

일본의 압축공기 지하암반저장 기술

김형목, 류동우, 정소걸, 송원경(한국지질자원연구원)

1. 서론

1.1 전력저장의 필요성 및 저장방식

전력 수요는 특정 계절 및 특정 시간대에 집중하는 경향이 있어 전력의 안정적인 공급 및 품질제고를 위해서는 첨두부하(peak)시에 대비하여 잉여전력을 저장해 둘 필요가 있다. 전력 에너지 저장방식으로는 전기 에너지를 역학적 에너지로 저장하는 플라이휠방식(Flywheels Energy Storage), 물의 위치에너지를 변환하는 양수발전 방식(Pumped hydro), 압축공기를 생성하고 저장하여 화력발전에 이용하는 압축공기 저장방식(Compress Air Energy Storage), 초전도 코일을 이용한 자기에너지로 저장하는 초전도 자기에너지 저장방식(Superconducting Magnetic Energy Storage) 및 변환과정 없이 직접 2차 전지(Battery)로 전기에너지를 저장하는 방식 등이 제안되고 있다. 그림 1.1에 각 저장방식의 규모 및 개발 수준을 나타내었다.

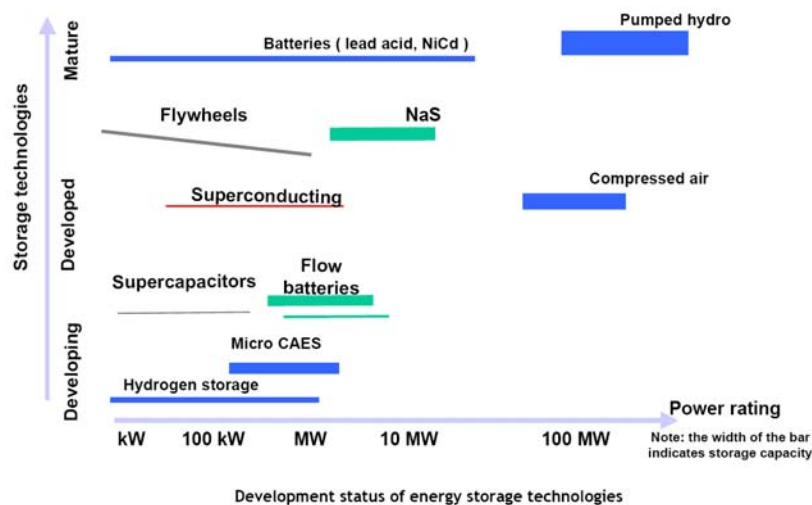


그림 1.1 에너지 저장방식별 규모 및 개발 수준(출처: <http://www.berr.gov.uk>)

최근 친환경에너지로 각광받는 태양광 및 풍력 발전의 경우, 날씨 조건에 따라서는 지속적이고 안정적인 전력 공급에 지장을 받을 수 있다. 따라서, 다양한 형태의 에너지 저장 시스템과 태양광 및 풍력으로 대표되는 신재생 에너지와의 융합을 통해 에너지 효율 향상 및 지구온난화 방지를 위한 온실가스 저감효과를 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

본고에서는 전력 부하의 평준화 수단으로 수백 MW급의 중/대규모 발전이 가능하고 도심 근교의 천심도 및 도서지방에도 건설 가능한 분산형 전력공급원으로서의 가스터빈 발전을 위한 압축공기 지하암반저장 국외사례 및 국내 적용을 위한 기술 분석을 목적으로 압축공기

지하암반저장을 위한 최적의 조건인 암염층이 존재하지 않고 균열을 포함한 경암 암반이 주된 국내 지질조건과 유사한 환경의 일본의 사례를 살펴보았다.

1.2 CAES-G/T 발전의 특징

Compressed Air Energy Storage Gas Turbine System (이하 CAES-G/T) 기술은 야간 및 휴일의 여유전력을 이용하여 압축공기를 발생시켜 지하암반 등의 저장시설에 저장해 두고 주간의 최대부하(peak)시에 연료와 함께 연소시켜 가스터빈 발전에 이용하는 일종의 화력발전이다. 가스터빈 발전은 입지조건 등의 제약이 적고 건설비가 상대적으로 저렴한 장점이 있으나 발전을 위해서는 고온고압의 압축공기가 필요하기 때문에 통상적 가스터빈 발전의 경우 투입 에너지의 약 2/3가 압축공기 생성을 위한 압축기 구동에 소비된다. CAES-G/T 발전은 야간 및 휴일의 여유전기를 이용하여 압축공기를 생성, 저장함으로써 발전시에 압축기 구동이 불필요하게 되어 동일한 연료량으로 통상적인 가스터빈 발전보다 약 2~3배의 발전량 증가를 얻을 수 있다. 즉, 동일한 발전량을 얻기 위한 화석연료 사용량을 약 1/3 수준 가량으로 절감할 수 있기 때문에 화력발전소의 에너지 효율향상과 배기가스 및 이산화탄소 등의 배출량을 감소시켜 온실가스 저감효과를 가져올 수 있다. 통상적인 가스터빈 발전시설과 CAES-G/T의 구성요소 및 효율을 그림 1.2에 비교하였다.

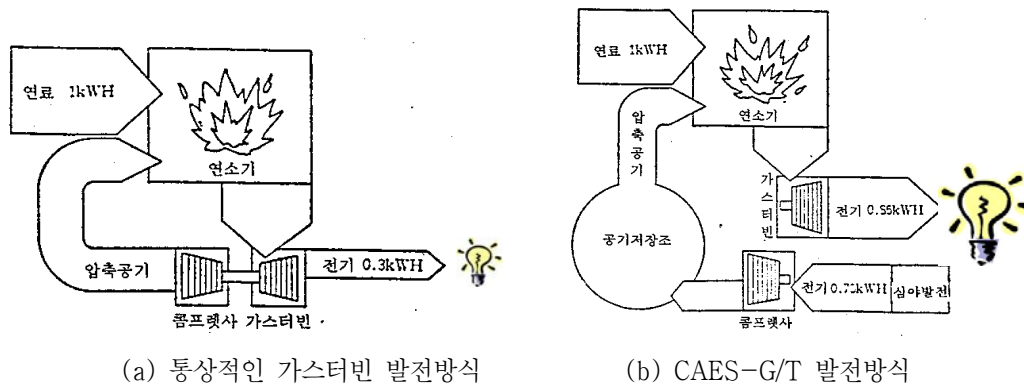


그림 1.2 가스터빈 발전방식과 CAES-G/T 발전방식의 비교

국내에서는 최근 국내전력환경 변화를 고려한 CAES-G/T 발전의 국내 적용 가능성을 고찰한 논문이 발표된 바 있으며 (김택곤 외, 2008), CAES-G/T 발전을 위한 압축공기 지하저장과 관련한 일반적인 기술동향 및 해결과제가 보고된 바 있다 (한국자원연구소, 1995)

2. 압축공기 지하암반저장 시설의 분류 및 특징

2.1 기밀방식에 따른 분류

압축공기 지하저장시설을 기밀방식에 따라 분류하면 복공식 라이닝 방식과 암반의 제반 특성을 이용한 무복공식으로 크게 분류할 수 있으며 암반의 제반 특성은 다시 암반 자체의 기밀성과 지하수압을 이용한 수봉방식으로 세분할 수 있다. 이들 기밀방식의 특징을 요약하면 표 2.1과 같다.

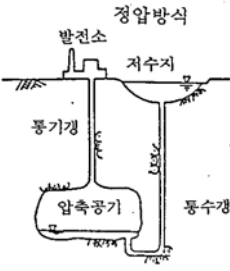
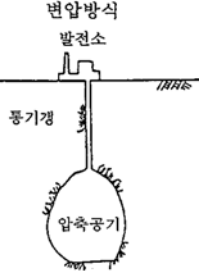
표 2.1 기밀방식에 따른 분류

기밀방식	장점	해결과제
라이닝 방식	-심도 제약이 없음 -수봉식보다 신뢰성이 높음 -공동 설치 심도를 알게 할 수 있음 -지하수위 등의 자연조건에 영향을 받지 않음	-라이닝 시공 비용 저감 -공동 내벽이 전하중을 받기 때문에 암반의 강도변형특성이 중요함 -라이닝 내구성
암반자체의 기밀성을 이용한 저장 (암염층 저장)	-심도 제약이 없음 -라이닝 시공 비용이 불필요	-대상 부지의 제약
지하수압을 이용한 저장	-라이닝 시공 비용이 불필요 (저 cost) -구조가 단순하므로 시공이 용이하며 유지관리가 거의 필요 없음	-수밀기능의 평가 -충분한 지하수압을 확보를 위해 공동 설치 심도가 깊어짐 -과대용수억제 조치로서의 그라우트의 의존도가 높고 cost 추정상 불확성 요소가 크게 됨 -공동 용수가 많은 경우에는 공기의 용해도가 문제가 됨

2.2 저장방식에 따른 분류

압축공기 지하암반공동 저장방식은 토출압력의 변동 유무에 따라 정압식과 변압식으로 분류할 수 있으며 각 방식의 특징을 요약하면 표 2.2와 같다.

표 2.2 저장방식에 따른 분류

	정압식	변압식
기밀성	지하수 및 암반의 기밀성에 의존	콘크리트 및 특수시트 등에 의한 라이닝 필요
공동용적	변압식에 비해 상대적으로 작음	저장 최대공기압과 최소공기압의 차에 의해 용적이 결정되므로 상대적으로 큼
시공성 (심도)	저장 공기압과 동일한 지하수압을 확보하기 위하여 대심도에 공동을 건설할 필요가 있음, 통수갱, 저수지 등이 필요	저장압에 관계없이 심도의 제약이 없음 지질, 지반조건이 양호할 경우 비교적 지하 천부에도 건설 가능
안정성	암반의 응력변형특성은 굴착시 및 점검시에만 고려하면 됨	저장 및 발전에 수반하여 암반에 걸리는 응력이 변동하기 때문에 주변 암반과 시공 콘크리트에 대한 안정성 평가가 필요
기타	용존 공기들이 분출되는 삼폐인 현상에 대한 대책이 필요	
개념도	 <p>정압방식 발전소 저수지 통수갱 압축공기 통수갱</p>	 <p>변압방식 발전소 통수갱 압축공기</p>

3. 무복공식 압축공기 지하저장 실증실험

3.1 실증실험 개요

암반의 지하수압에 의한 수봉기능을 이용한 무복공식 압축공기 지하암반 저장실험은 기후현에 위치한 카미오카(神岡) 광산의 폐갱도에서 실시되었다. 저장 공동은 갱도 입구로부터 수직심도 약 180 m 하부에 위치하고 지표로부터는 약 450 m 심도에 위치한다 (그림 3.1). 실험기간 중 갱도 입구까지 포화상태가 유지된 점으로부터 저장 공동 주변 지하수압은 약 1.8 MPa로 추정되었다.

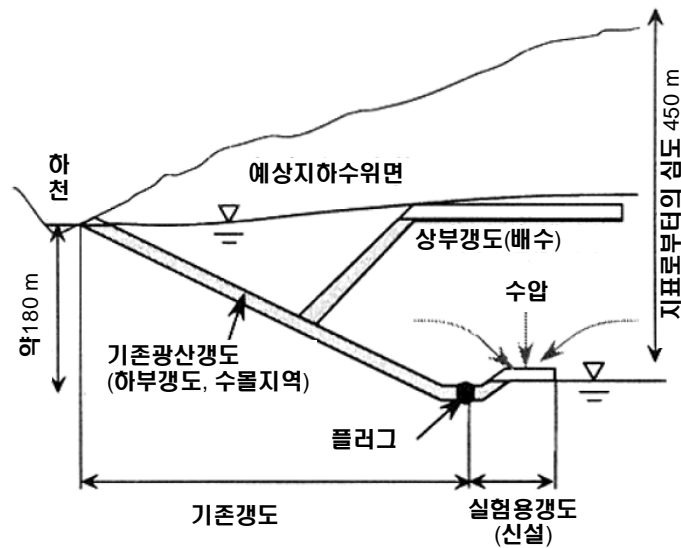
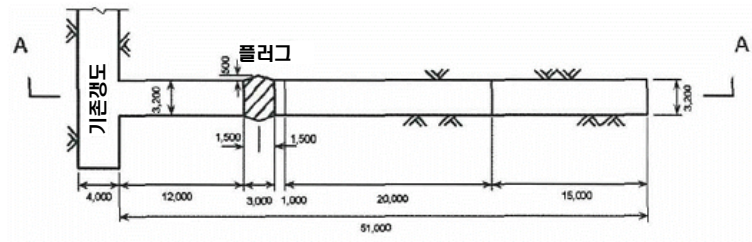


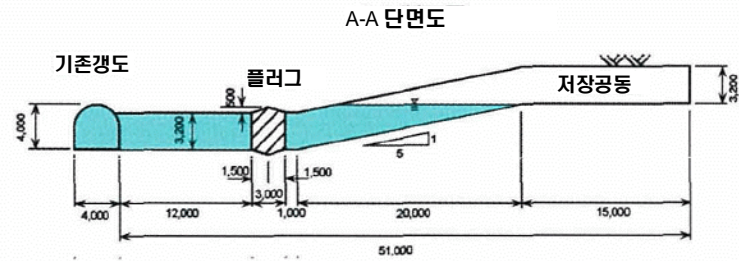
그림 3.1 무복공식 압축공기 저장 실증실험 시설 개요(電力中央研究所, 2003)

저장 공동은 기존 갱도와 직교하는 방향으로 발파공법을 이용하여 굴착되었다. 굴착 사양은 폭 3.2 m, 높이 3.2m, 길이 51m로 실제 압축공기가 저장되는 부분은 그림 3.2에서 1:5의 경사부를 지난 약 15 m 길이의 수평부에 해당한다. 경사부와 연결된 하부 수평부에는 콘크리트 플러그를 설치하고 주변을 포화시킴으로써 주변 손상대를 통한 압축공기의 누출을 방지하기 위한 구조로 설계되었다. 압축공기는 저장 공동 굴착 후 6 개월 간 침수 및 포화 과정을 두고 저장하였다.

저장 공동 내벽은 슛크리트를 타설하지 않고 길이 2 m의 록볼트를 약 2 m 간격으로 설치하였다. 따라서, 저장 공동 내 암반은 완전한 무복공 상태로 압축공기와 직접 접촉하게 된다 (그림 3.3). 또한, 플러그 외벽(기설갱도 측면)에는 수압이 일정하게 작용하고 내벽(저장공동 측면)에는 저장 압축공기 압력이 작용하게 된다. 외벽과 내벽에 작용하는 압력차가 플러그에 작용하게 되며 플러그는 압력차가 10 kgf/cm²을 넘지 않도록 설계, 시공되었다 (그림 3.4).



(a) 평면도



(b) 단면도

그림 3.2 압축공기 저장공동 설계사양(電力中央研究所, 2003)



그림 3.3 압축공기 저장공동 내부(電力中央研究所, 2003)



그림 3.4 압축공기 저장공동 플러그 철근배열(電力中央研究所, 2003)

3.2 실증실험 결과

그림 3.5은 3회의 한계압 시험결과를 나타낸 것으로 저장 공동 내 압력을 증가시키면서 누출공기량을 관측하였다. 초기 지하수압에 해당하는 압력 이하에서는 암반의 수봉기능으로 인해 압축공기 누출이 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한, 공기누출시험(1)에 의해 일단 공기 누출이 발생하여 주변 암반이 불포화 상태에서 실시한 공기누출시험(2)에서도 동일한 한계압에서 누출이 발생하기 시작하는 결과를 볼 수 있다. 따라서, 주변 암반의 포화도 혹은 누출 이력과는 무관하게 한계압은 초기 지하수압에 의해 결정됨을 알 수 있다.

그림 3.6은 승압 및 강압시의 압축공기 압력과 누출공기량의 관계를 나타낸 것이다. 승압 시와 강압시에 누출공기량 변화 곡선은 일치하지 않고 상이한 비가역적 거동을 보임을 알 수 있다. 동일한 공기 압력에서 강압시의 누기량이 승압시보다 클 뿐만 아니라 강압시에는

승압시의 한계압에서도 여전히 공기 누출이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 비가역성은 공기의 투과 경로가 되는 공극의 불포화 특성이 반영된 것으로 공극 내 공기가 침투하여 suction pressure가 커지면 지하수의 유동이 상대적으로 어렵게 되어 지하수는 공극으로부터 배수되기는 쉬우나 다시 포화되기는 어려운 상태가 된다고 할 수 있다. 그러나, 한계압 실험결과로부터 일단 한계압보다 충분히 낮은 압력으로 회복 후 다시 승압할 경우 동일한 한계압치에서 누출이 발생하기 시작하므로 암반의 수봉기능은 회복됨을 알 수 있다.

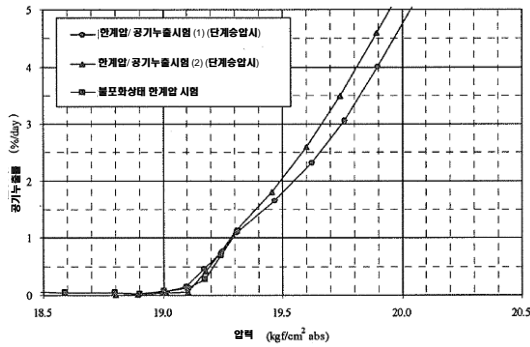


그림 3.5 한계압 실험결과

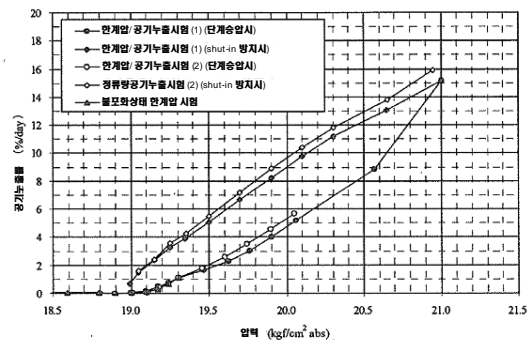


그림 3.6 공기누출 실험결과

3.3 삼폐인 현상

저장 공동 내에서는 압축공기와 지하수가 고압하에서 장시간 접촉하기 때문에 저장 압축 공기의 일부는 물에 용해되어 용존 상태로 존재하게 된다. 용해된 공기를 포함한 지하수가 공기 주입압에 의해 water shaft로 떠올라 상승할 경우 지하수압 감소로 인해 공기 상태로 방출되게 된다. 이를 CAES에서의 삼폐인 현상이라고 한다 (그림 3.7). 삼폐인 현상이 발생할 경우 water shaft 내 물의 평균밀도가 감소하게 되어 저장 공동 내의 수위가 저하하게 된다. 수위 저하가 U-bend의 하부까지 도달하게 되면 저장 압축공기가 상부 저류지를 통해 폭발적으로 배출되는 flow out 현상이 발생된다. 무복공식 CAES에서는 이러한 flow out 현상이 발생하지 않도록 삼폐인 현상을 예측하고 시스템 설계 및 운전방법을 확립하는 것이 필요하다.

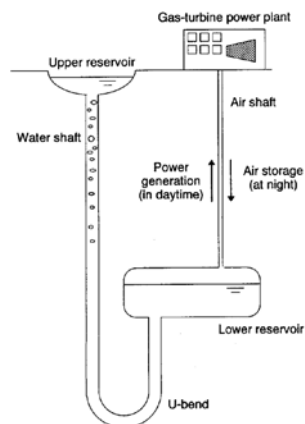


그림 3.7 CAES 시스템에서의 삼폐인 현상(大川富雄외, 1998)

4. 복공식 압축공기 지하저장 실증사례

4.1 개요

일본에서는 미국, 독일 등 암염공동을 이용한 사례와는 달리 복공식 압축공기 지하저장 터널을 포함한 CAES-G/T 발전시스템의 실용성과 안전성 확인을 그 목적으로 하였기 때문에 건설에 소요되는 시간 및 비용을 절약하기 위해 기존 광산 및 기존 공동의 이용을 중심으로 대상지를 검토하여 전력계통이 근접하고 광산설비의 유지가 양호한 일본 최북단 홋카이도의 탄광을 활용하여 파일럿 플랜트(pilot plant) 실증실험을 실시하였다(横山英和 외, 2002; 合田佳弘, 2002; 篠原俊彦 외, 2001). 대상 광산구조, CAES-G/T 파일럿 플랜트의 개념도 및 상세사양은 그림 4.1 및 표 4.1과 같다.

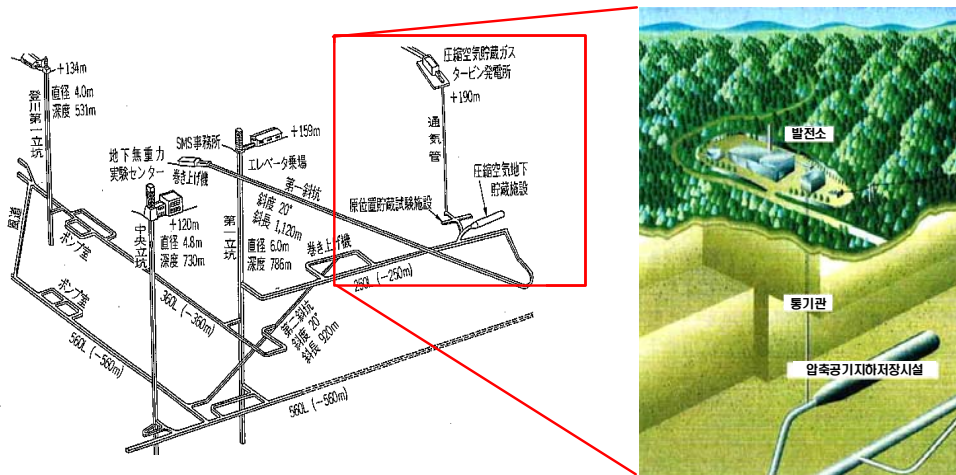


그림 4.1 대상 광산갱도 구조 및 CAES-G/T 발전시설 개념도(合田佳弘, 2002)

표 4.1 CAES-G/T pilot plant 상세 사양

출력:	2000 kW
발전시간:	4 시간
압축공기 충전시간:	10 시간
압축공기저장방식:	변압방식
내압방식:	100% 암반부담 16분할 복공관(두께 30 cm) + 뒷채움 콘크리트
기밀방식:	고무 라이닝 방식(두께 3 mm)
압축공기저장압력:	4~8 MPa(운용압력)
압축공기저장온도:	50 ℃이하
저장용량:	약1,600 m ³
지하저장조 내경:	직경 6 m
길이:	57 m

4.2 암반 및 지질조건

대상부지는 홋카이도의 중앙 제3기 습곡대에 속하며 지질구조는 일반적으로 남북방향의 주향을 가지고 서쪽으로 70도 급경사진 층구조를 보인다. 많은 탄층을 포함하고 있으나 저

장시설은 사암을 소량 협재한 사질이암층에 건설되었다. 층리면에 평행한 불연속면이 다수 관측되었으나 응력이완이 발생되지 않은 지역의 불연속면들은 밀착된 상태이다.

초기응력상태는 상부 토피압과 유사한 등방성의 응력장을 보였다. 일축압축강도는 20 MPa 정도로 건설지점의 심도가 450 m 임을 감안할 때 암반강도비(일축압축강도와 상부지표고하중비)가 약 2 정도로 공동굴착에 따른 이완대 발생이 우려되었다. 또한, 대상지역 암석은 코어채취 후 혹은 굴착 후 건조한 공기에 접할 경우 표면에 미세균열이 발생하는 노화현상을 보이고 건조 후 물과 접촉할 경우 slaking이 발생하고 흡수·팽창하는 성질을 보였다(표 4.2 및 표 4.3).

표 4.2 대상지역 암반의 기본물성치

단위체적중량(kN/m ³)	24.5
자연함수비(%)	3.5~4.0
일축압축강도(MPa)	20
암반전단강도(MPa)	$2.3 + \sigma \tan(40^\circ)$
암반탄성계수(GPa)	13.0
암반변형계수(GPa)	8.1

표 4.3 대상지역 초기지압측정결과

최대주응력	$\sigma_1 = 12MPa(N154^\circ E2^\circ N)$
중간주응력	$\sigma_2 = 11MPa(N110^\circ W69^\circ E)$
최소주응력	$\sigma_3 = 9MPa(N62^\circ E20^\circ W)$

4.3 복공시스템

압축공기 지하저장 시설의 복공시스템에서 요구되는 성능은 크게 저장압력에 대한 내압성과 저장압축공기의 누출을 방지하기 위한 기밀성으로 대표된다. 복공시스템으로는 내압성과 기밀성 확보를 위해 분할된 복공관을 설치하고 복공관 안쪽면에 기밀고무시트를 부착한 기밀라이닝구조를 채택하였다(그림 4.2).

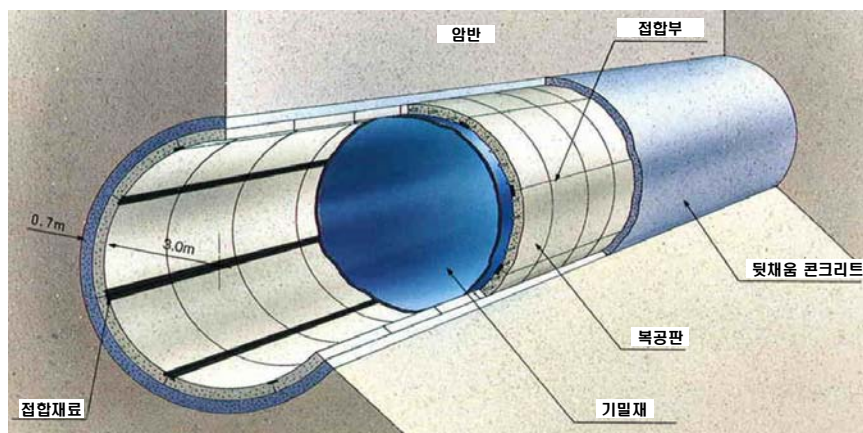


그림 4.2 복공식 압축공기 지하저장 터널 구성요소

파일럿 플랜트(pilot plant) 실증실험시의 지하저장 터널 설계에 있어서는 대상지역의 암반조건을 고려하여 복공판의 분할수, 두께, 필요 철근량 등을 결정하고 안쪽면에 부착하는 기밀용 시트의 구조 및 연결 구조, 형상, 규격 등을 결정하였다. 복공판의 분할수는 16, 두께 30 cm, 뒷채움 콘크리트의 두께는 30 cm로 하였으며 신선암과 파쇄대용으로 철근량이 상이한 두가지 타입의 복공판을 설계하였다. 고무 기밀시트의 접합은 열경화(heat vulcanized)접합을 사용하고 접합방향을 터널원주 방향이 아닌 터널축 방향으로 실시함으로써 현장에서의 접합 총연장을 대폭 감소시켜 누출 가능성을 저감하였다. 지하저장시설의 상세설계 사양은 그림 4.3과 같다.

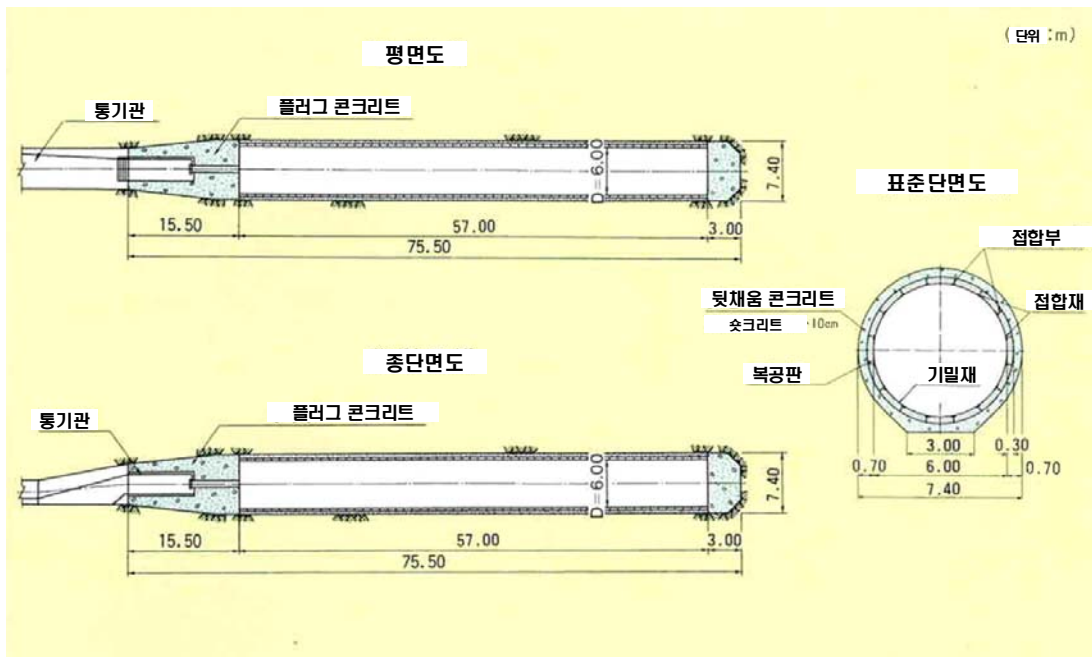


그림 4.3 복공식 압축공기 지하저장 터널 설계 단면도

지하저장 터널의 굴착은 손상영역을 저감시킬 목적으로 로드헤더를 이용한 기계굴착에 의한 NATM공법으로 시공하였다. 굴착 단면형상은 원형으로 하였으나 시공기계가 이동 가능하도록 인버터는 폭 3 m로 평탄하게 하였다. 록볼트는 인버터를 포함한 터널주위에 균등하게 배치하고 록볼트 타설후 신속히 숏크리트를 시공하였다. 인버터에는 FRP볼트를 사용하여 하반 굴착시에 선행타설하고 인버터의 손상방지에 주력하였다(그림 4.4). 또한, 인버터는 선행 타설한 FRP볼트를 절단하면서 굴착하고 시공기계가 인버터 완성면을 통행하도록 하여 암반 및 숏크리트면의 손상이 없도록 하였고 복공판 세그먼트는 일반 실드(shield) 터널용 장비를 사용하였다. 고무 기밀시트의 접합은 열경화(heat vulcanized)접합을 사용하고 접합 방향을 터널원주 방향이 아닌 터널축 방향으로 실시함으로써 현장에서의 접합 총연장을 대폭 감소시켜 누출 가능성을 저감하였다(그림 4.5).

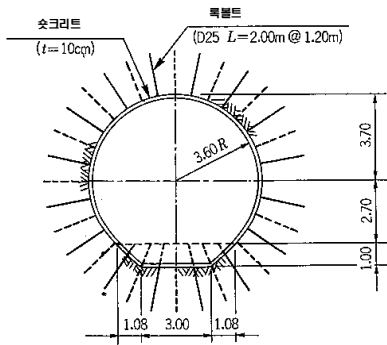


그림 4.4 저장공동 설계 단면(篠原俊彦외, 2001)



그림 4.5 복공판 설치 후 기밀시트 시공 모습(合田佳弘, 2002)

4.4 실험결과

실증실험은 기밀실험으로서 초기재하 및 단계별 재하를 실시하여 내압성 및 기밀성을 확인한 후 30 일간 및 90 일간 동안 반복재하시험을 실시하였다. 마지막으로 기밀성능을 확인하기 위하여 8 MPa의 압축공기를 저장하고 5일간 유지하면서 압력, 온도, 체적변화 등을 확인하는 shut-in시험을 실시하였다.

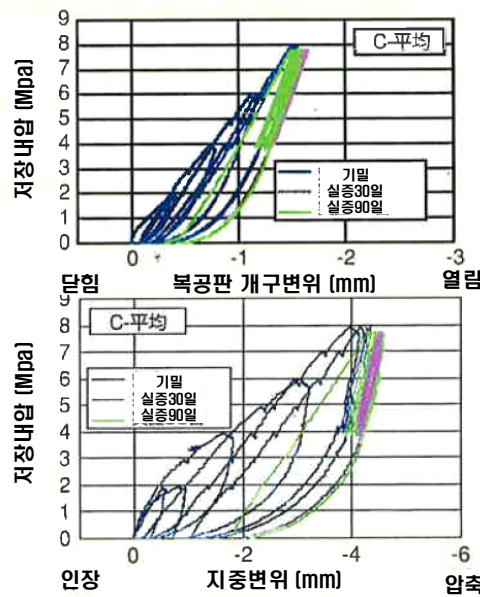


그림 4.6 pilot plant 실증시험시의 복공판 세그먼트 개구변위 및 지중변위의 이력 결과(合田佳弘, 2002)

그림 4.6는 재하시험 시 복공판 세그먼트의 개구변위 및 암반의 지중변위를 나타낸 것으로 전반적으로 탄성 거동을 보이고 저장압축공기의 내압에 기인한 손상영역의 진전이나 주변 암반의 인장파괴는 발생하지 않은 것으로 평가되었다. 또한, 압축공기 누출량은 공기중량으로 0.2%/day (발전운전시간 환산시 약 40초 정도에 해당)로 극히 소량이었으며 전체 발전량은 781 MW를 기록하였다.

5. 결론

본고에서는 압축공기 지하암반 저장에 최적인 암염층이 아닌 다수의 균열을 포함한 경암 암반에서도 복공식 및 무복공식 압축공기 지하 암반 저장이 기술적으로 가능함을 일본의 실증사례를 통해 확인하였다.

복공식 저장의 경우, 고압의 저장압력에 유연하게 대응 가능한 분할 기밀 라이닝 시스템이 핵심기술로 라이닝을 분할 구조로 설계함으로써 라이닝에 발생하는 인장응력을 최대한 억제하고 저장압에 의한 하중을 최대한 암반이 부담토록 하는 특징을 보였다.

무복공식 지하 암반공동 저장의 경우, 기존의 에너지 지하 암반 저장 기술 사례를 고려할 때 국내에서도 충분히 실현 가능할 것으로 판단되나, 용존 압축공기가 급격하게 분출되는 삼폐인 현상의 정확한 예측 및 방지를 위한 적절한 관로 및 CAES 운영방법의 설계가 중요할 것으로 판단된다.

압축공기 지하저장(CAES)의 경우 대규모 전력저장 방식의 하나인 양수발전과 비교하여 도심근교 및 도서지방에서의 건설이 가능하고 소규모 분산형 전력원으로써의 이용이 가능할 것으로 기대된다. 이는 화력발전의 에너지효율향상과 이산화탄소로 대표되는 온실가스 저감 효과를 가져와 저탄소 녹색성장이라는 최근의 추세에 대응 가능한 기술로도 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해서는 국내환경을 반영한 구체적이고 정확한 CAES의 경제성 분석이 선행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '지하 복공식 에너지저장시스템 개발'의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김택곤, 김지연, 이진무, 2008, 압축공기에너지 저장(CAES)의 현황과 전망, 한국암반공학회 춘계학술발표회논문집, pp.123-131.
2. 한국자원연구소, 1995, 압축공기 저장의 기술적 현황과 과제, 117p.
3. 電力中央研究所, 2003, 水封式圧縮空気貯蔵の実証-横坑での機密試験-, 報告書 U02050
4. 大川富雄, 田中伸和, 山本亮介, 松井剛一, 文字秀明, 1998, CAESシャンペン現象の数値解析, 日本機械学会論文集(B編), 64(628), pp.3964-3969.
5. 合田佳弘, 2002, 地下深部岩盤内における新しい高圧圧縮空気貯蔵技術の開発, 土木学会誌, Vol. 87, pp.39-41.
6. 横山英和, 篠原俊彦, 加藤拓一郎, 2002, 圧縮空気貯蔵発電パイロットプラントの実証試験, 電力土木, pp.150-154.
7. 篠原俊彦, 合田佳弘, 川上博史, 福田和寛, 2001, 地下450mの岩盤中に高圧圧縮空気を貯蔵, トンネルと地下, pp.495-503.