1을 뺀 값)과 오차의 평균제곱 비가 F 값이 되며, 이 값은 오차에 대한 요인의 중요도를 나타낸다. 즉, F 값이 크다면 특성치에 더 큰 영향을 미치는 유의인자(significant factor)로 평가한다. Table 3에 제시한 본 연구의 분석 결과를 보면 측압계수의 영향이 가장 크며, 저장공동 간격, 심도 순서로 필라의 최대주응력에 영향을 미치는 것으로 판정되었다. 인자 간 교호작용은 저장공동 간격과 심도의 교호작용($W \times De$)만 F 값이 유의수준 5%에서의 기각치보다 낮아 통계적 측면에서 영향이 없는 것으로 판정되었다. 따라서 측압계수와 심도의 교호작용($K \times De$) 및 저장공동 간격과 측압계수의 교호작용($W \times K$)은 필라의 최대주응력에 영향을 미치며, 이에 따라 깊은 심도 또는 저장공동 간격이 좁은 조건에서의 측압계수 변화는 저심도 또는 넓은 공동 간격 조건에서의 변화보다 필라의 최대주응력에 더 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다.

이러한 영향을 시각적으로 확인할 수 있도록 Fig. 5와 같이 주효과도 및 교호작용도를 작성하였다. 그림에서 각 점은 해당 수준별 평균을 나타내는 것으로, 예를 들어 주효과도 좌측 첫째 점은 저장공동 간격이 0.5D인 9개 해석사례에서 구한 최대주응력의 평균값인 8.8 MPa를 나타내며, 교호작용도의 좌측 최상단 점은 측압계수 $K_0 = 2.0$, 공동 간격 0.5D인 3개 해석사례의 평균값 12.2 MPa를 나타낸다. 주효과도의 기울기가 급할수록 인자가 필라의 평균 최대주응력에 미치는 영향이 크며, 교호작용도의 기울기가 급할수록 한 인자가 다른 인자에 미치는 영향이 크다. Fig. 5에서 측압계수와 저

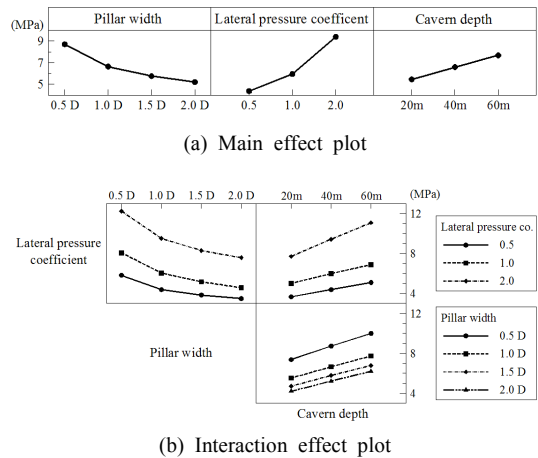


Fig. 5. Main and interaction effect plot for major principal stresses on pillar centerlines

장공동 간격의 영향이 크음을 확인할 수 있으며, 특히 공동 간격 0.5D 및 $K_0 = 2.0$ 일 때 다른 사례들과 뚜렷이 구분되었다. 필라의 평균 최대주응력에 대한 기대값을 구해보면 검토 범위 내 안정성에 가장 불리한 조건(심도 60 m, 공동 간격 0.5D, $K_0 = 2.0$)일 때 14.1 ± 0.9 MPa (95% 신뢰구간)이며, 이와 반대되는 가장 우호적 환경(심도 20 m, 공동 간격 2.0D, $K_0 = 0.5$)에서는 2.9 ± 0.9 MPa로 추정되었다. 결과적으로 암반 필라에 발생하는 평균 최대주응력의 크기는 측압계수 및 설계조건에 따라 3.5-7.5배(가장 불리한 조건에서의 최소(최대) 기대값과 가장 우호적 조건에서의 최대(최소) 기대값 비)까지 커질 수 있는 것으로 분석되었다.

3.3 열저장공동 간격의 영향

저장공동 사이 암반 필라의 폭은 구조적 안정성에 영

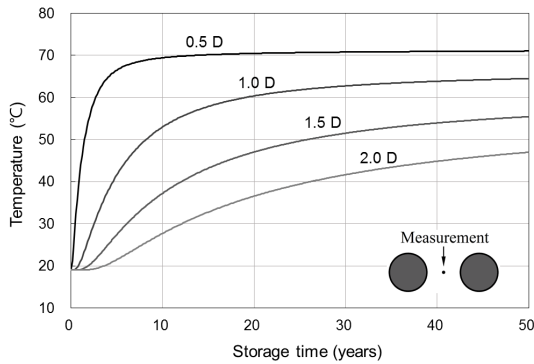


Fig. 6. Temperature changes at pillar centers with storage time

향을 미친다. Martin and Maybee(2000)가 다수 광산의 경암 필라에 대한 기존 조사 결과를 분석하여 분류한 결과에 따르면 총 178개 조사 대상 가운데 102개 사례가 파괴 또는 불안정 등급으로 판정되었으며, 그 중 약 90%가 암반 필라의 폭/높이 비가 1.5 이하로 채굴공간 사이 간격이 비교적 좁은 경우에 해당되었다. 또한 광산 채굴 시 암반 필라의 높이가 동일한 조건에서 필라의 두께가 감소하면 암반에 작용하는 평균 응력이 증가함은 여러 경험식으로도 알려져 있다(Lunder, 1994). 열에너지 저장공동의 경우에는 이러한 구조적 안정성과 더불어 장기운영으로 발생하는 열응력 역시 공동 간격의 영향을 받는다. Fig. 6에 제시된 바와 같이 간격이 좁을수록 필라 중심부 온도는 빠르게 상승하여 초기에 높은 온도로 수렴하기 때문에, 이미 역학적 응력이 상대적으로 크게 작용하고 있는 좁은 필라에 더 큰 열응력이 더해지게 된다. 그 결과 필라 폭이 가장 좁은 중심부를 따라 응력이 집중(Fig. 7a의 짙은 색 부분)되며, 필라 폭이 충분히 넓으면 Fig. 7b와 같이 서로 영향을 미치지 않는다.

공동 간격에 따른 최대주응력 변화를 살펴보기 위하여 지표면과 공동 천단부 거리가 60 m인 경우에 대해

필라 중심부와 필라 측벽부로 구분하여 Fig. 8에 나타내었다. 앞서 언급된 대로 축압계수 증가 및 공동간격 감소 시 최대주응력이 증가하였으며, 특히 필라 폭 0.5D에서 최대주응력이 상대적으로 크게 증가하였다. 필라 중심부는 역학적 응력 및 열응력 모두 공동 간격의 영향을 받아 필라 폭 감소 시 선형적으로 증가하다가 0.5D일 때 급격하게 증가하였다. 반면 필라의 측벽부는 저장되는 열에너지와 직접 접촉하기 때문에 열응력이 공동 간격에 따라 크게 달라지지는 않으며, 필라 폭 0.5D일 때 역학적으로 큰 응력이 측벽부에 발생하는 것으로 분석되었다. Fig. 8에 제시된 결과에 따르면 현재 검토 조건 범위에서 저장효율 향상을 위해 공동의 간격을 최대한 좁혀야 하는 경우 최소한 공동 직경 이상 필라 폭을 확보해야 할 것으로 판단되며, 보다 자세한 검토를 위해서는 강도감소법 등을 적용, 열저장공동 간격별 안전율을 산정할 필요가 있다.

해석 사례와 같이 동일한 크기의 열저장공동이 나란히 배치되는 경우 외에도 공동 주변에 관련 시설 설치 및 조사 등을 위한 소규모 수직갱(utility shaft)이 굴착될 수 있다. 이처럼 직경이 다른 수직갱이 근접해 있을 때 저장공동과의 거리가 안정성에 미치는 영향을 평가하기 위해서, 직경 38 m 열저장공동 주변에 3.8 m 직경의 수직갱이 인접해 있는 사례($K_0 = 1.0$, 지표면과 공동 천단부 간 거리 60 m)를 분석하였다. 큰 규모의 공동에는 열수가 50년 간 지속적으로 저장되는 것으로, 부가적 목적을 위해 설치된 수직갱은 무지보 조건으로 비어 있는 상태를 가정하였다. 수직갱에는 온도 경계조건이 적용되지 않았으며, 초기 암반 온도 19°C를 유지하다가 열수 저장으로 주변 온도 상승 시 함께 변화하도록 설정하였다.

일반적으로 직경 차이가 있는 수직갱이 근접해 있을 때 직경이 큰 수직갱(공동 직경 W_0)은 작은 규모의 수직갱(w_0) 주변 응력 분포에 큰 영향을 미치는 반면, 큰 수직갱은 거의 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다.

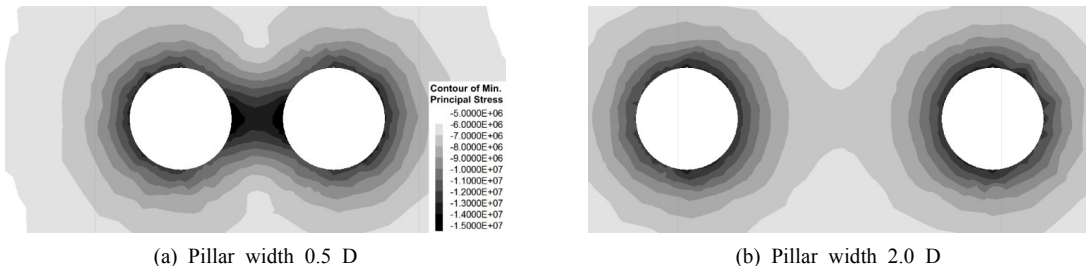


Fig. 7. Distribution of major principal stress around UTEs caverns (after 50-year storage)

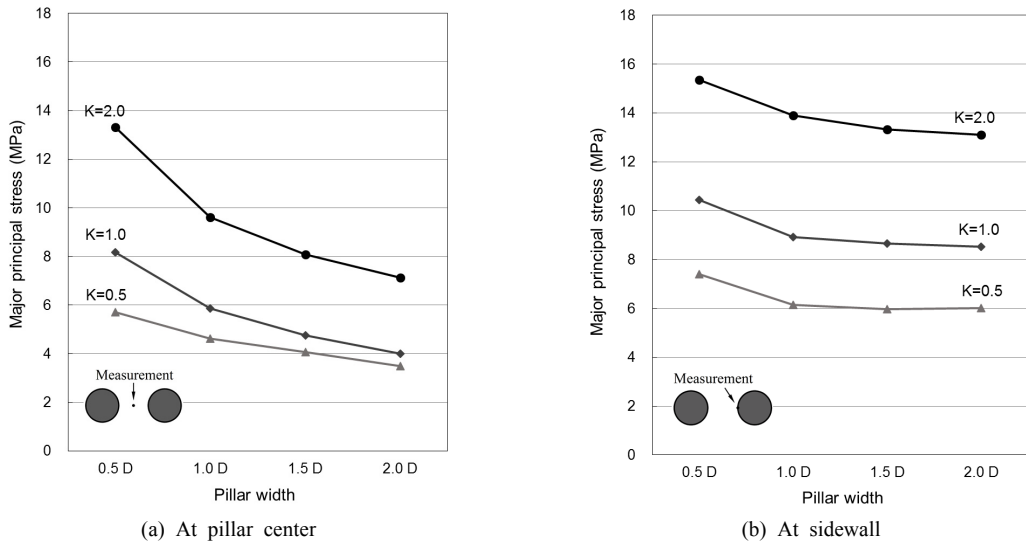


Fig. 8. Comparison of major principal stresses in the pillars with different widths and in situ conditions (after 50-year storage)

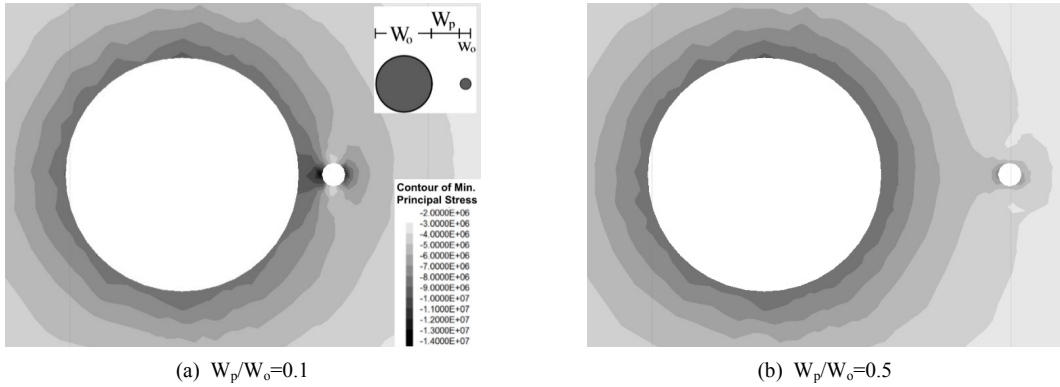


Fig. 9. Stress concentration at two caverns of unequal diameters ($W_o/w_o=10$)

Fig. 9에서도 공동 사이 필라 폭(W_p)이 $0.1 W_o$ 로 매우 인접해 있을 때 작은 수직갱 주변에서 응력이 크게 집중되며, $W_p=0.5 W_o$ 로 거리가 멀어지면 영향권에서 벗어나는 확인할 수 있다. 저장공동과 수직갱 사이 거리 별로 측벽부에 발생한 최대주응력을 비교하면(Fig. 10), 열저장공동은 단일공동일 때의 응력 상태(약 9.0 MPa)를 크게 벗어나지 않는 반면, 수직갱 좌측 측벽부의 최대주응력은 16.2 MPa부터 간격 증가에 따라 감소하다가 간격이 $0.5 W_o$ 일 때 저장공동과 비슷한 응력 수준에 이르렀다. Pariseau(2007)는 큰 규모의 수직갱 주변에 작은 수직갱($w_o/W_o \leq 0.2$)을 굴착하는 경우 소규모 수직갱에 응력이 집중되는 현상을 해소하기 위해서는 큰 수직갱 직경의 50% 이상 이격거리를 확보해야 한다는

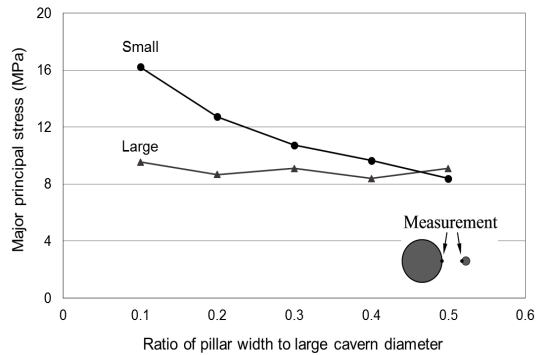


Fig. 10. Effect of large cavern on adjacent small-diameter hole (after 50-year storage)

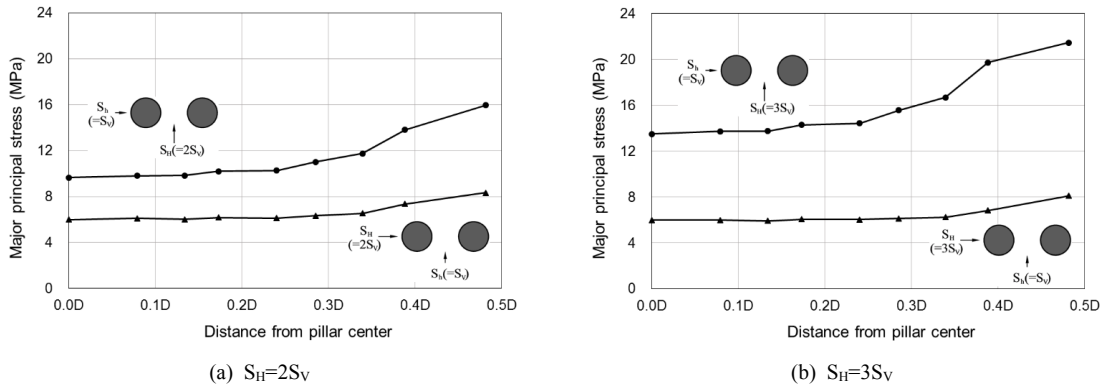


Fig. 11. Effect of the direction and magnitude of in situ stresses on pillar stability (after 50-year storage)

가이드라인을 제시한 바 있으며, 이는 본 연구의 검토 결과와 일치하였다.

3.4 수평응력의 이방성 영향

앞서 제시된 분석 결과들은 두 수평주응력의 크기가 동일하다는 가정 하에 도출되었으며, 이와 달리 수평주응력 크기에 차이가 있다면 최대 및 최소수평주응력 방향은 공동의 방패효과(shielding effect)로 인해 필라 안정성에 영향을 미친다(Obert and Duvall, 1967). 지표면 및 공동 천단부 간 거리 60 m, 공동 간격 1.0D인 조건에서 최대수평주응력의 크기가 수직응력의 2 또는 3배($S_H = 2$ or $3S_v$), 최소수평주응력은 수직응력과 동일($S_h = S_v$)할 때, 필라 중심부터 측벽부(0-0.5D)까지의 최대주응력 크기 분포를 조사해보면, Fig. 11에 제시된 바와 같이 저장공동의 중심축과 최대수평주응력 방향이 평행하게 배치되었을 때 필라의 중심축을 따라 발생하는 주응력은 $S_H = 2S_v$ 조건에서 6.0-8.3 MPa, $S_H = 3S_v$ 조건에서 6.0-8.1 MPa로 현지 암반의 최대수평주응력 크기 증가에도 암반 필라의 응력이 거의 변하지 않았다. 반면 저장공동 중심축에 수직인 방향으로 최대수평주응력이 작용하는 경우 평행한 방향일 때보다 더 큰 응력이 발생하였으며 최대수평주응력 크기 증가에 따라 암반 필라의 응력도 증가($S_H = 2S_v$ 일 때 약 9.6-15.9 MPa, $S_H = 3S_v$ 일 때 약 13.5-21.5 MPa)하였다.

4. 결론

본 연구에서는 다중 열에너지 저장공동의 안정성을 평가하기 위해 공동 사이 암반 필라의 응력 분포를 수치해석적으로 검토하였으며, 이를 통해 얻은 주요 결과

는 다음과 같다.

열에너지 저장공동의 장기 안정성 평가 시 저장된 열에너지로 인해 발생한 열응력은 구조적 안정성에 영향을 미치기 때문에 주요 검토 대상이 된다. 열응력이 작용하는 경우 저장이 시작되기 전 구조적으로 안정된 상태일 때보다 암반 필라에 작용하는 최대주응력이 상당량 증가(본 해석 사례에서는 필라 중심부 15-40%, 필라 측벽부 20-26% 증가)하였으며, 저장공동 간격이 좁을수록 근접한 열원으로 인하여 열응력 증가량도 커졌다. 필라 안정성에 영향을 미치는 주요인자를 선정하고 민감도 분석을 실시한 결과 측압계수, 저장공동 간격, 심도 순서로 영향력이 크게 평가되었다. 저장공동 간격의 경우 동일한 크기의 공동 건설 시 열에너지 저장효율 향상 목적으로 필라 폭을 좁게 배치하더라도 최소한 저장공동 직경 이상 확보해야 할 것으로 판단되었으며, 공동 규모가 다른 사례로서 직경이 큰 저장공동 주변에 소구경 수직갱이 설치될 때는 크기 차이로 수직갱에 응력이 집중되는 현상을 방지하기 위해 저장공동 직경의 0.5배 이상 이격할 필요가 있었다. 그리고 공동에 의한 방패효과가 발휘될 수 있게 최대수평주응력 작용방향과 공동 중심을 잇는 축이 평행하도록 배치함으로써 현지응력이 공동 사이 필라에 미치는 영향을 최소화할 수 있었다.

한편 본 연구에서는 해석 모델의 단순화를 위해 열에너지 저장 주기를 고려하지 않고 검토 기간 동안 지속적으로 운영되는 경우만을 가정하였다. 이러한 조건은 열응력 검토 측면에서 가장 안전측 분석이며, 주기적으로 반복되는 열에너지 주입-저장-토출 대기 사이클과 계절적 주기를 고려하여 온도 경계조건을 적용한다면 암반 필라에 발생하는 열응력의 크기가 감소할 수 있다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본연구사업인 ‘지하암반내 열에너지 저장을 위한 핵심기술 개발(과제코드 GP2012-001)’의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Andersson, J.C., 2007, Rock mass response to coupled mechanical thermal loading: Äspö Pillar Stability Experiment, Sweden, Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Sweden.
- Bauer, S.J. and B. Johnson, 1979, Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granites, Proceedings of the 20th symposium on rock mechanics, Austin, TX, 7-18.
- Birch, F. and H. Clark, 1940, The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition, American Journal of Science 238.8, 529-558.
- Choi, S.O., C. Park, J.H. Synn and H.S. Shin, 2008, A decade's experiences on the hydrofracturing in-situ stress measurement for tunnel construction in Korea, Proceedings of the Korean Society for Rock Mechanics 2008 Spring Conference, 79-88.
- Heuze, F.E., 1983, High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks-A review, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 20.1, 3-10.
- Hoek, E., C. Carranza-Torres and B. Corkum, 2002, Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, 267-273.
- Itasca Consulting Group, Inc., 2009, FLAC^{3D} Manual-Thermal Analysis.
- KIGAM, 2012, Development of core technology for underground thermal energy storage in rock cavern, Research report GP2011-003-2012(1) Part. III, Ministry of Knowledge Economy.
- Lee, H.W. and C.I. Lee, 1996, A study on temperature dependency of strength and deformation behavior of rocks, Tunnel & Underground Space 6.2, 101-121.
- Lunder, P.J., 1994, Hard rock pillar strength estimation—An applied empirical approach, M.S. thesis, University of British Columbia, Canada.
- Martin, C.D. and W.G. Maybee, 2000, The strength of hard-rock pillars, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 37, 1239-1246.
- Nordell, B., M. Grein and M. Kharseh, 2007, Large-scale utilization of renewable energy requires energy storage, Proceedings of International Conference for Renewable Energies and Sustainable Development, Algeria.
- Obert, L. and W.I. Duvall, 1967, Rock mechanics and the design of structures in rock, John Willey & Sons.
- Park, D., H.M. Kim, D. Ryu, B.H. Choi, C. Sunwoo and K.C. Han, 2013a, The effect of aspect ratio on the thermal stratification and heat loss in rock caverns for underground thermal energy storage, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 64, 201-209.
- Park, D., D. Ryu, B.H. Choi, C. Sunwoo and K.C. Han, 2013b, Mechanical stability analysis to determine the optimum aspect ratio of rock caverns for thermal energy storage, Tunnel & Underground Space 23.2, 150-159.
- Park, D., D. Ryu, B.H. Choi, C. Sunwoo and K.C. Han, 2013c, Thermal stratification and heat loss in underground thermal storage caverns with different aspect ratios and storage volumes, Tunnel & Underground Space 23.4, 308-318.
- Park, S.H., 2009, Design of experiment, Minyoungsa.
- Pariseau, W.G., 2007, Design analysis in rock mechanics, Taylor & Francis.
- Pavlov, G.K. and B.W. Olesen, 2011, Seasonal ground solar thermal energy storage review of systems and applications, Proceedings of ISES Solar World Congress, Kassel, Germany, 515-525.
- Robertson, E.C. and B.S. Hemingway, 1995, Estimating heat capacity and heat content of rocks, U.S. Geological Survey Open-file Report 95-622.
- Shim, B.O. and C.W. Lee, 2010, Status of underground thermal energy storage as shallow geothermal energy, Economic and Environmental Geology 43.2, 197-205.
- Van der Molen, I., 1981, The shift of the α - β transition temperature of quartz associated with the thermal expansion of granite at high pressure, Tectonophysics 73.4, 323-342.



김현우

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2012년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3243
E-mail: hyunwoo.kim@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 박사후연구원



박도현

1998년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2009년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3913
E-mail: parkdo@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 선임연구원



박의섭

1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 042-868-3098
E-mail: espark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 책임연구원



선우춘

1978년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1984년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1985년 Paris VI 대학(France) DEA
1988년 Paris VI 대학 지구구조학과
(France) 공학박사

Tel: 042-868-3235
E-mail: sunwoo@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 책임연구원