

압축공기 저장용 파일롯 터널에 설치된 콘크리트 플러그의 안정성 해석

이연규¹⁾, 송원경²⁾, 박철환²⁾, 최병희^{3)*}

Stability Analysis of Concrete Plugs Installed in Pilot Tunnels for the Storage of Compressed Air

Youn-Kyou Lee, Won-Kyoung Song, Chulwhan Park, Byung-Hee Choi

Abstract CAES-G/T (Compressed Air Energy Storage - Gas Turbine) power generation is a likely option for the buffer facility stabilizing the fluctuation of the renewable powers, such as wind and solar powers. Considering the geological conditions, the underground CAES facility is most probable if the CAES-G/T generation is planned in Korea. In this kind of facility, a concrete plug is installed to seal the compressed air in the container, so that the selection of the shape and dimension of concrete plug could be a critical design factor. The stability evaluation of two types of plug was carried out by investigating the distribution of the factor of safety in the plugs and the distribution of contact pressure over the contact surface. The analysis result shows that the taper-shaped plug is more structurally stable than the wedge-shaped plug for the given geological condition. Possible separation of the rock-concrete interface around the spring line of the wedge-shaped plug is anticipated, which means the possible leakage of compressed air through the side wall and also means the poor mobilization of frictional resistance on that area.

Key words Compressed air storage, Concrete plug, Finite element analysis, Contact pressure, Factor of safety

초 록 압축공기를 활용한 가스터빈 발전방식(CAES-G/T)은 태양열이나 풍력과 같은 신재생 에너지의 출력 변동성을 조절하는 유력한 수단 중 하나로 고려되고 있다. 국내에서 CAES 발전이 실용화된다면 지질여건상 암반터널식이 채택될 가능성이 크다. 암반터널식 CAES 시설에서는 압축공기 저장공간을 밀폐시키기 위한 콘크리트 플러그의 설치가 필요하므로 플러그의 형상과 크기를 결정하는 것이 중요한 설계변수가 된다. 파괴에 대한 안전율 분포와 접촉부 접촉압력 분포 분석을 통해 2가지 형태의 콘크리트 플러그에 대한 안정성 평가를 수행하였다. 주어진 지질조건에서는 테이퍼형 플러그가 썩기형 플러그에 비해 구조적으로 안정한 것으로 나타났다. 썩기형 플러그의 경우 측면 접촉부에서 분리현상이 예측되었고 이러한 분리면에서 압축공기의 누출 가능성과 마찰저항의 감소가 발생할 수 있음을 보여주었다.

핵심어 압축공기저장, 콘크리트 플러그, 유한요소해석, 접촉압력, 안전율

1. 서 론

최근 관심이 높아지고 있는 신재생에너지와 원자력에너지 개발의 활성화를 위해서는 잉여전력의 저장수단

과 신속한 침투부하 대응 방법의 개발이 병행되어야 한다. 그 방법의 하나로서 잉여전력으로 압축공기를 저장한 후 필요시 가스터빈 발전에 활용하는 CAES-G/T (Compressed Air Energy Storage Gas Turbine System) 기술에 대한 국내외 관심이 높아지고 있다. 최근 미국에서도 대규모 풍력발전단지에서 발생하는 잉여전력을 저장하는 버퍼시설의 유력한 후보로서 CAES식 발전이 큰 주목을 받고 있다(Baker, 2008). 국내 산업계에서도 이미 CAES 발전에 대한 관심을 나타내고 있으며(김택곤 등, 2008) 한국지질자원연구원 주도로 2009년부터 관련 연구가 시작되었다(김형목 등, 2009a, b).

¹⁾ 군산대학교 해양건설공학과 교수

²⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

³⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

* 교신저자 : bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2010년 12월 10일

심사 완료일 : 2010년 12월 23일

게재 확정일 : 2010년 12월 23일

현재 운영 중인 CAES 방식의 발전소는 독일의 Hunterf 발전소와 미국의 McIntosh 발전소가 있으며 이들은 암염층을 용해시켜 만든 동굴을 압축공기 저장 공간으로 활용하고 있다. 암염층이 존재하지 않는 국내에서 CAES 방식의 발전소를 건설할 경우 지형적 특성상 지하 암반 터널에 압축공기를 저장하는 방식이 채택될 가능성이 크다. 아직까지는 세계적으로 암반 터널식 CAES 발전소의 건설경험이 전무한 실정이지만 암반터널식 압축공기 저장시설에 대한 관심은 꾸준히 유지되고 있다. 일본에서는 홋카이도 지하 광산 터널에서 파일롯 플랜트의 실증시험을 실시한 사례가 보고되었다(橫山 등, 2002). 미국의 일리노이즈 주에서는 지하 600 m 백운암층에 총 부피 245,000 m³의 터널식 압축공기 저장시설의 건설을 시도하였으나 전력가격의 하락으로 부지조사 단계에서 취소된 바도 있다(Salter, 1984).

암반 터널에 압축공기를 저장하는 경우 압축공기 저장구간을 외부와 격리시키는 콘크리트 플러그의 설치 필수적이다. CAES 터널의 내부에서는 5 MPa의 이상의 고압이 작용하므로 내부 공기압과 지압에 대해 안정적인 콘크리트 플러그를 설계하는 것은 CAES 터널 설계기술의 핵심부분으로 예상된다.

CAES 터널 콘크리트 플러그의 안정성은 플러그의 재질, 형상, 암반-플러그 접촉면의 거동 특성에 따라 영향을 받을 것으로 예상된다. 그러므로 이들 영향요소를 고려한 플러그의 안정성해석을 통해 국내 암반 특성에 적합한 콘크리트 플러그의 설계기술을 확보하는 것은 국가에너지 개발계획의 차질 없는 수행을 위해 매우 중요한 과제이다.

이 연구에서는 현재 한국지질자원연구원 주도로 강원도에 위치한 ○○철광 광업소의 255 ML 갱도에 건설 예정인 2개의 파일롯 압축공기 저장터널의 콘크리트 플러그에 대한 안정성 해석을 수행한 후 설계된 콘크리트 플러그 형상의 적절성을 평가하고자 한다. 고려되고 있는 플러그 형상은 대칭 쐐기형과 테이퍼형이다. 이 연구에서는 두 곳의 파일롯 터널에 대해 3차원 유한요소해석을 해석을 수행하고 그 결과를 비교분석하여 2가지 플러그 형태의 적절성을 평가하고자 한다. 해석의 도구로 CAD 기반의 3차원 유한요소 프로그램인 SolidWorks(2007)를 이용하였다.

2. 파일롯 터널의 설계 개요

한국지질자원연구원(2010)의 상세설계 보고서에 따르면 현재 계획 중인 압축공기 저장용 파일롯 터널은 강원도에 위치한 ○○철광 광업소 내 지하 약 400~500

m의 2개 지점에 설치될 예정이다. “A” 지점 터널에는 쐐기형 플러그가 설치되고 “B” 지점 터널에는 테이퍼 형태의 플러그를 적용되며, 시공 후 운전을 통해 그 성능이 상호 비교 평가될 예정이다.

저장터널의 길이는 “B” 지역의 경우가 “A” 지역에 비해 10 m가 길며 플러그의 길이도 1 m가 길다. “A” 지역과 “B” 지역 파일롯 터널에 시공되는 라이닝시스템은 각 세 종류로 구성되어 설계되었으며, 실증 실험을 통해 성능평가를 수행하는 것이 예정되어 있다.

쐐기형 플러그는 중앙부에서 양 방향으로 12.53°의 경사를 가지며, 테이퍼형 플러그는 안쪽에서 바깥쪽으로 5.71°의 경사를 갖는다. 단면이 가장 큰 지점에서 플러그 둘레 길이는 쐐기형의 경우 23.48 m, 테이퍼형의 경우 21.81 m이다. 플러그 구조체의 중앙 하부에는 지름 70 cm의 홀을 형성시켜 플랜트의 보수를 위한 통로로 활용할 계획이다. 플러그 내측에서는 최대 5 MPa의 운전 공기압이 작용한다.

3. 파일롯 터널 부지의 역학적 특성

현장에서 채취한 암석시료를 이용하여 실험실 일축압축 시험을 실시한 결과 평균 일축압축강도는 116 MPa, 평균 인장강도는 13 MPa, 평균 Young's modulus는 40.4 GPa, 평균 포아송비는 0.14, 평균 밀도는 2.72 g/cm³로 나타났다(KIGAM, 2010).

파일롯 터널 예정지 주변의 5개 갱도에서 RMR 분류를 수행한 결과 굴착방향과 불연속면 방향을 고려한 보정 RMR값은 53~58 범위로 대상 부지는 보통 등급의 암반으로 평가되었다. 파일롯 터널 예정지 5개 갱도 주변암반을 대상으로 한 GSI(Geological Strength Index) 분류 결과 GSI 값의 범위는 45~65이며, 전체 평균은 59로 나타났다(KIGAM, 2010).

대상지역 암반의 변형계수 값은 암석의 실내시험에 의해 얻어진 Young's modulus(E_i)를 GSI값을 이용하여 현장 암반의 변형계수로 변환하는 다음 경험식(Hoek & Diederichs, 2006)을 이용하여 산정되었다.

$$E_m = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{(60 + 15D - GSI)/11}} \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 D 는 암반의 교란지수(disturbance factor)로서 0(비교란)과 1(완전 교란) 사이의 값을 갖는다. 파일롯 터널 대상지역 암반의 교란지수를 $D = 0.25$ 로 가정하면 현장 암반의 변형계수 산술평균값은 $E_m = 9.5$ GPa으로 나타났다(KIGAM, 2010).

한국지질자원연구원에서는 2010년 파일롯 터널 설치 예정지 갱도에서 수압파쇄법에 의한 초기지압 측정을 실시하였다. 수압파쇄시험 결과에 의하면 파일롯 터널 예정 지점의 연직방향 수직지압은 약 14 MPa이며 측압 비는 0.75~1.45 범위에 있는 것으로 나타났으며 측압 비 평균은 1.1로 계산되었다.

4. 3차원 유한요소해석

4.1 해석모델의 설정

CAD 기반의 3차원 유한요소 프로그램인 Solidworks (2007)를 활용하여 CAES 파일롯 터널의 안정성 해석을 수행하였다. 터널의 3차원 안정성 해석을 수행할 경우 해석시간의 많은 부분이 복잡한 요소망의 작성에 소비된다. 3차원 해석의 이러한 문제점은 CAD 기반의 유한요소프로그램을 활용함으로써 상당부분 극복될 수 있다.

Fig. 1은 실제 상세설계도를 바탕으로 완성한 유한요소해석모델로서 (a)는 썸기형 플러그를 적용한 경우이고 (b)는 테이퍼형 플러그를 적용한 경우이다. 대칭성을 고려하여 저장 터널의 1/2만을 해석대상으로 선정하였다. Solidworks의 CAD 기능을 활용하여 암반 및 콘크리트 영역을 각각 3개, 2개 부분으로 분할하여 생성시킨 후 이 들을 조립하여 전체 해석모델을 완성하였다. 썸기형 플러그 모델의 가로, 세로, 높이는 각각 31 m, 18 m, 36 m 이며, 테이퍼형 플러그 모델의 가로, 세로, 높이는 각각 42 m, 18 m, 36 m이다. 해석모델을 10절점 사면체요소를 이용하여 요소 분할하였다. 큰 응력구

배가 예상되는 콘크리트 구조체 및 터널주변에서는 요소를 조밀하게 발생시켰으며 외부 경계로 진행할수록 요소크기를 확대시켰다. 썸기형 플러그 모델의 경우 총 절점 수와 요소 수는 각각 86,283개, 61,649개이며 테이퍼형 플러그 모델의 경우 총 절점 수와 요소 수는 각각 106,593개, 76,068개이다.

4.2 해석모델의 경계조건

해석모델의 바닥면, 우측면, 전면에는 roller 구속조건을 부여하고 상부면과 후면은 경계면 응력이 작용하는 자유면으로 설정하였다. 수압파쇄시험 결과에 따라 모델에 작용하는 연직방향 수직지압은 약 14 MPa, 측압 비는 1.1로 가정하였다. 이에 따라 해석모델의 상부면에는 14 MPa의 압력을 작용시켰으며, 좌측면과 후면에는 상부면에 작용하는 압력의 1.1배인 15.4 MPa를 작용시켜 해석을 수행하였다. 저장 터널 내부면 과 압축 공기 주입공 면에서는 최대 운전공기압 $p_1 = 5\text{MPa}$ 이 작용하는 것으로 가정하였다.

콘크리트와 암반의 접촉부에서는 Fig. 2와 같이 미끄러짐과 벌어짐이 가능한 접촉조건을 설정하여 해석을 수행하였다. 요소망 접촉부에서는 초기에 암반요소와 콘크리트 요소가 절점을 공유하지만 전단력이 수직력과 마찰계수의 곱으로 표현되는 마찰력보다 클 때 접촉부에서 공유절점이 분리되면서 미끄러짐이 발생할 수 있다. 또한 접촉면에 인장력이 작용하면 공유절점들이 벌어지고 접촉압력이 0이 된다. 이 연구에서는 Ooi & Carter(1987)와 Wyllie(1999)의 연구결과를 바탕으로

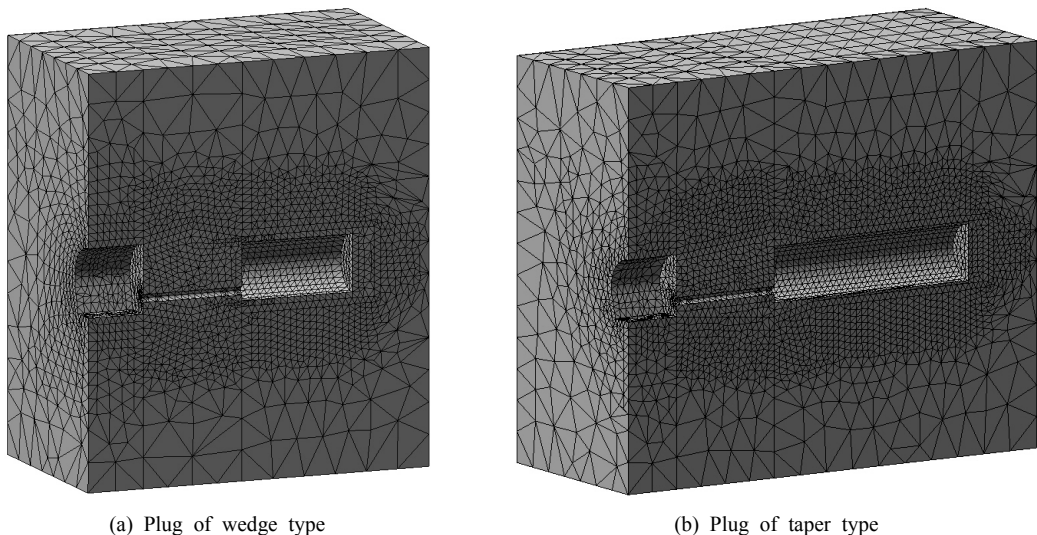


Fig. 1. Two analysis models with different plug types

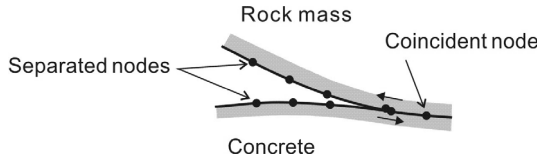


Fig. 2. Contact conditions at the rock mass - concrete interface

접촉부의 접착력을 0으로 가정하였고, 잔류마찰각을 40°으로 가정하여 해석을 수행하였다.

4.3 입력물성

해석모델에 적용한 암반과 콘크리트의 물성은 Table 1과 같다. 암반의 역학적 특성은 파일럿 터널 설치 지점의 지질 특성조사 자료를 바탕으로 결정하였다. 암반의 단위중량 및 포아송비는 현장 시료를 실험실 시험 결과 값이다. 암반의 변형계수 9.5 GPa는 현장 암반의 교란지수를 $D = 0.25$ 로 가정하고 현장 GSI 값을 고려하여 환산된 평균값을 적용하였다. 콘크리트의 변형계수, 단위중량, 포아송비는 관련 문헌을 참고로 결정하였다. 이 연구에서는 암반과 콘크리트의 거동을 탄성으로 가정하므로 강도정수들을 입력할 필요가 없지만 일축압축강도와 인장강도는 탄성응력분포 해석결과를 이용하여 Mohr-Coulomb 파괴조건에 대한 안전율을 산정할 목적으로 활용된다. 암반의 일축압축강도와 인장강도는 실험실 시험값의 약 1/2로 가정한 것이다. 콘크리트의 압축강도는 3가지 경우 즉, 24 MPa, 30 MPa, 40 MPa를 가정하였으며 대응되는 인장강도는 압축강도의 1/10을 가정하였다.

5. 해석결과 분석

5.1 파괴에 대한 안전율 분석

탄성해석으로 구한 응력분포에 Mohr-Coulomb 파괴

Table 1. Mechanical properties of rock mass and concrete

Properties	Rock mass	Concrete
Unit weight, γ (kN/m ³)	27.2	25.0
Poisson's ratio, ν	0.14	0.2
Deformation modulus, E_m (GPa)	9.5	15
Uniaxial compressive strength, σ_c (MPa)	60	24 30 40
Tensile strength, σ_t (MPa)	6	2.4 3.0 4.0

조건식을 적용하여 암반과 콘크리트의 파괴에 대한 안전율을 분석하였다. 압축강도가 σ_c , 인장강도가 σ_t 일 경우 Mohr-Coulomb 파괴조건식은 다음 식과 같이 표시된다.

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_t} - \frac{\sigma_3}{\sigma_c} = 1 \quad (2)$$

여기서 σ_1 은 최대주응력(인장응력을 양의 값으로 가정), σ_3 은 최소주응력이다. 식 (2)는 Fig. 3에서 직선 CD로 표시된다. 응력상태(σ_1, σ_3)가 영역 ADC 내부에 위치하면 파괴가 일어나지 않음을 의미한다. 그러므로 Mohr-Coulomb 파괴에 대한 안전률(FOS, Factor of Safety)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$FOS = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_t} - \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^{-1} \quad (3)$$

$FOS \leq 1$ 은 파괴가 예상되는 응력상태를 의미하며 $FOS > 1$ 은 파괴에 대해 안전한 응력상태를 나타낸다.

Fig. 4는 썩기형 콘크리트 플러그 및 라이닝 구조체에서 안전율이 1이상인 영역과 1 이하인 영역을 각각 청색과 적색으로 표시한 것이다. 콘크리트의 강도는 3가지 경우 즉, 24 MPa, 30 MPa, 40 MPa가 고려되었다. 인장강도는 압축강도의 1/10을 가정하였다. 썩기형 플러그의 모델의 경우 콘크리트 압축강도를 40 MPa까지 증가시켜도 플러그 및 라이닝에 파괴 가능 영역이 넓게 분포하는 것을 보여준다. 따라서 썩기형 플러그 모델은 주어진 해석조건에서 플러그의 안정성이 매우 낮은 것

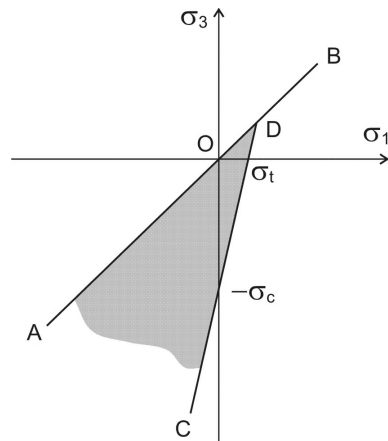


Fig. 3. Mohr-Coulomb failure criterion in $\sigma_1 - \sigma_3$ plane

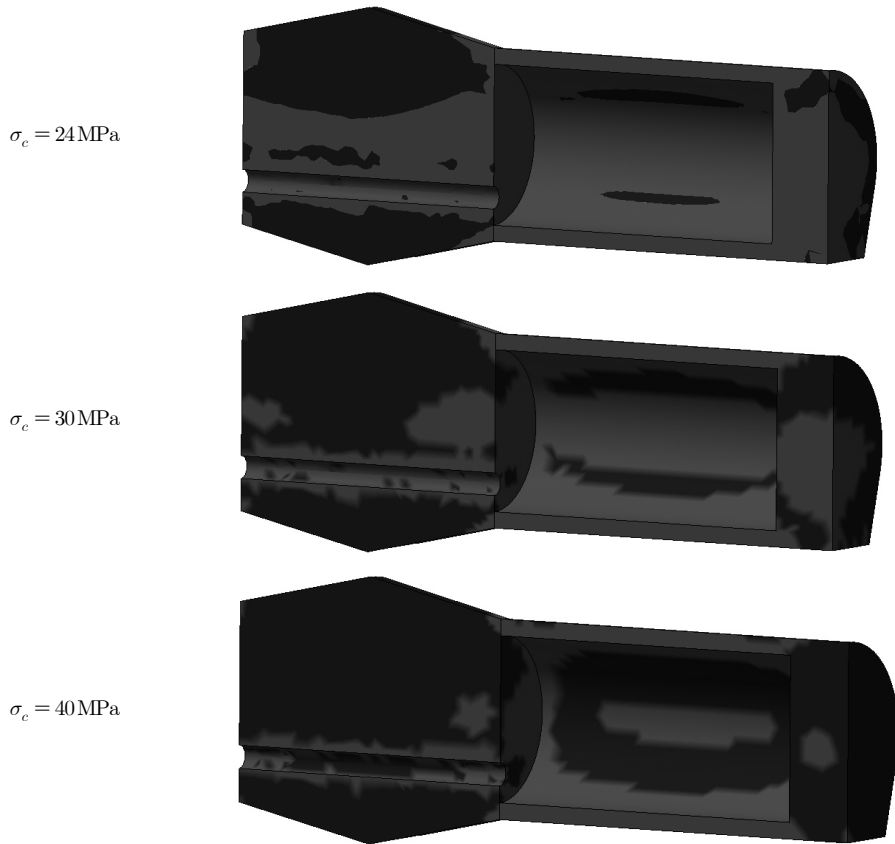


Fig. 4. FOS distribution in the wedge shaped plug and lining; blue region (FOS>1), red region (FOS≤1)

으로 판단된다. 라이닝과 플러그의 연결 지점, 라이닝 천장 및 바닥 지점들이 특히 파괴에 취약한 것으로 나타나고 있다.

Fig. 5는 3가지 콘크리트 강도조건에 대해 테이퍼형 콘크리트 플러그 및 라이닝 구조체에서 안전율이 1 이상인 영역과 1 이하인 영역을 각각 청색과 적색으로 표시한 것이다. 콘크리트의 압축강도가 30 MPa 이상이 될 경우 압축공기 입출관과 저장터널과의 접합부 일부를 제외하면 플러그 구조체에서는 파괴영역이 거의 나타나지 않고 있음을 보여준다. 특히 압축강도가 40 MPa 이상이면 저장터널 중앙부의 천장 및 바닥 부분에서만 일부 파괴영역이 관찰된다. 이러한 안전율 해석결과는 테이퍼형 플러그 모델이 썰기형 플러그 모델에 비해 상대적으로 구조적 안정성이 더 크다는 것으로 말해준다.

파일롯 터널의 최대 운전공기압은 5 MPa이므로 저장터널의 공기압 p_i 은 0~5 MPa의 범위에 있다. 지금까지는 최대 운전 공기압 조건에서 파일롯 터널의 안정성이 검토되었다. 운전 공기압은 플러그와 라이닝에 외력

으로 작용하여 구조적 불안정성을 야기할 수 있지만 한편으로 구속압으로 작용하여 안정성을 증대시키는 효과도 기대할 수 있다. $\sigma_c = 40$ MPa이고, $p_i = 0$ 인 경우 플러그의 안전율해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 썰기형 플러그 모델의 경우 플러그에 나타나는 파괴영역은 $p_i = 5$ MPa인 경우와 큰 차이가 없고 저장터널 라이닝의 파괴영역은 오히려 소폭 감소하고 있음을 보여준다. 테이퍼형 플러그 모델의 경우 $p_i = 5$ MPa인 경우에 비하여 플러그의 파괴영역은 저장터널과 접합부에서 조금 확대되는 것을 볼 수 있다. 반면에 라이닝의 파괴 가능성은 $p_i = 5$ MPa인 경우에 비하여 크게 높아짐을 보여준다.

5.2 콘크리트-암반 접촉면의 접촉압력 분석

CAES 파일롯 터널에서 구조적으로 취약한 부분은 콘크리트-암반의 접촉부로 예상되므로 접촉부에서 응력분포 특성을 분석할 필요가 있다. 이 연구에서는 콘크리트-암반 접촉부에 분리와 미끄러짐이 가능한 접촉



Fig. 5. FOS distribution in the taper shaped plug and lining; blue region (FOS>1), red region (FOS≤1)



Fig. 6. FOS distribution in the plugs and concrete linings for $p_i = 0$; blue region (FOS>1), red region (FOS≤1)

요소를 적용하여 안정성 해석을 수행하였고 그 결과로 얻은 암반-플러그 접촉부 접촉압력(contact pressure)을 분석하였다. 접촉면의 마찰각은 40°이며 보수적 해석을 위해 점착력은 0으로 가정하고 해석을 수행하였다.

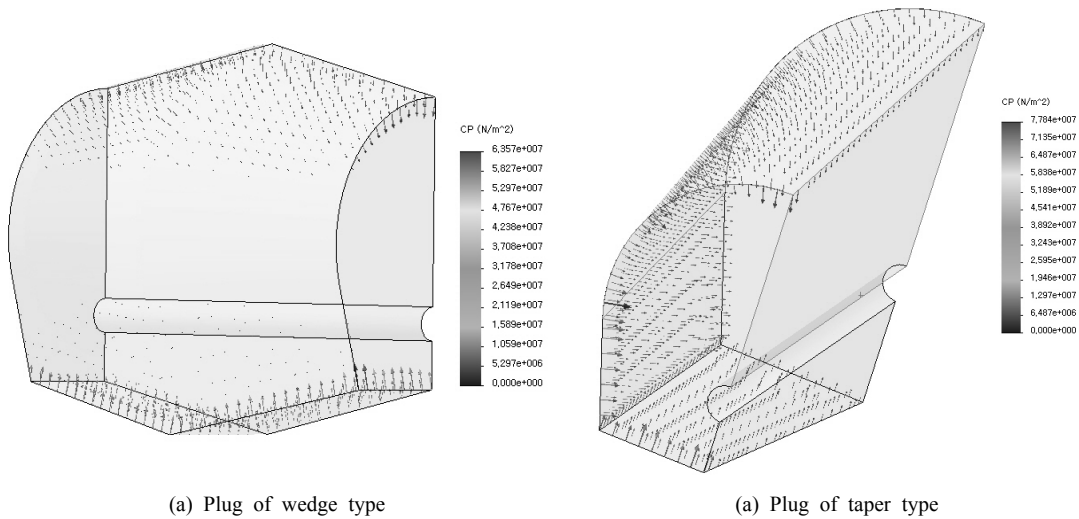
Fig. 7은 $p_i = 5$ MPa 일 때 쐐기형과 테이퍼형 플러그의 접촉면에 작용하는 접촉압력의 크기를 화살표로 표시한 것이다. 쐐기형 플러그의 경우 천정부와 바닥부에 접촉압력이 크게 작용하지만 측면부에서는 접촉압력이

거의 나타나지 않는다. 이는 쐐기형 플러그의 경우 측면부에서 접촉부의 분리 즉 콘크리트와 암반의 분리가 발생하기 때문으로 판단된다. 반면에 테이퍼형 플러그의 경우는 접촉면 전체에서 비교적 고르게 접촉압력이 분포하고 있다. 이는 테이퍼형 플러그의 경우 접촉면 분리가 발생되지 않고 전체 면적에 걸쳐 고루 전단저항력이 발휘되고 있음을 의미한다.

Fig. 8은 쐐기형 플러그의 천장부 중앙과 바닥 모서리 접촉부에서 플러그 축 방향 거리에 따른 접촉압력의 변화를 그래프로 도시한 것이다. 그림에서 축방향 거리에

0인 지점은 플러그의 외측 끝을 나타낸다. 쐐기형 플러그의 경우 천장부 중앙에서 접촉압력은 약 20 MPa이며 바닥 모서리에서는 약 40 MPa으로 계산되었으며 외측 끝부분에서 접촉압력의 급격한 증가를 보인다. 천장부 중앙 부분에서는 국부적인 접촉면 분리로 나타난다. 쐐기형 플러그의 경우 측면 접촉부의 분리가 발생하므로 측면부에서 접촉압력은 플러그 전체 길이에 걸쳐 0으로 나타났다.

Fig. 9는 테이퍼형 플러그의 천장부 중앙, 바닥 모서리, 측면 접촉부에서 플러그 축 방향 거리에 따른 접촉



(a) Plug of wedge type

(a) Plug of taper type

Fig. 7. Distribution of contact pressure on the surface of plugs

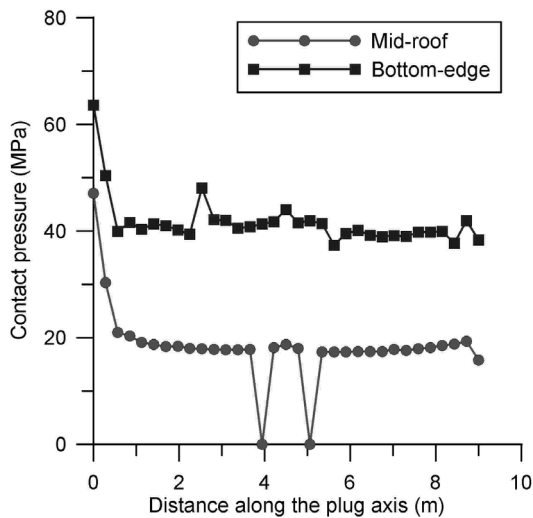


Fig. 8. Distribution of contact pressure on the surface of the wedge type plug along the axial distance

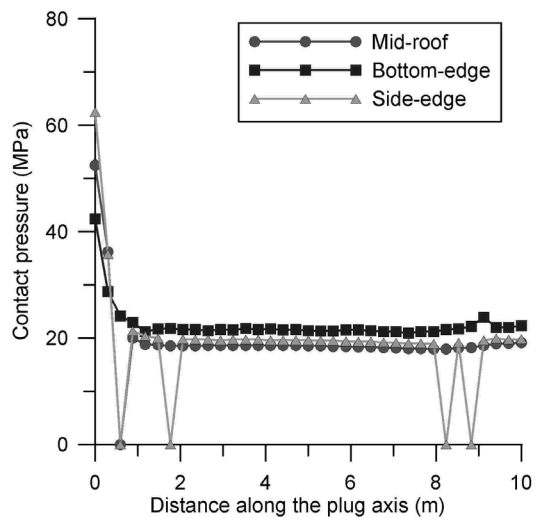


Fig. 9. Distribution of contact pressure on the surface of the taper type plug along the axial distance

압력의 변화를 도시한 것이다. 정상부, 바닥 모서리부, 측벽부에서 접촉응력은 전체적으로 20 MPa 정도이며 플러그 전체 길이에 걸쳐 비교적 고루 작용하고 있는 것으로 나타났다. 썩기형 플러그의 경우와 마찬가지로 외측 끝부분에서 급격한 접촉압력 증가현상을 보인다. 테이퍼형 플러그의 측벽 접촉부 외측 끝부분과 내측 끝부분에서 국부적인 접촉면 분리가 나타나고 있음을 보여주나 분리가 발생하는 지역은 매우 제한적인 것으로 판단된다.

Fig. 10은 $p_t = 5 \text{ MPa}$ 일 때 플러그와 플러그 주변 암반의 변형 모습을 100배 확대하여 도시한 것이다. 접촉압력 해석으로부터 예상할 수 있는 바와 같이 썩기형 플러그의 경우 측면 접촉부에서는 콘크리트와 암반의 분리가 나타나고 있음을 잘 보여준다. 반면에 테이퍼형 플러그의 경우 암반과 콘크리트의 분리가 나타나지 않고 있음을 알 수 있다.

플러그와 암반의 접촉면에 작용하는 접촉압력 해석결과 썩기형 플러그 모델에서는 측면 접촉부에서 접촉면 분리현상이 나타날 수 있는 것으로 해석되었다. 실제 운영 중 이러한 상황이 발생한다면 플러그의 안정성을 확보할 수 없을 뿐만 아니라 압축공기의 누출이 예상된다. 따라서 가정된 해석조건에서 설계된 썩기형 플러그의 안정성을 확보하기 위해서는 접촉면 분리 가능성에 대비한 대응 보강설계가 필요할 것으로 판단된다.

가정한 해석조건에서 테이퍼형 플러그는 썩기형 플러그에 비해 상대적으로 안정한 것으로 나타났다. 테이퍼

형 플러그의 경우 대체로 접촉면 전체에서 약 20 MPa의 압력으로 암반과 콘크리트의 접촉이 유지되므로 접촉면 분리의 가능성이 매우 낮은 것으로 해석되었다.

6. 결론

한국지질자원연구원 주도로 건설예정인 2가지 형태의 파일럿 압축공기 저장터널에 대해 콘크리트 플러그 및 라이닝 구조체의 안전을 해석과 콘크리트-암반의 접촉압력 해석을 수행하였으며, 그 결과 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

파괴안전을 해석결과 최대 운전공기압 조건에서 테이퍼형 플러그를 채용한 파일럿 터널의 구조적 안정성이 썩기형 플러그를 채용한 경우에 비해 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 또한 암반 및 콘크리트 구조체에 대한 파괴 가능성은 터널 주변암반보다는 플러그와 라이닝에서 크게 나타났다. 플러그 구조체에 대한 파괴안전을 분석결과 파괴가능성은 라이닝 플러그 접촉 부분에서 상대적으로 크게 나타났다.

암반-플러그 접촉면에서 접촉압력을 분석한 결과 테이퍼형 플러그의 경우 전체 면적에 걸쳐 접촉압력이 고루 발생하였다. 그러나 썩기형 플러그의 경우 측면 스프링라인 부근에서는 접촉압력이 거의 작용하지 않는 것으로 나타났다. 이는 썩기형 플러그의 경우 측면부에서 접촉면 분리가 발생하기 때문으로 판단되었다. 따라서 썩기형 플러그의 경우 접촉면 압력이 불균일 현상이

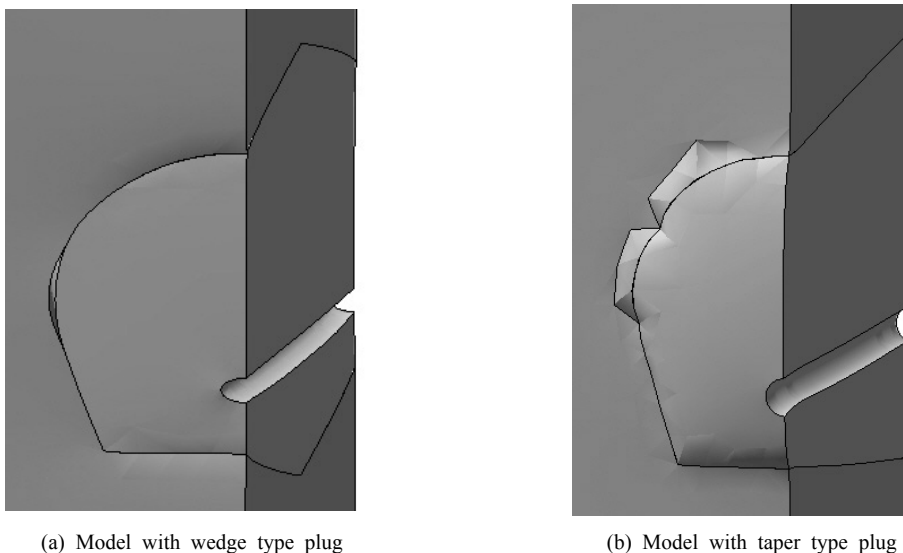


Fig. 10. Deformed shapes of concrete plugs and surrounding rock masses (x100)

뚜렷하여 접촉면의 활동가능성이 매우 큰 것으로 판단되었다.

이 연구에서 수행한 파괴안전율 분석은 안전율 1을 기준으로 하였으나 실제 터널 구조물 설계에서는 일반적으로 더 높은 안전율을 적용하고 있다. 이 논문의 안전율 분석은 실제 파괴를 염두에 둔 것이 아니며 플러그 및 라이닝의 파괴에 대한 상대적 취약성을 분석한 것임을 밝혀둔다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김택근, 김지연, 이진무, 2008, 압축공기에너지 저장(CAES)의 현황과 전망, 2008 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, 123-131.
2. 김형목, 류동우, 정소걸, 송원경, 2009a, 복공식 압축공기 지하저장을 위한 가변성 분할 라이닝 터널기술, 터널과 지하공간 (한국암반공학회지), 19.2, 77-85.
3. 김형목, 류동우, 정소걸, 송원경, 2009b, 일본의 압축공기 지하암반저장 기술, 2009 한국암반공학회학술발표회 논문집, 9-19.
4. 한국지질자원연구원(KIGAM), 2010, 압축공기에너지 지하저장 pilot plant 구축 상세설계 용역 설계보고서.
5. Baker, J., 2008, New technology and possible advances in energy storage, Energy Policy, 36, 4368-4373.
6. Hoek, E. and Diederichs, M.S., 2006, Empirical estimation of rock mass modulus, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 43, 203-215.
7. Ooi, L.H., Carter, J.P., 1987, Direct shear behavior of concrete-sandstone interfaces, Proc. 6th Int. Congr. on Rock Mech., Montreal, Canada, pp. 467-470.
8. Salter, M. de G., 1984, Design aspects for an underground compressed air energy storage system in hard rock, ISRM/BGS Symp. on Design and Performance of Underground Excavations, Cambridge, U.K.
9. Solidworks Corp., 2007, Solidworks 2007.
10. Wyllie, D.C., 1999, Foundations on rock (2nd Ed.), E & FN Spon.
11. 横山英和, 篠原俊彦, 加藤拓一郎, 2002, 壓縮空氣貯藏發電パイロットプラントの 實証運轉, 電力土木, 150-154.



이 연 규

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 063-469-1864
E-mail: kyoulee@kunsan.ac.kr
현재 군산대학교 해양과학대학 해양건설공학과 교수



박 철 환

1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3244
E-mail: cwpark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원



송 원 경

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



최 병 희

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 선임연구원