확률론적 해석에 기반한 다중 열저장공동의 적정 이격거리 분석

박도현, 김현우*, 박정욱, 박의섭, 선우춘

Analysis of the Optimal Separation Distance between Multiple Thermal Energy Storage (TES) Caverns Based on Probabilistic Analysis

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

Abstract Multiple thermal energy storage (TES) caverns can be used for storing thermal energy on a large scale and for a high-aspect-ratio heat storage design to provide good thermal performance. It may also be necessary to consider the use of multiple caverns with a reduced length when a single, long tunnel-shaped cavern is not suitable for connection to aboveground heat production and injection equipments. When using multiple TES caverns, the separation distance between the caverns is one of the significant factors that should be considered in the design of storage space, and the optimal separation distance should be determined based on a quantitative stability criterion. In this paper, we described a numerical approach for determining the optimal separation distance between multiple caverns for large-scale TES utilization. For reliable stability evaluation of multiple caverns, we employed a probabilistic method which can quantitatively take into account the uncertainty of input parameters by probability distributions, unlike conventional deterministic approaches. The present approach was applied to the design of a conceptual TES model to store hot water for district heating. The probabilistic stability results of this application demonstrated that the approach in our work can be effectively used as a decision-making tool to determine the optimal separation distance between multiple caverns. In addition, the probabilistic results were compared to those obtained through a deterministic analysis, and the comparison results suggested that care should be taken in selecting the acceptable level of stability when using deterministic approaches.

Key words Cavern thermal energy storage, Multiple rock caverns, Separation distance, Probabilistic analysis, Probability of failure, Shear strength reduction method

초 록 다중 열저장공동은 열에너지의 대규모 저장, 열적 성능 향상을 위한 높은 종횡비의 저장소 설계에 활용될 수 있다. 또한 긴 터널형의 단일공동이 열생산 및 주입을 위한 지상설비와의 연결에 적합하지 않은 경우, 길이를 줄인 다중 암반공동의 활용을 고려할 필요가 있다. 다중 열저장공동 활용시 공동간의 이격거리는 저장공간 설계시 고려해야 하는 주요 설계인자 중 하나이며, 정량적인 안정성 평가기준을 토대로 적정 이격거리가 산정되어야 한다. 본 논문에서는 대규모 열에너지 저장을 위한 다중 암반공동 계획시 공동간 이격거리를 결정하기 위한 수치 해석적 접근법에 대해 기술하였다. 다중 암반공동의 안정성 평가를 위해 기존의 결정론적 접근법과 달리 확률밀도에 의해 입력 매개변수의 불확실성을 정량적으로 고려할 수 있는 확률론적 해석기법을 이용하였으며, 집단열수 공급을 위한 다중 암반공동의 개념모델 설계에 적용하였다. 본 적용을 통해 확률론적 해석기법이 다중 암반공동의 이격거리 산정을 위한 의사결정 도구로서 유용하게 활용될 수 있음을 확인할 수 있었으며, 결정론적 해석결과와의 비교 분석으로부터 결정론적 접근법 적용시 안정성 평가기준을 신중히 설정할 필요가 있는 것으로 검토되었다.

핵심어 암반공동 열에너지 저장, 다중 암반공동, 이격거리, 확률론적 해석, 파괴확률, 전단강도 감소기법

Received: February 26, 2014

Revised: March 10, 2014

Accepted: March 13, 2014

*Corresponding Author: Hyunwoo Kim

Tel) +82428683243, Fax) +82428683416

E-Mail) hyunwoo.kim@kigam.re.kr

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

1. 서 론

암반공동을 이용한 지하 열에너지 저장은 암반의 낮은 열전도 특성을 활용하여 지하 공간에 열에너지를 저장하는 방식으로써 대용량의 열에너지 저장에 활용이 가능하다. 열에너지 저장소의 열적 성능(thermal performance)

은 저장소 내 에너지의 열성층화(thermal stratification, 온도에 따라 밀도가 변하는 유체의 특성으로 인해 고온 및 저온의 유체가 층을 이루는 현상)에 의해 좌우되며, 열저장소의 폭에 대한 높이의 비, 즉 종횡비(aspect ratio)가 커질수록 열성층화가 높게 유지되는 것으로 알려져 있다(Park 외, 2013). 그러나 종횡비의 증가에 따라 저장소의 폭에 비해 높이가 커지고, 이는 저장소의 구조 안정성 측면에서 불리하게 작용하게 할 수 있다. 특히 지하 암반공동을 활용하여 열에너지를 저장하는 경우, 암반공동의 저장용량(굴착규모) 및 종횡비, 암반조건(암반의 변형 및 강도 특성, 현지응력 등)에 의해 공동의 안정성이 영향을 받으므로 열적 성능 측면에서 유리한 높은 종횡비의 설계가 어려울 수 있으며, 이 경우 설계 저장용량의 단일 암반공동 대신 단위 저장용량을 줄인 다중 암반공동의 적용을 고려할 필요가 있다(Park 외, 2013). 또한 설계 저장용량 확보를 위한 긴 터널형의 단일 저장공동이 열저장 및 주입을 위한 지상설비와의 연결에 있어 효율적이지 못한 경우에도 중방향 길이를 줄인 다중 암반공동의 활용을 고려할 필요가 있다. 다중 암반공동을 활용하여 열에너지를 저장하는 경우, 공동들간의 이격거리는 저장공간 계획시 고려해야 하는 주요 설계인자로서 정량적인 안정성 평가기준 및 분석기법을 토대로 최적 이격거리가 결정되어야 한다.

다중 지하구조물의 이격거리 분석과 관련된 기존 연구들은 주로 수치해석(Kim & Kim, 2007, Sin & Kim, 2010, You & Kim, 2011, Kim 외, 2012, Lee 외, 2013)과 실내 모형실험(Lee & Lee, 2010, Kim & Kim, 2013)을 통해 이루어졌다. 수치해석을 이용한 연구에서는 다중 지하구조물 사이의 필라(pillar) 부분에 작용하는 응력과 암반강도의 비율(강도응력비)을 분석하여 안정성을 주로 평가하였으나, 필라부에 발생하는 지반응력이 위치별로 일정하지 않으므로 필라부의 특정 위치에 대한 강도응력비를 이격거리 분석의 변수로써 활용하는 것은 적합하지 않을 수 있다. 모형실험을 통한 연구에서는 굴착영역 주변 지반의 변형거동, 파괴양상, 응력발생, 지반침하 경향을 관측하여 안정성을 분석하였으나, 굴착 후 역학적 거동에 대한 정성적 분석에 국한되어 있어 정량적인 안정성 평가 방법으로 활용하기에는 한계가 있다. 한편, You & Kim(2011)의 연구에서는 Dawson 외(1999)의 전단강도 감소기법(shear strength reduction method)으로부터 계산되는 안전율을 토대로 다중 지하구조물의 이격거리별 안정성을 평가하였으나, 입력 매개변수의 불확실성을 정량적으로 고려하기 어려운 결정론적 해석(deterministic analysis)에 기반하였다. Griffiths 외(2002)는 입력변수의 변동성(variability)을 고려한 확

률론적 해석(probabilistic analysis)을 이용하여 필라부의 안정성을 분석하였으나, 지지력 계수(bearing capacity factor)와 관련된 경험식을 토대로 한 연구로서 다양한 형상의 다중 구조물의 안정성 평가에 활용하기에는 한계가 있다. Deng 외(2003)와 Guarascio & Oreste(2012)의 연구에서도 확률론적 해석에 기반하여 필라부의 안정성을 분석하였으나, 기존의 수치해석적 연구와 유사하게 강도응력비를 토대로 한 연구로서 필라부에 발생하는 불균등한 지반응력의 영향을 고려하지 않았다.

위에서 살펴본 바와 같이 다중 지하구조물의 이격거리 분석과 관련하여 다양한 연구들이 수행되어 왔으나 정량적 평가를 위한 적용성 측면에서 한계가 있었으며, 또한 일부 연구들은 필라부를 대상으로 한 국부적인 안정성 평가에만 초점을 두고 있어 다중 지하구조물의 전반적인 안정성 평가에의 활용이 어려운 문제점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 다중 지하구조물의 이격거리에 따른 전반적인 굴착 안정성을 정량적으로 살펴보고자 하였으며, 이를 위해 입력 매개변수의 불확실성을 확률밀도에 의해 고려할 수 있는 확률론적 해석기법과 수치해석을 연계하여 안정성 평가를 수행하였다. 확률론적 해석 기반의 안정성 평가를 위한 성능함수(performance function)의 변수로써 전단강도 감소기법의 안전율을 이용하였고, 확률론적 해석으로부터 계산되는 파괴확률을 토대로 저장공동의 이격거리별 안정성을 평가하였다. 또한 결정론적 수치해석 결과와의 비교 분석을 통해 본 연구에서 사용된 분석기법의 적용성을 조사하였다.

2. 확률론적 해석기법

Park 외(2010)에 따르면, 일반적으로 수치해석으로부터 수식화된 성능함수를 예측하는 것은 용이하지 않기 때문에 분석적 근사 기법(예, 일제이차모멘트법)은 수치해석과 연계한 지하구조물의 신뢰성 평가에 적절하지 않고, 또한 시뮬레이션 기법(예, Monte Carlo simulation, Latin hypercube sampling, important sampling 등)은 입력 확률변수에 대해 많은 양의 샘플링 수를 요구하므로 수치해석과 연계한 지하구조물의 신뢰성 평가에 효율적이지 못하다. 반면 점추정법(point estimate method)은 수식화된 성능함수를 요구하지 않고, 입력 확률변수의 특정 샘플링 점을 이용하여 성능함수의 통계모멘트를 구하므로 시뮬레이션 기법과 같이 방대한 계산횟수를 요구하지 않는다. Bucher 외(2000)에 따르면, 시뮬레이션 기법은 계산의 정확도는 가장 높으나 수치계산의 효율은 가장 낮고, 분석적 근사 기법인 일제이차모

멘트법은 수치계산 효율은 가장 높으나 계산 정확도는 가장 낮으며, 점추정법의 계산 정확도와 수치계산 효율은 시뮬레이션 기법과 일레이차모멘트법의 중간 정도이다. 따라서 점추정법은 수치해석과 연계하여 지하구조물의 안정성을 평가하기 위한 실용적인 기법이라고 할 수 있다(Park 외, 2012). 본 연구에서는 점추정법들 중 계산 효율 측면에서 유리한 Zhou & Nowak(1988)의 $2n$ 점추정법을 이용하여 다중 암반공동의 안정성을 평가하였다. Zhou & Nowak $2n$ 법의 통계모멘트 계산 정확도와 지하구조물에서의 적용성은 Park 외(2012)의 연구에서 확인된 바 있다.

Zhou & Nowak $2n$ 법은 입력 랜덤변수들간의 상관성을 고려하지 않는 점추정법으로써 성능함수의 통계모멘트는 식 (3)-(4)에 의해 계산된다. 성능함수의 랜덤변수들은 식 (1)과 같이 표준 정규화된 변수(standard-normalized variable)로 표현되고 샘플링 점들은 식 (2)에 의해 계산된다. 성능함수의 평균 및 분산은 식 (3)과 (4)를 통해 계산된다. $i = j$ 일 때, 표준 정규화된 샘플링 점들은 $(0, \dots, \sqrt{n}, \dots, 0)$ 와 $(0, \dots, -\sqrt{n}, \dots, 0)$ 이다.

$$G = G(z_1, \dots, z_i, \dots, z_n) \\ = G\left(\frac{X_1 - \mu_{X1}}{\sigma_{X1}}, \dots, \frac{X_i - \mu_{Xi}}{\sigma_{Xi}}, \dots, \frac{X_n - \mu_{Xn}}{\sigma_{Xn}}\right) \quad (1)$$

$$Z_j = -Z_{n+j} = (Z_{1j}, \dots, Z_{ij}, \dots, Z_{nj}) \quad (2)$$

$$\bar{G} = E[G] \approx \sum_{j=1}^{2n} w_j G(z_{1j}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{nj}) \quad (3)$$

$$\sigma_G^2 \approx \sum_{j=1}^{2n} w_j G^2(z_{1j}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{nj}) - (\bar{G})^2 \quad (4)$$

여기서 G 는 성능함수, X_i 는 i 번째 랜덤변수, n 은 입력 랜덤변수의 개수, w_j 는 j 번째 랜덤변수에 대한 가중치, z_{ij} 는 j 번째 랜덤변수를 샘플링할 때 i 번째 랜덤변수의 값($= \sqrt{n}$ for $i = j$, 0 for $i \neq j$), $\bar{G}$ 는 성능함수 G 의 평균값, σ 는 표준편차를 나타낸다.

본 연구에서는 Dawson 외(1999)의 전단강도 감소기법을 이용하여 암반공동의 안전율을 계산하였고, 계산된 안전율은 암반공동의 성능함수에 대한 capacity로 사용되었다. 또한 암반공동의 파괴가 안전율 1 이하에서 발생한다고 가정하여 신뢰도 평가를 위한 성능함수의 demand 값은 1이었다. 참고로, Dawson 외(1999)의 전단강도 감소기법에서는 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.

3. 열저장 암반공동의 중형비 결정

본 연구에서는 주거지역의 열수(hot water) 공급을 위한 터널형 다중 열저장공동을 대상으로 적정 이격거리를 분석하고자 하였으며, 이격거리 분석에 앞서 본 절에서는 저장공동의 형상 결정을 위해 공동의 중형비별 안정성 평가를 수행하였다. 2절의 확률론적 해석기법으로부터 계산되는 파괴확률을 토대로 공동의 중형비별 안정성을 분석하였으며, 결정론적 해석을 추가로 수행하여 안정성 결과를 비교 분석하였다.

3.1 수치해석 입력 물성

암반공동의 수치해석적 안정성 평가를 위한 적용 물성은 KIGAM(2012)의 자료를 토대로 Table 1과 같이 선정되었다. KIGAM(2012)에서는 국내의 화강암과 석회암 지역을 대상으로 지하 열에너지 저장 연구를 수행하였으며, 황등 화강암과 단양 석회석을 대표 암종으로 선정하여 역학적 및 열적 물성을 조사하였다. 본 연구의 확률론적 해석에서 고려한 입력 랜덤변수들은 변형계수, 점착력, 내부마찰각, 측압계수이었으며(Table 1), 이 변수들의 변동계수(coefficient of variation) 값은 three-sigma rule에 의해 결정되었다. Three-sigma rule은 지반조사 자료의 수가 부족하여 입력변수의 상한값과 하한값에 대한 정보만 있는 경우 활용되는 방법으로, 입력변수의 정규분포를 가정하는 경우 99.73%의 입력값, 즉 거의 모든 값들이 평균값으로부터 $\pm 3\sigma$ (표준편차) 떨어진 영역 내에 존재하므로 식 (5)에 의해 표준편차가 산정될 수 있다(Withiam 외, 1997, Duncan, 2000).

$$SD = (HPV - LPV) / 6 \quad (5)$$

여기서 SD 는 표준편차, HPV (highest possible value)와 LPV (lowest possible value)는 각각 측정된 자료의 상한값과 하한값이다.

Table 1. Parameters and values used in this study

Parameter		Value
Unit weight (kN/m^3)		26.3
Poisson's ratio		0.33
Deformation modulus (MPa)	Mean	7,600
	COV	0.2
Cohesion (MPa)	Mean	1.4
	COV	0.1
Internal friction angle ($^\circ$)	Mean	39
	COV	0.02
Stress ratio	Mean	1.0
	COV	0.1

COV = coefficient of variation

3.2 암반공동의 중형비별 형상 제원 및 수치모델링

본 연구에서는 터널형 암반공동의 종방향 길이를 50 m로 설정하였고, 단일 암반공동의 열수 저장용량으로 Park 외(2013)가 산정한 값($84,000 \text{ m}^3$)을 적용하였다. 이 용량은 아파트 1,000세대(세대당 주거면적 106 m^2)가 동절기 2개월 동안 열수를 사용할 수 있는 부피이다. 설정된 단위 저장용량($84,000 \text{ m}^3$)과 공동의 종방향 길이(50 m)에 대해 암반공동의 소요 단면적은 $1,680 \text{ m}^2$ 이며, 이를 토대로 저장공동의 중형비별 굴착 폭과 높이를 설정하였다(Table 2). 적용한 암반공동의 중형비는 약 1-5의 범위이었다.

본 연구에서는 PHASE2(Rocscience, 2014) 프로그램을 이용하여 역학적 안정성 해석을 수행하였다. 암반공동의 중심에 대해 연직방향으로 분할한 대칭 모델(symmetry model)을 이용하여 수치모델링(평면변형률 조건)을 하였으며(Fig. 1), 해석영역은 가로 304 m, 세로 484 m이었다. 공동의 설치 심도는 지표면-공동 천단

부 거리 기준으로 50 m로 설정하였다. Fig. 1은 암반공동의 중형비별 수치해석 모델을 나타낸다.

3.3 암반공동의 중형비별 파괴확률 및 중형비 결정

Fig. 2는 Zhou & Nowak $2n$ 법에 의해 예측된 암반공동의 중형비 변화에 따른 파괴확률을 나타낸다. 그림으로부터 암반공동의 중형비가 증가함에 따라 파괴확률이 증가, 즉 안정성이 감소하는 것을 알 수 있으며, 이러한 중형비 증가에 따른 파괴확률의 증가는 공동의 중형비가 증가함에 따라 공동의 폭에 비해 높이가 커지고, 이로 인해 암반공동 벽면부에서 수평응력으로 인한 영향이 크게 작용하여 나타난 결과로 판단된다. 일반적으로 비탈면, 댐과 같은 지반구조물의 안정성 평가를 위한 목표 파괴확률(target probability of failure)의 범위는 0.1-1%이고(Genske & Walz, 1991, Christian 외, 1994), 이 파괴확률 조건을 토대로 저장공동의 중형비를 설계하는 경우 고려할 수 있는 중형비의 범위는 1.56-

Table 2. Dimensions of the single tunnel-shaped rock cavern for different aspect ratios

Width (m)	Height (m)	Aspect ratio	Storage volume (m^3)
41.00	41.00	1.00	84,050
33.00	51.00	1.55	84,150
29.00	58.00	2.00	84,100
26.00	64.50	2.48	83,850
24.00	70.00	2.92	84,000
22.00	76.50	3.48	84,150
20.50	82.00	4.00	84,050
19.50	86.50	4.44	84,337
18.50	91.00	4.92	84,175

(a) Aspect ratio = 1.00

(b) Aspect ratio = 2.92

Fig. 1. Numerical models used for assessing the stability of the single tunnel-shaped rock caverns with different aspect ratios **Fig. 2.** Probabilities of failure of the single rock cavern for different aspect ratios **Fig. 3.** Factors of safety of the single rock cavern for different aspect ratios

2.01이다(Fig. 2). 본 연구의 종횡비별 안정성은 암반공동의 지보(support)를 모델링하지 않은 결과로써 안정성이 과소 평가, 즉 보수적으로 평가된 결과라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 위에서 언급된 파괴확률 범위의 상한값인 1%를 목표 파괴확률로 설정하였으며, 이를 토대로 종횡비 2를 설계 종횡비로 설정하였다.

한편, 결정론적 해석결과와의 비교를 위해 Table 1의 지반물성 평균값을 이용하여 공동의 종횡비별 안전율을 분석하였으며, 예측된 공동의 종횡비별 안전율은 Fig. 3과 같다. 그림으로부터 종횡비가 증가함에 따라 안전율이 감소하는 것을 알 수 있으며, 허용 안전율이 1.1, 1.2, 1.3인 경우, 최대로 적용 가능한 종횡비는 각각 2.66, 2.19, 1.60이다. 이로부터 결정론적 해석결과를 토대로 종횡비를 결정하는 경우 고려할 수 있는 설계 종횡비는 1.6-2.7이고, 앞서 분석된 확률론적 결과(1.56-2.01)보

다 더 큰 값의 종횡비 적용이 가능함을 알 수 있다. 그러나 허용 안전율(1.1, 1.2, 1.3)에 따른 적용가능 최대 종횡비의 변화를 살펴보면, 허용 안전율이 약 10% 증가할 때, 적용가능 최대 종횡비가 18-27% 변화하여 안정성을 평가하는 기준(허용 안전율)에 따라 적용가능 최대 종횡비가 확률론적 해석에 비해 상대적으로 민감하게 변화하는 것을 알 수 있다(확률론적 해석의 경우, 안정성 평가기준(목표 파괴확률)이 10배 커짐에 따라 약 29% 변화함). 또한 저장공동의 종횡비별 예측된 파괴확률과 안전율의 관계는 Fig. 4와 같으며, 안전율이 1-1.22인 경우, 구조물의 잠재적인 파괴가능성을 나타내는 파괴확률 1% 이상이 예측된 것을 알 수 있다. 즉 결정론적 해석에서는 구조물의 안정성이 확보된 것으로 간주할 수 있는 안전율 1 이상이 예측되었지만, 지반의 불확실성을 고려한 확률론적 해석에서는 구조물이

Fig. 4. Relationship between probability of failure and factor of safety for the single rock cavern

잠재적으로 파괴될 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 위의 두 가지 결과로부터 결정론적 해석에 의한 안정성 평가시 안정성 평가기준(예, 안전율)을 신중히 설정할 필요가 있음을 알 수 있다. 한편, 확률론적 해석에 의한 파괴확률과 결정론적 해석에 의한 안전율의 관계는 캘리포니아 Moss Landing 지역의 액상화 가능성(liquefaction potential)을 분석한 Juang 외(1999)의 연구에서도 조사된 바 있다. 이 연구에 따르면, 결정론적 해석에 의한 경우 안전율이 기준치 이상이어서 액상화 가능성이 없는 것으로 분석되었으나 실제 현장에서는 액상화가 일부 지역에서 발생하였으며, 이 지역의 액상화에 대한 파괴확률이 높은 것으로 검토되었다. 이 연구에서 분석된 액상화에 대한 파괴확률과 안전율의 관계는 Fig. 5와 같으며, 안전율이 1~1.5인 경우, 안전율의 변화에 따라 파괴확률이 민감하게 변화하고, 안전율이 1보다 크지만 액상화 가능성이 높은 파괴확률(1% 이상)이

Fig. 5. Factor of safety vs. probability of liquefaction (Juang 외, 1999)

예측된 것으로 보고되었다.

4. 다중 열저장공동의 이격거리별 안정성 분석

4.1 다중공동의 이격거리별 수치모델링

앞서 결정된 중형비 2(굴착 폭 = 29 m, 높이 = 58 m)의 열저장공동을 다중배치하는 경우 공동간 적정 이격거리를 분석하기 위해 Table 3과 같이 해석조건을 설정하여 안정성 분석을 수행하였다. 표에서 R_{d-w} 는 저장공동의 굴착 폭에 대한 다중공동간 이격거리의 비를 나타내며, 여기서 이격거리는 두 개 공동의 인접한 굴착 벽면 사이의 수평 직선거리이다. 공동의 이격거리별 안정성 평가를 위한 수치모델링은 Fig. 6과 같고, 앞서 단일 저장공동의 안정성 평가에서와 같이 공동의 설치 심도는 지표면-공동 천단부 거리 기준으로 50 m이었다. 수치해석을 위한 입력 물성은 3절의 중형비 결정시 사용

Table 3. Separation distances between the twin tunnel-shaped rock caverns with an aspect ratio of 2.0

Separation distance between caverns (m)	R_{d-w}
15	0.52
30	1.03
45	1.55
60	2.07
75	2.59
90	3.10
105	3.62

R_{d-w} = Separation-distance-to-cavern-width ratio

Fig. 6. Numerical model used for assessing the stability of the twin tunnel-shaped rock caverns (W_p = Separation distance between the caverns)

Fig. 7. Probabilities of failure of the twin rock caverns with an aspect ratio of 2.0 for different separation distances (R_{d-w} = Separation-distance-to-cavern-width ratio)

된 값과 동일하였다.

4.2 다중공동의 이격거리별 파괴확률 및 결정론적 해석결과와의 비교

확률론적 해석으로부터 계산된 다중 암반공동의 이격거리별 파괴확률은 Fig. 7과 같으며, 다중공동간 이격거리가 감소함에 따라 파괴확률이 증가하여 안정성이 저하되는 것을 알 수 있다. 이는 공동간 이격거리가 가까울수록 굴착공동 주변의 지반거동이 상호 간섭하여 나타난 결과로 판단되며, Fig. 8로부터 이러한 상호 간섭의 영향을 확인할 수 있다. Fig. 8은 저장공동의 파괴 발생시 최대 전단변형률 분포를 나타내는 그림으로, 공동간 이격거리가 가까울수록 공동 사이의 필라부 구간에서 지반의 전단변형이 중첩되어 파괴가 발생하고, 반면

(a) $R_{d-w} = 0.52$

(b) $R_{d-w} = 1.03$

(c) $R_{d-w} = 3.62$

Fig. 8. Distributions of the maximum shear strain induced by cavern excavation for different separation distances (R_{d-w} = Separation-distance-to-cavern-width ratio)

Fig. 9. Factors of safety of the twin rock caverns for different separation distances

Fig. 10. Relationship between probability of failure and factor of safety for the twin rock caverns

에 두 개 공동간 거리가 멀어질수록 지반거동의 상호간섭이 줄어드는 것을 알 수 있다. 한편, 앞서 단일 저장공동의 종횡비 결정에서 사용된 안정성 평가기준(목표 파괴확률 = 1%)을 동일하게 적용하는 경우, 다중공동 굴착시 안정성 확보를 위해서는 최소 2.67W(W = 단일 저장공동의 굴착 폭) 이상의 이격거리 설계가 필요한 것으로 분석되었다(Fig. 7).

한편, 3절에서와 같이 Table 1의 지반물성 평균값을 이용하여 다중공동의 이격거리별 안전율을 추가로 분석하였고, 위의 확률론적 해석결과와 비교 분석하였다. 예측된 공동간 이격거리별 안전율은 Fig. 9와 같으며, 이격거리가 증가함에 따라 안전율이 증가하는 경향을 보였다. 또한 허용 안전율이 1.1-1.2인 경우, 적용가능한 최소 이격거리의 범위는 1.6W-2.8W인 것으로 분석되었다. 허용 안전율에 따른 적용가능 이격거리의 변화를 살펴보면, 앞서 종횡비 결정에서와 유사하게 허용 안전율에 따라 적용가능 이격거리가 크게 변화하는 것

Fig. 11. Probabilities of failure of the twin rock caverns for different aspect ratios (ARs) and separation distances (R_{d-w} = Separation-distance-to-cavern-width ratio)

을 알 수 있다(허용 안전율이 1.1에서 1.2로 약 10% 증가할 때, 적용가능 이격거리가 74% 증가함). 또한 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 안전율이 1.01-1.18인 경우 파괴확률이 1% 이상인 것으로 예측되었으며, 이는 결정론적 해석으로부터 예측된 안전율 값이 구조물의 안정성이 확보된 것으로 간주할 수 있는 1보다 크지만, 확률론적으로는 구조물이 잠재적으로 파괴될 가능성이 있음을 나타낸다. 이러한 결과는 3.3절에서도 확인되었으며, 결정론적 접근법을 적용하는 경우 안정성 평가기준의 설정에 주의해야 함을 알 수 있다.

4.3 저장공동의 종횡비에 따른 다중공동의 적정 이격거리의 변화

저장공동의 종횡비가 다중공동의 이격거리 산정에 미치는 영향을 살펴보기 위해 3.3절의 파괴확률 0.1%를 만족하는 종횡비 조건에서 이격거리별 안정성 분석을 수행하였다. 적용한 종횡비는 1.58로써 저장공동의 폭과 높이는 각각 32.5 m, 51.5 m이었다. 확률론적 해석으로부터 예측된 다중 암반공동의 이격거리별 파괴확률은 Fig. 11과 같고, 앞서 종횡비 2.0에 대한 결과와 유사하게 공동간 이격거리가 증가함에 따라 파괴확률이 감소하는 경향을 보였다. 또한 목표 파괴확률 1%와 0.1%를 만족하는 이격거리는 각각 1.36W(W = 저장공동의 굴착 폭)와 2.11W인 것을 알 수 있으며, 이 이격거리들은 종횡비 2.0에 대한 이격거리(2.67W)보다 작은 값으로서(Fig. 11), 종횡비 산정에 적용된 안정성 평가기준(목표 파괴확률)이 상이하여 나타난 결과이다. 즉 종횡비 1.58은 파괴확률 0.1% 조건, 종횡비 2.0은 파괴확률 1% 조건에서 산정된 값들로서, 종횡비 2.0의 암반공동에 비해 종횡비 1.58의 공동이 상대적으로 높

은 수준의 안정성이 확보되어 적용가능한 이격거리가 작게 나타난 것으로 판단된다.

위의 결과로부터 저장공동의 종횡비에 따라 공동의 다중배치를 위한 이격거리 조건이 달라지는 것을 알 수 있으며, 저장소의 열적 성능 향상을 위해 종횡비를 높게 설정하는 경우, 공동의 다중배치를 위한 이격거리가 커져야 함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 대규모 지하 열에너지 저장을 위한 다중 암반공동의 이격거리에 따른 굴착 안정성을 확률론적 해석기법에 기반하여 검토하였으며, 결정론적 해석 결과와의 비교 분석을 통해 확률론적 해석기법의 적용성을 조사하였다. 본 연구로부터 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

열저장 암반공동의 형상 결정을 위해 수행한 단일 저장공동의 종횡비별 안정성 평가에서는 공동의 종횡비가 커질수록 굴착 안정성이 감소하는 경향을 보였으며, 다중 암반공동의 이격거리 변화에 따른 안정성 평가에서는 이격거리의 증가에 따라 다중공동의 안정성이 향상되는 것으로 검토되었다. 이러한 결과는 확률론적 해석과 결정론적 해석에서 유사하게 나타났으며, 각 해석기법의 안정성 평가기준을 토대로 종횡비와 공동간 이격거리의 산정이 가능함을 확인하였다. 그러나 결정론적 해석상으로는 구조물의 안정성이 확보된 것으로 간주할 수 있는 조건임에도 불구하고, 확률론적 해석에서는 구조물이 잠재적으로 파괴될 가능성이 있는 것으로 예측된 경우가 있어 결정론적 접근법 적용시 안정성 평가기준을 신중히 설정해야 함을 알 수 있었으며, 결정론적 해석과 더불어 확률론적 해석에 의한 안정성 평가도 병행될 필요가 있음을 확인하였다. 또한 저장공동의 종횡비를 달리하여 다중공동의 적정 이격거리를 분석한 결과, 종횡비의 증가에 따라 설계 이격거리가 커져야 하는 것으로 검토되었다.

한편, 본 연구의 다중 암반공동에 대한 안정성 분석 결과는 암반 내 분포하는 불연속면을 고려하지 않은 결과로써, 암반공동이 설치되는 구간에 파쇄대와 같은 뚜렷한 불연속면이 존재하거나, 다중 암반공동 사이의 필라부 및 공동 주변에서 불연속면 거동이 우세할 것으로 예상되는 경우에는 암반의 불연속 거동을 모사할 수 있는 해석기법을 이용하여 안정성을 평가해야 할 것이다. 또한 열저장공동을 장기 운영함에 따라 공동 내 열에너지에 의해 주변 암반의 강도특성이 변화할 수 있으며, 이 경우에는 암반의 열-역학적 상호거동을 반영한 안정

성 검토도 고려해야 할 것이다.

사 사

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

Reference

1. Bucher C., D. Hintze and D. Roos, 2000, Advanced analysis of structural reliability using commercial FE-codes, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Barcelona, CD-ROM.
2. Christian, J.T., Ladd, C.C and G.B. Bacher, 1994, Reliability applied to slope stability analysis, Journal of Geotechnical Engineering Division 120, 2180-2207.
3. Dawson, E.M., W.H. Roth and A. Drescher, 1999, Slope stability analysis by strength reduction, Géotechnique 49.6, 835-840.
4. Deng, J., Yue, Z.Q., Tham, L.G. and H.H. Zhu, 2003, Pillar design by combining finite element methods, neural networks and reliability: a case study of the Feng Huangshan copper mine, China, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40, 585-599.
5. Duncan, J.M., 2000, Factors of safety and reliability in geotechnical engineering, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering 126.4, 307-316.
6. Genske, D.D. and B. Walz, 1991, Probabilistic assessment of the stability of rock slopes, Structural Safety 9, 179-195.
7. Griffiths, D.V., Fenton, G.A. and C.B. Lemons, 2002, Probabilistic analysis of underground pillar stability, International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics 26, 774-791.
8. Guarascio, M. and P. Oreste, 2012, Evaluation of the stability of underground rock pillars through a probabilistic approach, American Journal of Applied Sciences 9.8, 1273-1282.
9. Juang C.H., Rosowsky, D.V. and W.H. Tang, 1999, Reliability-based method for assessing liquefaction potential of soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 125.8, 684-689.
10. 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.
11. Kim, D.S. and Y.G. Kim, 2007, A study on the stability analysis for asymmetry parallel tunnel with rock pillar, Journal of Korean Tunnelling & Underground Space Association 9.4, 387-401.
12. Kim, W.B., Yang, H.S. and T.W. Ha, 2012, An assessment of rock pillar behavior in very near parallel tunnel, Tunnel & Underground Space 22.1, 60-68.

13. Kim, P.G. and J.W. Kim, 2013, Scale model studies for stability estimation of twin tunnels with small clearance, *Tunnel & Underground Space* 23.2, 130-140.
14. Lee, Y.J. and S.D. Lee, 2010, Pillar width of twin tunnels in horizontal jointed rock using large scale model test, *Tunnel & Underground Space* 20.5, 352-359.
15. Lee, M.H., Kim, B., Jang, Y.S., Yun, J.N. and H.G. Park, 2013, Behavior and pillar stability of enlarged existing parallel tunnels, *Journal of Korean Tunnelling & Underground Space Association* 15.5, 537-546.
16. Park, D., Park, E.S., Song, W.K. and D.W. Ryu, 2010, Reliability assessment of tunnel support systems using a probability-based method, *Tunnel & Underground Space* 20.1, 39-48.
17. Park, D., Kim, H.M., Ryu, D.W., Choi, B.H. and K.C. Han, 2012, Comparative study on the applicability of point estimate methods in combination with numerical analysis for the probabilistic reliability assessment of underground structures, *Tunnel & Underground Space* 22.2, 86-92.
18. Park, D., Ryu, D., Choi, B.H., Sunwoo, C. and K.C. Han, 2013, Mechanical stability analysis to determine the optimum aspect ratio of rock caverns for thermal energy storage, *Tunnel & Underground Space* 23.2, 150-159.
19. Rocscience, 2014, Rocscience Phase2 software, <http://www.rocsience.com/products/3/Phase2> [Accessed February 7, 2014)].
20. Sin, Y.W. and Y.G. Kim, 2010, Review of mechanical behaviors of pillar in large parallel tunnel, *Tunnel & Underground Space* 20.3, 131-144.
21. Withiam, J.L., Voytko, E.P., Barker, R.M., Duncan, J.M., Kelly, B.C., Musser, S.C. and V. Elias, 1997, Load and resistance factor design (LRFD) for highway bridge substructures, Federal Highway Administration, Washington D.C.
22. You, K.H. and J.G. Kim, 2011, Evaluation of the influence of pillar width on the stability of a twin tunnel, *Journal of Korean Tunnelling & Underground Space Association* 13.2, 115-131.
23. Zhou, J. and A.S. Nowak, 1988, Integration formulas to evaluate functions of random variables, *Structural Safety* 5.4, 267-284.

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

김현우

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2012년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3243

E-mail: hyunwoo.kim@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 박사후연구원

박정욱

2003년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
 2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학석사
 2011년 서울대학교 대학원 에너지시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3246

E-mail: jwpark@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 연구원

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 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