

압축공기에너지 저장 공동의 콘크리트 플러그 최적 형상에 대한 수치해석적 연구

박도현¹⁾, 김형목^{1)*}, 류동우¹⁾, 신중호²⁾, 송원경²⁾

Numerical Study on the Optimal Shape of Concrete Plug for Compressed Air Energy Storage Caverns

Dohyun Park, Hyung-Mok Kim, Dong-Woo Ryu, Joong-Ho Synn, Won-Kyong Song

Abstract In the present study, the stability of a compressed air energy storage cavern was numerically assessed by concrete plug shapes in order to investigate the optimal shape of concrete plug. The concrete plugs were cylindrical, embedded cylindrical, tapered, and wedged in shape. The stability assessment was carried out based on factor of safety through a strength reduction method and a volume ratio which refers to the ratio of the volume of yield regions in concrete induced by internal pressure to all concrete volume. The results from the present study indicated that the embedded cylindrical and taper shaped plugs were mechanically more stable than the cylindrical and wedge shaped plugs. However, from a comparison of stress distributions in rock mass between the embedded cylindrical and taper shaped plugs, the taper shaped plug was found to be more optimal than the embedded cylindrical plug, since the embedded cylindrical plug caused more stress concentration in the interface between the plug and rock mass than the taper shaped plug.

Key words Compressed air energy storage, Concrete plug, Plug shape, Strength reduction method, Factor of safety

초 록 본 연구에서는 압축공기에너지 저장 공동의 콘크리트 플러그 최적 형상을 조사하기 위해 플러그 형상에 따른 저장 공동의 안정성을 수치해석적으로 평가하였다. 고려한 플러그 형상은 원통형, 암반에 근입된 원통형, 테이퍼형, 쐐기형이었고, 강도감소법에 의한 안전율과 압축 공기의 압력으로 인해 콘크리트에 발생하는 항복 영역의 부피비를 토대로 안정성을 분석하였다. 안정성 분석 결과, 암반에 근입된 원통형과 테이퍼형 플러그가 원통형과 쐐기형 플러그보다 역학적으로 더 안정한 것으로 분석되었다. 그러나 암반에 근입된 플러그의 경우 플러그와 암반이 접촉하는 부분에서 응력 집중이 발생하여 암반에 근입된 원통형 플러그보다는 테이퍼형 플러그가 최적의 형상인 것을 확인하였다.

핵심어 압축공기에너지 저장, 콘크리트 플러그, 플러그 형상, 강도감소법, 안전율

1. 서 론

최근 저탄소 녹색성장에 대한 사회적 요구가 증가함에 따라 에너지 이용효율을 향상시키기 위한 기술 개발의 필요성이 대두되고 있으며, 이를 위한 대책으로 대용

량 전기에너지 저장에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 간헐적으로 에너지가 발생하여 수요 특성에 맞춰 안정적인 전력 공급이 어려운 신재생에너지의 이용 효율을 제고하기 위해서는 전기에너지의 저장이 반드시 필요하다. 전기에너지 저장은 전기적, 기계적, 화학적, 열적 에너지 저장 형태로 분류할 수 있다. 대표적으로 축전기, 플라이휠, 배터리 방식 및 압축공기, 양수, 열 에너지 저장 방식 등이 있으며(김형목 외, 2009), 전기에너지를 대용량으로 저장하기 위한 대안으로 압축공기에너지를 지하에 저장하는 방식이 가장 효율적인 것으로 최근 평가되고 있다(한국지질자원연구원, 2010). 압축공기에너

¹⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

²⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

* 교신저자 : kimh@kigam.re.kr

접수일 : 2011년 5월 11일

심사 완료일 : 2011년 5월 24일

게재 확정일 : 2011년 5월 26일

지 저장(CAES, compressed air energy storage)은 잉여 전력 및 신재생에너지를 이용하여 압축공기를 발생시켜 지하 암반 등의 매체에 저장하는 것으로 전력 수요 발생 시 발전을 위해 저장된 압축공기가 사용된다.

지하 암반에 공동을 굴착하여 압축공기를 저장하는 경우 압축공기의 누출을 방지하기 위해서는 플러그(plug)를 반드시 설치해야 한다. 따라서 저장 공동 내부에서 작용하는 고압의 공기압에 대해 안정적으로 저항할 수 있는 플러그의 설계 기술은 고압 기밀 라이닝 시스템, 반복적인 압축공기 주입 및 생산에 대한 장기 피로거동 분석 기술, 신뢰성 기반 저장공동 안정성 평가 기술, 열-수리-역학적 복합거동 분석 기술, 기밀성능 모니터링 시스템 등과 함께 CAES 핵심 기술 중의 하나라고 할 수 있다. 저장 공동에 설치하는 플러그의 안정성은 플러그의 재료 특성 및 형상, 암반-플러그 인터페이스 특성에 따라 좌우된다. 일반적으로 플러그 시공을 위해 재료 특성이 잘 알려진 콘크리트 재료가 사용되므로 플러그 재료 및 암반-플러그 인터페이스 특성보다는 플러그 형상이 더 중요한 매개변수라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 플러그의 형상을 매개변수로 하여 압축공기에너지 저장 공동에 대한 수치해석적 안정성 평가를 수행하였다. 플러그 형상으로는 천연가스 압축공기 지하저장에 대한 기존 사례와 시공성을 고려하여 원통형(cylindrical shape), 암반에 근입된 원통형(embedded cylindrical shape), 테이퍼형(tapered shape), 쐐기형(wedged shape)을 적용하였다. 저장 공동의 안정성 평가를 위해 Dawson 외 (1999)가 제안한 강도감소법(strength reduction method)을 토대로 안전율을 분석하였고, 저장 공동 내부에 공기압 작용 시 콘크리트에 발생하는 항복 영역의 부피를 타설한 전체 콘크리트의 부피로 나눈 항복 부피비(yield volume ratio)를 조사하였다.

2. 안정성 평가 방법

2.1 강도감소법

Dawson 외 (1999)가 제안한 강도감소법은 비탈면, 터널 등 구조물의 안전율을 분석할 수 있는 기법으로 bracketing approach를 이용하여 강도정수인 점착력과 내부마찰각을 감소시켜 가면서 수치 계산이 수렴되지 않는 지점까지 반복 계산을 수행하고, 수치 계산이 수렴되지 않는 강도정수 값에서 구조물이 파괴된 것으로 간주하여 안전율을 구하는 방법이다(Fig. 1). 따라서 안전율은 현장의 강도정수를 Fig. 1에서와 같이 수치 계산이 수렴되지 않는 시점에서의 강도정수 값으로 나눈 값이 된다. 식 (1)과 (2)는 강도감소 계수, 즉 임시 안전

율을 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($^{\circ}$), 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($^{\circ}$)이다.

2.2 항복 부피비

수치해석 시 항복이 발생하는 요소는 소성 거동을 하게 되며, 소성 거동 발생 시 역학적으로 불안정한 요소가 된다. 따라서 역학적으로 유리한 플러그를 설계하기 위해서는 항복 영역이 적게 발생하는 플러그의 형상을 결정해야 한다. 본 연구에서는 CAES 지하 공동의 안정성을 평가하기 위해 항복 부피비를 조사하였다. 항복 부피비는 저장 공동 내부에 공기압 작용 시 콘크리트에 발생하는 항복 영역의 부피를 플러그와 라이닝을 위해 타설된 전체 콘크리트의 부피로 나눈 값으로 정의하였다(식 (3)). 항복 부피비는 저장 공동 내부에 공기압 작용 시 소성 거동이 발생한 요소들의 비율을 나타내므로 이 값을 최소화할 수 있는 플러그 형상을 결정할 필요가 있다.

$$R_y = \frac{V_{yc}}{V_{tc}} \quad (3)$$

여기서 R_y 는 항복 부피비, V_{yc} 는 내부 공기압 작용 시

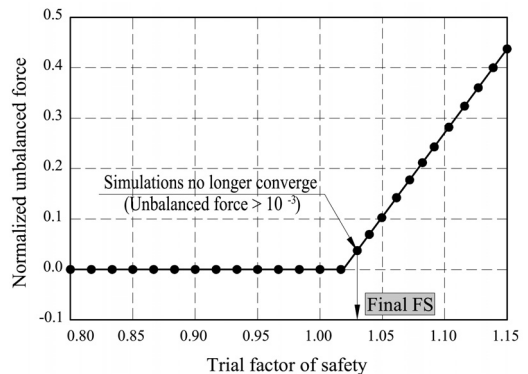


Fig. 1. Unbalanced forces for the trial factors of safety (Dawson 외, 1999)

콘크리트에 발생하는 항복 영역의 부피(m^3), V_c 는 플러그와 라이닝을 위해 타설된 전체 콘크리트 부피(m^3)이다.

3. 유한차분법에 의한 수치 모델링

3.1 입력 물성치

본 연구에서는 한국지질자원연구원 (2010)에서 계획 중인 pilot plant 부지의 암반을 대상으로 플러그 형상별 안정성 검토를 수행하였다. Table 1은 수치해석에 적용한 암반과 콘크리트의 역학적 물성을 나타낸다. Table 1의 암반 물성은 한국지질자원연구원 (2010)의 분석 결과이며, 초기 응력의 측정 결과를 반영하여 측압계수 1.0을 적용하였다. Table 1에 콘크리트 물성치들은 한국콘크리트학회 (2007)의 자료를 토대로 산정되었고, 설계 일축압축강도가 24 MPa인 콘크리트를 대상으로 하였다. 콘크리트의 Mohr-Coulomb 모델 강도정수는 인장강도가 압축강도의 1/10(인장강도 2.4 MPa)인 것으로 가정하여 산정되었다.

콘크리트와 암반의 접촉부에서는 미끄러짐과 벌어짐이 발생하므로 이를 모델링하기 위해 인터페이스 요소를 적용하였다. Table 2는 본 연구에서 적용한 암반-콘크리트 인터페이스 물성을 나타낸다. 인터페이스에서의 수직 강성은 Jaeger (1972)와 Kumar & Singh (1990)이 균질, 등방, 탄성조건을 가정하여 제안한 식 (4)를 토대로 결정되었다. King & Chandrasekaran (1975)에 따르면 수직 강성에 대한 전단 강성의 비는 0.1-0.9이고, 암석-콘크리트 인터페이스에서 수직 강성이 전단 강성의 약 3배라고 제안한 Benson (1986)의 결과를 반영하여 본 연구에서는 식 (4)에 의해 계산된 수직 강성에 1/3을 곱하여 전단 강성을 산정하였다. 암반과 콘크리트 사이의 주면 마찰은 국토해양부 (2008)에서 제안한 점착력 0, 마찰각 30° 를 적용하여 모델링되었다.

$$K_n = \frac{E_m}{(1+\nu)r} \tag{4}$$

여기서 K_n 은 수직 강성(MPa/m), E_m 은 암반의 변형계수(MPa), ν 는 암반의 포아송비, r 은 공동 단면의 중심에서 라이닝 배면까지의 거리(m)이다.

3.2 해석 조건 및 모델링

본 연구에서는 FLAC2D (Itasca) 프로그램을 이용하여 콘크리트 플러그 형상별 안정성 검토를 수행하였다. Fig. 2는 안정성 검토를 위한 저장 공동의 표준 단면을 나타낸다. 플러그의 길이를 결정하기 위해 Fig. 3과 같이 암반에 근입되지 않은 원통형 플러그를 가정한 후 플러그-라이닝 연결부의 저항을 고려하지 않고, 플러그에 작용하는 외부 힘(저장 공동 내 공기압)과 플러그와 암반 사이에 주면 마찰력만으로 그 길이를 결정하였다(식 (5)). CAES 발전 규모를 고려한 저장 공동 내 운영 공기압은 5-8 MPa로 저장 공동 내 공기압(P)은 8 MPa, 공기압이 작용하는 플러그 단면적(A)은 16.63 m^2 (저장 공동 내경 2.5 m), 플러그의 둘레(l_p)는 18.85 m(플러그 외

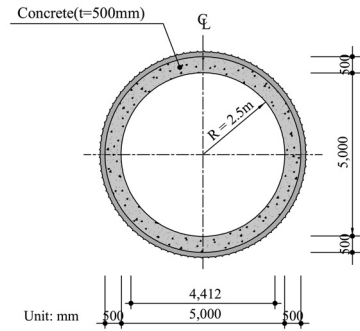


Fig. 2. Typical cross-section of underground storage cavern

Table 1. Mechanical properties of rock mass and concrete(한국지질자원연구원, 2010, 한국콘크리트학회, 2007)

Property	Rock mass	Concrete
Unit weight (kN/m^3)	27.2	25.0
Deformation modulus (MPa)	11,000	26,000
Poisson's ratio	0.14	0.17
Cohesion (MPa)	3.0	3.79
Angle of internal friction ($^\circ$)	45	54.9

Table 2. Mechanical properties of concrete-rock mass interface

Normal stiffness (MPa/m)	Shear stiffness (MPa/m)	Cohesion (MPa)	Friction angle ($^\circ$)
3,216	1,071	0.0	30

경 3.0 m)를 적용하였고, 토목 구조물에 일반적으로 사용되는 1.2-1.5의 안전율 범위를 고려하여 플러그 길이 산정을 위한 안전율(FS)로 1.3을 적용하였다. 콘크리트와 암반의 주면 마찰력(f_s)을 산정하기 위해 한국지반공학회 (2003)에서 제안한 식 (6)을 이용하였고, 안전한 설계를 위해 하한치인 0.94 MPa을 적용하였다. 위와 같은 값들을 적용 시 플러그 길이가 약 9.8 m로 산정되어 본 연구에서는 10.0 m를 플러그 길이로 적용하였다.

$$L = \frac{P \times A}{f_s \times l_p} \times FS \tag{5}$$

여기서 L 은 플러그 길이(m), P 는 플러그에 작용하는 저장 공동 내 공기압(MPa), A 는 공기압이 작용하는 플러그 단면적(m^2), f_s 는 암반과 플러그 사이에 주면 마찰력(MPa), l_p 는 플러그의 둘레(m), FS 는 플러그 길이를 결정하기 위한 안전율이다.

$$f_s = (2.3 - 3.0) f_w^{1/2} \tag{6}$$

여기서 f_s 는 암반과 콘크리트 사이의 주면 마찰력 (psi), f_w 는 암반과 콘크리트의 일축압축강도(psi) 중 작은 값이다.

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 플러그 형상으로 원통형, 암반에 근입된 원통형, 테이퍼형, 쐐기형 총 네 가지를 고려하였다. 암반에 근입된 원통형, 테이퍼형, 쐐기형 플러그의 경우 추가 굴착 높이를 1.0 m로 설정하였으며, 저장 공동의 길이는 pilot plant의 규모를 고려하여 결정되었다. 저장 공동의 3차원 거동을 모사하기 위해 Fig. 5와 같이 축대칭 조건을 사용하였고, 심도 100 m에서의 초기 응력을 재현하기 위해 해석 경계면에

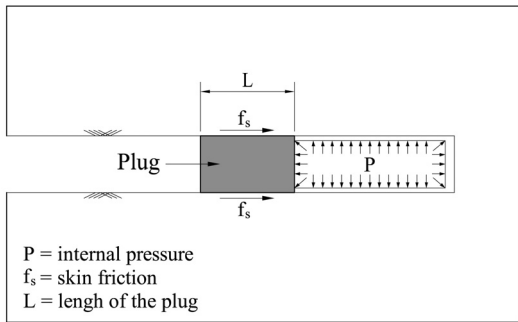
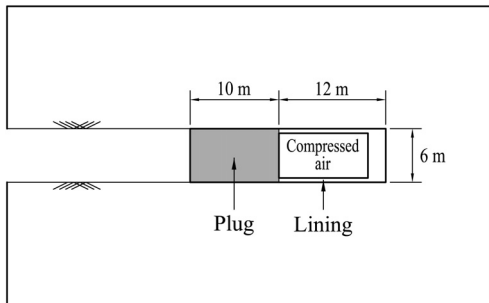
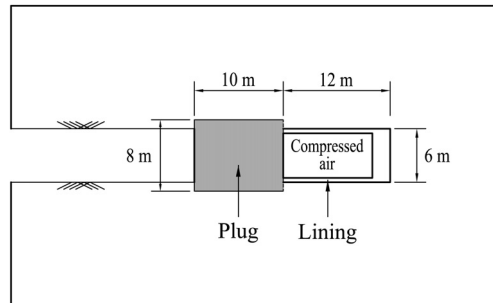


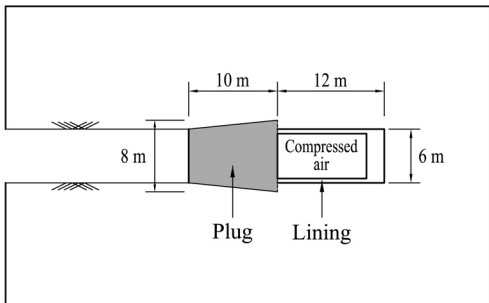
Fig. 3. Factors in determining the length of a concrete plug (Eqs. (5) and (6))



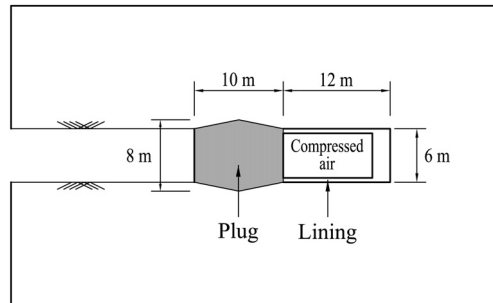
(a) Cylindrical shape



(b) Embedded cylindrical shape



(c) Tapered shape



(d) Wedged shape

Fig. 4. Geometry and dimensions of different plug shapes

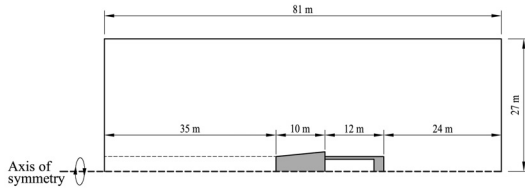


Fig. 5. Schematic of numerical model

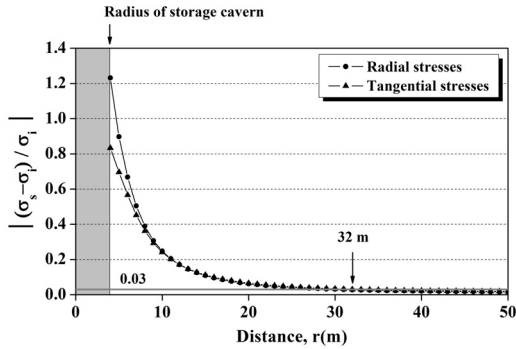
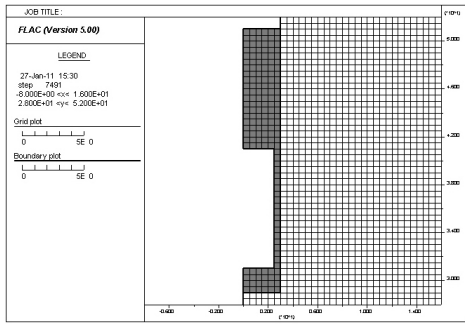


Fig. 6. Comparison between initial insitu stresses (σ_i) and stresses (σ_s) induced by internal pressure

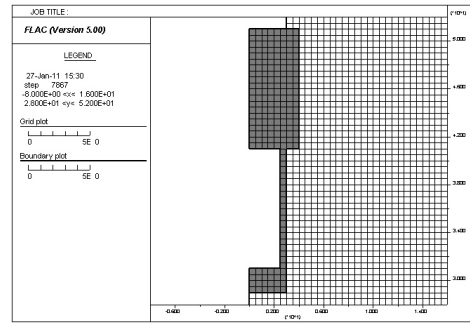
2.67 MPa의 압력을 적용하였다. Fig. 6은 지표 하부 100 m에 위치하는 직경 6.0 m의 원형 공동에 내압 8 MPa 적용 시 초기 응력과 내압으로 유도된 응력과의 차이를 분석한 그래프로서 공동 중심으로부터 32.0 m(5.3D) 떨어진 지점부터 초기 현지 응력과 내압 작용 시 현지 응력의 차이가 3% 이내가 되는 것으로 분석되어 본 연구에서는 저장 공동으로부터 해석 경계면의 영향을 최소화하기 위해 최소 6.0D 이상 확보되도록 해석 영역을 설정하였다. Fig. 7은 축대칭 조건을 이용한 플러그 형상별 수치 모델링을 나타낸다.

4. 플러그 형상별 안정성 평가 결과 및 분석

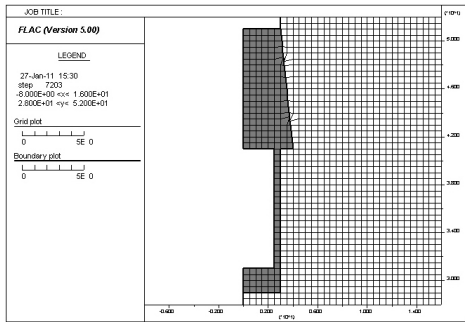
본 연구에서는 CAES 발전 규모 및 운영 공기 압력을 고려하여 저장 공동 내부에 작용하는 공기압을 5 MPa (압축공기 생산 시 최소 압력), 8 MPa(압축공기 주입 시 최대 압력)로 설정하여 플러그 형상별 안정성 검토를 수행하였다. Table 3과 4는 각각 내부 공기압이 5 MPa와 8 MPa인 경우 수치해석적 안정성 검토 결과를 나타낸다. 내압 5 MPa 작용 시 강도강소법에 의한 안전율은 원통형 플러그를 제외하고 동일하게 분석되었



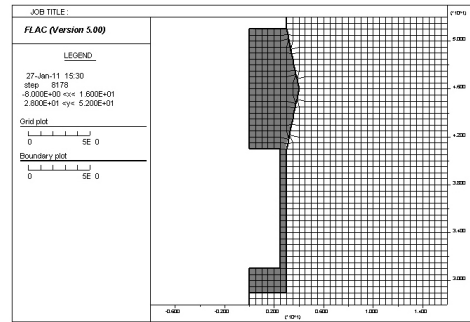
(a) Cylindrical shape



(b) Embedded cylindrical shape



(c) Tapered shape



(d) Wedged shape

Fig. 7. Numerical configurations by concrete plug shapes

Table 3. Summary of numerical results at an internal pressure of 5 MPa

Plug shape	Factor of safety	Yield volume ratio
Cylindrical	< 1.0	0.47
Embedded cylindrical	8.28	0.23
Tapered	8.28	0.30
Wedged	8.28	0.35

Table 4. Summary of numerical results at an internal pressure of 8 MPa

Plug shape	Factor of safety	Yield volume ratio
Cylindrical	< 1.0	0.49
Embedded cylindrical	6.62	0.23
Tapered	6.89	0.30
Wedged	6.73	0.35

으나, 플러그와 라이닝에 항복 파괴되는 암반에 근입된 원통형 플러그에서 최소로 나타나 암반에 근입된 원통형 플러그가 안정성 측면에서 유리한 것을 알 수 있었다. 내압이 8 MPa 작용하는 경우에는 강도강소법에 의한 안전율은 테이퍼형 플러그가 가장 크게 분석되었으나, 암반에 근입된 원통형 플러그와 썸기형 플러그의 안전율과 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 플러그와 라이닝의 항복 파괴되는 원통형 플러그의 경우 내압이 5 MPa 작용할 때보다 약간 증가하였으나, 그 외 플러그 형상에서는 변화가 거의 없었다. 위의 분석 결과로부터 저장 공동에 내압 5 MPa와 8 MPa 작용 시 역학적으로 유리한 플러그 형상은 암반에 근입된 원통형과 테이퍼형이고 다음으로 썸기형인 것을 알 수 있었다. 원통형 플러그의 경우 안전율이 1.0 이하로 플러그 형상으로서 적절하지 않은 것으로 분석되었다.

Fig. 8은 내압 8 MPa 작용 시 플러그 형상별로 소성이 발생한 영역을 나타낸다. 그림과 같이 저장 공동 내 공기 압력으로 인해 라이닝과 플러그-라이닝 연결부에서 소성 거동이 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 상세 구조 계산을 통해 철근 보강 계획을 수립하고, 라이닝과 플러그 접속 시 연결 부위의 설계 기술과 시공 품질을 확보하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 적용한 콘크리트 설계 일축압축강도 24 MPa에 대하여 철근 보강으로 콘크리트의 소성 거동을 제어하기 어려운 경우, 배합 재료나 배합비 등을 변경하여 소성 거동을 최소화할 수 있는 콘크리트 재료를 개발할 필요가 있을 것이다. 한편 Fig. 9에서와 같이 플러그와 암반이 접촉하는 부분에서는 플러그의 활동(sliding)으로 인해 플러그와 주변 암반의 절대 변위 차

이에 해당하는 상대 전단변위가 집중적으로 발생하였다. 암반에 근입된 원통형, 테이퍼형, 썸기형에서의 최대 상대 전단변위는 각각 4.3 mm, 8.3 mm, 7.9 mm로 분석되었다. 플러그와 암반사이의 접촉면에서 플러그의 활동은 일반적으로 접촉면의 법선 방향으로 벌어짐(opening)을 동반하고, 이는 저장된 압축공기의 주요 누출 경로가 될 위험이 있다. 따라서 플러그-암반 접촉부에서의 전단거동을 최소화하기 위해 록볼트 타설 등과 같은 보강 대책이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 10은 내압 8 MPa 작용 시 암반에 근입된 원통형, 테이퍼형 및 썸기형 플러그에서 발생하는 암반의 전단 응력 분포를 나타낸다. 테이퍼형과 썸기형 플러그의 경우 플러그 중간부부터 전면부까지 암반에 전단 응력(최대 전단 응력 0.45 MPa(테이퍼형), 0.63 MPa(썸기형))이 고르게 분포하는 반면, 암반에 근입된 원통형 플러그의 경우 플러그 전면부(진입 갭도 부분)와 접촉하는 암반 구간에서 전단 응력(최대 전단 응력 1.13 MPa)이 최대 2.5배 집중되는 결과를 보였다. 일반적으로 발파에 의한 굴착 시 굴착면 주변에 암반 손상 영역이 발생하므로 암반에 근입된 원통형 플러그의 경우 Fig. 10(a)에 표시한 부분에서 국부적인 암반 파괴가 발생하여 플러그가 갑작스런 변형을 일으킬 수 있고, 이로 인해 압축공기 저장 공동이 전반적으로 불안정해질 수 있다. 또한 테이퍼형이나 썸기형 플러그의 경우 외곽부 발파공의 천공 각도를 조절하여 플러그의 형상에 따라 어렵지 않게 암반을 굴착할 수 있으나, 암반에 근입된 원통형 플러그의 경우 플러그를 암반에 근입시키기 위한 추가 굴착 작업이 필요하고, 추가 굴착 시 플러그 전면부에 암반의 손상 제어가 용이하지 않아 시공성

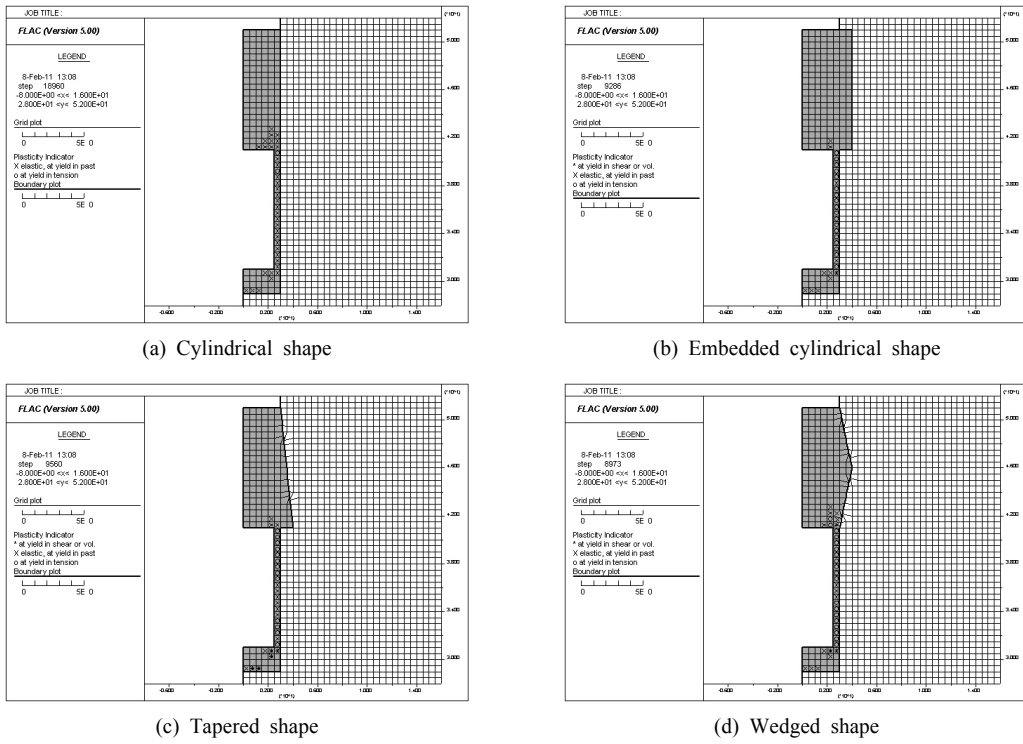


Fig. 8. Yield regions by concrete plug shapes (internal pressure = 8 MPa)

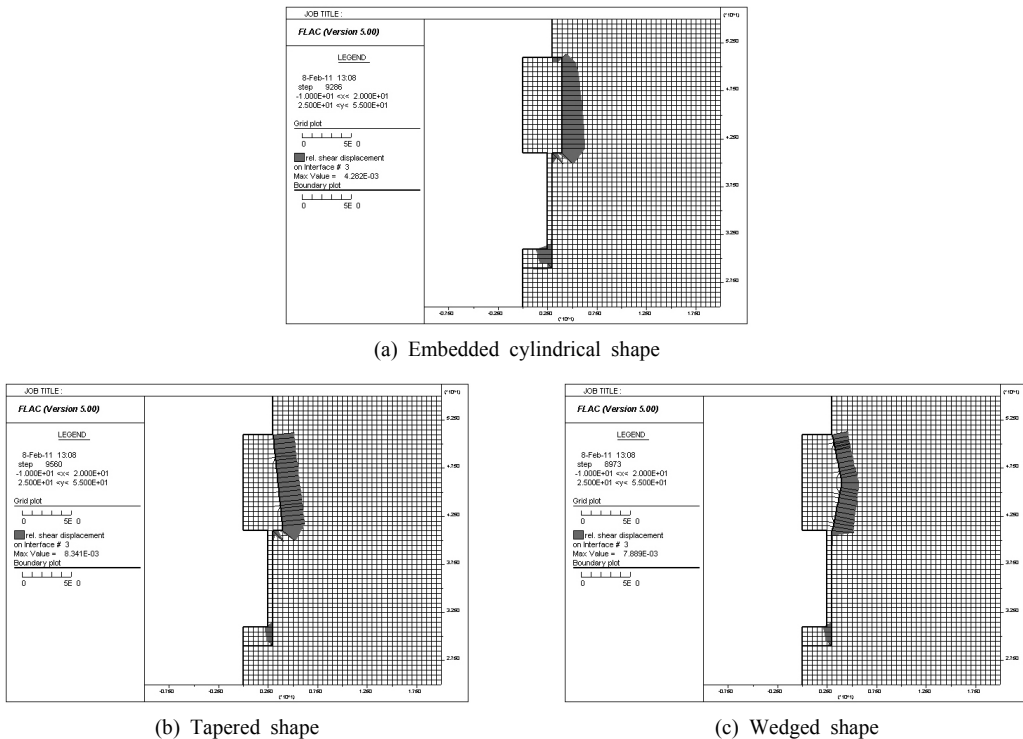
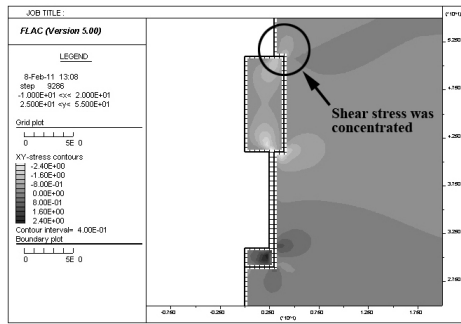


Fig. 9. Relative shear displacements along the interfaces between concrete plug and surrounding rock mass (internal pressure = 8 MPa)

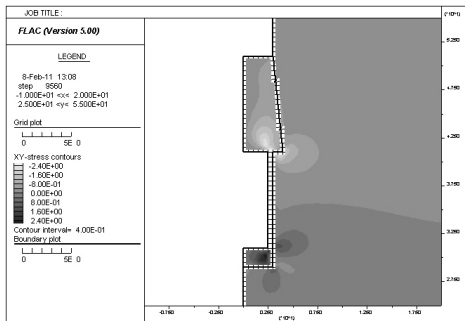
이 떨어진다고 할 수 있다. 따라서 암반 내 응력 집중, 암반 손상 영역, 시공성 등을 고려할 때, 압축공기를 저장하기 위한 플러그 형상으로 암반에 근입된 원통형 플러그보다는 테이퍼형이나 썸기형 플러그를 적용하는 것이 역학적으로 더 유리할 것으로 판단된다.

Fig. 11은 테이퍼형과 썸기형 플러그의 경우 내압 8 MPa 작용 시 콘크리트 해석 요소의 주응력의 분포를 나타낸다. 두 가지 플러그 형상에서 전반적으로 유사한

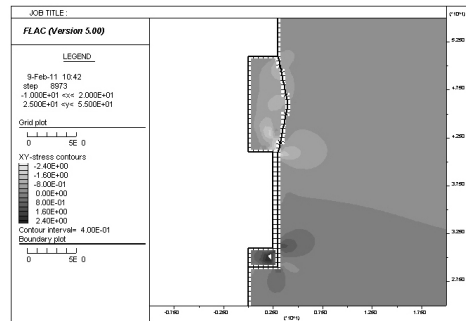
응력 분포를 보이지만, Fig. 11에 음영으로 표시한 부분에서 볼 수 있는 것처럼 썸기형 플러그의 경우 콘크리트의 파괴 포락선에 근접하는 해석 요소들이 더 많이 분포하였으며, 콘크리트 해석 요소들의 국부 안전율 (local factor of safety)을 비교함으로써 이를 확인할 수 있었다. 즉 국부 안전율이 1.5 이하인 해석 요소들의 부피를 분석한 결과, 테이퍼형과 썸기형에서 각각 50.27 m³, 82.12 m³로 나타나 썸기형 플러그 적용 시 파괴 포



(a) Embedded cylindrical shape

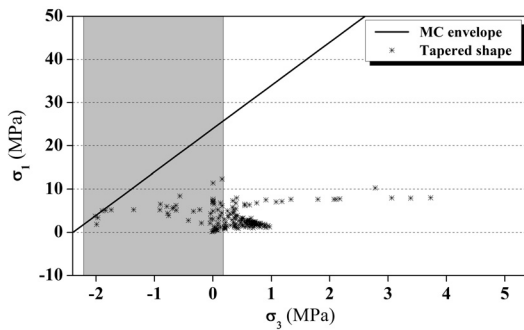


(b) Tapered shape

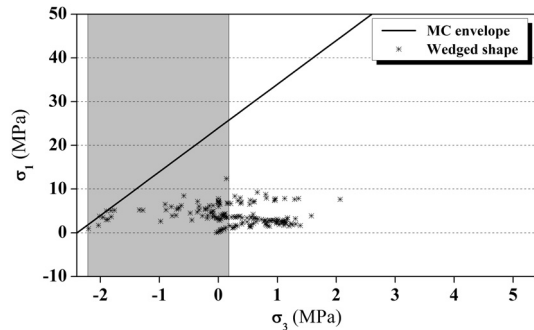


(c) Wedged shape

Fig. 10. Shear stresses for embedded cylindrical, tapered, and wedged shapes (internal pressure = 8 MPa)



(a) Tapered shape



(b) Wedged shape

Fig. 11. Comparison of principal stress distributions between the tapered and wedged shapes (internal pressure = 8 MPa)

락선에 근접하는 요소들이 더 많은 것을 알 수 있었다. 여기서 국부 안전율은 해석 요소의 최대 및 최소 주응력이 형성하는 Mohr 원의 반경(r_a)과 해석 요소가 파괴 포락선에 접하는 Mohr 원의 반경(r_f)의 비(r_f/r_a)이다. 한편 Table 3과 4에서 볼 수 있는 것처럼 내압 작용 시 동일한 부피인 테이퍼형과 썩기형 플러그에서 단위 부피당 발생하는 항복 영역의 규모가 테이퍼형보다 썩기형이 더 큰 것으로 분석되었다. 또한 내압에 저항하는 플러그의 표면적이 썩기형(표면적 64.1 m²)보다 테이퍼형(표면적 63.1 m²)이 더 작음에도 항복 영역의 비율이 더 작으므로 썩기형보다는 테이퍼형이 역학적으로 더 안정한 플러그 형상인 것을 알 수 있었다.

5. 결론 및 향후 연구사항

본 연구에서는 압축공기를 지하 공동에 저장하는 경우 필수적으로 설치해야 하는 콘크리트 플러그의 최적 형상을 분석하기 위해 네 가지 플러그 형상(원통형, 암반에 근입된 원통형, 테이퍼형, 썩기형)을 설정하여 수치해석적 안정성 검토를 수행하였고, 수치해석으로부터 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

저장 공동 내 공기압 5 MPa과 8 MPa 작용 시 강도 감소법에 의한 안전율과 항복 영역의 크기를 비교한 결과, 역학적으로 유리한 플러그 형상은 암반에 근입된 원통형과 테이퍼형이고 다음으로 썩기형인 것을 알 수 있었다. 원통형 플러그는 내부 공기압 작용 시 안전율이 1.0 이상 확보되지 않아 플러그 형상으로서 적절하지 않은 것으로 분석되었다.

플러그 형상별로 암반에 발생하는 전단 응력의 분포를 비교한 결과, 테이퍼형 및 썩기형 플러그의 경우 플러그와 접촉하는 암반에서 전단 응력이 고르게 분포한 반면, 암반에 근입된 원통형 플러그의 경우 플러그 전면부와 접촉하는 구간에서 암반에 전단 응력이 집중되는 결과를 보여 테이퍼형 플러그보다는 역학적으로 더 불리한 것으로 분석되었다.

내압에 저항하는 플러그의 표면적이 서로 유사한 테이퍼형과 썩기형 플러그의 안정성을 비교한 결과, 테이퍼형 플러그가 강도감소법에 의한 안전율이 높고, 항복 영역의 발생 비율이 더 작게 분석되었다. 또한 암반에 발생하는 주응력의 분포를 비교한 결과, 썩기형 플러그의 경우 파괴 포락선에 근접하는 요소들이 더 많은 것으로 분석되어 테이퍼형 플러그가 썩기형 플러그보다 역학적으로 더 안정한 것을 알 수 있었다.

항복 영역이 발생한 구간을 조사한 결과, 플러그 형상과는 관계없이 플러그와 라이닝이 연결되는 구간이 역학적으로 취약한 것으로 분석되어 라이닝과 플러그 접속 시 연결 부위의 설계 기술과 시공 품질을 확보하는 것이 콘크리트 플러그의 중요한 기술 항목임을 확인하였다.

한편 본 연구에서는 굴착 시 암반 손상 영역, 불연속면, 지하수에 의한 부력 영향, 압축공기의 반복적인 주입-생산으로 인한 콘크리트 및 암반의 피로 거동 등을 고려하지 않았기 때문에 향후 플러그의 상세 제원(플러그 길이, 추가 굴착 높이 등 플러그의 상세 기하학적 형상, 플러그-라이닝 연결부 보강 방법 등)를 결정하기 위해서는 이러한 요소들을 고려한 추가 분석이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 ‘지하 암반내 복공식 에너지저장시스템 개발’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 국토해양부, 2008, 도로설계편람 제5편 교량, 509-98p.
2. 김형목, 류동우, 정소걸, 송원경, 2009, 무복공식 압축공기 지하암반공동 저장기술 사례연구, 한국지부시스템공학회지 46.5, 614-624.
3. 한국지반공학회, 2003, 구조물 기초설계기준 해설, 구미서관, 서울, 346-350.
4. 한국지질자원연구원, 2010, 지하 암반내 복공식 에너지저장시스템 개발 연구보고서.
5. 한국콘크리트학회, 2007, 콘크리트구조설계기준, 기문당, 서울.
6. Benson C.P., 1986, Literature review of rock properties for analysis of navigation structures founded on rock, Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
7. Dawson E.M., W.H. Roth and A. Drescher, 1999, Slope stability analysis by strength reduction, Géotechnique 49.6, 835-840.
8. Jaeger C., 1972, Rock mechanics and rock engineering, Cambridge University Press, Cambridge.
9. King G.J.W. and V.S. Chandrasekaran, 1974, An assessment of the effects of interaction between a structure and its foundation, Proceedings of the conference on settlement of structures, Cambridge, London, 368-383.
10. Kumar P. and B. Singh, 1990, Design of reinforced concrete lining in pressure tunnels, considering thermal effects and jointed rockmass, Tunnelling and Underground Space Technology 5.1, 91-101.



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



김형목

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2002년 동경대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 042-868-3265
E-mail: kimh@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원



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 선임연구원



송원경

1982년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1996년 프랑스 에콜데민 지질공학과 공학박사

Tel: 042-868-3247
E-mail: songwk@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원



신중호

1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3242
E-mail: jhsynn@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원