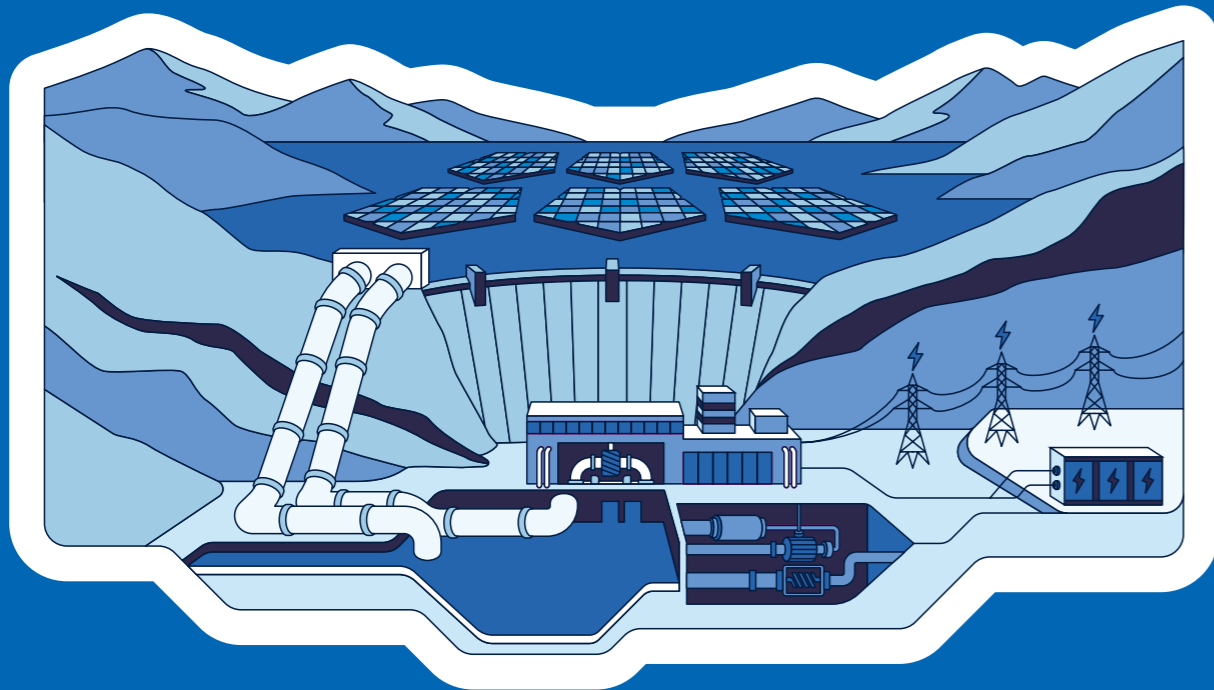


# PART 1

## 특집기사

에너지 전환 시대 댐의 새로운 가치:  
양수발전과 수상태양광



1. 에너지 전환 시대 양수발전댐의 가치와 미래전략 -수로터널 및 지하공간 기술을 중심으로-	8
조계춘 교수 (KAIST   前 터널지하공간학회장)	
2. 탄소중립 시대의 전력계통 유연성 확보와 기존 댐 활용 양수발전의 역할	22
가필순 부장 (한국수자원공사 신사업부)	
3. 에너지 대전환 시대의 중심 양수발전소 -친환경 댐건설로 완성하다-	34
김광섭 실장 (한국수력원자력 양수건설처)	

# 에너지 전환 시대 양수발전의 가치와 미래전략

## -수로터널 및 지하공간 기술을 중심으로-

Strategic Value and Future Directions of Pumped Storage Hydropower in the Energy Transition Era - A Perspective on Water Conveyance Tunnels and Underground Space Technology -



**조계춘 카이스트 교수**  
前 (사)한국터널지하공간학회 회장  
한국과학기술원(KAIST) 정회원  
gyechun@kaist.edu

### 요약 (Abstract)

탄소중립과 재생에너지 확대 가속화, 최근의 AI산업과 대규모 데이터 센터의 확산으로 전력계통의 안정성과 유연성 확보가 중요한 과제로 부상하고 있다. 양수발전은 대규모 전력저장 수단으로서 변동성이 큰 태양광·풍력 발전을 보완하며 계통 안정화에 핵심적인 역할을 수행한다. 특히 양수발전은 단순한 발전시설을 넘어 에너지 안보와 전력시장 효율성을 뒷받침하는 국가 핵심 인프라로 재조명되고 있다. 이러한 시설의 경제성과 안전성은 수로터널, 지하발전소, 지하공동 등 지하공간 기술의 수준에 크게 좌우된다. 본 기고에서는 에너지 전환 시대 양수발전의 전략적 가치를 살펴보고, 수로터널 및 지하공간 기술 관점에서 향후 기술개발 방향과 정책적 지원 과제를 제시하고자 한다.

**키워드:** 양수발전, 에너지 전환, 수로터널, 지하공간 기술

**Keywords:** Pumped Storage Hydropower, Energy Transition, Water Conveyance Tunnels, Underground Space Technology

## 1. 서론

전 세계적으로 탄소중립과 에너지 전환이 가속화되고, 최근 AI 산업과 대규모 데이터 센터의 확산으로 전력시스템의 구조적 변화가 빠르게 진행되고 있다. 화석연료 기반의 중앙집중형 발전체계에서 태양광과 풍력 중심의 재생에너지 체계로 전환됨에 따라 전력망 안정성 확보가 국가적 핵심 과제로 부상하고 있다.

재생에너지는 친환경성과 지속가능성 측면에서 중요한 장점을 가지지만, 기상조건에 따라 출력 변동성이 크고 발전량 예측에도 한계가 있다는 구조적 문제를 가진다. 따라서 재생에너지 비중이 증가할수록 계통 유연성 확보와 대규모 에너지 저장기술의 중요성이 커지고 있다.

최근 배터리 기반 ESS(Energy Storage System)가 빠르게 보급되고 있으나, 장주기(long-duration) 저장과 대규모 계통 안정화 측면에서는 여전히 한계가 존재한다. 이에 따라 세계 각국은 이미 기술적 안정성과 경제성이 검증된 양수발전(pumped storage hydropower)에 다시 주목하고 있다.

양수발전은 단순한 수력발전 설비가 아니라 국가 전력망 안정성을 지탱하는 장주기 에너지 저장 인프라이다. 특히 대규모 수로터널, 압력수로, 지하발전소 공동(cavern) 등으로 구성되는 대표적 지하공간 인프라 시스템이기도 하다. 즉, 양수발전의 핵심 경쟁력은 발전기 자체보다 터널·지하공간 기술에 의해 좌우된다고 볼 수 있다.

전통적으로 댐은 홍수조절, 용수공급, 수력발전 등 수자원 관리의 핵심 인프라로 기능해 왔다. 그러나 에너지 전환이 가속화되는 오늘날에는 재생에너지의 변동성을 흡수하고 전력계통의 안정성을 확보하는 에너지 저장 플랫폼으로서 새로운 가치가 부각되고 있다. 특히 양수발전은 기존 댐 인프라를 활용하여 대규모 에너지를 저장·공급할 수 있다는 점에서, 댐의 기능을 수자원 관리에서 에너지 안보와 탄소중립 지원까지 확장시키는 대표적인 사례라 할 수 있다.

최근 지하공간은 단순 보조공간이 아니라 미래 국토가치 혁신의 핵심 수단으로 인식되고 있다. 지하공간은 토지이용 효율성 향상, 도시경관 보존, 기후영향 저감, 방재 및 에너지 안보 확보 측면에서 중요한 전략적 가치를 가진다. 특히 국토의 약 70%가 산지인 우리나라의 지형적 특성은 양수발전과 같은 대심도 지하공간 활용에 유리한 조건을 제공한다.

우리나라는 세계적 수준의 터널 및 지하공간 건설 경험을 보유하고 있으며, 장대터널·대심도 구조물·스마트 건설기술 분야에서도 경쟁력을 확보하고 있다. 따라서 에너지 전환

시대에 양수발전은 단순 발전 인프라를 넘어 국가 지하공간 기술 역량을 집약하는 미래 전략사업으로 재조명될 필요가 있다.

본 고에서는 에너지 전환 시대 양수발전의 전략적 가치와 함께 수로터널 및 지하공간 기술 관점에서 국내 양수발전의 기술적 과제와 정책적 방향을 고찰하고자 한다.

[표 1] 배터리 기반 ESS와 양수발전의 비교

항 목	배터리 기반 ESS	양수발전
저장 용량	수~수천 MWh	수 GWh
저장 기간	단주기 저장(수분~수시간)	장주기 저장(~수백시간)
저장 단가	높음	낮음
초기 투자비	낮음	매우 높음
설비수명	10-20년	50~100년
계통서비스	우수	매우 우수
화재위험	존재	거의 없음
특 성	신재생 전력 단기 변동 대응	대규모 재생 발전 연계

## 2. 에너지 전환 시대 양수발전의 전략적 가치

### 2.1 재생에너지 확대와 장주기 ESS의 필요성

태양광과 풍력 중심의 재생에너지 발전은 출력 변동성과 간헐성이 크다는 구조적 특성을 가진다. 태양광은 야간 발전이 불가능하며 기상변화에 민감하고, 풍력 또한 풍속 변화에 따라 출력 변동이 크다.

재생에너지 비중이 증가할수록 전력계통은 실시간 수급균형 유지가 어려워지며, 주파수 안정성과 예비력 확보 문제가 더욱 중요해진다. 최근 제주지역을 중심으로 출력제한(curtailment) 문제가 증가하는 것도 이러한 구조적 한계를 보여주는 사례라 할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 잉여전력을 효율적으로 저장하고 필요시 안정적으로 공급할 수 있는 장주기 에너지 저장시스템이 필수적이다.

실제로 제주지역에서는 재생에너지 발전 비중 증가에 따라 출력제한이 지속적으로 증가하고 있다. 한국전력거래소 자료에 따르면 제주지역 재생에너지 출력제한은 2020년 77회에서 2023년 180회 이상으로 증가하였으며, 향후 해상풍력 보급 확대에 따라 이러한

현상은 더욱 증가할 것으로 전망된다. 이는 재생에너지 확대와 함께 대규모 에너지저장 수단 확보가 필수적임을 보여준다.

최근 배터리 ESS가 빠르게 확대되고 있으나, 일반적으로 수 시간 이하의 단주기 저장에 적합하다. 반면 양수발전은 수십 시간 이상의 장주기 저장과 수 GW급 대용량 저장이 가능하다는 장점을 가진다. 즉, 향후 전력망은 “Battery + Pumped Storage”의 상호보완 구조로 발전할 가능성이 크다. 배터리는 단주기·분산형 저장을 담당하고, 양수발전은 장주기·대용량 계통 안정화를 담당하는 구조이다.

국제에너지기구(IEA)는 2050년 탄소중립 시나리오에서 전 세계 전력저장 설비가 현재 대비 수 배 이상 확대되어야 하며, 특히 장주기 저장 분야에서는 양수발전이 여전히 가장 큰 비중을 차지할 것으로 전망하고 있다. 현재 전 세계 에너지저장 설비용량의 약 90% 이상은 양수발전이 차지하고 있으며, 이는 양수발전이 검증된 대규모 저장기술임을 보여준다.

### 2.2 양수발전의 역할과 기능

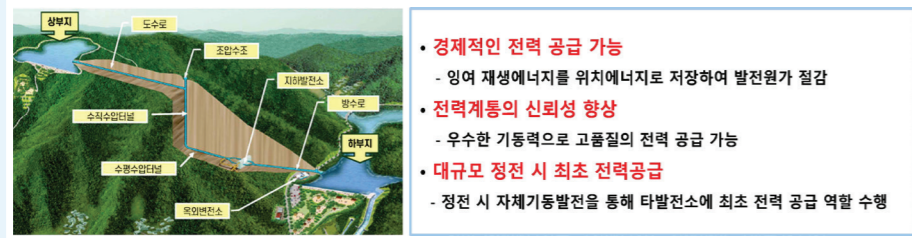
양수발전은 전력수요가 낮을 때 잉여전력을 활용하여 물을 상부저수지로 양수하고, 전력수요가 증가할 때 하부저수지로 방류하며 발전하는 방식이다.

양수발전은 단순 저장기능 외에도 다음과 같은 다양한 계통 서비스를 제공할 수 있다.

- 부하평준화(load leveling)
- 피크저감(peak shaving)
- 주파수 조정(frequency regulation)
- 블랙스타트(black start)
- 예비력 공급(spinning reserve)
- 재생에너지 출력 변동 대응

특히 양수발전은 우수한 기동 특성을 바탕으로 계통 안정성과 전력품질 향상에 중요한 역할을 수행할 수 있다.

최근 신규 양수발전은 가변속(variable speed) 시스템 적용이 확대되고 있다. 가변속 양수발전은 재생에너지 출력 변동에 보다 유연하게 대응할 수 있으며, 부분부하 운전 효율과 계통 주파수 조정 성능을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.



[그림 1] 양수발전의 역할

### 2.3 국내외 양수발전 현황과 시사점

최근 국내에서는 영동, 홍천, 포천, 합천, 영양 등 신규 양수발전 사업이 추진되고 있으며, 대부분 가변속 시스템 적용이 계획되고 있다. 향후 재생에너지 확대를 고려할 때 국내 양수발전의 전략적 중요성은 더욱 증가할 것으로 전망된다.

현재 세계 주요국들은 재생에너지 확대와 함께 양수발전 설비를 지속적으로 확대하고 있다. 중국은 세계 최대 규모의 양수발전 설비를 운영 중이며, 일본 역시 높은 양수발전 비중을 유지하고 있다. 반면 우리나라는 현재 약 4.7 GW 규모의 양수발전 설비를 운영하고 있으며, 피크수요 대비 비중은 약 4.5 % 수준으로 평가된다. 이는 일본(17.4 %) 등에 비해 상대적으로 낮은 수준이다.

제11차 전력수급기본계획에서는 재생에너지 확대에 대응하기 위한 계통 유연성 자원 확보의 중요성이 강조되고 있으며, 이에 따라 신규 양수발전소 건설이 추진되고 있다. 현재 건설 또는 계획 중인 영동, 홍천, 포천, 합천, 영양 양수발전 사업이 모두 완료될 경우 국내 양수발전 설비용량은 약 8 GW 수준까지 확대될 것으로 전망된다.

국내 양수발전소 운영 현황							
※총 16기 4,700MW							
구 분	청평양수	삼강진양수	무주양수	산정양수	양양양수	청송양수	예천양수
설비용량(MW)	400(2기)	600(2기)	600(2기)	700(2기)	1,000(4기)	600(2기)	800(2기)
댐(상부)	높이	62	88	60.7	86.9	72	89.8
	길이	290	269	287	360	347	400
총 저수량(백만톤)	2.7	6.5 / 10.1	3.7 / 6.7	6.4 / 7.4	4.9 / 9.2	7.1 / 10.2	6.9 / 8.9
시설년도	1980	1985	1995	2001	2006	2006	2011

국내 신규 양수발전소 건설 계획					
영동 양수발전소	홍천 양수발전소	포천 양수발전소	합천 양수발전소	영양 양수발전소	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설용량: 600MW(300MWx2기)</li> <li>• 발전형식: 가변속식</li> <li>• 준공예정시기: 30년 12월</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설용량: 500MW(250MWx2기)</li> <li>• 발전형식: 가변속식</li> <li>• 준공예정시기: 32년 12월</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설용량: 700MW(350MWx2기)</li> <li>• 발전형식: 가변속식</li> <li>• 준공예정시기: 33년 12월</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설용량: 900MW(225MWx4기)</li> <li>• 발전형식: 가변속식</li> <li>• 준공예정시기: 34년 12월</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설용량: 1,000MW(250MWx4기)</li> <li>• 발전형식: 가변속식</li> <li>• 준공예정시기: 36년 06월</li> </ul>	

[그림 2] 국내 양수발전 현황 및 건설계획

[표 2] 국가별 양수발전 현황 (운영기준, 주요국) [2024년]

국 가	양수발전 설비용량 [GW]	양수발전소 (sites)	전력소비 [TWh]	최근 피크수요 [GW]	피크 대비 양수발전 비중 [%]
중국	58.7	> 30	9,850	1,465	4.0
일본	27.5	~ 40	805.9	157.6	17.4
미국	23.2	41	4,086	745	3.1
독일	6.3	26	518	73.7	8.5
프랑스	5.1	6	449.2	83.5	6.0
대한민국	4.7	7sites/16units	549.8	105.1	4.5

\*출처: IHA (2024), IEA (2023)

## 3. 양수발전의 핵심: 수로터널과 지하공간 기술

### 3.1 대표적 지하공간 시스템

양수발전은 상부댐과 하부댐, 압력수로터널, 수압철관, 지하발전소 대단면 공동(cavern), 방수로 등으로 구성되는 복합 인프라 시스템이다. 특히 주요 구조물의 상당 부분이 지하에 위치하며, 최근에는 환경 훼손 최소화와 경관 보존을 위해 지하화 비중이 더욱 증가하는 추세이다. 결국 양수발전의 경제성과 안전성은 발전설비뿐 아니라 암반조건과 지하공간 설계·시공 기술에 크게 좌우된다.



[그림 3] 양수발전소 단면 및 지하발전소 공동 개념도 (AI 생성)

### 3.2 압력수로터널 설계의 중요성

압력수로터널은 상부저수지에서 하부발전소 방향으로 물을 보내는 도수계통 중 높은 수두차에 의해 압력수가 흐르는 핵심 구간이다. 일반 도로터널이나 철도터널과 달리 반복 내수압과 수격작용(water hammer)을 지속적으로 받는 특수 구조물이기 때문에 보다 정밀한 설계가 요구된다.

현재 국내 양수발전 압력수로터널 라이닝 설계는 기존 설계사례와 해외기준을 참고한 경험적 방법에 의존하는 측면이 있다. 그러나 향후에는 다양한 수리조건과 하중조합을 반영한 구조해석 기반 설계체계가 필요하다. 특히 다음과 같은 기술요소가 중요하다.

- 고수압 조건 안정성 확보
- 콘크리트 라이닝 최적설계
- 수격작용 대응
- 균열 및 누수 제어
- 압밀그라우팅 최적화
- 장기 내구성 확보

또한 최근에는 압력수로의 수리학적 손실을 최소화하기 위한 유선형 단면 및 사이클로이드 기반 수로 형상 연구가 진행되고 있으며, 향후 양수발전의 효율 향상에 기여할 것으로 기대된다.



[그림 4] 압력수로터널 라이닝 구조 및 작용하중 개념도 (AI 생성)

### 3.3 지하발전소 공동(cavern)과 내진설계

양수발전의 지하발전소는 대단면 공동 구조물로서 고도의 지하공간 기술이 요구된다. 특히 국내와 같이 복잡한 지질환경에서는 암반 불연속면, 초기응력, 단층대 등을 종합적으로 고려한 안정성 평가가 중요하다.

최근 국내에서도 양수발전 지하구조물의 내진설계 중요성이 증가하고 있으나, 수로터널 및 지하발전소에 대한 독립적인 내진등급 및 설계기준은 아직 미흡한 실정이다. 향후에는 지반의 동적물성과 구조물-암반 상호작용을 고려한 시간이력해석 기반 설계체계 정립이 필요하다.

### 3.4 TBM과 스마트 지하공간 기술

최근 세계 장대터널은 NATM 중심 시공에서 TBM(Tunnel Boring Machine) 기반 기계화 시공으로 빠르게 전환되고 있다. 해외 주요 양수발전 프로젝트에서도 도수터널 및 수압터널에 TBM 적용이 확대되고 있으며, 공기 단축과 품질 향상 측면에서 효과를 보이고 있다.

국내 역시 장대 수로터널 증가에 대비하여 TBM 적용 확대와 단면 표준화, 전문인력 양성 등이 필요하다. 또한 BIM(Building Information Modeling) 기반 설계, 디지털트윈, 실시간 계측 및 AI 기반 안전관리 기술 등을 활용한 스마트 건설체계 구축도 중요하다.

## 4. 국내 양수발전의 기술적·사회적 과제

### 4.1 양수발전 설계기준의 체계화 필요성

국내 양수발전소는 대부분 장기간 축적된 경험적 설계기법을 기반으로 계획 및 시공되어 왔다. 그러나 최근 신규 양수발전 사업 확대와 함께 대심도·대단면 지하공간 및 고수압 수로터널 적용이 증가하면서 보다 체계적이고 정량적인 설계기준 정립의 필요성이 커지고 있다.

특히 압력수로터널 콘크리트 라이닝 설계는 기존 양수발전소 설계사례와 해외 기준 등을 참고한 경험적 접근이 주를 이루고 있으며, 다양한 수리조건과 반복 내수압 조건을 충분히 반영한 합리적 구조설계 체계는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 최신 국내 설계기준

(KDS)과 수치해석 기반 거동평가를 반영한 새로운 라이닝 설계체계 정립이 필요하다.

향후에는 단순 응력 검토 수준을 넘어 하중조합 기반 부재력 평가, 라이닝 두께 및 철근 배근 최적화, 압밀그라우팅 최소화 및 최적화 기술 등을 포함한 설계기준 고도화가 이루어져야 한다. 또한 압력수로터널의 다양한 수리조건과 수격작용에 대한 정밀 해석 기반 설계체계 구축도 중요하다.

양수발전소 지하공간의 내진설계 또한 중요한 과제로 부상하고 있다. 현재 국내 기준에서는 수로터널 및 지하발전소 구조물에 대한 내진등급과 지진하중 적용 기준이 명확히 정립되어 있지 않다. 특히 지하구조물은 주변 암반과의 상호작용 특성이 크기 때문에 지반의 동적물성, 단층 및 불연속면, 간극수압, 구조물 접속부 거동 등을 종합적으로 고려한 동적해석 체계가 요구된다.

따라서 향후에는 양수발전소 주요 구조물에 대해 구조형식별 내진등급을 명확히 설정하고, 응답변위법과 시간이력해석법 등을 포함하는 지하구조물 특화 내진설계 기준이 마련될 필요가 있다.

또한 양수발전소는 터널 종류와 기능이 매우 다양하다. 지하발전소 공동, 수압터널, 흡출터널, 모선티널, 접근터널 등은 각각 상이한 하중조건과 지반조건을 가지므로, 터널 종류별 표준지보패턴과 취약구간 보강기준을 체계적으로 제시할 필요가 있다.



[그림 5] 양수발전소에 특화된 설계기준(라이닝, 내진설계 및 지보패턴) 정립 필요

## 4.2 대심도 지하공간 시공 리스크와 안전관리

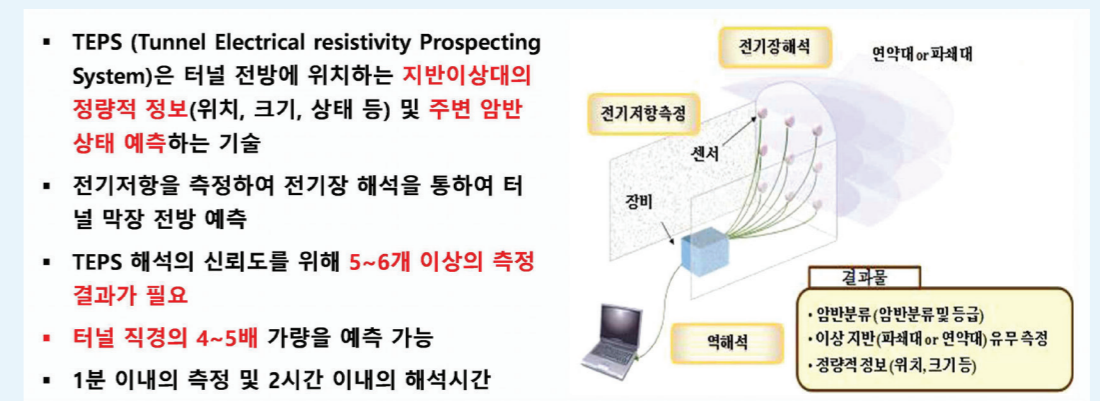
양수발전소는 대부분 산악지형의 대심도 암반 내에 건설되므로 시공 중 다양한 지반

리스크가 발생할 수 있다. 특히 단층파쇄대, 고지압 조건, 고압지하수, 암반 불연속면 등은 대형 붕락사고와 장기 공기지연의 원인이 될 수 있다.

실제 국내 일부 양수발전소 건설 과정에서도 진입터널 붕락과 같은 사례가 발생하였으며, 이는 지반조사와 시공 중 위험예측의 중요성을 보여준다. 향후에는 설계단계부터 전구간 리스크 도출 및 평가 체계를 강화하고, 시공단계에서 실시간 지반정보를 반영하는 스마트 시공체계 구축이 필요하다. 예를 들어, 터널분야 전문학회 및 전문가 그룹과의 협업을 활용하여 전구간 리스크 도출 및 평가, 설계도서 적정성 검토, 현장 고민사항 기술지원, 설계와 다른 암반조건별 처리 방안 등 터널 시공중 필요 사항에 대한 현장 기술 자문을 통해 시공 과정에서 발생 가능한 리스크를 효과적으로 저감할 수 있다.

특히 최근에는 터널 전방 예측 기술(TEPS: Tunnel Electrical resistivity Prospecting System)을 활용하여 막장 전방의 이상대 위치와 규모를 정량적으로 예측하는 기술이 발전하고 있다. 이러한 기술은 NATM뿐 아니라 TBM 굴착에도 적용 가능하며, 향후 양수발전 장대터널의 안전성 향상에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

또한 터널 및 지하공간 건설의 장대화 추세에 따라 TBM 적용 확대도 중요한 과제가 되고 있다. 해외 주요 양수발전 프로젝트에서는 이미 도수터널과 수압터널에 TBM 적용이 확대되고 있으며, 국내 역시 시공성·경제성·공기 단축 효과를 고려한 적극적인 적용 검토가 필요하다. 특히 국내는 아직 NATM 중심 시공 비중이 높으나, 향후 장대수로터널 증가에 대비하여 TBM 단면 표준화, 장비 국산화, 전문인력 양성 등 중장기 기술전략 수립이 요구된다.



[그림 6] 시공 중 터널 전방 예측 시스템 - TEPS

### 4.3 스마트 건설과 디지털 기반 유지관리

최근 양수발전소 건설 및 유지관리 분야에서는 디지털 기반 스마트 건설기술의 중요성이 크게 증가하고 있다. BIM 기반 3차원 설계, 공통데이터 환경(Common Data Environment), 디지털 엔지니어링 체계 구축 등을 통해 설계·시공·유지관리 전 주기의 통합 관리가 가능해지고 있다. 특히 대심도 지하공간은 완공 이후 접근성과 유지관리 효율성이 제한되기 때문에, 초기 설계단계부터 디지털 기반 유지관리 체계를 고려할 필요가 있다.

또한 실시간 계측 및 안전관리 시스템을 활용하여 작업자 위치 추적, 재난 대응, 사고 위험 예측 등을 수행하는 스마트 안전관리 체계도 중요하다. 향후에는 AI 기반 데이터 분석과 디지털트윈 기술을 활용한 예지보전(predictive maintenance) 체계로 발전할 가능성이 크다.

## 5. 양수발전 확대를 위한 정책적 제언

### 5.1 양수발전의 국가 전략 인프라화

에너지 전환 시대 양수발전은 단순 발전설비가 아니라 국가 전력망 안정성을 지탱하는 장주기 에너지 저장 인프라로 재정립될 필요가 있다. 현재 전력시장 구조에서는 양수발전의 계통 안정화 기여가 충분히 반영되지 못하고 있다. 그러나 재생에너지 비중 증가에 따라 양수발전은 주파수 조정, 예비력 공급, 블랙스타트, 장주기 저장 등 핵심 계통서비스를 수행하게 될 것이다. 따라서 향후에는 용량시장(capacity market) 및 계통 안정화 기여 보상체계를 개선하여 양수발전의 공공적 가치를 제도적으로 반영할 필요가 있다.

### 5.2 양수발전 지하공간 설계기준 고도화

향후 신규 양수발전 확대에 대비하여 양수발전 전용 설계기준 체계를 고도화할 필요가 있다. 특히 다음 분야의 기준 정립이 중요하다.

- 압력수로터널 라이닝 설계기준
- 대심도 지하발전소 공동(cavern) 설계기준
- 양수발전 전용 내진설계기준
- 터널별 표준지보패턴 체계
- TBM 적용 설계기준
- 스마트 유지관리 기준

기존 도로·철도터널 기준을 단순 준용하는 방식에서 벗어나, 양수발전 특성을 반영한 독립적 설계체계 구축이 필요하다.

### 5.3 스마트 건설 및 디지털 전환 확대

향후 양수발전소는 스마트 건설기술과 디지털 기반 운영체계를 적극 도입할 필요가 있다. BIM 기반 설계와 디지털트윈 기술을 활용하면 설계·시공·운영 데이터를 통합적으로 관리할 수 있으며, 장기 유지관리 효율성과 안전성을 크게 향상시킬 수 있다. 또한 AI 기반 계측데이터 분석, 실시간 위험예측, 자동화 시공관리 기술 등을 통해 양수발전소의 스마트 인프라화가 가능할 것이다.

### 5.4 친환경·저진동 시공기술 개발

향후 양수발전 건설에서는 주민수용성과 환경성을 동시에 확보할 수 있는 저영향 시공 기술 개발이 중요하다. 특히 워터젯 기반 암반굴착 기술은 발파진동 감소, 과굴착 방지, EDZ(Excavation Damaged Zone) 최소화 등의 장점을 가지고 있어 향후 도심지 및 민감구간 터널 시공에 효과적으로 활용될 수 있다. 또한 TBM 기반 기계화 시공 확대는 공기 단축과 품질 향상뿐 아니라 안전성과 친환경성 확보 측면에서도 중요한 대안이 될 수 있다.

### 5.5 산학연 협력 기반 기술개발 체계 구축

양수발전은 기계·전기 분야뿐 아니라 터널·암반·지반·수공구조물 기술이 융합되는 대표적인 종합 엔지니어링 사업이다. 따라서 성공적인 양수발전 확대를 위해서는 댐 관련 공공기관·기업, 학계, 연구기관, 시공사, 설계사 간 긴밀한 협업체계가 중요하다.

특히 관련 전문학회 및 연구기관과 같은 전문가 집단과의 지속적인 기술 협력은 설계기준 개선, 시공 안전성 확보, 스마트 유지관리 기술개발 등에 중요한 역할을 할 수 있다. 향후에는 국가 차원의 체계적 기술개발 로드맵 수립과 함께 장기적 전문인력 양성 전략도 병행될 필요가 있다.

## 6. 결론

에너지 전환 시대의 핵심 과제는 단순히 재생에너지 발전량 확대가 아니라 안정적인 전력계통 운영에 있다. 태양광과 풍력 중심의 전력체계에서는 장주기 에너지 저장과 계통 유연성 확보가 필수적이며, 이러한 측면에서 양수발전의 전략적 중요성은 더욱 커질 것으로 전망된다. 특히나 최근 AI 산업과 대규모 데이터센터의 확산으로 안정적 전력공급의 중요성이 더욱 커지고 있으며, 이러한 측면에서도 양수발전은 국가 전력시스템의 회복탄력성을 높이는 핵심 인프라로 기능할 수 있다.

양수발전은 이미 기술적 안정성과 경제성이 검증된 대표적인 대규모 에너지 저장수단이다. 또한 단순 발전설비를 넘어 국가 전력망 안정성을 지탱하는 핵심 지하공간 인프라로 이해할 필요가 있다. 특히 양수발전의 핵심은 수로터널과 지하발전소 등 지하공간 시스템에 있으며, 터널 및 지하공간 기술이 사업의 성패를 좌우한다고 볼 수 있다.

향후에는 양수발전을 국가 장주기 저장 인프라로 재정립하고, 설계기준 고도화와 스마트 건설기술 개발, 친환경 시공기술 확보 등을 병행할 필요가 있다. 또한 댐 관련 공공기관-기업, 학계, 연구기관, 전문학회 간 협업을 기반으로 체계적인 기술개발과 전문인력 양성이 추진되어야 한다.

에너지 전환 시대의 경쟁력은 결국 안정적인 에너지 저장 인프라와 이를 구현할 수 있는 지하공간 기술 역량에 의해 결정될 것이다. 특히 수로터널과 대심도 지하공간 기술은 미래 양수발전의 경제성·안전성·환경성을 좌우하는 핵심 요소이며, 양수발전은 이러한 기술을 바탕으로 댐의 기능을 수자원 관리 중심에서 국가 에너지 안보와 전력계통 안정성을 지원하는 전략 인프라로 확장시키는 핵심 수단이 될 것이다. 앞으로의 댐은 물을 저장하는 시설을 넘어 전력을 저장하고 재생에너지와 전력계통을 연결하는 에너지 저장 플랫폼으로 진화할 것이며, 이러한 변화는 에너지 전환 시대 댐의 새로운 가치를 보여주는 대표적인 사례가 될 것이다.

### 참고문헌

- International Energy Agency (IEA) (2021), Hydropower Special Market Report: Analysis and Forecast to 2030, Paris: IEA.
- International Energy Agency (IEA) (2023), Electricity Market Report 2023, Paris: IEA.
- International Hydropower Association (IHA) (2024), 2024 World Hydropower Outlook, London: IHA.
- ITA (International Tunnelling and Underground Space Association) (2019), Guidelines for Underground Works Associated with Hydropower Projects.
- U.S. Department of Energy (DOE) (2023), Pumped Storage Hydropower: Benefits for Grid Reliability and Renewable Energy Integration, Washington, D.C.
- 한국수력원자력(KHNP) (2024), 양수발전 기술현황 및 확대 추진계획, 경주: 한국수력원자력.
- 한국에너지경제연구원(KEEI) (2023), 탄소중립 시대 전력계통 안정화와 에너지저장 기술의 역할, 울산: KEEI.