

변화하는 세계에서 댐과 수력에너지

Dams and Hydropower in a Changing World

Jinsheng JIA : 국제대댐회 (ICOLD) 총재
 Jing MA : 중국 수자원 및 수력에너지 연구소
 Cuiying ZHENG : 중국대댐회 (CHINCOLD)

*본 원고는 Jia(ICOLD 총재)가 '한국대댐회 2010 댐기술 심포지엄 (10. 11. 4, 대전)'에서 발표한 자료를 편집부에서 번역하였음

요약 :

세계적인 변화에 더 잘 적응하기 위해 충분한 수자원 확보시설을 마련하는 방안이 국제 사회로부터 넓은 지지를 받고 있다. 연구에 의하면, 1인당 수자원 확보능력과 수력 에너지 발전량은 UN이 제안한 HDI(human development index / 인간 발전 지수)와 밀접한 관계를 갖는다. 다른 에너지 발전 시설과 비교해 수력 에너지는 '생애 회수율' (life span Payback ration)에 있어서 최선의 선택이다. 더 좋은 수자원 및 수력 에너지 개발을 위한 핵심 현안문제를 제안하였다

핵심어 :

수자원 확보 시설(water storage infrastructure)
 국제적 변화(global change)
 수력 에너지(hydropower)
 지속 가능한 개발(sustainable development)

1. 수자원 시설 건설 및 수력 에너지 개발의 새로운 시대가 도래 하고 있다.

세계는 변하고 있다. 인구 증가 및 경제 개발이 자원 및 에너지에 대한 끊임없는 수요를 생성하는 핵심 요

인이다. 수자원은 기본적인 천연자원일 뿐만 아니라 전략적 자원이며 환경에 지대한 영향을 미친다. 세계 인구는 매년 거의 8,000만 명씩 증가하고 있으며 이는 매년 담수에 대한 신규 수요가 64억 톤이나 된다는 것을 의미한다. 2030년에는 세계 인구의 47%가 물 부족(water stress) 상태가 심각한 지역에서 살게 될 것이다(UNESCO, 2009). 한편 기후변화에 의해 야기된 홍수 및 가뭄을 포함하여 급격한 기상이변의 증가는 물 분배 및 활용에 대한 어려움을 더욱 더 심각하게 한다.

현재 우리가 직면하고 있는 현저한 제약사항들 중의 하나인 기후 변화는 우리가 대응조치를 취할 것을 요구하고 있다. 한편으로 우리는 에너지 공급 구조에 대한 전략적인 조정을 적극 추진하고, 에너지 공급 구조에서 화석연료가 주된 역할을 하는 기조를 변경 해서 온실가스 방출을 줄일 필요가 있으며 다른 한편으로 우리는 전 세계적인 기후변화의 결과에 대한 (국제공조에 기반을 둔) 대응 보안책을 강구할 필요가 있다.

일반적으로 저장시설을 확대하고 용량을 규제하는 것이 핵심 엔지니어링 조치로 간주되었다. 기후 변화에 적응하기 위해 댐 및 저수지의 역할에 대한 다양한 의견 수렴이 국제 사회의 주관으로 광범위하게 이



루어지고 있다. 그 결과 수자원 확보시설이 지속 가능한 개발을 달성하기 위해 필수적이라는 사실을 인식하는 사람들이 더욱 더 증가하고 있음이 밝혀지고 있다. 충분하지 않은 수자원 확보시설은 기후변화에 대응하고 'Millennium Development Goals'(새천년 개발 목표)을 충족하기 위한 능력을 갖추려는 우리의 발걸음을 더디게 할 것이다.

대형 수자원 확보시설 건설에 대해 찬반론자들이 함께 우호적인 분위기 속에서 국제적 개발에 관한 현안 문제를 논의하기 위해 한자리에 모일 수 있으며, 이러한 사실 자체가 개발 요구조건이 여론 조성의 기반임을 반영하는 것이다.

이러한 변화상이 댐 및 저수지 건설 및 수력 에너지 개발에 관한 새로운 시대의 도래에 이바지하고 있다. 많은 수자원 시설 투자와 댐의 결과로 취해진 기타 조치들은 개별 국가가 기후 변화에 대처하고 경제 위기를 극복하는데 도움을 줄 것이다. 현재까지 약 165 개 국가가 추가적인 수력 에너지 개발을 공식 표명하였다. 제안된 설치 완료 용량은 이미 33.8TW에 달한다. 홍수 조절 역량을 증강시키기 위해 홍수 대비 설비를 강화하거나 또는 북미나 유럽 국가들에서처럼 생태 시스템 보호 및 복구 목적으로 규제 목표나 모드를 조절하기 위해, 현재, 선진국에서 수력 에너지에 대한 관심은 건설된 수력 발전소에 대한 복구 및 강화로 이미 옮겨갔다. 개발도상국의 경우 아시아나 남미의 국가들과 같은 많은 국가들이 2025년 전에 수력 에너지 개발에 관한 과업을 마무리하고자 하는 야심찬 개발 계획을 세웠다. 아프리카의 국가들과 같은 후발국의 경우, 비록 풍부한 수력 에너지 잠재력을 가지고 있고 수력 에너지 개발 의지를 가지고 있지만 투자 부문, 기술적 또는 정치적 면에서의 제한

으로 인해 수력 에너지 개발 과정에 많은 어려움과 장벽에 부딪혀 있다. 현재 1,200개의 댐이 건설 중이다. 이들 중 370개 댐이 그 높이가 60m 이상이다. 이들 중 대부분이 아시아 및 남미 소재 55개 국가에 위치해 있다.

2. 다른 에너지와 비교해도 수력 에너지는 '생애 회수율' (life span Payback ration)에 있어서 최선의 선택이다.

지난 세기 동안 다목적 댐 및 저수지는 가뭄 대비, 홍수 방지, 농업/공업용수 공급, 수로 및 에너지 자원 개발의 기회를 제공해 왔다. 또한, 에너지 위기, 물 공급 위기, 식량 위기 및 기후 변화 등이 계속적으로 대두됨에 따라 수자원 활용 및 에너지 활용의 관점에서 댐 및 수자원 확보시설의 종합적인 장점이 점차 부각되었다.

물의 저장은 곧 에너지의 저장을 의미한다. 수자원 확보는 오늘날 발전 시스템에 있어서 중요한 역할을 수행해 왔다. 현재 수력 발전은 전 세계 발전량의 약 20%를 차지하며(EIA, 2008), 이는 화석 연료가 차지하는 비중 다음으로 큰 비중을 차지하는 것이다(그림 1).

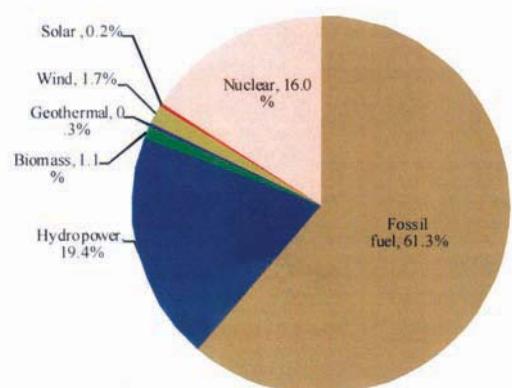


그림 1. 발전 유형별 분포도

여러 가지 에너지 유형 가운데 수력 에너지는 가장 높은 에너지 회수율을 보이면서도 온실가스 방출도 가장 작다. '에너지 회수'라는 용어는 1970년대 석유 파동으로 인해 대두되기 시작하였다. 석유파동 이후, 에너지 의제에 있어서 중대한 변화가 있었으며 에너지 독립, 대기 질(air quality), 기후 변화와 같은 현안 문제들이 대두되었다(Gagnon, 2008). 많은 국가들이 석유의 대체 에너지원을 탐사하기 시작하였다. 이에 따라 대두되는 문제들 중의 하나가 증가 일로에 있는 장래 에너지 수요에 대처하기 위해 어떠한 효율적인 에너지 대안을 선택하는 문제이다. 적절한 해결책을 마련하기 위해, 정책입안자들은 결정을 내리기 전에 '생애 주기 평가'(life-cycle assessments)를 고려할 필요가 있다. 그러한 생애 주기 평가는 이의 핵심 성분으로 '에너지 회수율'을 포함시켜야 한다. 에너지 회수율은 전반적인 영향의 다소 간접적인 일부라 할 수 있고 실제 영향의 근원에 대해 유용한 관점을 제공한다. 따라서, 생애 주기에 기초하여 다른 에너지 대안에 대해 '순 에너지'를 비교하여 'NEA(Net Energy Analysis/순 에너지 분석)'의 형성에 있어서 에너지 대안을 평가하는데 있어서 에너지 회수율 개념이 사용되었다.

여러 가지 서로 다른 에너지 대안을 비교하는 하나의 방법으로 소위 '생애 주기 에너지 회수율'을 계산하는 것이 있다. '생애 주기 에너지 회수율'이란 시스템 건설, 유지관리 및 연료 공급을 위해 필요한 투입된 에너지 총량 대비 그 시스템이 정상적인 수명 동안 생산한 출력 에너지 총량의 비를 의미한다. 발전소의 에너지 회수율은 발전소 수명 동안 생산한 출력 에너지 총량을 발전소 건설, 운영, 연료 공급 및 해체

하는데 필요한 투입된 에너지 총량으로 나누어 얻은 값으로 정의된다.

White & Kulcinski (1999)는 다음과 같이 EPR(Energy Payback Ratio/에너지 회수율)를 계산하는 간단한 공식을 제안하였다:

$$EPR = \frac{E_{nL}}{(E_{matL} + E_{conL} + E_{opL} + E_{decl})}$$

위 공식에서, EnL는 해당 발전소의 수명 L 기간 동안 생산된 '순 전기 에너지를 말하며 EmatL는 발전소의 수명 L 기간 동안 사용된 자재로 투입된 에너지 총량을 말하며 EconL는 수명 L 을 갖는 발전소 건설에 투입된 에너지 총량을 말하며 EopL는 발전소의 수명 L의 기간 동안 발전소 운전에 투입된 에너지 총량을 말하며 EdecL는 발전소가 자기 수명 L 기간 동안 운전된 후 해체하는데 투입된 에너지 총량을 말한다. 에너지 회수율이 높다는 것은 양호한 성능을 갖는다는 것을 의미한다.

Gagnon(2005)에 따르면 여러 유형의 에너지 개발의 에너지 회수율은 저수지를 이용한 수력 에너지의 경우는 약 208~280; 강물의 흐름을 이용한 수력 에너지의 경우는 약 170~267; 풍력 에너지의 경우 약 18~34; 생물학적 에너지의 경우 약 3~5; 태양 에너지의 경우 약 3~6; 원자력 에너지의 경우 약 14~16; 전통적인 화력 에너지의 경우 2.5~5.1; 이산화탄소 회수나 저장 기술을 적용한 열 발전의 경우 약 1.6~3.3이다(그림 2).

수력 에너지는 또한 가장 적은 온실가스를 배출하는 에너지원이다(그림 3). 세계 에너지 위원회 (World

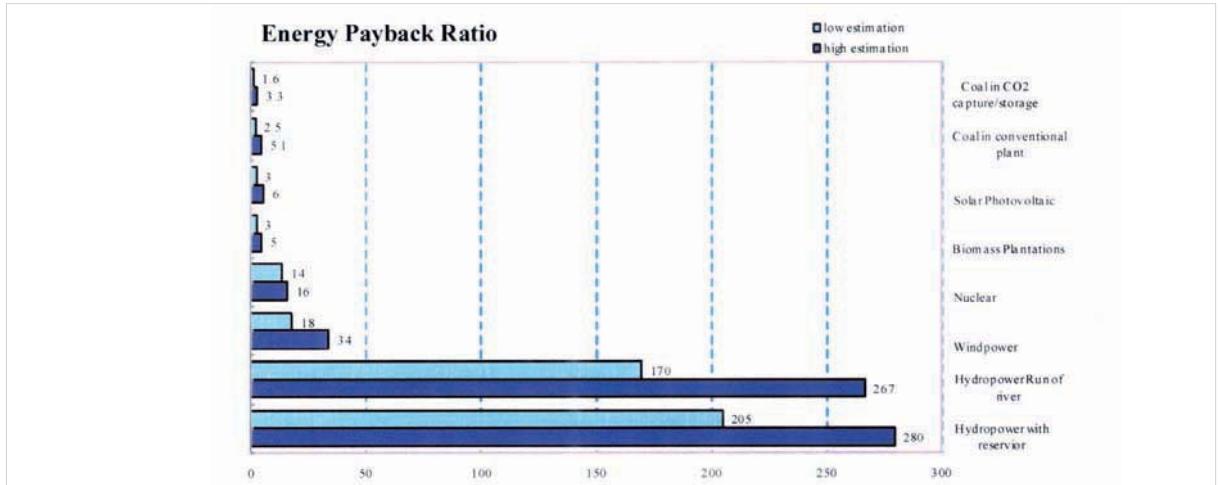


그림2. 유형에 따른 에너지 회수율

Energy Council, 2004)의 계산에 따르면 GWh 당 CO₂ 방출량은 중래의 화력발전은 약 941~1,022톤, 디젤 연료를 사용하는 화력 발전은 약 649~787톤, CO₂ 저장 기술을 적용한 열 발전의 경우 약 220~300톤, 태양열 에너지의 경우 약 38~121톤, 생물학적 에너지의 경우 약 51~90톤, 저수지를 이용한 수력 발전의 경우 10~33톤, 풍력 에너지의 경우 9~20톤, 원자력 에너지의 경우 약 6~16톤, 강물을 이용한 수력발전의 경우 3~4톤으로 가장 적은 CO₂를 방출한다.

3. 댐과 수력 에너지 개발은 HDI와 밀접한 관계를 갖는다.

댐 및 수력 에너지는 포괄적인 장점이 있을 뿐만 아니라 사회-경제 발전에도 긴밀한 관련을 갖는다. Berga(2008) & Jia가 처음 이러한 생각을 갖게 되었다. 이들은 해당 국가가 가지고 있는 1인당 수력 에너지 발전 및 저장 능력을 사회 경제 발전과 밀접한

관련을 갖는다고 생각했다. 이러한 생각을 따라, 우리는 약 100개 이상의 국가를 대상으로 1인당 저장 용량 지수, 1인당 수력 에너지 발전 지수 및 HDI(human development index / 인간 발전 지수)를 비교, 분석하였다. 그 결과 댐/저수지 및 수력 에너지 개발이 어떻게 사회경제 발전과 관련이 있는지를 잘 보여 주었다.

인간 발전의 질을 반영하는 1인당 GDP, 건강 및 교육수준을 가중 평균하여 도출한 지수인 HDI는 UN 회원 국가가 그들의 사회경제적 발전 정도를 측정하는데 사용되는 포괄적 지수이다. 이 지수는 1인당 GDP가 인간 발전도 측정을 위한 유일한 지수로 사용되는 단점을 피했다. HDI는 0~1까지의 값으로 나타내며 HDI가 1에 가까우면 가까울수록 인간 발전도는 더욱 더 높게 된다.

0.9보다 더 큰 HDI를 갖는 나라들은 대부분 호주 (0.970), 미국(0.956), 영국(0.947) 등의 선진국들이며, 0.8~0.9의 HDI를 갖는 국가들은 비교적 개발도

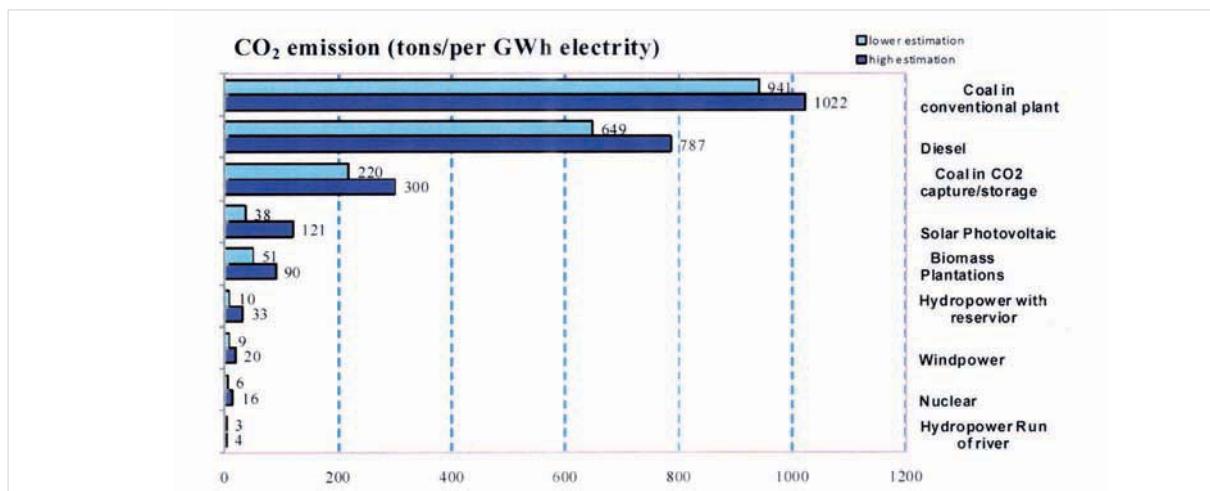


그림3. 에너지 유형별 온실가스 방출량

상국으로, 예를 들어, 아르헨티나(0.866), 러시아(0.817), 브라질(0.813) 등이다. 반면, 0.5 미만의 HDI를 갖는 국가들은 주로 아시아나 아프리카의 후진국으로, 르완다(0.46), 부르키나파소(0.389), 아프카니스탄(0.352) 등이 있다.

2007년 100개가 넘는 국가들의 인간 발전과 땅/저수지 및 수력 에너지 발전 데이터에 따르면 (United Nation, 2009, Editorial Board, 2008), 0.9가 넘는 HDI를 보이는 국가들은 1인당 수자원 용량이 2,924 톤이며, 1인당 수력 에너지 발전은 1461Kwh이며 0.8~0.9의 HDI를 보이는 국가의 경우, 각각 2,476 톤과 982Kwh이며 0.7~0.8의 HDI를 보이는 국가의 경우, 각각 571 톤과 350Kwh이며 0.6~0.7의 HDI를 보이는 국가의 경우, 각각 212톤과 106Kwh이며 0.5~0.6의 HDI를 보이는 국가의 경우, 각각 173톤과 86Kwh이다(그림 4와 그림 5).

이러한 사실에서 나타난 바와 같이, 선진국은 안정적인 수자원 및 에너지를 확보하고 변화하는 수자원에 대처하기 위한 탄탄한 기반을 가지고 있지만 개발도상국의 경우 재정적, 기술적, 인적 자원의 제약으로 인해 여전히 갈 길이 멀다. 이스라엘(0.935HDI / 1인당 저장 용량 27톤)이나 잠비아(0.481HDI / 1,072 톤)의 경우처럼 예외는 있지만 한 국가나 지역에서의 땅 발전 수준은 인간 발전 수준과 직접적인 정비례 관계가 있다. 이는 수자원 기반시설의 국제적 분포는 물 부족 위험의 국제적 분포와 반비례 관계가 있다고 한 UN의 조사결과(2006)와 배치된다.

효과 정도가 다양하다는 것은 국제적 변화가 발전 정도가 서로 다른 국가들에 서로 다른 영향 및 결과를 초래한다는 것을 의미한다. Blair(2008)가 보고서에서 지적한 바와 같이, 온실가스 방출이 뉴욕에서 일어나든 상하이에서 일어나든 그것이 기후 변화에 미치는 영향은 동일하다는 것이다, 물론 기후 변화의

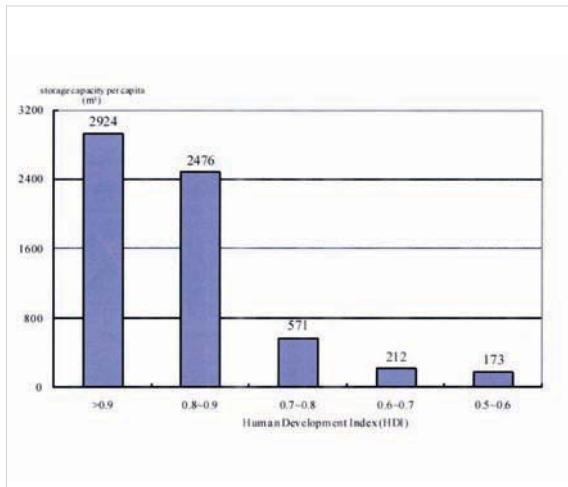


그림4. HDI와 1인당 확보 용량과의 관계

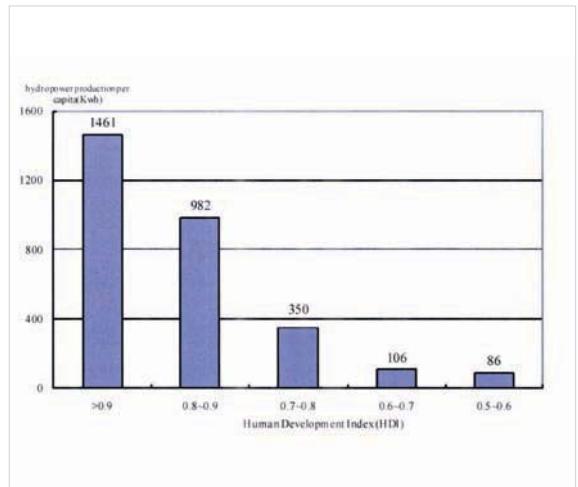


그림4. HDI와 1인당 확보 용량과의 관계

충격에 가장 취약한 곳은 가장 빈곤한 지역이다. 마찬가지로 훨씬 더 많은 온실가스를 방출하지 않았고, 현재 방출하고 있지 않으며 앞으로도 방출하지 않을 후진국이나 미개발국가들도 기후 변화로 인해 발생하는 비용에 책임을 갖게 된다.

이들 국가들은 기후 변화 효과에 가장 취약하며 적응력도 가장 미미하다. 발전 정도가 서로 다른 국가들은 수자원 시설 우선순위와 목표에 있어서 뿐만 아니라 관심사에 있어서도 서로 다르다. 후진국의 경우 국제적 기후 변화의 결과는 종종 천재지변의 폐해 정도에 버금간다. 왜냐하면 부적절한 저장 용량으로 극심한 기상이변이 자주 발생하게 되고 그 결과 더 심각한 재난을 초래하기 때문이다. 수자원 시설의 건설은 그들의 생존 및 빈곤 탈출과 관련한 중대한 문제이다. '수력 에너지 개발에 관한 세계 선언'(World Declaration on Hydropower Development, 2008)

내에 기술된 바와 같이 전 세계의 많은 지역에서 당연하게 생각하는 신뢰성 있는 전기 공급은 아프리카의 후진국들에 있어서 '생명을 구하는 생필품'이 될 수 있다.

일반적으로 에너지 및 수자원 수요는 이들 국가에서는 아주 중요한 것이므로, 아프리카에서 수력 개발 계획의 다양한 편익(특히 저수지가 포함되어 있을 때)은 특히 중요하다. 아프리카가 겪고 있는 극심한 기상이변(대규모 홍수나 주기적인 가뭄)의 피해는 댐/저수지 개발 계획에 의해 크게 완화될 수 있다. 청정 음용수 및 식량 보안을 제고시키기 위한 관계용수의 공급은 수자원 개발 계획의 주요한 부차적인 편익이다. 따라서 수자원 및 수력 에너지원 개발은 개발도상국, 특히 아프리카 국가들에게 있어서는 중대한 문제이며 삶의 질을 개선시키기 위한 가장 긴급한 과제들 중의 하나이다.

4. 대형 댐의 장기적 안전은 댐 및 수력 에너지 개발의 기본이다.

오늘날, 세계 여러 지역에서 지속 가능한 개발 및 삶의 지속 가능성은 수자원, 식량, 에너지 공급 부족으로 위협받아 왔다. 여전히 11억의 사람들이 안전한 음용수 공급 부족을 겪고 있고, 24억 명이 위생 서비스를 제공받지 못하고 있으며 20억 명의 사람들이 전기 공급 서비스를 기다리고 있다. 한편으로 우리는 더욱 더 많은 댐과 저수지를 건설할 필요가 있으며, 다른 한편으로 기존의 댐과 저수지가 정상적으로 가동되도록 유지 관리할 필요가 있다. 비록 많은 현대 선진 기술이 개발되었다 하더라도 우리는 여전히 풀어야 할 많은 과제를 안고 있다. 76명의 생명을 앗아간 2009년 8월 17일에 발생한 Sayano-Shushenskaya 사고는 전 세계인의 관심을 불러 일으켰다.

한 보고서에 따르면 금속 피로도가 쌓여 가던 볼트를 견뎌 내는 터빈 커버로 시작해 고장 발생으로 이어진 사고의 연쇄작용이 결국 중대한 재앙을 가져올 수 있다고 밝혀졌다. 실제로 댐 고장의 상당수가 모니터링 및 유지보수의 소홀로 야기된 것이다. 대형 댐의 안전에 대해 사회가 갖는 지대한 관심과 주의는 결국 대형 댐의 안전은 댐 및 수력 에너지 발전의 기본이라는 점을 우리에게 일깨워 준다.

대형 댐의 장기적 안전을 보장하기 위해 이들의 설계, 건설 및 운전 단계에서 주의를 기울여야 한다.

- 댐의 안전은 기술적 문제일 뿐만 아니라 사회적 관심사이다. 우리는 기술적 부분에 대한 책임을 가지

며 이와 동시에 사회적 책임에도 많은 관심과 주의를 기울여야 한다.

- 댐의 노화와 잠재 문제 및 복구 조치는 댐의 설계, 건설 및 운전 단계에서 고려되어야 한다. 소유자, 설계자 및 계약업자는 해당 댐이 장래에 수백 년 동안 가동될 것이라는 점을 망각하지 않아야 한다. 구조 및 자재는 상술한 바와 같이 상당한 기간 동안 지속되거나 복구될 수 있어야 한다.

- 복구 프로그램 개발 시 댐의 활동에 영향을 줄 모든 요소를 고려하여 댐의 장기 안전에 대한 평가를 실시해야 한다.

- 댐 및 댐 구성물의 수명은 다를 수 있다. 잘 설계되고, 잘 건설되고, 잘 유지 관리되고 모니터링 된 댐은 어려움이 없이 100년 까지 가동할 수 있다. 그러나 댐 수문 및 모터와 같은 기계적 요소들은 30~50년 정도가 되면 교체해 주어야 한다. 펜 스틱(penstock)의 수명은 40~60년이다. 전반적인 댐 프로젝트의 안전을 위해 노후화된 부품의 정기적 수리 및 교체는 아주 중요하다.

- 위험 관리 측면에서, 비상 대응 계획(Emergency Action Plan)은 댐 안전에 영향을 줄 수 있는 모든 가능 요소를 고려하여 작성하여야 한다. 동력실(powerhouse)과 관련한 고장은 댐 자체를 위험에 처하게 할 수 있다. 동력실에서 스필웨이 게이트(spillway gate) 및 펜 스틱 가드 게이트(penstock guard gate)와 같은 중요한 안전 장치로의 전원 공급 또는 통신 단절로 인해, 아주 자주, 이러한 중대



위험 상황이 초래될 수 있다. 정치적, 경제적 위기나 지진과 같은 천재지변에 대해서도 고려해야 하며, 댐의 안전은 누가 보장을 할 것이고 문제 발생 시 연락 체계에 대해서도 고려해야 한다.

금세기에 있어서 댐 및 저수지의 건설 및 운영은 더

이상 과학적, 기술적 문제로만 고려될 수 없다. 댐에 관한 오해를 최소화하고 국제적 차원에서 추가 개발에 대한 지지를 도출해 내기 위해 대형 댐에 대한 장기적인 안전은 기본적이고 아주 중요한 문제이다.

참고자료

- Blair,T and Climate Group, 2008, Breaking the climate deadlock: A global deal for our low-carbon future
- Berga, L., 2008, Dam for sustainable development, in Proceedings of high-level International Forum on Water Resources and Hydropower: 1–6. Beijing China.,
- Editorial Board, 2008, Word Atlas & Industry Guide 2008, The International Journal on Hydropower and Dams, London, UK.
- EIA, 2008, Energy Information Administration international statistics database, <http://www.eia.doe.gov/>,
- Gagnon, L. 2005 Energy Payback Ratio. Hydro-Quebec, Montreal.
- Gagnon, L. (2008). "Civilisation and energy payback." Energy Policy, 36(9): 3317?3322.
- UNESCO, 2009. The United National World Water Development Report-Water in a Changing World. UNESCO, New York, USA.
- United Nation. 2006 United Nation Human Development Report-2006, United Nation, New York, USA.
- United Nation, Human Development Report 2009 Overcoming barriers: Human mobility and development, United Nation, 2009.
- White, S.W., and Kulcinski, G.L. 1999. "Birth to Death"analysis of the energy payback ratio and CO₂ gas emission rates from coal, fission, wind and DT fusion electrical power plants. UWFDM-1063, University of Wisconsin-Madison.
- World Declaration Dams & Hydropower, 2008, Paris , France.
- World Energy Council, 2004, Comparison of energy systems using life cycle assessment a special report for world energy council, London, UK
- Leyland, B., Debate is needed on the long-term safety of large dams 2010. ICOLD, Pairs