

특별기고

06 에너지 전환 시대의 양수발전: 아시아의 개발 방향과 과제
우효섭·최성욱

Water
for future

에너지 전환 시대의 양수발전: 아시아의 개발 방향과 과제

- IAHR-APD 2026 고위급 패널의 주요 논의와 시사점



우효섭

IAHR-APD 2026
고위급 패널 사회자



최성욱

IAHR-APD 2026 조직위원장
연세대학교
건설환경공학과 교수

A SPECIAL
NOTE

1. 요지

양수식 수력발전(Pumped Storage Hydropower, PSH), 또는 간단히 양수발전은 변동성이 큰 태양광과 풍력 등 재생에너지의 급속한 확대에 대응할 수 있는, 현재 가장 성숙하고 널리 검증된 대규모 장주기 에너지 저장기술 중 하나이다. 특히 최근에는 재생에너지 확대와 더불어 AI 및 데이터센터 등의 전력수요가 빠르게 증가하면서 전력시스템의 안정성과 유연성을 확보하기 위한 양수발전의 중요성이 다시 부각되고 있다.

아시아는 이러한 변화의 중심에 있다. 중국은 대규모 신규 양수발전 개발과 기술혁신을 추진하고 있으며, 일본은 기존 대규모 양수발전 자산의 현대화와 새로운 운영방식을 모색하고 있다. 한국에서도 재생에너지의 급속한 확대에 대응하여 신규 양수발전의 필요성이 커지고 있다.

국제수환경공학회 (IAHR)가 발간한 2025년 2월호 Hydrolink 특집호에서도 취·방수구 설계, 고정속 및 가변속 기술, 건조지역에서의 양수발전, 풍력·태양광과 연계한 하이브리드 시스템 등 양수발전의 최신 기술동향을 집중적으로 다룬 바 있다.

지난 7월 인천 송도에서 개최된 제25회 IAHR-APD Congress의 고위급 패널(High-Level Panel, HLP)에서는 중국과 일본 전문가의 두 차례 기조연설과 중국·일본·한국 전문가들의 패널토의를 통해 이러한 변화와 과제를 논의하였다. 특히 이번 패널에서 공통적으로 확인된 것은 양수발전이 과거의 첨두부하 대응 발전시설에서 벗어나 재생에너지의 변동성을 흡수하고 전력망의 안정성을 확보하며, 나아가 물관리와 환경관리까지 연계하는 다기능 물-에너지 인프라로 전환되고 있다는 점이다.

2. 중국: 대규모 개발과 지능형 양수발전

첫 번째 기조연설자인 중국 수리수전과학연구원(IWHR)의 Jiang Yunzhong 부원장은 중국의 ‘탄소피크 및 탄소중립’ 목표 달성을 지원하는 핵심수단으로서 양수발전의 전략적 역할을 강조하였다. 세계적인 에너지 전환이 가속화되고 재생에너지 비중이 지속적으로 증가하는 상황에서 양수발전은 전력계통 안정성 향상, 재생에너지 계통연계 확대 및 기후변화 대응력 강화에 기여할 수 있는 성숙한 대규모 에너지 저장기술로 재평가되고 있다고 설명하였다.

중국은 「양수발전 중·장기 개발계획(2021~2035)」에 따라 2030년까지 1억 2천만 kW(120 GW), 2035년까지 3억 kW(300 GW)의 설비용량 확보를 목표로 하고 있다. 2024년 말 기준 중국의 양수발전 설비용량은 5,869만 kW(58.69 GW)로 전 세계 설비용량의 31% 이상을 차지하며 9년 연속 세계

1위를 유지하고 있다고 소개하였다.

특히 중국의 양수발전은 단순한 전력공급시설에서 벗어나 전력계통 균형, 장주기 에너지 저장, 생태환경과의 조화를 동시에 수행하는 다기능 계통조정 인프라로 발전하고 있다. 재생에너지와 전력전자 설비의 비중이 증가하면서 복잡해지는 전력계통에 대응하기 위해 AI, 빅데이터 분석, 중앙집중식 제어시스템 등을 활용한 지능형 운영도 확대되고 있다. Jiang 부원장은 광둥-홍콩-마카오 Greater Bay Area의 다발전소 통합 중앙관제센터와 중국이 독자 개발한 iP9000 지능형 감시·제어 플랫폼을 대표 사례로 소개하였다.

그는 대규모 시설 확충, 지속적인 기술혁신, 통합 스마트 운영관리를 통해 양수발전이 중국의 차세대 전력시스템을 떠받치는 핵심 기반시설이자 고품질 물·에너지 인프라 발전을 견인하는 새로운 성장동력으로 자리매김하고 있다고 결론지었다.



첫 번째 기조연설자 중국 수리수전과학연구원(IWHR)의 Jiang Yunzhong 부원장

일본: 기존 시설의 현대화와 역할의 전환

두 번째 기조연설자인 일본 교토대학 방재연구소(DPRI)의 Sumi Tetsuya 교수는 일본 양수발전의 역할이 최근 크게 변화하고 있음을 강조하였다. 2020년 말 기준 일본에는 42개의 양수발전소가 운영되고 있으며 총 설비용량은 약 27.4 GW이다. 이 가운데 약 70%는 도쿄, 간사이 및 주부 지역에 집중되어 있다. 전국 평균 설비 이용률은 2020년 기준 4.6%로 낮지만 재생에너지 보급이 빠르게 확대되는 시코쿠, 규슈 및 홋카이도에서는 상대적으로 높다고 설명하였다.

1970~1990년대 일본 양수발전의 주요 역할은 원자력발전의 야간 잉여전력을 이용하여 물을 상부저수지로 양수하고 전력수요가 높은 주간에 발전하는 것이었다. 그러나 최근에는 태양광과 풍력의 확대에 따라 운용 패턴이 바뀌고 있다. 낮 시간의 태양광 잉여전력을 이용해 양수하고 태양광 발전량이 급격히 감소하는 저녁과 야간에

발전함으로써 재생에너지의 변동성을 보완하고 있다.

양수발전은 비상시 전력계통 복구에도 중요한 역할을 한다. 2022년 6월 도쿄 지역의 전력 수급 위기 당시에는 600만 kW 이상의 전력을 공급하여 대규모 정전을 방지하였으며, 2018년 홋카이도 동부 이부리 지진에 따른 광역정전 당시에는 블랙스타트 기능을 활용하여 전력계통 복구의 핵심 전원으로 활용되었다.

반면 노후화와 낮은 수익성은 일본 양수발전이 해결해야 할 중요한 과제이다. 2030년까지 약 2.5 GW, 2050년까지 약 17.5 GW의 설비가 준공 후 60년을 초과하게 되어 대규모 개·보수와 재건설이 필요하다. 따라서 향후에는 양수발전이 제공하는 전력계통 조정능력의 경제적 가치를 어떻게 평가할 것인지, 노후시설을 어떻게 효율적으로 갱신하고 유지할 것인지가 중요한 정책과제로 제시되었다. 아울러 대형 태풍 시 기상예보와 연계하여 홍수조절 기능까지 고려하는 저수지 최적 운영도 향후 과제로 강조되었다.



두 번째 기조연설자 일본 교토대학 방재연구소(DPRI)의 Sumi Tetsuya 교수

3. 지명토론: 미래 양수발전을 바꿀 기술과 지속가능성

이어진 지명토론에서 IWHR의 Chen Liang 박사는 풍력 및 태양광 발전의 확대에 따라 양수발전이 기존의 단순한 첨두부하 대응 발전소에서 다기능 에너지 인프라로 빠르게 진화하고 있다고 설명하고, 향후 10년간 양수발전의 고도화를 이끌 네 가지 핵심 기술혁신을 제시하였다.

첫째, 가변속(variable-speed) 발전기 기술이다. 기존 고정속 발전기에 비해 넓은 출력 범위에서 안정적으로 운전할 수 있고 빠른 응답성과 유·무효전력의 독립적 제어를 통해 주파수와 전압 조정 등 계통 안정화 기능을 강화할 수 있다. 중국이 독자 개발한 300~400 MW급 가변속 발전기도 이러한 기술발전의 사례로 소개되었다.

둘째, 비전통적 건설기술이다. 지하 발전소, 폐광 활용, 해안지역 내식(耐蝕) 기술 등을 활용하면 방치된 광산을 재활용하고 토지이용을 줄이며 도시

인근 부하 중심지에 분산형 에너지 저장시설을 구축할 수 있다.

셋째, 디지털 트윈 기반의 지능형 운영·유지관리(O&M)이다. 다양한 계측자료를 통합하여 설비 상태를 실시간으로 분석하고 이상징후를 조기에 진단하여 예지보전을 실시함으로써 설비의 신뢰성과 운영효율을 높이고 여러 운영목표를 동시에 고려한 최적 운전을 가능하게 한다.

넷째, 다중 에너지 연계(Multi-energy coupling) 기술이다. 양수발전과 풍력, 태양광, 배터리를 통합적으로 운영함으로써 서로 다른 시간 규모의 에너지 저장수요에 대응하고 지역 에너지 시스템의 회복력을 높이는 것이다.

일본 교토대학 방재연구소의 Yoshimura Takeshi 교수는 일본의 경험을 토대로 양수발전의 지속가능성을 기계·기술적 측면과 환경적 측면으로 구분하였다. 규슈 지역의 운영 사례에서 나타나듯 양수 운전빈도가 증가하면 러너 마모와 공동현상 등이 증가하고 정비기간 확보도 어려워질 수 있다.

이에 대응하기 위해서는 디지털 계측과 상태감시, 데이터 분석을 이용하여 이상징후를 조기에 발견하고 고장 이전에 유지·보수를 실시하는 예지보전 체계가 중요하다고 강조하였다.

환경적 측면에서는 저수지 퇴사와 수질 문제가 발전소 운영뿐 아니라 주변 하천과 지역환경에도 영향을 미친다. 기존 다목적댐을 활용한 신규 양수발전, 홍수조절 기능과의 연계, 저수지 수위의 신속한



패널토의: 좌측부터 Chen Liang 박사, Yoshimura Takeshi 교수, 장철 처장

조절, 하루 하천으로의 토사 공급 등 물관리와 에너지 관리를 통합하는 새로운 운영방향도 제시하였다. 이는 미래의 양수발전을 단순한 에너지 저장시설이 아니라 물-에너지-환경을 연결하는 복합 인프라로 바라볼 필요가 있음을 보여준다.

4. 한국의 양수발전과 새로운 개발방향

한국수자원공사의 장철 처장은 재생에너지 확대에 대응하기 위한 한국의 양수발전 필요성과 향후 개발방향을 설명하였다. 발표에 따르면 2025년 기준 한국의 총 발전설비는 156 GW이며, 이 가운데 재생에너지는 39 GW, 양수발전은 5 GW이다. 특히 태양광 설비는 약 34 GW로 재생에너지의 대부분을 차지한다. 한국 정부는 2030년까지 재생에너지 설비를 약 103 GW로 확대할 계획이며, 이에 따라 태양광과 풍력의 간헐성으로 인한 잉여전력과 출력 변동이 크게 증가할 것으로 예상된다고 설명하였다.

태양광 발전이 낮 시간에 집중됨에 따라 잉여전력이 발생하고 저녁에는 발전량이 급감한다. 이러한 상황에서 양수발전은 낮의 잉여전력을 저장하여 저녁과 야간에 공급할 수 있는 대용량·장주기 저장수단으로서 중요한 역할을 할 수 있다. 배터리 에너지 저장장치(BESS)가 단기 저장에 적합한 반면 양수발전은 대용량·장주기 저장이 가능한 물 기반 에너지 저장시스템(WESS)으로 제시되었다.

또한 국내 태양광 설비가 일사량이 풍부한 호남지역에 집중된 반면 송전망 확충에는 한계가 있다는 점에서 지역별 양수발전소 확충의 필요성도 제기되었다. 데이터센터와 반도체 산업의 성장으로 전력수요가 증가하는 상황에서 태양광, 양수발전 및 BESS를 결합한 에너지 시스템의 중요성이 커질

것으로 전망하였다. K-Water는 기존 다목적댐을 하부저수지로 활용하고 상부저수지만 신규 개발함으로써 건설비와 환경영향을 줄이는 새로운 양수발전 개발모델을 제안하였다.

5. 교차질문과 아시아 지역의 협력

이어 사회자는 각 발표자와 토론자에게 미래 양수발전의 기술·정책 방향에 관한 개별 질문을 제시하였다.

Jiang 부원장에게는 ‘중국의 양수발전 개발경험이 아시아 지역의 개발 로드맵에 어떻게 기여할 수 있는지’를 질문하였다. 그는 양수발전을 지원·육성할 수 있는 법적·제도적 기반, 국가 주도의 체계적 개발계획, 핵심기술의 자체개발과 비용 절감, 그리고 지역 여건에 맞는 맞춤형 개발 경험을 아시아 국가들과 공유할 수 있다고 답하였다.

Sumi 교수에게는 ‘기후변화와 에너지 도전에 대응하기 위해 기존 양수발전 설비를 어떻게 재설계해야 하는지’를 질문하였다. 그는 기존 양수발전 설비가 전력망 조정과 다양한 부차서비스에서 높은 잠재가치를 가지며, 기존 저수지를 새로운 양수발전 시설과 연결할 기회도 확대될 수 있다고 설명하였다. 동시에 장기적 투자 전망을 포함한 경제적 타당성과 공공의 동의가 핵심 이슈라고 강조하였다.

Chen 박사에게는 ‘향후 10년 동안 양수발전을 가장 크게 변화시킬 기술혁신’을 질문하였다. 그녀는 앞서 제시한 가변속 발전기, 비전통적 건설기술, 지능형 운영·유지관리 및 다중 에너지 연계를 다시 강조하면서 이들 기술이 양수발전을 현대적이고 다기능적이며 지능화된 에너지 인프라로 전환시키는 핵심동력이 될 것이라고 답하였다.

Yoshimura 교수에게는 ‘노후화와 환경적 요구에 대응하면서 양수발전의 지속가능성을 어떻게 확보할 것인지’ 질문하였다. 그는 첫째, 상태감시·계측·데이터 분석을 활용하여 이상징후를 조기에 감지하고 고장 이전에 적절한 유지·보수를 실시하는 것이 중요하며, 둘째, 저수지 퇴사와 수질 문제 등 환경적 과제를 함께 관리해야 한다고 강조하였다.

장철 처장에게는 ‘한국에서 기존 수력발전시설을 이용한 양수발전 개발을 가속화 하려면 무슨 정책적 조건이 필요한지’ 질문하였다. 그는 첫째 이 분야에 대해 일반적인 시장 수익률보다 더 높은 이익을 보장하는 제도적 장치의 필요성을 강조하였다. 자본과 노동은 다른 부문보다 수익성이 높을 경우 그 부문으로 이동하게 되며, 따라서 돈이 그곳으로 향하면 시설(인프라)도 그 뒤를 따르게 되고, 높은 수익률은 투자의 빠른 속도를 의미한다고 하였다.

6. 아시아 3국의 서로 다른 접근과 공통 방향

이번 HLP에서 나타난 중국, 일본, 한국의 양수발전 전략은 각국이 처한 여건에 따라 차이를 보였다. 중국은 국가의 중·장기 계획 아래 대규모 신규 개발과 기술혁신을 동시에 추진하고 있다. 일본은 이미 구축된 대규모 양수발전 자산을 바탕으로 노후시설의 현대화와 재생에너지 시대에 맞는 운용방식의 전환에 중점을 두고 있다. 한국은 향후 재생에너지 확대에 대비하여 신규 양수발전의 확보와 기존 다목적댐을 활용한 새로운 개발모델을 모색하고 있다.

따라서 중국은 ‘확장(expansion)’, 일본은 ‘현대화(modernization)’, 한국은 ‘새로운 개발모델(new development model)’이라는 서로

다른 단계에 있다고 볼 수 있다. 그러나 세 나라 모두 양수 발전을 과거의 침두부하 대응 발전시설에서 재생에너지 시대의 장주기 에너지 저장 및 전력계통 안정화 인프라로 재정의하고 있다는 점에서는 같은 방향으로 나아가고 있다.

7. 한국에 대한 시사점

첫째, 양수발전과 BESS를 상호보완적인 저장기술로 접근할 필요가 있다. BESS가 빠른 응답을 요구하는 비교적 단기적인 전력변동에 효과적이라면, 양수발전은 대용량·장주기 저장을 담당하는 방식으로 역할을 분담할 수 있다.

둘째, 기존 댐을 활용한 양수발전 개발을 적극적으로 검토할 필요가 있다. 기존 저수지를 상부 또는 하부저수지로 활용할 수 있다면 신규 댐 건설에 따른 비용과 환경·사회적 영향을 줄일 가능성이 있다.

셋째, 양수발전의 경제성을 단순한 발전량이나 설비 이용률만으로 평가하기보다는 다양한 계통서비스의 가치를 함께 고려하는 평가체계가 필요하다. 장주기 에너지 저장, 주파수 조정, 예비력, 블랙스타트 등 양수발전이 제공하는 기능을 함께 평가해야 한다. 일본의 사례에서 나타나듯 낮은 이용률만으로 양수발전의 가치를 평가할 경우 전력계통 안정화라는 중요한 기능이 충분히 반영되지 않을 수 있다.

넷째, 향후 양수발전의 계획과 운영에서는 에너지뿐 아니라 물관리와 환경적 지속가능성을 함께 고려하는 통합적 접근이 필요하다. 홍수관리, 저수지 퇴사와 수질, 하류 하천환경 등을 양수발전의 계획·운영 단계에서 함께 고려할 필요가 있다.

8. 맺음말

이번 고위급 패널의 논의를 통해 양수발전은 과거의 단순한 침두부하 대응 발전시설에서 재생에너지 시대를 뒷받침하는 핵심 에너지 저장 및 계통조정 인프라로 빠르게 변화하고 있음을 확인할 수 있었다. 위와 같은 개별 질의응답을 마치고 사회자는 다음의 네 가지 take-home message를 패널 참가자와 청중에게 제시하며 약 60분간의 고위급 패널토의를 마무리하였다.

첫째, 양수발전은 현재 가장 성숙하고 널리 검증된 대규모 장주기 에너지 저장기술 중 하나이며, 재생에너지 발전 비중의 확대와 AI를 비롯한 데이터센터의 급속한 증가로 그 중요성이 더욱 커질 것이다.

둘째, 미래의 양수발전은 단순한 에너지

저장시설을 넘어 가변속 기술, AI, 디지털 트윈과 예지보전 등을 활용하는 지능형·디지털·다기능 에너지 인프라로 발전할 것이다.

셋째, 미래 양수발전은 전력계통뿐 아니라 물관리와 환경관리의 관점에서도 접근해야 한다. 기존 댐 활용, 홍수관리, 저수지 퇴사와 수질, 하류 하천환경 등을 통합적으로 고려함으로써 물-에너지-환경을 연결하는 지속가능한 인프라로 발전할 수 있다.

넷째, 이러한 기술적·환경적·제도적(거버넌스) 과제를 해결하기 위해서는 아시아 국가 간의 긴밀한 협력이 중요하다. 기술과 경험을 공유하고 공동연구와 정책협력을 확대한다면 양수발전은 아시아의 에너지 전환과 지속가능한 물·에너지 관리에 더욱 중요한 역할을 담당할 수 있을 것이다.



패널토의 마무리 발언: 좌측부터 Jiang Yunzhong 부원장, Sumi Tetsuya 교수, 우효섭 교수