열에너지 저장용 암반 공동의 최적 종횡비 결정을 위한 역학적 안정성 해석

박도현, 류동우*, 최병희, 선우춘, 한공창

Mechanical Stability Analysis to Determine the Optimum Aspect Ratio of Rock Caverns for Thermal Energy Storage

Dohyun Park, Dongwoo Ryu*, Byung-Hee Choi, Choon Sunwoo, Kong-Chang Han

Abstract It is generally well known that the stratification of thermal energy in heat stores can be improved by increasing the aspect ratio (the height-to-width ratio) of the stores. Accordingly, it will be desirable to apply a high aspect ratio so as to demonstrate the good thermal performance of heat stores. However, as the aspect ratio of a store increases, the height of the store become larger compared to its width, which may be unfavorable for the structural stability of the store. Therefore, to determine an optimum aspect ratio of heat stores, a quantitative mechanical stability assessment should be performed in addition to thermal performance evaluations. In the present study, we numerically investigated the mechanical stability of silo-shaped rock caverns for underground thermal energy storage at different aspect ratios. The applied aspect ratios ranged from 1 to 6 and the mechanical stability was examined based on factor of safety using a shear strength reduction method. The results from the present study showed that the factor of safety of rock caverns tended to decrease with the increase in aspect ratio and the stress ratio of the surrounding rock mass was influential to the stability of the caverns. In addition, the numerical results demonstrated that under the same conditions of rock mass properties and aspect ratio, mechanical stability could be improved by the reduction in cavern size (storage volume), which indicates that one can design high-aspect-ratio rock caverns by dividing a single large cavern into multiple small caverns.

Key words Cavern thermal energy storage, Aspect ratio, Mechanical stability, Shear strength reduction method, Factor of safety

초 록 일반적으로 열저장소의 종횡비(폭에 대한 높이의 비)가 커짐에 따라 저장된 열에너지의 성층화가 높게 유지될 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 열저장소의 열적 성능을 높이기 위해서는 저장소 종횡비를 크게 설정하는 것이 유리할 것이다. 그러나 종횡비의 증가에 따라 저장소의 폭에 비해 높이가 커지고, 이는 열저장소의 구조적 안정성 측면에서 불리하게 작용할 수 있으므로 저장소의 최적 종횡비 결정시 열적 성능 분석과 더불어 역학적 안정성에 대한 정량적인 분석이 수행되어야 할 것이다. 본 연구에서는 지하 열에너지 저장을 위한 사일로 형 암반공동의 종횡비 변화에 따른 역학적 안정성을 수치해석적으로 조사하였다. 적용한 종횡비는 1-6의 범위에 있고, 전단강도 감소기법에 의한 안전율을 토대로 암반공동의 역학적 안정성을 평가하였다. 종횡비별 안정성 분석 결과, 암반공동의 종횡비가 증가함에 따라 안전율이 감소하는 경향을 보였으며, 주변 암반의 측압계수가 안정성에 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었다. 또한 동일한 암반특성 및 종횡비 조건에서 암반공동의 규모(저장 용량)가 줄어들에 따라 안정성이 향상되는 것으로 나타나, 큰 규모의 단일 암반공동을 소규모의 다중 암반공동으로 분할함으로써 높은 종횡비의 암반공동 설계가 가능한 것을 알 수 있었다.

핵심어 암반공동 열에너지 저장, 종횡비, 역학적 안정성, 전단강도 감소기법, 안전율

Received: Mar. 20, 2013

Revised: Apr. 3, 2013

Accepted: Apr. 8, 2013

*Corresponding Author: Dongwoo Ryu

Tel) +82428683099, Fax) +82428683416

E-Mail) dwryu@kigam.re.kr

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

1. 서 론

태양에너지와 같은 신재생에너지는 계절과 시간대에 따라 에너지 발생이 일정하지 않고, 에너지가 필요한 수요 시간대에도 일치하지 않을 수 있기 때문에 효율적

인 에너지 이용을 위해서는 에너지 저장에 필요하다. 열에너지 저장은 태양열에너지, 산업폐열 등으로부터 얻은 열에너지를 저장하는 것으로서 에너지의 수요와 공급의 불균형을 해소시킬 수 있는 기술 중의 하나이다. 열에너지 저장 장치의 열적 성능(thermal performance)은 저장된 열에너지의 성층화에 의해 크게 좌우되며, 이는 열성층화가 높게 유지될수록 에너지로서 이용가능한 유효에너지(available energy or exergy)가 증대될 수 있기 때문이다.

일반적으로 열저장소의 폭에 대한 높이의 비, 즉 종횡비(aspect ratio)가 커질수록 열성층화가 높게 유지되는 것으로 알려져 있다. 태양열에너지 저장을 위한 지상 저장소의 종횡비별 열성층화 효율 및 최적 종횡비를 분석한 기존 연구들의 결과는 다음과 같다. Cole & Bellinger(1982), Ismail 외(1997), Hahne & Chen(1998)은 종횡비가 4일 때 열성층화가 최대로 발생한다고 하였고, Nelson 외(1999)에 따르면 종횡비가 3일 때 최적이고, Hariharan 외(1991)는 종횡비가 3-4의 범위에 있을 때 최적이라고 보고하였다. 한편 Cotter & Charles(1993), Matrawy 외(1996), Ismail 외(1997), Eames & Norton(1998), Bouhdjar & Harhad(2002)는 종횡비가 3 이하인 경우에 열성층화가 종횡비의 변화에 민감하다고 하였다. Joo 외(2008)의 경우 수치해석적 연구를 통해 태양열에 의한 고온수 저장시 저장소의 종횡비를 2 이상으로 설계하는 것이 열성층화에 있어 유리하다고 제안하였다.

지하 암반공동을 활용한 열에너지 저장시 열성층화 효율 및 종횡비의 영향을 조사한 기존의 연구는 다음과 같다. Park 외(2012)는 열전달 해석(heat transfer analysis)에 의해 열수(hot water) 저장을 위한 스웨덴 Lyckebo 암반공동의 열성층화 거동을 분석하였으며, 암반공동의 종횡비별 열성층화 효율을 분석한 KIGAM(2012)의 연구에 따르면, 지상 저장소에 대한 기존 연구의 결과와 동일하게 지하 암반공동의 경우도 종횡비가 증가함에 따라 열성층화 효율이 증가하고, 토러스형 암반공동의 경우 열적 성능 측면에서 유리한 최적 종횡비가 3.5인 것으로 조사되었다.

열적 성능 측면에서 종횡비의 영향을 분석한 위의 기존 연구들로부터 열저장소의 종횡비가 클수록 저장소 내 열에너지의 성층화가 높게 유지되는 것을 알 수 있다. 그러나 종횡비의 증가에 따라 저장소의 폭에 비해 높이가 커지고, 이는 저장소의 구조적 안정성에 불리하게 작용할 수 있다. 특히 지하 암반공동을 활용한 열에너지 저장의 경우, 암반공동의 저장용량(굴착규모), 종횡비 및 암반 조건(암반의 변형 및 강도 특성, 측압계

수 등)에 따라 역학적 안정성이 좌우되므로 최적 종횡비 결정시 열적 성능 분석과 함께 역학적 안정성에 대한 분석이 수행되어야 할 것이다. 그러나 위에서 언급한 기존 연구들에서는 열에너지 저장소의 역학적 안정성보다는 열적 성능(열성층화 효율) 측면에 초점을 두고 종횡비의 영향을 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 열에너지 저장을 위한 지하 암반공동의 종횡비가 역학적 안정성에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 암반공동의 종횡비별 역학적 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 전단강도 감소기법의 안전율 개념을 이용하였으며, 암반공동의 종횡비, 측압계수 및 저장용량의 변화에 따른 역학적 안정성을 분석하였다.

2. 역학적 안정성 평가 방법 및 열에너지 저장용량 산정

2.1 역학적 안정성 평가 방법

본 연구에서는 암반공동의 종횡비가 역학적 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 전단강도 감소기법을 이용하였다. 전단강도 감소기법을 제안한 Zienkiewicz 외(1975)에 따르면, 강도감소계수(strength reduction coefficient)는 지반의 전단강도와 외부 하중에 의해 지반에 발생하는 전단응력의 비(= 전단강도/전단응력)로 정의된다. 전단강도 감소기법은 Naylor(1982), Giam & Donald(1988), Ugai(1989), Matsui & San(1992), Ugai & Leshchinsky(1995), Park & You(1998), Dawson 외(1999), Lechman & Griffiths(2000), Lim 외(2001), Lee & Jang(2010), Park 외(2011), Lee 외(2012) 등 기존의 많은 연구들에서 지반 구조물(터널,

Fig. 1. Determination of factor of safety using the shear strength reduction method combined with numerical analysis (Dawson 외, 1999)

사면, 광산 등)의 안정성을 평가하는 데 활용되어 왔다.

본 연구에서는 Dawson 외(1999)가 제안한 수치해석과 연계한 전단강도 감소기법을 이용하였다. 이 기법에서는 지반 구조물의 파괴 여부를 판단하기 위해 수치계산이 수렴하지 않는 경우 구조물이 파괴되는 것으로 가정하며, bracketing approach를 도입하여 전단강도정수인 점착력과 내부마찰각을 감소시켜 가면서 안전율을 계산한다. 즉 수치계산이 수렴되지 않는 지점까지 전단강도정수를 감소시켜 가면서 반복적으로 수치계산을 수행하고, 수치계산이 수렴되지 않는 강도정수 값에서 구조물이 파괴된 것으로 간주하여 안전율을 구하는 방법이다(Fig. 1). 따라서 안전율은 현장의 강도정수를 Fig. 1에서와 같이 수치계산이 수렴되지 않는 시점에서의 강도정수 값으로 나눈 값이 된다. 식 (1)과 (2)는 강도감소 계수, 즉 임시 안전율을 토대로 감소된 점착력과 내부마찰각을 구하는 식들이다.

$$c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c \quad (1)$$

$$\phi^{trial} = \tan^{-1} \left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi \right) \quad (2)$$

여기서 c 와 ϕ 는 각각 현장의 점착력(MPa)과 내부마찰각(°), F^{trial} 은 강도정수를 감소시키기 위한 계수(즉, 임시 안전율), c^{trial} 과 ϕ^{trial} 은 F^{trial} 에 의해 감소된 점착력(MPa)과 내부마찰각(°)이다.

2.2 열에너지 저장을 위한 암반공동의 저장용량 산정

본 연구의 열에너지 저장을 위한 암반공동 개념모델에서는 주거지역의 열수(열교환용 난방수와 직접사용급탕수) 공급을 대상으로 하였다. 열수 공급을 위한 저장용량은 한국지역난방공사의 자료(KDHC, 2013)를 활용하여 산정하였다. KDHC(2013)에 따르면, 면적 106 m²(32평형) 아파트의 1세대 당 동절기 난방요금은 평균 약 17만원/월이며, 이를 단위 사용요금(= 약 82원/Mcal)에 의해 사용 열량으로 계산하면 약 2,073 Mcal/월이다. 이와 같이 계산된 사용 열량을 식 (3)에 의해 열수 사용량(부피)으로 환산하면 1세대 당 1,382 l/day이며, 이로부터 설계 열수 사용량을 1,400 l/day로 설정

하였다. 열수 사용량으로의 환산을 위해 열교환을 위한 공급 온도의 평균값(95℃)과 열교환 후 회수되는 온도의 평균값(45℃)을 적용하였다(KDHC, 2013).

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (3)$$

여기서 Q 는 열에너지(kJ), m 은 물질의 질량(kg), C_p 는 비열(kJ/(kg·℃)), T_1 과 T_2 는 각각 낮은 온도(℃)와 높은 온도(℃)를 나타낸다.

본 연구의 열에너지 저장 암반공동의 개념모델에서는 저장된 열수의 최대 사용가능 기간을 동절기 2개월(60일)로 설정하였으며, 공급 대상은 아파트 1개 단지(1,000세대)로 설정하였다. 참고로 KB국민은행연구소 등이 조사한 수도권(서울, 인천, 경기) 지역의 아파트 단지당 평균 세대수는 840세대인 것으로 알려져 있다(Economy Chosun, 2009). 위와 같이 설정된 설계 열수 사용량, 열수 공급 세대수, 저장 열수의 최대 사용가능 기간으로부터 암반공동의 저장용량은 84,000 m³(= 1,400 l/day/세대 × 1,000세대 × 60 days)으로 산정되었다.

3. 유한요소법에 의한 수치 모델링

3.1 적용 물성치

암반공동의 중형비별 수치해석적 안정성 평가를 위한 적용 물성은 국내의 황등 화강암과 단양 석회석에 대한 실내암석시험 자료(KIGAM, 2012)를 토대로 산정하였다. RMR(rock mass rating) 기준으로 암반등급 III (RMR = 40-60)인 암반을 대상으로 하였으며, 실내시험 자료로부터 현장암반의 물성을 산정하기 위해 Hoek 외(2002)의 방법을 이용하였다. 암반의 변형계수와 강도정수(점착력 및 내부마찰각) 산정을 위해 적용한 Hoek 외(2002)의 손상계수(disturbance factor), D 는 양호한 조절발파로 인해 암반손상이 거의 없을 때의 값($D = 0$)과 조절발파 미적용으로 암반손상이 크게 발생했을 때의 값($D = 0.8$)의 평균($D = 0.4$)을 적용하였다. Table 1은 산정된 암반의 역학적 물성을 나타낸다.

한편 수압파쇄시험에 의해 국내 암반의 초기응력 분포를 조사한 Choi 외(2008)의 연구에서는 심도에 따른

Table 1. Mechanical properties of rock mass used in the present study

Unit weight (kN/m ³)	Poisson's ratio	Deformation modulus (MPa)	Cohesion (MPa)	Angle of internal friction (°)
26.3	0.33	7,600	1.4	39.0

측압계수의 값을 식 (4)와 같이 제안하였다. 본 연구에서 고려한 종횡비 범위에서 암반공동의 최대 심도(지표면으로부터 공동 바닥부까지 거리)는 약 200 m로서 이를 식 (4)에 적용하면, 측압계수는 0.53-1.3의 범위이다. 이를 토대로 본 연구에서는 측압계수의 변화에 따른 종횡비 영향을 분석하기 위해 측압계수 0.5, 1.0, 1.5를 적용하였다.

$$\left(\frac{6}{Z} + 0.5\right) < K_0 < \left(\frac{240}{Z} + 0.1\right) \quad (4)$$

여기서 K_0 는 측압계수이고, Z 는 지표면으로부터의 심도(m)이다.

Table 2. Dimensions of the silo-shaped rock caverns for different aspect ratios (storage volume = 84,000 m³)

Width (m)	Height (m)	Aspect ratio	Surface area (m ²)
47.0	48.5	1.03	10,631
41.0	63.5	1.55	10,820
38.0	74.0	1.95	11,102
35.0	87.5	2.50	11,545
33.0	98.0	2.97	11,871
31.0	111.5	3.60	12,369
30.0	119.0	3.97	12,629
29.0	127.5	4.40	12,937
28.0	136.5	4.88	13,239
27.0	146.5	5.43	13,572
26.0	158.0	6.08	13,968

3.2 암반공동의 종횡비별 형상 제원 및 수치모델링

본 연구에서는 원통 구조의 사일로(silo) 형상 암반공동을 대상으로 하였으며, 2.2절에서 산정한 저장용량(84,000 m³)을 토대로 암반공동의 종횡비별 굴착 폭과 높이를 설정하였다. 적용한 암반공동의 종횡비는 약 1-6의 범위이었다. Table 2는 저장용량이 84,000 m³인 사일로형 암반공동의 종횡비별 형상 제원을 나타낸다. 본 연구에서는 암반공동의 저장용량에 따른 종횡비의 영향을 분석하고자 하였으며, 이를 위해 저장용량의 절반 부피(42,000 m³)를 갖는 사일로형 암반공동의 형상 제원을 Table 3과 같이 설정하였다. Table 2와 3의 surface area는 원통형 암반공동의 표면적으로서 원통 상하부의 원의 면적과 원통 측면의 표면적의 합을 나타낸다.

Table 3. Dimensions of the silo-shaped rock caverns for different aspect ratios (storage volume = 42,000 m³)

Width (m)	Height (m)	Aspect ratio	Surface area (m ²)
38.0	37.0	0.97	6,685
33.0	49.0	1.48	6,791
30.0	59.5	1.98	7,022
28.0	68.0	2.43	7,213
26.0	79.0	3.04	7,515
25.0	85.5	3.42	7,697
24.0	93.0	3.88	7,917
23.0	101.0	4.39	8,129
22.0	110.5	5.02	8,398
21.5	116.0	5.40	8,561
20.5	127.0	6.20	8,839

Fig. 2. Numerical modeling for the stability analysis of the silo-shaped rock caverns at different aspect ratios (storage volume = 84,000 m³)

본 연구에서는 PHASE2(Rocscience, 2013) 프로그램을 이용하여 역학적 안정성 해석을 수행하였다. 암반공동의 3차원 거동을 모사하기 위해 축대칭(axial symmetry) 조건을 사용하였으며, 해석영역은 반경 304 m, 높이 484 m이었다. 공동의 설치 심도는 지표면-공동 천

Fig. 3. Factors of safety of rock caverns at different aspect ratios (storage volume = 84,000 m³)

단부 거리 기준으로 50 m로 설정하였다. Fig. 2는 축대칭 조건을 이용한 암반공동(저장용량 = 84,000 m³)의 종횡비별 수치 모델링을 나타낸다. 암반공동의 지보(support) 설계는 공동의 단면규격, 굴착방법, 암반조건 등에 따라 다양하므로 본 연구에서는 공동의 지보를 고려하지 않았으며, 암반공동의 종횡비 변화에 따른 굴착 후 변위발생 경향을 분석하기 위해 공동의 천단부 및 측벽부 굴착면에 계측지점을 설정하였다.

4. 종횡비별 역학적 안정성 평가 결과 및 분석

4.1 종횡비별 안전율

Fig. 3은 전단강도 감소기법에 의해 계산된 암반공동(저장용량 = 84,000 m³)의 종횡비와 암반 측압계수의 변화에 따른 안전율을 나타낸다. 그림으로부터 암반공동의 종횡비가 증가함에 따라 안전율이 감소하는 것을 알 수 있으며, 동일한 종횡비에서 측압계수가 증가함에 따라 안전율이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 종횡비 증가에 따른 안전율의 감소는 암반공동의 종횡비가 증가함에 따라 공동의 폭에 비해 높이가 커지고, 이로 인

Fig. 4. Yield regions after cavern excavation at different aspect ratios (storage volume = 84,000 m³, K₀ = 1.5)

Fig. 5. Yield regions after cavern excavation at different stress ratios (storage volume = 84,000 m³, aspect ratio = 5.43)

해 암반공동 벽면부에서 수평응력으로 인한 영향이 크게 작용하여 나타난 결과로 판단된다. 측압계수의 증가에 따른 안전율의 감소 경향도 측압계수가 커짐에 따라 암반 내 작용하는 수평응력이 증가하여 나타난 것으로 판단된다.

측압계수가 1.5인 경우, 암반공동의 종횡비에 따라 굴착 후 발생한 암반 내 소성영역의 분포는 Fig. 4와 같다. 그리고 종횡비가 5.43인 경우, 암반의 측압계수에 따른

Table 4. Maximum applicable aspect ratios for different allowable factors of safety (storage volume = 84,000 m³)

Allowable FS	Aspect ratio at the allowable FS		
	$K_0 = 0.5$	$K_0 = 1.0$	$K_0 = 1.5$
1.1	5.92	2.62	1.13
1.2	5.11	1.83	< 1.0

FS = factor of safety; K_0 = stress ratio

굴착 후 소성영역 분포는 Fig. 5와 같다. Fig. 4와 5로부터 종횡비가 커지고 측압계수가 커짐에 따라 암반공동의 벽면부에서 소성영역의 발생이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이로 인해 종횡비 및 측압계수의 증가에 따라 안정성이 감소한 것으로 판단된다.

Table 4는 허용 안전율(allowable factor of safety)을 1.1과 1.2로 설정했을 때 적용가능한 암반공동의 종횡비를 나타낸다. 허용 안전율이 1.1인 경우, 측압계수 0.5-1.5의 범위에서 적용가능한 종횡비는 1.1-5.9인 것으로 분석되었다. 허용 안전율 1.2인 경우, 측압계수 0.5-1.0의 범위에서 1.8-5.1의 종횡비를 적용할 수 있고, 측압계수 1.5에서는 종횡비 1 미만이 적용되어야 하는 것으로 분석되었다.

4.2 종횡비별 변위 발생 경향

측압계수가 1.0인 경우, 암반공동(저장용량 = 84,000 m³) 굴착 후 발생한 종횡비별 공동 천단부와 벽면부에서의 변위는 Fig. 6과 같다. 종횡비별 변위 발생 경향을 상호 비교하기 위해 무차원 높이와 폭을 사용하였다. 여기서 무차원 높이는 암반공동 바닥부로부터 측정된 연직방향 거리를 암반공동의 높이로 나눈 정규화된 변수이고, 무차원 폭은 암반공동 중심을 기준으로 측정된 수평방향의 거리를 암반공동의 폭으로 나눈 변수이다. Fig. 6(a)로부터 종횡비가 커짐에 따라 공동 벽면부에서 변위 발생이 점차적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 6(a)에 표시된 안전율이 1.0 미만인 종횡비 3.97부터 종횡비의 증가에 따라 변위 발생이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 6(b)는 종횡비에 따른 공동 천단부에서의 변위 발생 경향을 보여주며, 종횡비가 커짐에 따라 천단부에서의 변위 발생이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 Table 2에 표시된 대로 종횡비가 커짐에 따라 공동의 굴착 폭이 감소하여 나타난 결과로 판단된다.

4.3 저장용량 변화에 따른 영향

설정된 저장용량의 절반 부피(42,000 m³)를 갖는 암반공동의 경우, 종횡비와 암반 측압계수의 변화에 따른

Fig. 6. Displacements induced by cavern excavation at different aspect ratios (storage volume = $84,000 \text{ m}^3$, $K_0 = 1.0$)

Fig. 7. Factors of safety of rock caverns at different aspect ratios (storage volume = $42,000 \text{ m}^3$)

안전율은 Fig. 7과 같으며, 앞서의 저장용량 $84,000 \text{ m}^3$ 의 결과(Fig. 3)와 동일하게 암반공동의 종횡비와 축압계수가 증가함에 따라 안전율이 감소하는 경향이 나타났다. 그러나 저장용량의 감소로 인해 공동의 굴착 규

Table 5. Maximum applicable aspect ratios for different allowable factors of safety (storage volume = $42,000 \text{ m}^3$)

Allowable FS	Aspect ratio at the allowable FS		
	$K_0 = 0.5$	$K_0 = 1.0$	$K_0 = 1.5$
1.1	> 6.0	3.73	1.44
1.2	> 6.0	2.84	1.05

FS = factor of safety; K_0 = stress ratio

모가 줄어들어 저장용량 $84,000 \text{ m}^3$ 인 암반공동에 비해 안전율이 높은 것으로 분석되었다.

Table 5는 허용 안전율을 1.1과 1.2로 설정했을 때 적용가능한 암반공동의 종횡비를 나타낸다. 허용 안전율이 1.1인 경우 축압계수 0.5-1.5의 범위에서 적용가능한 종횡비는 1.4-6.0이고, 허용 안전율이 1.2인 경우에는 1.0-6.0의 종횡비가 적용가능한 것으로 분석되었다(축압계수 0.5에서는 종횡비 6 이상 적용가능). 저장용량이 $84,000 \text{ m}^3$ 일 때 적용가능한 종횡비(Table 4)와 비교해보면, 저장용량을 줄임으로써 높은 종횡비의 적용이 가능한 것을 알 수 있다. 따라서 열적 성능 측면에서 유리한 높은 종횡비의 암반공동 설계를 위해 설계 저장용량의 단일 암반공동 대신 상대적으로 작은 규모의 다중 암반공동의 적용을 고려할 필요가 있을 것이다.

4.4 결과 고찰

열에너지 저장을 위한 암반공동의 종횡비가 역학적 안정성에 미치는 영향을 분석한 결과, 암반공동의 종횡비가 증가함에 따라 안정성이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 열저장소의 종횡비가 커짐에 따라 열저장소의 열적 성능, 즉 열성충화 효율이 증가하는 기존 연구의 결과(KIGAM, 2012)와 상반되는 것(Fig. 8 참조)으로서, 열저장소의 형상 설계시 열적 성능뿐만 아니라 역학적 안정성도 동시에 고려되어야 하는 것을 알 수 있었다.

종횡비에 따른 열적 성능과 역학적 안정성의 일반적인 경향은 Fig. 8과 같으며, 열저장소의 종횡비별 열적 성능 변화에 대한 기존 연구와 역학적 안정성 변화에 대한 본 연구의 결과를 토대로 한다. Fig. 8(a)의 경우, 열저장소의 종횡비 결정시 열적 성능 측면에서는 높은 종횡비가 유리하나, 역학적 안정성 확보를 위해서는 열적 성능 측면에서 유리한 종횡비보다 더 작은 값을 적용해야 할 것이다. 이와는 반대로, Fig. 8(b)의 경우는 열적 성능 측면에서 유리한 높은 종횡비에서도 역학적 안정성이 확보되므로 종횡비 결정시 열적 성능 측면에

Fig. 8. Determination of the optimum aspect ratio of rock caverns considering both mechanical stability and thermal performance (FS = factor of safety, TS = thermal stratification, AR_{design} = designed aspect ratio of a rock cavern)

서 최적인 값을 적용할 수 있을 것이다. 그리고 4.3절에서 언급한 대로, 큰 규모의 단일 암반공동의 역학적 안정성이 Fig. 8(a)와 같다면, 단위 저장부피를 줄인 다중 암반공동의 적용을 통해 Fig. 8(b)와 같이 역학적 안정성을 확보할 수 있으므로 열적 성능 측면에서 유리한 종횡비 설계가 가능할 것이다. 그러나 이러한 단위 저장부피를 줄인 다중 암반공동의 적용은 공동의 건설과 관련된 비용 및 시공성에 대한 분석과 병행하여 결정되어야 할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 지하 열에너지 저장을 위한 암반공동의 종횡비 변화에 따른 역학적 안정성을 수치해석적으로 검토하였고, 수치해석으로부터 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

암반공동의 종횡비가 증가함에 따라 역학적 안정성이 감소하는 경향을 보였으며, 주변 암반의 측압계수, 즉 암반의 초기응력 조건이 안정성에 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었다. 이러한 종횡비 증가에 따른 역학적 안정성의 감소는 열저장소의 종횡비가 커짐에 따라 열저장소의 열적 성능이 증가하는 기존 연구의 결과와 상반되는 것으로서, 열저장소의 형상 설계시 열적 성능과 역학적 안정성을 종합적으로 고려해야 하는 것을 알 수 있었다. 특히 지상 저장소와는 달리 지하 암반공동을 활용한 열에너지 저장의 경우, 동일한 종횡비 조건일지라도 주변 환경의 조건, 즉 암반의 역학적 특성 및 초기응력에 따라 안정성이 달라지므로 이를 고려한 형상 설계가 이루어져야 할 것이다.

암반공동의 저장용량에 따른 종횡비의 영향을 분석한 결과, 저장용량을 줄임으로써 더 큰 종횡비의 적용이 가능한 것을 알 수 있었다. 따라서 열적 성능 측면에서 유리한 높은 종횡비의 암반공동의 설계를 위해서는 설계 저장용량의 단일 암반공동 대신 상대적으로 작은 규모의 다중 암반공동의 적용도 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

한편 본 연구에서는 암반의 전단강도를 토대로 안전율을 분석하는 전단강도 감소기법에 의해 열에너지 저장을 위한 암반공동의 역학적 안정성을 분석하였으나, 역학적 안정성에 대한 평가 기준으로 굴착 후 지반 변형을 고려하는 경우, 안전율이 높게 평가되더라도 지반의 변형특성에 따라 허용 변위량을 초과할 수 있으므로 굴착 후 발생 변위량에 대한 검토도 병행될 필요가 있을 것이다. 또한 종횡비가 큰 암반공동의 경우 굴착심도가 깊어질 수 있으므로 공동 주변 암반의 취성파괴에 대한 안정성도 검토되어야 할 것이다.

사 사

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

참고문헌

1. Bouhdjar, A. and A. Harhad, 2002, Numerical analysis of transient mixed convection flow in storage tank: influence of fluid properties and aspect ratios on stratification, *Renewable Energy* 25, 555-567.

2. 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) Fall Conference, 79-88.
3. Cole, R. L. and F. O. Bellinger, 1982, Thermally stratified tanks, ASHRAE Transactions 88, 1005-1017.
4. Cotter, M. A. and M. E. Charles, 1993, Transient cooling of petroleum by natural convection in cylindrical storage tanks—II. Effect of heat transfer coefficient, aspect ratio, and temperature-dependent viscosity, Int J Heat and Mass Transfer 36, 2175-2182.
5. Dawson, E. M., W. H. Roth and A. Drescher, 1999, Slope stability analysis by strength reduction, Géotechnique 49.6, 835-840.
6. Eames, P. C. and B. Norton, 1998, The effect of tank geometry on thermally stratified sensible heat storage subject to low Reynolds number flows, Int J Heat and Mass Transfer 41, 2131-2142.
7. Economy Chosun, 2009, Apartment price rise rate in the Seoul metropolitan area, http://economyplus.chosun.com/special/special_view_past.php?boardName=C10&t_num=4012&img_ho=59 [Accessed February 5, 2013]
8. Giam, S. K. and L. B. Donald, 1988, Determination of critical slip surfaces for slopes via stress-strain calculations, Proceeding of the Fifth Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, Sydney, Australia, 461-464.
9. Hahne, E. and Y. Chen, 1998, Numerical study of flow and heat transfer characteristics in hot water stores, Solar Energy 64, 9-18.
10. Hariharan, K., K. Badrinarayana, S. S. Murthy and M. V. Murthy, 1991, Temperature stratification in hot-water storage tanks, Energy 16, 977-982.
11. Hoek, E., C. Carranza-Torres and B. Corkum, 2002, Hoek-Brown criterion – 2002 edition, Proceedings of NARMS-TAC Conference, Toronto, 267-273.
12. Ismail, K. A. R., J. F. B. Leal and M. A. Zanardi, 1997, Models of liquid storage tanks, Int J Energy Research 22, 805-815.
13. Joo, H. J., J. B. Kim and H. Y. Kwak, 2008, Numerical study on thermal stratification of the aspect ratio of solar thermal storage tank. Proceedings of the Korean Solar Energy Society (2008) Fall Conference, 178-183.
14. KDHC (Korea District Heating Corporation), 2013, Simulator for estimating heating cost, <http://www.kdhc.co.kr> [Accessed February 26, 2013].
15. KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 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, Seoul.
16. Lechman, J. B. and D. V. Griffiths, 2000, Analysis of the Progression of Failure of Earth Slopes by finite elements, In: Griffiths D. V., G. A. Fenton and T. R. Martin(Eds), Slope Stability 2000, ASCE, Virginia, 250-265.
17. Lee, S. E. and Y. H. Jang, 2010, Stability assessment of the slope at the disposal site of waste rock in limestone mine, Tunnel and Underground Space 20.6, 475-490.
18. Lee, Y. S., D. Park, C. Sunwoo, G. W. Kim and J. S. Kang, 2012, Numerical design approach to determining the dimension of large-scale underground mine structures, Tunnel and Underground Space 22.2, 120-129.
19. Lim, H. U., C. H. Kim and H. J. Baek, 2001, Stability analysis of rock slope in limestone mine by numerical analysis, Tunnel and Underground Space 11.3, 270-278.
20. Matrawy, K. K., I. Farkas and J. Buzás, 1996, Optimum selection of the aspect ratio of solar tank, Proceedings of EuroSun'96, Freiberg, Germany, 251-255.
21. Matsui, T. and K. C. San, 1992, Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique, Soils and Foundations 32.1, 59-70.
22. Naylor, D. J., 1982, Finite elements slope stability, Numer. Meth in Geomech, Proceedings of NATO Advanced Study Institute. Lisbon, Portugal, 229-244.
23. Nelson, J. E. B., A. R. Balakrishnan and S. S. Murthy, 1999, Parametric study on thermally stratified chilled water storage systems, Applied Thermal Engineering 19, 89-115.
24. Park, Y. J. and K. H. You, 1998, Stability analysis for jointed rock slope using ubiquitous joint model, Tunnel and Underground Space 8.4, 287-295.
25. Park, D., H. M. Kim, D. W. Ryu, J. H. Synn and W. K. Song, 2011, Numerical study on the optimal shape of concrete plug for compressed air energy storage caverns, Tunnel and Underground Space 21.3, 188-195.
26. Park, D., H. M. Kim, D. W. Ryu, B. H. Choi, C. Sunwoo and K. C. Han, 2012, Numerical study on the thermal stratification behavior in underground rock cavern for thermal energy storage (TES), Tunnel and Underground Space 22.3, 188-195.
27. Rocscience, 2013, Rocscience Phase2 software, <http://www.rocsience.com/products/3/Phase2> [Accessed March 11, 2013].
28. Ugai, K., 1989, A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto-plastic FEM, Soils and Foundations 29.2, 190-195.
29. Ugai, K. and D. Leshchinsky, 1995, Three-dimensional limit equilibrium and finite element analysis : a comparison of results, Soils and Foundations 35.4, 1-7.
30. Zienkiewicz, O. C., C. Humpheson. and R. W. Lewis, 1975, Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics, Géotechnique 25.4, 671-689.

박도현

1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2009년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3913

E-mail: parkdo@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

최병희

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2002년 전남대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2005년 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 공학박사

Tel: 042-868-3237

E-mail: bhchoi@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

한공창

1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 Ecole des mines de Paris 지질공학과 공학석사
1993년 Ecole des mines de Paris 지질공학과 공학박사

Tel: 042-868-3241

E-mail: hankc@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

류동우

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3099

E-mail: dwryu@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 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 지구환경연구본부 책임연구원