



# 07.

## 수력발전댐 사업의 성공적인 개발을 위한 미계측유역 수문관측소 운영방법

### Xe-Pian Xe-Namnoy Hydroelectric Power Project의 수문관측 과업 사례를 중심으로

송현섭(SK건설 과장), 정재권(SK건설 상무)  
나용수(SK건설 부장), 강우영(이피에스엔지니어링 대표)

#### 1. 서론

수력발전댐 개발사업을 추진하기 위해서는 사업에 대한 타당성 평가가 수행되어야 하며 그 핵심 요소 중 하나인 발전가능량에 대한 정확한 평가가 이루어져야 한다. 이를 위해서는 양질의 수문관측 자료에 근거한 신뢰성 높은 수자원 부존량 산정이 필수적이다. 아울러 수문관측 자료는 댐 시공 후 운영단계에서 그 효율성을 높일 수 있는 기본적인 자료가 되므로 관련 유역의 수문관측은 수력발전댐 사업의 성공적인 개발을 위해서 사업개발 중과 사업개발 후에도 지속적으로 수행되어야 하는 매우 중요한 요소이다. 하지만, 현재 대부분의 수력발전댐 개발사업은 개발도상국에서 추진되고 있는 실정이며, 이 대상국들 중 국가 전반에 걸쳐 체계적인 수문관측을 수행하며 장기간에 양질의 수문관측 자료를 보유하고 있는 나라는 거의 없는 실정이다. SK건설은 한국서부발전과 함께 2006년도에 라오스 정부와 수력발전댐 개발 양해각서를 체결한 이래, 라오스 남부의 Bolaven 고원 지역에서 “Xe-Pian Xe-Namnoy Hydroelectric Power Project (이하 XXHP Project)”를 진행하고 있으며, XXHP Project의 사업대상 지역 또한, 양질의 자료가 충분하지 않은 사실상 미계측 유역이다. 이에 SK건설은 2007년 3월에 수문조사 과업을 개시하여 현재까지 수문관측을 수행하고 있으며, 양질의 수문관측 자료를 수집하기 위하여 지속적으로 관측방법을 개선하고 있다.

본 기고에서는 XXHP Project에서 수행하고 있는 수문관측 사례를 들어 수력발전댐 사업의 성공적인 개발에 매우 중요한 요소 중 하나인 양질의 수문자료를 지속적으로 수집하기 위한 미계측 유역에서의 수문관측망 구축 및 운영방법에 대하여 소개하고자 한다.

#### 2. XXHP Project 소개

XXHP Project는 라오스 남부의 Champasak주와 Attapeu주에 위치하고 있는 Bolaven 고원 지역에서 메콩강의 지류인 Xe Pian, Xe Namnoy 및 Houay Makchan 하천을 대상으로 개발 중에 있는 시설용량 410 MW의 유역변경식 수력발전 사업이다. 본 사업은 발전수량의 확보를 위해 아래의 그림 1과 같이 먼저 각 하천에 댐을 건설하여 상류 유역에서 발생하는 자연유량을 담수하고, Xe Pian과 Houay Makchan의 저류량을 Xe Namnoy 저수지에 도수한 후, 연장 16.5 km의 발전수로터널을 이용하여 약 650 m 낙차가 발생하는 Xe Kong Valley의 발전소에 보내 전력을 생산하도록 설계되었다.

XXHP Project는 국내 최초로 민간 주도로 해외에서 추진된 BOT (Build, Operate and Transfer)방식의 민관합동 (Public-Private Partnership) 수력발전사업으로, 우리나라의 SK건설과 한국서부발전이 시행사의 주주로 참여하고 있다 (그림 2 참조).

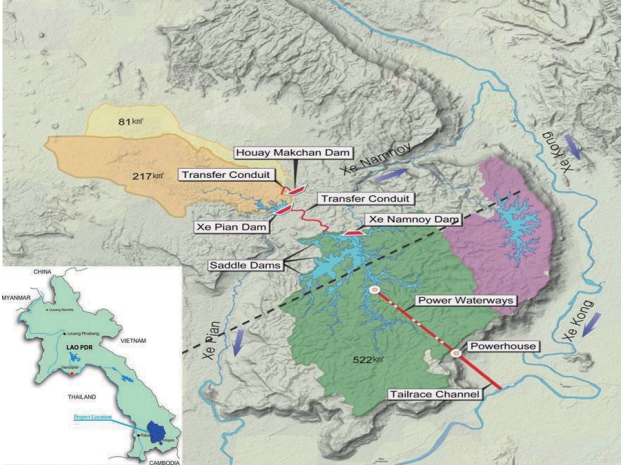


그림 1. XXHP Project 현황도

현재 SK건설은 EPC (설계, 조달 및 시공) 계약자로서 수력발전댐을 시공 중에 있으며, 한국서부발전은 향후 O&M (운영 및 유지관리) 계약자로 수력발전댐 운영 및 유지관리를 27년간 수행할 예정에 있다. 여기서 생산된 전력량의 약 90%는 태국의 전력청인 EGAT로 판매되며, 나머지는 라오스의 전력공사인 EDL로 판매될 예정이다. 사업과 관련된 자세한 내용은 본 사업의 특수목적회사인 Xe-Pian Xe-Namnoy Power Company (PNPC)의 홈페이지 [www.pnpclaos.com](http://www.pnpclaos.com)을 참조하기 바란다.



그림 2. XXHP Project 사업구조 개요

### 3. 수문관측소 구축 및 수문조사

#### 3.1 대상유역 현황

XXHP Project의 대상지역인 라오스 남부의 기후는 전형적인 몬순기후로 건기와 우기의 구별이 뚜렷하다. 건기는 북동몬순의 영향을 받아 보통 11월에서 3월까지 지속되며, 남서몬순의 영향을 받는 5월부터 10월까지는 우기가 지속되어 연강수량의 90% 이상이 우기기간에 발생된다. 대상유역인 Bolaven 고원의 강수량은 산악지형의 영향을 받아 지역적인 변동성이 매우 크며, 서쪽에 위치한 Paksong (1,300 EL. m)에서 약 3,600 mm의 연평균 강수량을 보이고 있으며, 동쪽으로 가면서 급격한 감소경향을 보여 동쪽 끝에서는 약 2,400 mm의 연평균 강수량을 나타낸다. 대상국인 라오스의 경우 Ministry of Natural Resources and Environment의 산하기관인 Department of Meteorology and Hydrology (DMH)에서 국가 기상 및 수문 관측망을 운영하고 있다. 사업 대상유역 및 인근에서 DMH에 의해 운영되고 있는 기상 또는 강우 관측소의 경우, 대부분 대상유역 외부의 북서쪽에 위치하고 있는 것으로 조사되었으며 (그림 3 참조), 사업대상유역 내에서 현재까지 지속적으로 운영되고 있는 관측소는 Nikhom 34 관측소 1개로 신뢰성에 대한 검증이 필요한 수준이었다.

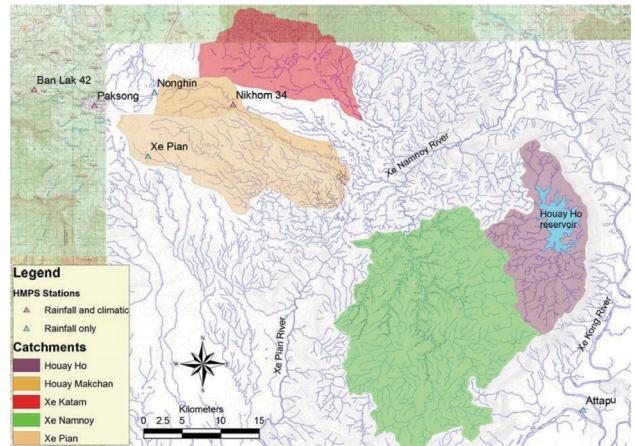


그림 3. 기존 관측소 현황 (AF Colenco, 2007)



### 3.2 수문관측소 신설 및 운영

사업 대상유역은 산악지형의 영향을 받아 강우량의 지역적인 변동성이 매우 크다. 또한 DMH에서 기존에 수행된 Champasack주의 강우 공간분석 결과에 의하면 Bolaven 고원의 동쪽으로 갈수록 강우량이 급격히 감소하는 것으로 확인되었다. 이에 SK건설 및 한국서부발전에서는 대상 유역의 북서쪽에 위치한 기존 관측소의 자료만을 이용할 경우, 신뢰성 있는 수문분석을 수행하기에는 무리가 있다고 판단하여 자체적으로 수문 관측망을 신설하고 수문관측을 직접 수행하기로 결정하였으며, 국내의 수자원 전문 컨설팅회사인 (주)이피에스엔지니어링과 함께 2007년 3월에 수문조사를 개시하여 현재까지 수문관측을 수행하고 있다.

#### 3.2.1 수문관측소 신설

수문 관측소는 수문조사 초기1차년도 및 2차년도에 걸쳐서 구축 및 보강되었다. 최종적으로 사업 대상유역에 강우 관측소 6개소, 수위 관측소 3개소, 팬 증발량 관측소 2개소 및 기상 관측소 1개소를 신설하였으며, 관측소 중 1개소 (Ban Lak 15 관측소)는 DMH에서 운영하여 수집하고 있는 장기간 자료의 신뢰성 검증을 위하여 기존 Nikhom 34 관측소 인근에 설치하였다. 수위 관측소의 경우 가장 작은 유역이며 지형의 특성 및 위치가 Xe Pian유역과

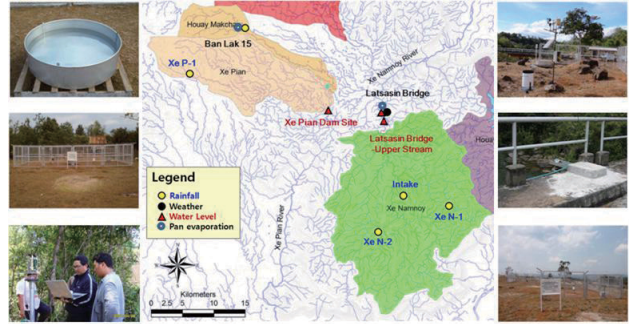


그림 4. 수문 관측소 신설 현황

유사한 Houay Makchan (81 km<sup>2</sup>)을 제외한 Xe Namnoy (522 km<sup>2</sup>)와 Xe Pian (217 km<sup>2</sup>)의 댐 site 예정지 인근에 설치하였으며, 수자원 부족량 산정의 신뢰도를 높이기 위하여 주 유역인 Xe Namnoy에는 약 600 m의 간격을 두고 상하류에 2개소를 신설하여 운영하였다. 강우 및 수위 관측소 모두 World Meteorological Organization (WMO)에서 추천하는 산악지역(Mountain regions)의 관측소 최소 밀도를 만족하게 구성하였으나, 강우 관측소의 경우 강우량의 지역적인 변동성이 매우 큰 특성을 고려하여, WMO의 추천기준보다 좀더 조밀하게 관측망을 구축하였다. 신설된 관측소의 위치, 설치사진, 정보 등은 그림 4 및 표 1과 같다.

표1. 수문 관측소 신설 현황

관측요소	관측소명	계측기 Type
강 우	Ban Lak 15	Tipping-bucket (전도형)
	Intake	
	Latsasin Bridge	
	Xe N-1	
	Xe N-2	
수 위	Xe P-1	Ultra sensor (초음파식) 및 목자판
	Latsasin Bridge	
	Latsasin Bridge-Upper Stream	
팬 증 발 량	Xe Pian Dam Site	Class A Pan
	Latsasin Bridge	
기상 요소	Ban Lak 15	Automatic Weather System
	Latsasin Bridge	

### 3.2.2 수문관측소 운영

신뢰성 높은 수자원 부존량 산정을 위한 필수요소인 양질의 수문관측 자료를 수집하기 위해서는 먼저 대상지역의 수문학적 특성이 고려된 관측망이 구성 되어야 하며, 더불어 설립된 관측소를 효율적으로 운영하여야 한다. 하지만, 신규 수력발전댐 개발사업은 특성상 산악지역, 즉 오지를 대상으로 하는 경우가 대부분이며 대상국도 대부분 개발도상국이어서, 효율적으로 관측소를 운영하기에는 일반적으로 다음과 같은 어려움이 존재한다.

- 1) 대상지역에서 수문 관측망의 운영 및 유지관리를 위한 전문인력 상주
- 2) 실시간 데이터 수집 시스템 구축 등

먼저 1)의 경우, 개발사업이 진척되어 시공단계 (Construction phase)에 접어들어 현장사무소가 설립되기 전에는 수문 관측망을 관리하기 위한 전문인력의 대상지역 상주가 사실상 불가능 하다. 또한 2)의 경우, 개발사업의 초기 진행단계에서 실시간 데이터 수집 시스템 구축을 위한 투자가 쉽지 않을뿐더러, 구축 의향이 있어도 아직까지 개발도상국의 통신 인프라가 미비한 경우가 많아 시스템을 구축하기 어려운 실정이다. 이러한 상황에서 수문 관측망을 관리하기 위한 최선의 방법으로는 최대한 빈번하게 현장을 방문하는 것이나 거리와 비용에 따른 어려움이 있으며, 계측기의 고장이 발생할 경우 즉각적인 대처가 어려워 일정기간의 자료 손실이 발생할 위험을 내포하고 있다. 본 사업에서는 관측자료의 손실을 최소한으로 줄이는 동시에 양질의 자료를 수집하기 위하여 다음과 같은 방법으로 대상지역에 현장 사무소가 설립되기 전까지 수문 관측소를 운영하였다.

#### 3.2.2.1 강우 관측소

강우량 관측을 위한 계측기로는 일정한 주기로 관측 data가 Data logger 자동으로 저장되는 전도형 (Tipping bucket) Type을 선정하였고, Data 손실을 최소화 하기 위해서, 모든 강우 관측소를 Dual system으로 운영하였다.

Dual system 운영결과, 실제로 개측 시점부터 현재까지 동일 관측소에서 2개의 계측기가 동시에 관측오류나 고장을 일으키는 상황은 발생하지 않아, 6개 관측소에서 강우관측 자료의 손실을 방지할 수 있었다. 그림 5는 Dual system으로 운영된 6개 관측소 중 Ban Lak 15 및 Xe P-1 관측소의 설치 사진을 예로 보여주고 있다.



(a) Ban Lak 15

(b) Xe P-1

그림 5. 강우 관측소 설치 사진

#### 3.2.2.2 수위 및 팬 증발량 관측소

수위관측의 경우, 보통수위표(또는 목자판)에서 읽은 값을 기준으로 하며 계측기의 수위값이 보통수위표값과 다르면 계측기의 수위값을 수정하여 오차를 보정한다 (건설교통부, 2004). 앞서 언급되었듯이, 수력발전댐 사업의 특성상 오지에 설치되는 보통수위표를 정기적으로 계측하기에는 많은 어려움이 존재한다. 하지만, 본 사업의 경우, 관측소 인근에 거주하는 현지인 존재하는 것으로 조사되어 차선책으로 전문인력은 아니나 이들 거주인들을 채용하여 보통수위표 및 팬 증발량을 정기적(2회/일)으로 관측하도록 하였으며, 양질의 수위 및 팬 증발량 자료를 수집하기 위하여 다음과 같은 방법을 병행하였다.

##### 1) DMH를 통한 현지 관측인 정기교육

일반적으로 아직까지 개발도상국의 평균 교육수준은 낮은 편이며, 특히 오지에서 거주하는 사람의 경우 그 나라의 평균보다 낮은 교육을 받았거나 아예 교육을 받지 않은 사람들이 대부분이다. 이에 본 사업에서는 현지 관측인의 관측능력을 개선하기 위하여 Champasak주의 DMH와 현지 관측인 정기 위탁교육 계약을 체결하여 사전 교육을 체계적으로 실시한 후 현장 관리업무를 수행하도록 하였으며,





이후에도 정기적으로 (1회/월) DMH의 관련 공무원이 현장 관측소를 방문하여 현지 관측인 추가교육 및 현장 관측소 관리상태 점검을 6년동안 지속하였다. 그림 6은 DMH와의 위탁교육 계약 후 Champasak주의 Pakse 기상 관측소에서 촬영한 기념사진과 DMH 공무원의 현지인 교육 모습이다.



(a) 위탁교육 계약 후 기념사진 (b) 현지인 위탁교육  
그림 6. DMH에 의한 현지 관측인 위탁교육 관련 사진

## 2) 동 시간 사진 촬영

비록 DMH에 의한 정기적인 수위 및 팬 증발량 관측방법 교육을 통하여 현지 관측인의 관측능력이 개선되었다고 판단되나, 관측결과의 정확성 검증이 추가적으로 수반되어야 한다. 이에 본 사업에서는 현지 관측인에게 디지털 카메라를 제공하여 야장기록과 더불어 동시간 사진 촬영을 수행하도록 하였으며, 최종적으로 야장과 사진을 비교하여 관



(a) 보통수위표 (b) Class A pan  
그림 7. 현지 관측인에 의한 사진 촬영 결과

측결과를 검증하였다. 그림 7은 현지 관측인에 의해 촬영된 계측사진을 보여준다.

### 3.2.2.3 Data Download 및 계측기 유지관리

보통수위표와 팬 증발량의 경우 현지 관측인을 고용한 관측 대행이 가능했지만, 노트북을 이용하여 주기적으로 수행해야하는 Data download와 계측기의 유지관리 부분에 대한 부분은 현지 거주인을 통한 대행이 용이하지 않았다. 이에 본 사업에서는 대안으로 수문조사를 위해 연 6~7회의 현장방문 시 계측기의 유지관리와 Data download를 병행하고, 나머지 기간에는 검증된 현지 업체와 유지관리 대행 계약을 체결하여 최소 1회/월의 주기로 수문 관측소 유지관리를 수행하여 장비고장에 의한 자료 손실을 최소화하도록 노력하였다. 그림 8은 Data download 및 계측기 유지관리 사진을 보여준다. 이와 별도로 연간 1회의 관측소 유지관리 관련 자체 감사를 통하여 개선점 및 조치방안을 간구하고 그 품질 확보를 위해 노력을 기울였다.



(a) Data Download (b) 계측기 유지관리

그림 8. Data download 및 계측기 유지관리 사진

표 2. 수문조사 결과

요소	관측지점	측정 횟수						합계
		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	6차년도	
유량	Latsaisn Bridge	14	40	45	18	25	26	168
	Xe Pian Dam Site	15	16	25	27	29	28	140
	Latsaisn Bridge - Upper Stream	-	33	49	27	26	26	161
부유사	Intake	14	7	8	6	5	6	46

### 3.3 수문조사

신뢰성 높은 수자원 부존량 산정을 위해서는 정확한 유량 측정 자료를 기반으로 수위-유량 관계곡선식이 개발되어야 한다. 이에 본 사업에서는 수위 관측망 신설에 의한 관측자료 수집과 더불어, 신뢰성 높은 수위-유량 관계곡선식 개발을 위하여 유량측정(유속 및 하천단면측량)을 수행하였으며 이와 별도로 Intake 지점의 부유사 측정을 수행하였다. 수문조사를 위한 현장방문은 총 6년간 연 평균 6~7회 수행되었으며, 1회 현장방문 시 평균 7일 정도 수문조사를 수행하였다. 표 2는 6년간의 수문조사 결과를 나타내며, 그림 9는 수문요소 측정사진을 나타낸다.



(a) 유속 측정      (b) 단면측정      (c) 부유사 측정

그림 9. 수문요소 측정 사진

## 4. 수문관측 결과의 활용

### 4.1 강우자료

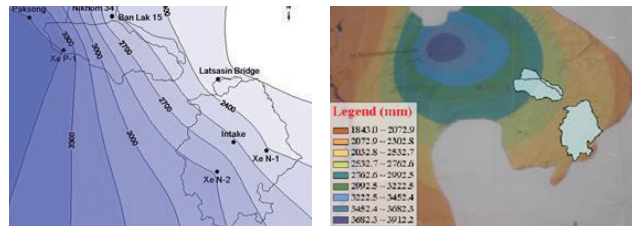
#### 1) 기존 관측소 관측자료 검증

본 사업의 수문관측은 2007년 3월부터 개시되었다. 하지만, 발전가능성에 대한 정확한 평가를 위해서는 장기간의 수문자료를 이용한 댐 운영 시뮬레이션이 수행되어야 한다. 이를 위해 관측개시 전인 2007년 이전의 강우 시나리오 DMH에 의해 운영되는 Nikhom 34 관측소 등 인근 기존 관측소의 과거 관측자료를 이용하여 생성해야 한다. 본 사업에서는 앞서 언급된 것과 같이 Ban Lak 15 관측소를 Nikhom 34 인근에 신설하였으며, 두 관측자료의 비교를 통하여 DMH에서 수집하는 강우 자료에 대한 검증을 수행한 후 과거 강우 시나리오를 생성하도록 하였다.

#### 2) 유역 평균 강우량의 산정

신설된 6개의 강우 관측소와 DMH에서 운영하는 사업 대상지역 인근의 기존 관측소 2개소의 관측자료를 이용하여 강우량의 공간분석을 수행할 수 있었으며, 대상유역에 대

하여 보다 정밀한 유역 평균 강우량을 산정할 수 있었다. 또한, 공간분석결과 Bolaven 고원의 강우 패턴은 동쪽으로 갈수록 감소하지만 북쪽으로 갈수록 증가하는 것으로 확인되었다. 신규 공간분석결과와 기존 DMH에서 국가 관측망을 이용하여 제시한 등우선도와 비교했을 때, 사업대상유역의 강우 발생량이 기존에 추정된 양보다 좀 더 풍부하다는 것을 알게 되었다 (그림 10 참조).



(a) 등우선도 (신규)

(b) 등우선도 (기존, DMH 작성)

그림 10. 사업지역내 강우분포 비교

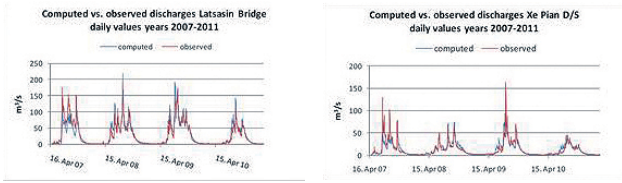
### 4.2 수위 및 유량측정 자료

#### 1) 댐 상류 자연유량 산정

지속적으로 관측된 수위와 유량측정 자료를 이용하여 총 6년간에 걸쳐 수위-유량관계 곡선식을 지속적으로 개발 및 개선하였으며, 이를 이용하여 Xe Namnoy 및 Xe Pian 하천의 댐 상류에서 발생하는 자연유량을 정밀하게 산정할 수 있었다. Main 유역인 Xe Namnoy의 경우, 약 600 m의 간격을 두고 상하류에 위치한 2개소의 유량자료를 상호비교·검토하여 산정결과의 정확도를 추가적으로 개선하였다.

#### 2) 강우-유출 모형 구축

산정된 유량자료들은 기본설계 단계 (Basic Design phase) 시 장기간 유량시나리오 생성을 위한 강우-유출 모형의 매개변수 추정을 위해 이용되었으며, 이를 통하여 기존 F/S의 수자원 부존량 산정 및 댐운영 시뮬레이션 결과를 개선할 수 있었다. 그림 11은 Xe Namnoy 및 Xe Pian의 강우-유출 모형의 매개변수 추정결과를 나타낸다.



(a) Xe Namnoy

(b) Xe Pian

그림 11. 강우-유출모형 매개변수 추정결과

### 4.3 수자원 부존량 산정

수문관측을 통하여 수집한 수문자료를 이용하여 기본설계 시 수자원 부존량을 재 산정하였으며, 기존 2007년에 수행했던 F/S 때의 산정결과보다 사업대상구역의 수자원 부존량이 좀 더 풍부하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 개선된 강우-유출 모형을 통해 생성된 장기간 유량시나리오를 이용하여 댐 운영 시뮬레이션을 수행한 결과, 기존에 계획되었던 시설용량의 증가가 가능한 발전수량을 보유한 것으로 확인되었다. 본 사업에서는 이러한 결과를 토대로 기존에 계획했던 시설용량 390 MW에서 최종적으로 410 MW로 증가시켜 사업의 경제성을 개선하였다.

## 5. 결론 및 제언

본 기고에서는 Xe-Pian Xe-Namnoy Hydroelectric Power Project의 수문관측 사례를 중심으로 수력발전댐 사업의 성공적인 개발을 위한 미계측 구역의 수문관측소 운영방법 및 결과의 활용에 대하여 간략히 소개하였다.

본 사업은 수문조사를 사업개발 초기단계에서부터 자체적으로 수행하여 양질의 수문관측 자료를 수집하였으며, 이를 토대로 수자원 부존량 및 발전가능량 평가결과를 지속

적으로 개선하였고, 최종적으로 시설용량을 기존에 계획했던 390 MW보다 증가한 410 MW로 확정하여 사업을 진행하는 결과를 얻을 수 있었다. 아울러 수집되는 자료는 향후 효율적인 댐 운영을 위하여 중요한 자료가 될 것으로 기대하고 있다.

또한, 수문조사와 관련한 이러한 전반적인 노력들은 발전량 및 사업에 대한 신뢰도를 향상시키게 되었으며 투자는 행들에 소개되어 사업에 대한 투자 의사결정에 긍정적인 매개가 되었다고 판단된다.

본 기고에 소개된 사례가 현재 라오스, 미얀마, 파키스탄, 네팔 등을 대상으로 XXHP Project와 비슷한 BOT 방식의 민관 공동 개발 해외 수력발전 투자개발사업을 추진 또는 진행하고 있는 국내사와 국내 발전분야 관련 공기업들에게 사업의 성공적인 개발을 위한 좋은 참고자료가 되기를 기대한다.

### [References]

1. 건설교통부 (2004), 수문관측매뉴얼
2. AF-Colenco, et al. (2011). Xe Pian-Xe Namnoy Hydropower Project. Basic Design Report.
3. Colenco, (2007). Xe Pian-Xe Namnoy Hydropower Project. Feasibility Study Report.
4. WMO (1994). Guide to Hydrological Practices, Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and Other Applications, WMO-No.168.