

설계변수에 따른 압축천연가스 저장 공동의 거동 분석

박연준*, 문형석, 박의섭

Stability Analysis of the CNG Storage Cavern in Accordance with Design Parameters

Yeon-Jun Park*, Hyung-Suk Moon, Eui-Seob Park

Abstract The domestic demand of natural gas has increased continuously due to the sudden rise of oil price and regulations on greenhouse gas to global warming. In order to improve the supply security of natural gas market in Korea, the agreement on supply of pipeline natural gas (PNG) in Russia was signed between Gazprom and Korea Gas Corporation in 2008. If the supply plan of Russian natural gas is realized, underground storage facilities would be required in order to balance supply and demand of natural gas because the gas demand is concentrated in the winter. This study investigated the safety of the storage facility in quantitative way considering several design parameters such as gas pressure, depth of the storage cavern, rock condition and in-situ horizontal stress ratio. Two dimensional stress analyses were conducted using axi-symmetry condition to examine the behavior of cavern depending upon suggested design parameters. Results showed that the factor of safety, defined as the ratio of 'shear strength'/ 'shear stress', was largely affected by the depth, rock class and gas pressure but was insensitive to the coefficient of lateral pressure(Ko).

Key words CNG (Compressed Natural Gas), Storage cavern, Storage pressure, Depth of storage cavern, Coefficient of lateral pressure(Ko)

초 록 최근 유가 상승 및 지구 온난화에 대한 온실가스의 규제 강화로 인해 국내 천연가스 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 이에 국내 천연가스 시장의 공급 안전성을 높이기 위하여, 2008년 한국가스공사와 Gazprom 간에 러시아 파이프라인 천연가스 공급에 관한 협약을 체결하기도 했다. 러시아 PNG 도입계획이 본격화되어 천연가스가 도입되면 겨울철에 가스 수요가 집중되는 국내의 경우엔 천연가스 수급 균형을 위하여 지하저장시설이 필수적으로 요구될 것이다. 본 연구는 암반등급, 토피고, 저장압력, 현지측압계수(Ko)를 변수로 하여 천연가스 저장 공동의 안정성을 정량적으로 평가하였다. 제안된 설계변수에 따른 저장 공동의 거동을 파악하기 위해 축대칭 조건을 사용하여 2차원 응력해석을 수행하였다. 해석 결과 전단강도/전단응력으로 정의된 공동의 안전율은 심도, 암반등급 및 저장압력에 크게 영향을 받았으나 측압계수의 영향은 거의 없었다.

핵심어 압축천연가스, 저장 공동, 저장압력, 토피고, 측압계수

Received: Jan. 29, 2013

Revised: Jun. 17, 2013

Accepted: Jun. 17, 2013

***Corresponding Author:** Yeon-Jun Park

(Tel) +82312202580, (Fax) +82312202522

(E-Mail) yjpark@suwon.ac.kr

Dept. Civil Engineering, Suwon University, San 2-2, Wau-ri, Bongdam-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do 445-743, Korea

1. 서 론

최근 국제 유가 상승 및 지구 온난화에 대한 온실가스의 규제 강화로 인해 청정에너지원의 하나인 천연가스의 수요는 꾸준히 증가하고 있으며, 현재까지 국내에 도입되는 천연가스(NG; Natural Gas)는 영하 162℃로 냉각시켜 부피를 1/600으로 축소시킨 액화천연가스

(LNG; Liquefied Natural Gas)로 공급되고 있다.

일반적으로 천연가스 저장시설은 LNG 저장을 위해 가장 널리 이용되는 지상탱크(Aboveground tank) 방식과 NG 저장을 위해 지질조건이 가능한 일부 국가에서만 이용되는 지하저장(UGS; Underground Gas Storage) 방식으로 분류되고 있다. 국내의 경우엔 LNG 저장을 위하여 지상식 및 반지하식 저장탱크를 주로 건설하여 왔으나, LNG 저장시설 부지 확보의 어려움과 저장기술(지상탱크 건설기술 등)의 발달 등으로 단위면적당 LNG 저장능력을 극대화하기 위해 지상식 및 반지하식 탱크 용량을 10만 kl급에서 14만 kl급이나 20만 kl급의 대용량으로 설계 및 건설하고 있으며, 점차 가스 저장 시설 규모의 대형화를 위하여 지하저장방식으로 관심을 전환하고 있다.

국내 천연가스 현황을 살펴보면, 2011년 현재 총 주요 에너지 공급원의 16.2%를 차지했으며, 발전원 비중에서는 21.2%를 기록하는 반면, 국내 가스 생산은 미미한 수준이며, 전체 천연가스 수요의 99.7%를 수입에 의존하고 있다. 이에 국내 천연가스 시장의 공급 안전성을 높이기 위하여, 2008년 9월 한국가스공사와 Gazprom 간에 러시아 파이프라인 천연가스(PNG; Pipeline Natural Gas) 공급계획에 관한 협약서를 체결하기도 했다. 이에 의하면 2017년부터 25년간 연간 10 bcm (billion cubic metres)의 가스를 수송하는 내용을 담고 있다.

이와 같은 러시아 PNG 도입이 본격화되어 파이프라인을 통해 기체상태의 천연가스가 도입되면 겨울철에 가스 수요가 집중되는 국내 사정상, 수급 균형을 위하여 천연가스 지하저장시설이 필수적으로 요구될 것이다. 일반적으로 PNG를 초고압 상태(200 bar 이상)로 압축 저장해야 경제성이 있으며, 또한 안전적으로 저장하기 위해선 지하저장방식이 가장 적합한 것으로 널리 알려져 있다.

국내의 경우, 천연가스 지하저장에 주로 사용되고 있는 폐유전/가스전, 암염공동 및 대수층 저장시설에 적합한 특정한 지질구조를 갖고 있지 못한 관계로, 국내와 유사한 지질조건을 가진 스웨덴에서 고압의 천연가스 저장을 위해 개발 운영 중인 복공식 지하암반공동(LRC; Lined Rock Cavern) 저장기술 중에서 저장 공동의 안정성 측면의 영향요소를 살펴보고자 한다.

스웨덴의 LRC 개념은 기본적으로 상대적으로 얇은 심도(100~200 m)에 시공되는 복공식 암반공동에 천연가스를 고압 상태로 저장하는 것으로, 공동 내부의 높은 가스 압력을 저장 공동의 주변 암반이 흡수하는 것이다. 한편 콘크리트 라이닝은 암반과 가스 압력 간의 하중 전달 매체로 작용하고, 얇은 강재 라이닝은 저장

가스의 누출을 방지하는 역할을 하는 것이다. LRC 개념의 다른 특징은 저장 가스압력이 현지 암반 응력보다 훨씬 더 크기 때문에, 주변 암반이 저장압력으로 인한 용기력(uplifting forces)에 충분히 저항할 정도로 강해야만 한다는 것이다(Sofregaz US Inc., 1999).

본 연구에서는 고압의 천연가스 저장을 위한 복공식 지하암반공동의 부지 선정에 영향을 미치는 저장심도, 암반상태 등의 다양한 암반공학적 변수를 살펴보고자 하였다. 이에 저장 공동의 형상은 Halmstad LRC 데모 플랜트의 공동과 동일한 것으로 가정하였다. 스웨덴 천연가스 지하저장시설인 Halmstad LRC 데모 플랜트에 적용된 공동 형상은 고압의 가스 저장에 적합한 사일로(silo) 형태로, 높이 50 m, 폭 35 m로 굴착되어 최종 공동 체적은 40,000 m³에 달한다. 또한 경험적 암반분류법의 하나인 Q-System을 근거로 3가지 암반등급으로 구분하고, 각각의 등급에 상응하는 역학적 물성을 결정하였다.

유한차분법(FDM) 프로그램인 FLAC^{2D}를 사용하여 사일로 형태의 저장 공동을 해석하기 위해, 2차원 축대칭 모델로 간주하였고 암반의 절리 및 지하수의 영향은 별도로 고려하지 않았다. 암반공학적 설계변수에 따른 저장 공동의 역학적 거동을 평가하기 위하여 암반등급별로 토피고(저장 심도), 저장압력, 측압계수(K₀)의 입력값을 달리하였다. 즉, 각각의 암반등급에 대하여 토피고는 50, 100, 150, 200, 250 m로, 저장압력은 5, 10, 15, 20, 25 MPa로, 그리고 측압계수(K₀)는 1.0, 2.0, 3.0으로 가정하여 해석하였다. 해석 모델은 지표면으로부터 저장 공동의 하부까지 하나의 균질한 암반층으로 가정하였으며, 해석 영역은 저장 공동의 높이(h)의 10배인 단면을 기준으로 굴착 후와 저장압력 적용 후의 수평 및 수직응력의 차이가 1.0% 미만인 지점을 경계로 산정하였다.

본 연구는 고압 천연가스 지하저장 공동의 타당성평가를 위한 암반등급 및 현지 응력 조건에 따른 적절한 저장 심도 및 저장압력의 관계를 규명하는 것이 주된 관심사인 관계로, 수치해석상에서 저장 공동의 굴착은 분할 굴착이 아닌 전단면 굴착법을 적용하였으며, 저장 공동의 주 지보재로 널리 사용되는 록볼트 및 슛크리트는 해석에 반영하지 않았다. 또한 암반공학적 설계변수에 따른 저장 공동의 거동을 가능한 정량적으로 분석하고자, 전단강도 감소기법을 기반으로 한 FLAC 내의 내장명령어인 'solve fos'를 기반으로 안전율(strength/stress)을 계산하였다.

2. 저장 공동의 안정성 평가 개념

일반적으로 저장 공동 내의 최대 저장압력의 증가는 암반 공동의 불안정성을 야기하므로, 고압 저장 공동의 중요한 설계 요소 중의 하나는 지반 용기에 대한 안전성(safety against ground uplift)으로 볼 수 있다. 만약 저장 공동 상부의 암반이 높은 저장압력으로 인한 상향 용기압력(upward lifting pressure)에 충분히 저항할 수 없다면, 공동 주변의 암반에는 균열이 발생하고, 결국엔 공동의 전체적인 불안정성을 유발하게 된다(Kim et al, 2012).

2.1 지반 용기에 관한 이론식

고압의 천연가스 저장으로 인한 지하 저장 공동의 지반 용기 문제에 관해서는 한계평형에 기초를 한 강성 콘 모델(rigid cone model)과 대수 나선 모델(log-spiral model, Brandshaug et al., 2001)을 들 수 있다. 한계평형의 원리는 저장 가스 압력으로 인한 하중을 상부 암반의 무게에 의한 저항력과 비교하는 것이다. 물론 강성 콘 모델과 대수 나선 모델은 저항하는 암반의 체적 형상에서 근본적으로 다르고, 대수 나선 모델의 경우에는 대수 나선형의 파괴면을 따라 발생하는 마찰 저항 또한 고려한다. 두 모델 모두 균열을 내포하는 암반을 연속체로 간주한다.

2.1.1 강성 콘 한계평형 모델

강성 콘 모델은 저장 공동 상부 암반의 상재하중이 콘 형태로 작용한다고 가정하므로 용기력(F)은 Fig. 1 과 같이 작용한다. 이때 암반의 전단강도는 무시하며, 콘의 무게와 밀접한 관련이 있는 콘 각도(α)는 일반적으로 30~45°로 간주하는데, 연약하거나 균열이 많은

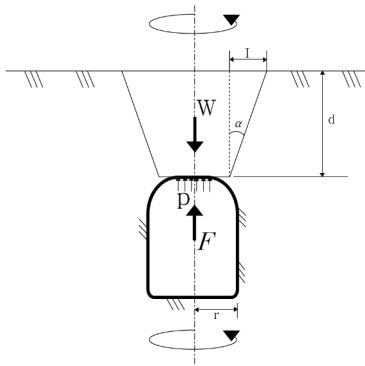


Fig. 1. Conceptual view of rigid-cone limit equilibrium model (Littlejohn and Bruce, 1975)

암반에선 작은 값을 사용한다.

콘의 무게로 인해 발생하는 상재하중(W)과 저장압력에 의한 용기력(F)은 각각 식 (1), (2)와 같고, 용기 파괴는 저장압력에 의한 용기력(F)이 암반에 작용하는 상재하중(W)을 초과할 경우에 발생한다(Littlejohn and Bruce, 1975).

$$W = \rho g \pi \left(r^2 d + [rd^2 \tan(\alpha)] + \frac{d^3 \tan^2(\alpha)}{3} \right) \quad (1)$$

- 여기서, W : 콘의 무게로 발생하는 전체 수직하중
 ρ : 암반의 밀도
 g : 중력가속도
 r : 저장 공동의 반지름
 d : 저장 공동의 심도
 α : 콘의 각도(= $\tan^{-1} \frac{I}{d}$)

$$F = \pi r^2 p \quad (2)$$

- 여기서, F : 저장압력에 의한 전체 용기력
 p : 가스 저장압력

상기 식들을 이용하여 지반 용기에 저항하는 안전율(FS, factor of safety)은 W/F 로 정의될 수 있다. 그러나 강성 콘 모델은 암반의 강도를 고려하지 못하는 매우 간단한 개념으로, 용기에 관한 저항력을 평가함에 있어 매우 보수적임을 알 수 있다.

2.1.2 대수 나선 한계평형 모델

지반 용기에 대한 저항력을 평가하는데 사용되는 대

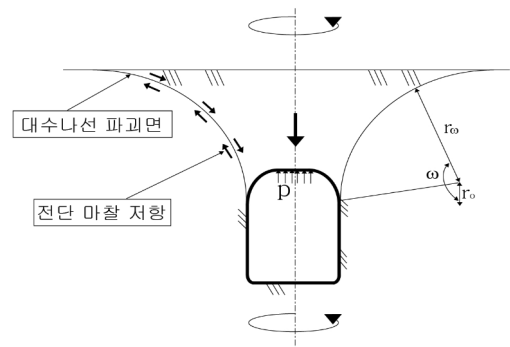


Fig. 2. Conceptual view of the log-spiral criterion (Ghaly and Hanna, 1994)

수나선 모델의 개념은 Fig. 2와 같이 표현된다. 이 개념은 얇은 심도에서의 쓰일 앵커 인발(pull-out of soil anchors)에 저항하는 흙의 거동에 기반하고 있다 (Ghaly and Hanna, 1994).

나선의 형태는 식 (3)과 같이 마찰각의 함수로 표현되고, 모델은 암반의 중량뿐만 아니라 Fig. 2와 같이 대수나선 파괴면의 마찰각으로 인한 저항력 또한 포함하고 있다. 식 (3)에서 보는 바와 같이, 대수-나선 기준은 주어진 마찰각의 암반에 대하여 일정하게 유지된다.

$$r_{\omega} = r_o e^{\omega \tan \phi} \quad (3)$$

- 여기서, r_{ω} : 대수-나선의 반지름(각도가 ω 일 경우)
- r_o : 대수나선의 반지름($\omega=0$ 일 경우)
- ω : 선회 각도(angle of revolution)
- ϕ : 암반의 마찰각

Mandl(1988)은 실험에 의해 나선의 폭과 각도는 수평응력의 크기에 민감하다는 것을 발견하였다. 이로부터 대수-나선 모델은 낮은 현시수평응력을 가지는 조건에서의 지반 응력에 저항하는 안전율을 과대평가할 가능성이 있음을 확인할 수 있다.

2.2 저장 공동의 안전율 평가기법

2.2.1 저장 공동의 안전율

본 연구에서는 수치해석을 이용하여 저장 공동의 안정성을 평가하고자 강도/응력(Strength/Stress) 비의 개념을 사용하였다. Mohr-Coulomb 파괴기준은 식 (4)와 같으며, 강도/응력비 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\sigma_{1f} = \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \sigma_3 - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (4)$$

$$r_2/r_1 = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (5)$$

Fig. 3과 같이 수치해석에 있어, 각 요소의 응력상태는 주응력 σ_1 과 σ_3 에 의해 표현될 수 있다. 일반적으로 이 응력상태는 σ - τ 평면상에서 반지름 r 을 갖는 원 ①로 그려진다. 이 원이 파괴면에 접하게 될 때 파괴가 발생하게 된다. 원 ①에 의해 표현된 응력상태에서 파괴

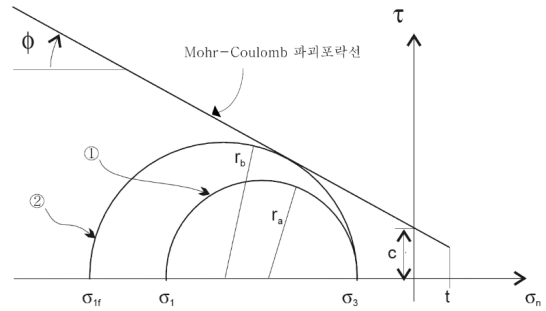


Fig. 3. The Mohr-Coulomb failure criterion (ITASCA, 2005)

가 발생하려면 σ_3 는 그대로 유지하면서 원 ②와 같이 파괴면에 접할 때까지 σ_1 이 증가하여야 한다.

두 원의 반지름 비($F = r_2/r_1$)는 주어진 응력 상태에서 강도/응력비에 해당한다. F 는 또한 ‘파괴지수’ 및 ‘안전율’로 잘 알려져 있으며, 이는 해당요소가 파괴에 근접한 정도를 나타내는 척도가 된다. 하지만 σ_3 의 크기에 따라 응력비의 신뢰도가 달라질 수 있다. σ_3 가 0이라면 σ_1 이 σ_{1f} 와 같을 때 응력비는 1이며 축차응력에 의한 원이 파괴포락선에 접하게 되며 파괴가 발생할 것이다. 그에 반해 σ_3 가 0을 초과하는 값을 가진다면 축차응력과 일축 압축강도의 값이 같더라도 응력비는 같은 1의 값을 가지지만 기울기를 가지고 있는 파괴포락선과 인접하지 않기 때문에 파괴가 일어나지 않는다. 또한 σ_3 가 매우 커지면 분자인 축차응력이 커져 응력비가 낮더라도 원 ②가 0 이상의 기울기를 가지는 파괴포락선과 만나지 않게 되기 때문에 응력비 값은 1 이하가 되더라도 파괴가 발생하지 않는다. 이러한 이유로 응력비는 안전율의 경향을 파악할 수는 있지만 절대적인 지표가 될 수는 없다.

2.2.2 전단강도 감소기법

유광호 등(2000)은 연약 암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가에서 전단강도 감소기법(Shear Strength Reduction Method, SSR)을 사용하여 터널의 안전율을 구하는 기법을 제시하였다. 이 기법은 안정성 해석에서 실제 암반의 점착력 c 와 내부 마찰각 ϕ 를 터널이 파괴될 때까지 감소시켜가며 해석을 반복 수행하여 터널의 파괴가 발생되기 시작하는 시점의 안전율을 산정할 수 있다.

터널의 파괴가 발생하는 시점의 시험 안전율을 구하기 위해서는 먼저 시작 값과 증분 값을 정하고, 이때 시작 값은 해석 결과가 평형 상태, 즉 터널의 파괴가 발생하지 않는 시험 안전율이 되어야 하며, 증분 값은 원하는 안전율의 정확도에 따라 정해지는데, 해석과정에서

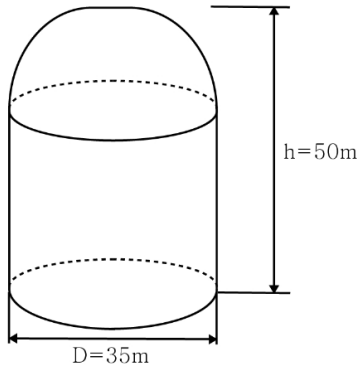


Fig. 4. Conceptual model of storage cavern

단계별로 감소시킬 수 있다. 해석결과가 수렴되고 지보재에 작용하는 응력이 허용응력을 초과하지 않으면 터널의 파괴가 발생하지 않은 것이므로 시험안전율은 증분 값만큼 증가되고, 이때 시험안전율은 저장된다. 시험안전율을 증가시켜가며 해석을 반복 수행하여 최종 안전율을 구한다(박종원 등, 2004).

3. 저장 공동의 수치해석

3.1 해석조건의 설정

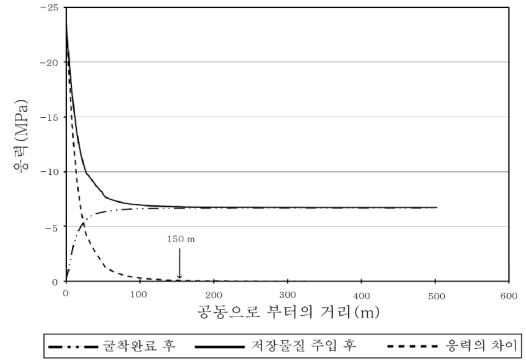
본 연구에서는 유한차분법을 기본으로 요소의 각 절점에 구성된 방정식을 아주 작게 세분화된 시간단계에서부터 이전 시간단계에서 구한 값을 초기 값으로 하여 방정식의 해를 구하고 평형상태에 대한 기준에 도달할 때까지 반복계산을 수행하여 최종 해를 구하는 방식의 프로그램인 FLAC^{2D}를 사용하여 2차원 축대칭 연속체 해석을 하였다.

3.1.1 해석단면 선정

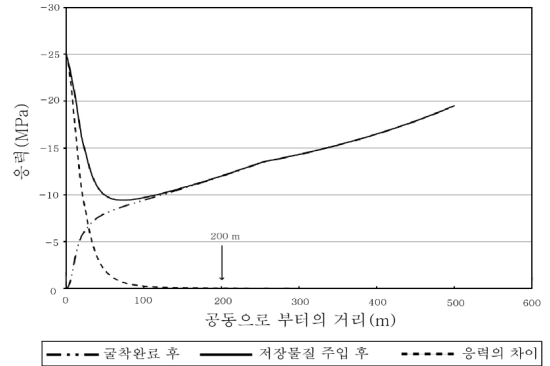
지하 공동의 안전율에 영향을 미치는 주요 인자 중 하나인 공동의 형상은 Sweden의 Halmstad 저장 공동에 적용된 사일로 형태로 선정하였다. 저장 공동의 형상은 Fig. 4와 같으며, 높이(h)는 50 m, 폭(D)은 35 m이다.

3.1.2 해석영역에 따른 경계조건 설정

수치해석 모델을 작성할 때, 해석결과에 영향을 주지 않는 최소한의 경계조건을 설정해야 한다. 본 연구에서는 최대 저장압력 25 MPa, 최대 토피고 250 m, 암반상태가 가장 불량한 3등급, 공동 높이(h)의 10배인 단면을 기준으로 굴착완료 시와 저장압력 작용 후의 수평응력(horizontal stress, S_{xx})과 수직응력(vertical stress, S_{yy})



(a) Horizontal stress change in the direction of cavern wall



(b) Vertical stress change in the direction of cavern floor

Fig. 5. Change in stresses due to gas injection

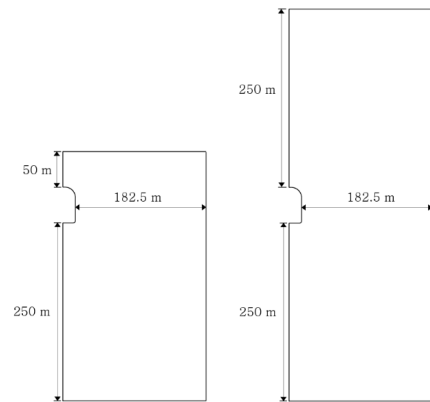


Fig. 6. Numerical analysis models

의 변화를 분석하여 경계영역을 설정하였다.

Fig. 5 (a), (b)는 각각 공동으로부터 측벽 방향과 하부 방향으로의 굴착 후 응력과 저장압력 작용 후 수평응력 및 수직응력의 변화를 나타낸 그래프이다. 공동 주변부에서 굴착완료 후 응력과 저장압력 작용 후 응력

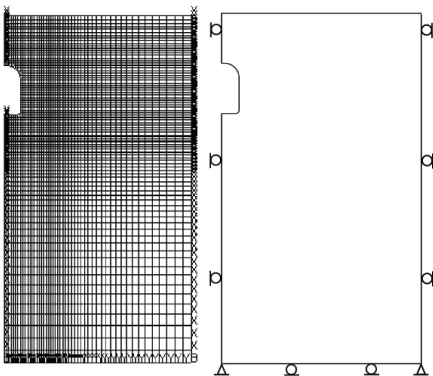


Fig. 7. Boundary condition for analysis

간의 차이가 크게 나타났으며, 일정 거리 이상 떨어지면 같아지는 것을 볼 수 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 공동에서 측벽 방향으로의 응력변화 차이를 분석한 결과, 공동의 측면 경계로부터 약 150 m 떨어진 지점에서부터 굴착 직후와 저장압력 주입 후의 응력의 차이가 1.0% 미만인 것이 경계에 의한 효과가 거의 없음을 알 수 있었다. 이 결과를 참고하여 공동의 측벽으로부터 182.5 m 지점을 경계영역으로 설정하였다. 또한 공동 바닥면 하부로는 약 200 m 지점에서 응력 차이가 1.0% 미만이 되므로, 공동 바닥으로부터 250 m 하부지점을 해석 경계로 설정하였다.

토피고는 50, 100, 150, 200, 250 m 총 5가지의 경우로 가정하였다. Fig. 6은 토피고에 따른 공동의 하부 및 측면 경계영역을 포함한 단면 형상이며, Fig. 7은 경계조건을 보여준다.

3.1.3 지반 모델링

암반은 탄소성 거동을 하는 것으로 가정하였다. 탄소성 모델을 적용하기 위해서는 항복이 시작되는 응력수준을 결정하는 항복규준(failure criterion)과 항복 후 거동을 모사하기 위한 유동법칙(flow rule)이 필요하다. 본 연구에서는 암반의 항복거동을 비교적 잘 나타낼 수 있는 연속체 해석의 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb의 항복규준을 적용하였으며, 연상유동법칙을 따르는 것으로 가정하였다.

3.2 지반 물성 산정

국내에서는 RMR 분류를 기본으로 하여 지보체계를 5가지 패턴으로 나누어 적용하고 있다. 하지만 이 분류 방법에 근거한 5개 등급은 지보체계와 비합리적인 상관관계를 보이며, 특히 암반의 상태가 불량하여 많은 지

Table 1. Rock mass classification by Q and RMR (Park and Ryu, 2011)

Rock Mass Class	Q value Range	RMR Range
I	40<Q	74<RMR
II	4<Q≤40	59<RMR≤74
III	0.1<Q≤4	35<RMR≤59

보재가 필요한 경우에 대해서는 세분화 되어있지 않아 과다 설계(over-design) 또는 부실 설계(under-design)를 초래할 가능성이 있다. Q-System의 9개 등급 분류는 국내의 5등급 분류에 비해 너무 세분화된 경향이 있으므로 지질 변화가 심하고 암반분류에 능통한 전문 지질공학자가 현장에 상주하지 않는 국내 실정을 고려해 볼 때 국내 현장에 적용하기에는 다소 무리가 있다. 따라서 Q-System에 근거하여 지반의 상태를 9개 등급에서 6개 등급으로 조정 분류하고 이에 따른 합리적인 지반 물성 산정을 통해 현재까지 과도하게 적용되어온 불합리한 지보체계를 적절하게 개선할 필요가 있다(한국도로공사, 2002).

본 연구에서는 한국도로공사(2002)가 제안한 암반분류 1안과 2안 중 2안의 2등급과 3등급을 묶고 대신 최하등급의 불량한 암반을 세분화한 것 중 1, 2, 3등급 암반을 선정하여 Table 1에 정리하였다. 또한 Q 값과 RMR의 관계에 흔히 이용되는 Bieniawski(1989)의 관계식은 식 (6)과 같다.

$$RMR \approx 9 \ln Q + 44 \tag{6}$$

그러나 식 (6)은 Q값이 작은 경우에는 음의 값이 계산되는 단점이 있는데, Barton(1995)은 이를 개선하여 식 (7)을 제안한 바 있다.

$$RMR \approx 15 \log Q + 50 \tag{7}$$

식 (7)을 사용할 경우 Q값이 작은 경우에 RMR 값이 음의 값으로 환산되지 않는 반면, RMR 값이 다소 크게 환산된다. 그러나 국내 암반에의 적용에 관한 이상돈 등(2002)의 연구에 의해서도 동일한 식이 유도된 바 있어, 본 연구에서는 Barton(1995)의 제안식을 그대로 적용하였으며 암반등급별 Q값에 대한 RMR값의 범위는 Table 1에 수록하였다.

본 해석에서는 암반분류에 따른 물성과 국내의 터널 설계 적용사례를 종합적으로 고려하여 산정한 암반등급별 물성(박연준과 유일형, 2011)을 해석에 사용하였

Table 2. Material properties for analysis (Park and Ryu, 2011)

Rock Mass Class	Elastic Modulus (GPa)	Cohesion (kPa)	Internal Friction Angle(°)	Poisson's Ratio (ν)	Unit Weight (kN/m ³)	Tensile Strength (kPa)
I	17	3,000	45	0.20	27.0	1,500
II	14	2,000	42	0.22	26.0	1,000
III	6.5	600	37	0.25	25.0	300

Table 3. Calculated overburden load and uplift force

Rock Mass Class	Overburden (m)	Rock Load (GN)	Storing Pressure (MPa)	Uplift Force by Gas Pressure(GN)
I	250	387.69	5	4.81
	200	210.10		
	150	97.17		
	100	34.28	10	9.62
	50	6.77		
II	250	373.33	15	14.42
	200	202.32		
	150	93.58		
	100	33.01	20	19.23
	50	6.52		
III	250	358.97	25	24.04
	200	194.54		
	150	89.98		
	100	31.74		
	50	6.27		

으며, 각각의 등급별 역학적 물성은 Table 2와 같다.

3.3 이론식에 의한 상향거동 평가

암반등급별로 토피고 및 저장압력 등에 따른 이론적인 상향거동을 평가하고자 Littlejohn과 Bruce(1975)가 제안한 콘 모델을 사용하였다. 콘 모델에서 적용된 콘의 각도는 일반적으로 사용되는 30~45°의 범위에서 40°로 가정하였다. 이에 따라 암반등급별 토피고에 따른 상재하중(W)과 공동내의 저장압력에 의한 이론적인 용기력(F)은 Table 3과 같이 계산되었다.

Littlejohn과 Bruce가 제안한 바와 같이 암반의 상향파괴는 저장압력에 의한 용기력(F)이 암반에 작용하는 상재하중(W)을 초과할 경우에 발생한다는 것으로 가정할 경우, 저장 공동의 토피고가 약 100 m 이상인 경우에는 암반등급에 무관하게 저장압력을 최대 25 MPa까

지 증가시키더라도 상향파괴가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 다만 토피고가 50 m로 낮은 저장 심도의 경우엔 저장압력이 5 MPa로 낮아져야만 3등급 암반에서도 상향파괴가 발생하지 않는 것으로 해석되었다.

이와 같이 이론식에 의한 상향거동 평가는 암반상태에 따른 역학적 물성을 고려하지 않는 단순한 상재하중과 저장압력간의 비교에 의한 방식이라 매우 제한적으로 사용하여야 함을 알 수 있다.

4. 수치해석 결과

암반등급, 토피고, 측압계수에 따른 최적 저장압력을 평가하기 위하여 3개의 암반등급에 대하여 토피고를 50~250 m, 측압계수를 1.0~3.0 그리고 저장압력을 5~25 MPa로 각각 변화시켜가며 수치해석을 수행하였고, 해석 결과는 전단강도 감소기법으로 구한 안전율로 나타내었다. 당초 토피고는 50 m 간격으로 설정하였으나,

Table 4. Safety factor of storage cavern ($K_o=1.0$)

Storing Pressure (MPa)	Rock Mass Class	Overburden (m)								
		50	60	70	80	90	100	150	200	250
25	I	1.85	2.23	2.58	2.92	3.26	3.54	4.90	6.37	7.52
	II	1.40	1.68	1.99	2.26	2.53	2.78	3.95	5.16	6.18
	III	0.67	0.85	1.03	1.24	1.42	1.64	2.56	3.46	4.40
20	I	2.22	2.63	3.12	3.50	3.85	4.21	5.94	7.85	9.60
	II	1.66	1.98	2.34	2.68	3.02	3.31	4.74	6.32	7.82
	III	0.81	1.02	1.24	1.49	1.73	1.96	3.06	4.19	5.50
15	I	2.81	3.41	3.94	4.42	4.89	5.35	7.82	10.83	14.15
	II	2.09	2.54	3.00	3.42	3.82	4.19	6.18	8.60	11.33
	III	1.03	1.30	1.59	1.89	2.19	2.48	3.92	5.61	7.71
10	I	4.08	4.88	5.63	6.40	7.17	7.99	12.81	20.34	64.00
	II	3.01	3.68	4.29	4.90	5.53	6.15	9.92	15.62	25.16
	III	1.46	1.84	2.28	2.71	3.15	3.58	6.07	9.75	15.91
5	I	8.34	10.33	12.57	15.15	18.23	22.04	64.00	64.00	64.00
	III	6.10	7.58	9.25	11.12	13.39	16.05	64.00	64.00	64.00
	3	2.93	3.81	4.77	5.85	7.11	8.60	25.52	64.00	64.00

Table 5. Safety factor of storage cavern ($K_o=2.0$)

Storing Pressure (MPa)	Rock Mass Class	Overburden (m)								
		50	60	70	80	90	100	150	200	250
25	I	1.82	2.20	2.58	2.95	3.27	3.56	4.93	6.37	7.49
	II	1.38	1.66	1.96	2.26	2.54	2.80	3.97	5.16	6.15
	III	0.68	0.84	1.03	1.25	1.48	1.71	2.60	3.47	4.40
20	I	2.19	2.65	3.12	3.51	3.87	4.22	5.96	7.85	9.60
	II	1.61	1.98	2.34	2.69	3.03	3.33	4.75	6.32	7.79
	III	0.82	1.01	1.24	1.52	1.78	2.02	3.08	4.19	5.47
15	I	2.80	3.41	3.94	4.42	4.89	5.37	7.82	10.83	14.10
	II	2.06	2.53	3.01	3.42	3.82	4.19	6.18	8.57	11.33
	III	1.03	1.29	1.61	1.93	2.23	2.52	3.94	5.61	7.74
10	I	4.08	4.88	5.63	6.40	7.17	7.99	12.81	20.28	64.00
	II	3.01	3.68	4.29	4.90	5.53	6.15	9.92	15.56	25.16
	III	1.46	1.89	2.32	2.73	3.16	3.60	6.07	9.75	15.91
5	I	8.37	10.33	12.57	15.15	18.23	21.98	64.00	64.00	64.00
	II	6.10	7.60	9.25	11.12	13.33	16.05	64.00	64.00	64.00
	III	2.92	3.82	4.77	5.85	7.11	8.63	25.52	64.00	64.00

해석 결과 토피고 50 m와 100 m 사이에서 안전율의 변화가 매우 커서 토피고 50 m와 100 m 사이를 다시 10 m 간격으로 세분화하여 추가적인 해석을 수행하였다.

Table 4, 5 및 6은 측압계수가 각각 1.0, 2.0 및 3.0인

경우 토피고, 저장압력, 암반등급에 따른 암반의 안전율이다. 저장압력이 높아질수록, 그리고 심도가 낮아질수록 안전율이 감소하며, 암반등급에도 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 그러나 측압계수의 증가에 따른 안전율의

Table 6. Safety factor of storage cavern ($K_0=3.0$)

Storing Pressure (MPa)	Rock Mass Class	Overburden (m)								
		50	60	70	80	90	100	150	200	250
25	I	1.81	2.19	2.59	2.96	3.28	3.56	4.92	6.37	7.52
	II	1.38	1.66	1.97	2.28	2.55	2.80	3.96	5.15	6.18
	III	0.68	0.85	1.08	1.33	1.53	1.71	2.58	3.47	4.38
20	I	2.17	2.63	3.12	3.50	3.87	4.22	5.94	7.85	9.60
	II	1.63	2.00	2.37	2.71	3.03	3.33	4.75	6.32	7.79
	III	0.82	1.05	1.33	1.57	1.78	2.00	3.07	4.19	5.50
15	I	2.80	3.41	3.95	4.42	4.90	5.35	7.82	10.83	14.15
	II	2.08	2.54	3.00	3.42	3.82	4.19	6.18	8.60	11.33
	III	1.01	1.37	1.65	1.91	2.20	2.49	3.92	5.61	7.74
10	I	4.08	4.88	5.66	6.40	7.17	7.99	12.81	20.34	64.00
	II	3.01	3.68	4.29	4.90	5.53	6.15	9.92	15.62	25.28
	III	1.53	1.88	2.29	2.71	3.14	3.60	6.07	9.75	15.97
5	I	8.37	10.33	12.57	15.15	18.23	22.04	64.00	64.00	64.00
	II	6.10	7.58	9.25	11.12	13.39	16.05	64.00	64.00	64.00
	III	2.93	3.82	4.77	5.85	7.11	8.63	25.52	64.00	64.00

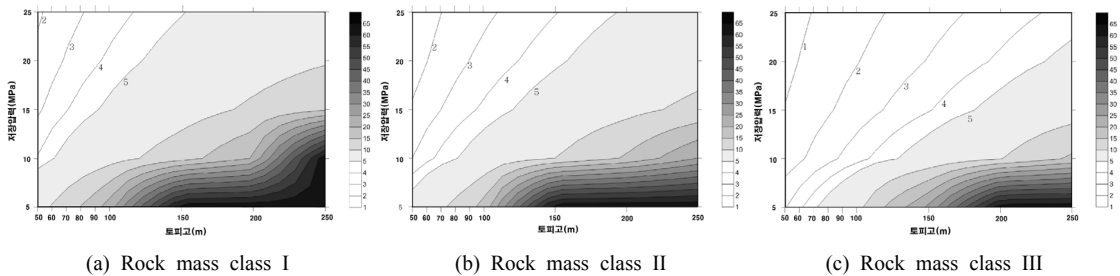


Fig. 8. Safety factor chart

변화는 거의 없음을 알 수 있다. 이는 공동의 수평 단면이 원형인데다, 축대칭 조건을 이용하였기 때문에 축압의 증가가 모든 방향에서 동일하게 발생하였기 때문이다. 최대 및 최소 축압의 차이가 큰 경우에는 3차원 해석의 수행이 불가피하다.

Fig. 8은 토피고와 저장압력에 따른 안전율의 분포를 암반등급별로 도시한 것이다. 지반 조사 결과와 운영 방침에 따라 저장압력이 결정되면 Fig. 8의 도표를 이용하여 저장심도를 결정할 수 있다. 예를 들어 암반등급이 2등급이고, 저장압력이 25 MPa인 경우, 최소 안전율이 2.0이라면 저장 공동의 깊이는 Fig. 8(b)로부터 70 m 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 지반조건과 저장압력 및 저장 공동의 심도를 압축천연가스 저장 공동의 주된 설계변수로 선정하고, 이들의 상호 관계를 고려하여 정량적으로 압축천연가스 저장 공동의 안전성을 평가하고자 하였다. 저장 공동은 사일로(silo) 형태로 가정하였으며, 저장 공동의 거동을 파악하기 위하여 설계변수를 변경해가며 2차원 축대칭 연속체 수치해석을 수행하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1. 선정된 설계 변수 중 공동의 심도와 저장압력, 그리고 암반등급은 예상대로 공동의 안정성에 큰 영향을 주었다. 특히 저장압력의 영향이 가장 크게 나타났다.

2. 선정된 설계 변수 중 축압계수는 공동의 안정성에 거의 영향을 주지 못하였다. 이는 공동의 수평 단면이 원형인데다, 축대칭 조건을 이용하였기 때문에 축압의 증가가 모든 방향에서 동일하게 발생하기 때문이다. 최대 및 최소 축압의 차이가 큰 경우에는 3차원 해석을 수행하여 확인할 필요가 있다.
3. 안전율의 변화가 심한 토피고 50 m에서 100 m 구간을 10 m 단위로 세분하여 추가로 해석을 수행하여, 암반등급별로 안전율 도표를 작성하였다. 본 도표는 압축천연가스 저장 공동의 초기 설계 단계에서 공동의 운영압력, 심도 등의 결정에 유용하게 사용될 수 있다.

본 연구는 해석대상의 지반을 균질한 단일 지층으로 가정하고, Q값을 근거로 한 암반분류에 따른 지반 물성을 가정하여 해석한 것이다. 실제 압축천연가스 저장소의 설계 시에는 지반조건도 복잡하기 때문에, 암반역학적인 문제 외에 내부 container와의 상호 거동을 비롯하여 여러 항목이 추가로 고려되어야 할 것이다.

Reference

1. Barton N., 1995, The Influence of Joint Properties in Modelling Jointed Rock Masses, Keynote Lecture, 8th ISRM Congress, Tokyo, Vol. 3.
2. Bieniawski, Z. T. (1989), Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley&Sons, 251p.
3. Brandshaug, T., Christianson, M. and Damjanac, B. (2001) Technical Review of the Lined Rock Cavern (LRC) Concept and Design Methodology: Mechanical Response of Rock Mass, Prepared for U.S. DOE, p. 42
4. Ghaly, A. and A. Hanna. (1994), "Ultimate Pullout Resistance of Single Vertical Anchors", Can Geotech. J., Vol. 31, pp. 661-672.
5. Itasca Consulting Group, Inc. (2005), Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 5.0, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.
6. Kim, H-M., Park, D., Ryu, D-W. and Song, W-K. (2012) Parametric sensitivity analysis of ground uplift above pressurized underground rock caverns, Engineering Geology 135-136, pp. 60-65.
7. Lee, S.D., B.O. Ryu, K.S. Kim, D.I. Kim, Y.J. Park and K.H. You, 2002, Improvement of support system for road tunnel with rock mass classification, Report No. GE-02-07, Highway & Transportation Technology Institute, KHC (in Korean)
8. Littlejohn, C. S. and Bruce, D. A. (1975), "Rock Anchors - State of the Art Part 1: Design(1)", Ground Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 25-32.
9. Mandl, G. (1988) Mechanics of Tectonic Faulting: Models and Basic Concepts: Developments in Structural Geology. Elsevier Science, Amsterdam.
10. Park, J.W., Y.J. Park, K.H. You and S.D. Lee, 2004, A study on the assessment of safety factor of tunnels, Tunnel & Underground Space 14.5, 327-338 (in Korean)
11. Park, Y.J. and I.H. Ryu, 2011, A study on the estimation of load distribution factors considering excavation methods and initial stress conditions, Tunnel & Underground Space 21.3, 192-204 (in Korean)
12. Sofregaz US Inc. and LRC (1999) Commercial Potential of Natural Gas Storage in Lined Rock Caverns (LRC), Topical Report SZUS-0005 DE-AC26-97FT34348-01 prepared for U.S. DOE, p. 101
13. You, K.H., Y.J. Park and G.J. Bae, 2000, An assessment of safety factor for tunnels excavated in a weak rock layer, Tunnelling Technology 2.3, 47-57 (in Korean)



박연준

1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 031-220-2580
 E-mail: yjpark@suwon.ac.kr
 현재 수원대학교 토목공학과 교수



문형석

2011년 수원대학교 공과대학 토목공학과 공학사
 2013년 수원대학교 공과대학 토목공학과 공학석사

Tel: 031-751-1612
 E-mail: flyhyungsuk@gmail.com
 현재 (주)플든엔지니어링 사원



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