

인도네시아 Cisangkuy 유역 수자원 운영에 대한 연구

Study for Operation of Water Resources in Cisangkuy Basin of Indonesia

김태원*, 김성만*, Willam M. Putuhena**, 고익환***

Tae Won Kim, Sung Man Kim, Willam M. Putuhena, Ick Hwan Ko

요 지

인도네시아는 수자원을 관리하는 기관이 총 9개 부처이지만 지역 단위로 가면 각각의 에이전시가 존재하는 등 복잡한 이해관계가 얽혀 있어 효율적인 수자원 관리 및 운영 기술에 많은 어려움이 있다. 이에 인도네시아 국립 수자원연구소(PusAir, Puslitbang Sumber Daya Air)와 공동으로 Cisangkuy 유역 내 다양한 시설물의 연계운영 효과를 분석하여, 한정된 수자원을 다양한 수요처에 원활히 공급함으로써, 지역민과 관리기관 간의 이해관계를 해소하고 최적의 수자원 활용방안들에 대한 연구를 수행하고 있다. 본 연구에서는 Cisangkuy 유역 내 Cisangkuy 강 상류부의 기존 수력 댐 운영과 상수량 증대를 위해 계획 중인 신규댐에서의 추가용수 공급을 고려한 연계운영 효과분석을 수행하여 수자원의 효율적인 활용을 위한 기초자료를 제시하고자 한다. Cisangkuy 유역에 대하여 현재 용수체계에 대한 모형의 적정성 검토를 수행하였으며, 기존 수력댐 저수지 시스템 운영효율에 대하여 물수지분석을 검토한 결과, 현 운영체계보다 최적 운영시 수력발전소 발전용량이 증가되는 것으로 검토되었다. 이와 같은 모형 구축자료는 현재 Cisangkuy 유역에 대하여 체계적인 운영방안이 없는 상태에서 대상유역 내 다양한 시설물 연계운영효과 도출을 위한 자료가 될 수 있으며, 국내 연구진들이 향후 인도네시아 수자원활용 계획 수립 시 기초자료 활용측면에서 유용할 것으로 예상된다.

핵심용어 : Cisangkuy 유역, KModSim 모형, 유역 네트워크, 용수체계, 물수지 분석

1. 서론

인도네시아는 급속한 경제성장과 도시화 과정에서 인구와 산업의 과도한 도시집중으로 한국이 산업화 과정에 겪었던 것보다 심각한 환경문제에 직면하고 있으며, 자카르타와 반둥을 포함하는 광역 수도권 지역의 물 부족과 수질 오염, 환경문제가 위험한 수준에 도달하였다. 특히, 짜따름강 중·상류에 위치한 인도네시아 3대 도시인 반둥시는 인구의 고밀화로 인하여 식수가 매우 부족한 실정이다. Cisangkuy 유역은 복잡한 수계 및 다양한 관리주체로 인한 수자원 관리 및 운영에 문제가 있기 때문에 유역의 가용 수자원을 최대한 효율적으로 활용할 수 있도록 효율적인 물관리 체계 수립이 필요하다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 인도네시아 정부에서는 Cipanujung 및 Cileunca 기존 수력 댐의 활용, 신규 댐의 건설 등 구조적인 대책과 함께 관리시스템의 정비 등 비 구조적인 노력을 통해 문제를 해결하려고 하고 있다.

본 연구의 목적은 인도네시아 Citarum 상류에 위치한 Cisangkuy 유역내 다양한 시설물의 연계운영 효과를 분석하여, 수자원의 효율적인 활용을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

* 정회원 · (주)지티이 대표이사
* · (주)지티이 수자원부 과장
** · PUSAIR Head of Experimental Station
*** 정회원 · (주)유신 부사장

· E-mail : hydrokim@naver.com
· E-mail : sisa59@naver.com
· E-mail : william_putuhena@yahoo.com
· E-mail : ihko@yooshin.co.kr

2. Cisangkuy 유역 현황

Cisangkuy 강은 반둥시 남측에 위치하며, Citarum 강의 제1지류에 해당한다. Cisangkuy 강의 유역면적은 약 279.21 km²이며, 유로연장은 49.78 km가 된다. 과업위치도와 주요시설물 현황은 <그림 1>과 같으며, 유역특성은 <표 1>과 같다. 과업대상 지역내의 주요 시설물로는 댐 2개소(Cipanunjang, Cileunca), 인공 터널 2개소(Saluran, Cilaki Beet), 수력발전소 3개소(Plengan, Lamajan, Cikalong), 취수장 1개소(Cikalong) 및 기타 부속 수리시설물 등으로 구성되어 있다. 상류에 위치한 2개의 댐은 Cisangkuy 상류 및 인근 Cilaki 및 주변유역으로 부터 터널 2개소를 통해 유입된 유량을 저류, 하류 발전소 3개소에 용수를 공급하고 있는 발전용수 전용댐이다.

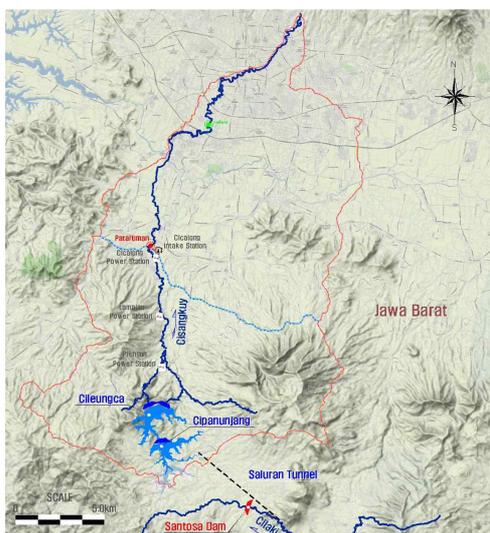


그림 1. Cisangkuy 유역

표 1 유역특성

| 구분 | 유역면적(km ²) | 유로연장(km) |
|------------------|------------------------|----------|
| Cisangkuy 강 유역 | 279.21 | 49.78 |
| Cipanunjang 댐 | 76.36(*) | 7.67 |
| Cileunca 댐 | 20.62(**) | 12.95 |
| Pataruman 유량관측지점 | 133.80 | 23.95 |

주)

- 1.(*): Cipanunjang으로 유입되는 Saluran터널 유역면적 포함시
- 2(**): Cileunca댐으로 유입되는 Cipanunjang 댐 유역 면적(* Saluran 터널 제외) 포함시
- 3.Pataruman 유량관측지점 기준 유역면적 (* Saluran 터널 제외)

3. 수문현황 조사 및 분석

Cisangkuy 유역 인근에 반둥시의 Bandung 기상관측소 자료를 분석한 결과, 월평균 기온은 23.3℃, 최고기온과 최저기온의 범위는 28.8℃~19.3℃를 나타내는 것으로 조사되었고, 일조율 및 상대습도는 각각 58.1%, 78.3%인 것으로 조사되었다.

과업지역 인근에 위치한 우량관측소 중 Cisangkuy 유역 내에서 금회 과업지역과 연관이 있는 관측소는 6개소이다. 이 중 20개년 이상의 일 강우기록을 보유한 관측소는 Chinchona(PLN) 1개소이며, 결측된 년도의 자료를 제외한 관측소별 연 강우량을 살펴보면 비록 인접한 관측소일지라도 동일연도 최대 1,000mm 이상까지 차이를 보임으로서 보유년수 및 결측일수와 함께 강우기록에 대한 신뢰성에 문제가 있는 것으로 판단된다. 강우 관측소를 서로 보완한 연 강우량(1984년~1.992년, 1994년~2012년)은 그림 2와 같다. Pataruman 수위 관측소와 비교한 결과 강우 패턴은 유사한 것으로 검토되었다.

Cisangkuy 유역 내의 Pataruman 유량관측소를 선정하여 유황분석을 하였다(그림 3 참조). 과업지역 내 수문특성 분석을 위하여 획득한 자료 중 가장 장기간의 자료를 보유한 Chinchona 관측소의 자료 중 결측치가 대체로 없는 10개년(1994년~2003년)의 일강우자료와 Pataruman 유량관측소의 11개년(2002~2012년) 유량관측 자료를 분석하였다. 우량관측 자료를 이용하여 강우량의 증감

추세를 분석하기 위하여 이동평균법을 적용하였으며, 적용결과 강우량이 뚜렷이 증가하는 패턴을 나타내고 있다고 판단하기는 어려운 것으로 검토되었다. Chinchona 관측소에 대하여 1일, 2일, 3일 최대강우량과 연강우량에 대한 계열상관도를 분석한 결과, 통계학적 신뢰수준 95%범위 내에서 모든 지속기간에 대하여 상관성이 없는 것으로 분석되었다. 이것은 연 최대강우 자료가 이전 연도의 강우와 상관성이 없는 독립적으로 발생하고 있음을 의미한다. 연최대강우 시계열 자료의 무작위성(randomness)을 분석하기 위하여 3개의 검정(Run 검정, Turning point 검정, Anderson exact 검정)을 수행하였다. 또한 강우자료의 경향성(trend) 분석을 위해 3개의 검정(Kendall 검정, Hotelling-Pabst 검정, Wald-Wolfowitz 검정)을 수행하였다. 1일, 2일, 3일 연최대강우량 및 연강우량에 대하여 무작위성 및 경향성을 분석한 결과 모든 지속시간에서 공히 무작위성과 무경향성을 갖고 있는 것으로 검토되었다.

집중호우의 발생빈도 분석은 강우자료의 한계로 인해 간접방법으로 Pataruman 유량관측지점의 유출특성을 분석하였다. Pataruman 유량관측지점에서의 관측유량이 5m³/s, 10m³/s, 15m³/s를 기준으로 설정하여 초과발생 일수를 도출하였으며, 이에 대해 2년, 5년 단위로 이동평균법을 적용하여 분석하였다. 이동평균법에 의한 분석결과, 유출량은 Chinchona 유량관측소와는 달리 증가하는 현상을 타나내고 있는데, 이는 가용 자료한계로 인한 분석기간의 차이(Chinchona 1994~2003, Pataruman 2002~2012)에 따른 것으로 판단된다. 그러나 유출량에 가장 큰 영향을 미치는 부분이 강우임을 감안 시 과업지역의 경우 최근에 강우 및 유출이 증가하고 있다고 판단하였다.

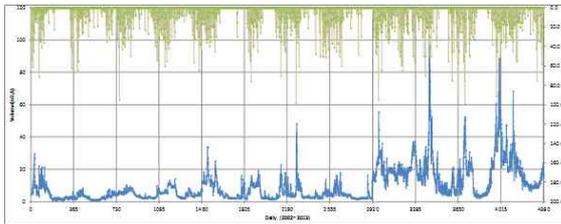


그림 2. 강우량 보완 결과

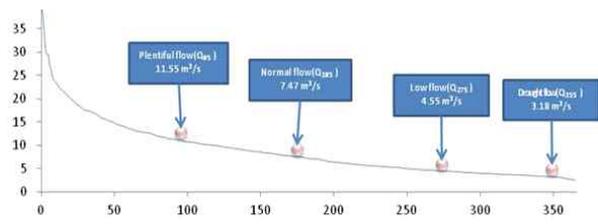


그림 3. Pataruman 유량관측지점 유황곡선

3. 운영현황 분석

Cisangkuy 유역에 대한 현 용수체계를 분석하기 위해 소유역을 토대로 KModSim 모형의 네트워크를 그림 4와 같이 구축하였다. 유역에 대한 유출분석을 수행하기 위해 분석대상지점 상·하류에 위치한 수위표 지점 등의 실측자료를 이용하는 방법, 강우-유출모형에 의한 방법이 있는데, 현재 조사된 일 강우의 경우 자료의 신뢰성 문제로 인해 금회 물수지 분석에서는 강우-유출 모형에 의한 유출량 산정을 보류하였다. 본 과업지역인 Cisangkuy 강 유역의 경우 Pataruman 유량관측소가 운영중에 있으며, 그 관측기록 년 수가 12개년(2001~2012년)으로 실측 자료를 유역별 대비유량법으로 적용하여 자연유출량을 산정하였다. Pataruman지점의 자연유출량을 산정하기 위해 Cileunca 저수지의 방류량, 관개용수를 고려하여 산정하였으며, 산정방법은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{자연유량} &= \text{실측유량} + \text{순물소모량(생활, 공업 및 농업용수)} \\ &= \text{Pataruman(자연유량, Cileunca 저수지 상류지역 제외)} \\ &= \text{Pataruman(관측유량)} - \text{Cileunca(계산방류량)} + (\text{관개면적} \times \text{단위용수량} \times 65\%) \end{aligned}$$

Pataruman 관측소의 자료보유기간은 2001년~2012년(일자료)으로 Saluran 터널(2002년~2012년, 일자료)과 Cilaki Beet(2002년~2012년, 일자료)의 관측유량보다 1개년 이상 많은데 따라 비유량법 적용시 2002년~2012년(11개년, 일자료) 자료를 최종 적용하여 물수지 분석을 수행하였다. 한편, Pataruman 지점의 2002년~2012년의 관측자료(일자료)분석결과 평균갈수량(Q355)인 3.18m³/s보다 작은 유출량 발생일수는 1,228일로 조사되었으며 이수 안전도는 69.4%, Q95% 유량인 3.37m³/s보다 작은 유출량 발생일수는 1,305일로 조사되었으며 이수 안전도는 67.5%인 것으로 검토되었다(그림 5와 6 참조).

과업지역의 현재 용수체계를 검토하기 위해서 검토조건으로 모의기간은 2002~2012 (11년, 일자료), 기존 저류지 Targe storage 우선순위 적용, Cikalong 취수장 1.9m³/s(현장조사 결과), 기존 저류지 2개소 운영 및 발전소 3개소 운영에 따른 9개년(2004~2012년) 월평균 발전량 자료를 적용하여 용수체계에 대한 물수지 분석결과 Pataruman 관측지점의 이수안전도는 Q95% 유량 기준 66.72%이고 Pataruman 관측유량 대비 Q95% 유량 기준 (+)0.78%의 오차를 보이고 있다. Pataruman 관측지점의 2002~2012년 일자료의 실측치와 ModSim 모의치를 비교한 결과 결정계수(R²)는 0.999, 모형 효율성 계수(ME)는 0.999, 평균제곱근 오차(RMSE)는 13.65m³인 것으로 검토됨에 따라 현재 운영체계에 대한 모형의 적정성을 확인하였다.

현재 용수체계에 대해 현재 관측된 수위를 통해 도출된 연평균 대표운영곡선과 최적화 운영곡선 적용시 검토를 수행하였으며, 검토조건으로 모의기간은 2002~2012(11년, 일자료), 기존 저류지 대표운영곡선 및 최적화 운영곡선 적용, Cikalong 취수장에서 1.9m³/s 취수조건, 발전소 3개소 월평균 발전량 운영 자료를 적용하여 최대건조시기 발생시 저수지 이수안전도 100% 달성 및 최대 에너지 생산을 위해 가능한 많은 물을 유지하는 최적화된 저장 운영곡선을 시행착오법을 통해 검토하였으며, 검토된 운영 곡선 적용 시 물수지 변화 검토하였다.

Cipanunjang, Cileunca의 운영수위를 조사한 결과 건기와 우기에 따라 일정한 패턴을 나타냈다. 대체로 우기시기인 12월~2월은 저수지의 수위를 최대한 끌어올려 건기시에 방류된 물을 보충하는 시기이며, 5월 까지도 건기가 발생하는 시기에 대비하여 우기시 보충된 물을 최대한 보존하였으며, 최악의 건기시기인 9월~11월은 방류하는 시기인 것으로 검토되어 에너지 생산을 위한 최적 운영면에서는 대체로 만족한 결과를 보이는 것으로 판단되나, 하류지역의 필요관개용수 공급측면에서는 9월~12월에 부족함을 발견하였다. 이에 따라 비록 현재 운영중인 저류지의 경우 주로 하류부 수력발전소 운영을 위해 운영되기는 하나 발전뿐만 아니라 하류부 용수공급 및 관개용수 면에서도 다각적으로 활용이 가능한 최적운영곡선을 시행착오를 통해 검토하였으며 검토결과는 표 2와 같다.

5. 결론

본 연구에서는 인도네시아 Cisangkuy 유역 내에 대하여 유역 현황, 수문 분석 및 각종 수리구조물들에 대한 현황 조사 및 운영자료들을 분석하였으며, 유역 내 위치한 Cipanunjang, Cileunca 댐과 3개의 발전소(Plengan, Lamajan, Cikalong) 및 취수장의 연계운동을 분석하였다. 연계운영 분석을 위한 모형은 KModSim을 적용하였으며, 분석결과, 저수지의 운영 수위를 검토한 결과, 건기와 우기에 따라 일정한 패턴을 가지고 있는 것으로 분석되었으며, 과업지역의 현재 용수체계에 대한 모형의 적정성 검토를 수행하였다. 기존 수력댐 저수지 시스템 운영효율에 대하여 검토한 결과, 현 운영체계보다 최적 운영시 수력발전소 발전용량이 증가되는 것으로 검토되었다.

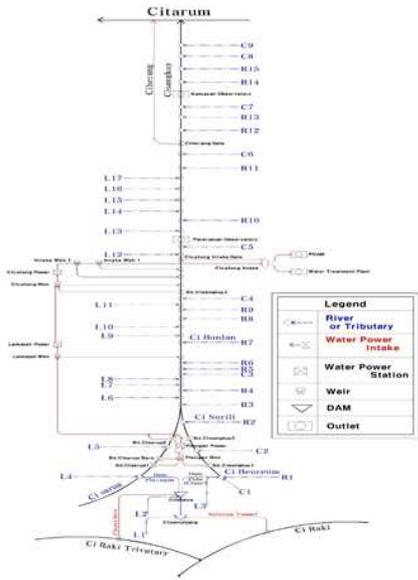


그림 4. 유역 네트워크 모식도

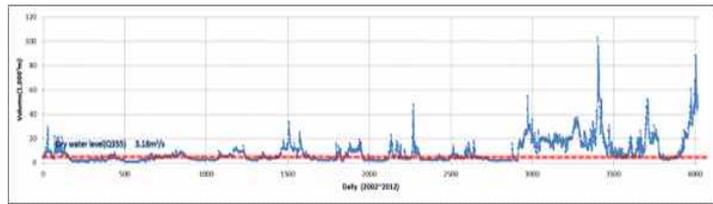


그림 5. Pataruman 지점 장기 유출량 (2002~2012년, Q355기준)

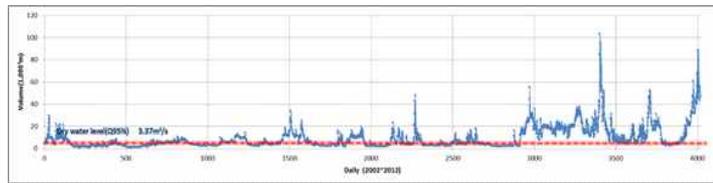


그림 6. Pataruman 지점 장기 유출량 (2002~2012년, Q95%)

표 2 현 운영과 최적운영의 효과 검토

| 구분 | | 연평균 발전용량(1,000m³) → 건기시 공급 | | |
|-----|----------|----------------------------|---------|------------------|
| | | 현 운영시 | 최적 운영시 | 증감 |
| 발전소 | Plengan | 534,255 | 548,366 | ↑ 14,111(2.64 %) |
| | Lamajan | 572,477 | 587,981 | ↑ 15,504(2.71 %) |
| | Cikalong | 618,352 | 639,375 | ↑ 8,717(1.41 %) |

| 구분 | 현 운영시 | | 최적 운영시 | | 증감 |
|----------------|--------|---------|--------|---------|-------|
| | 안전도(%) | 부족(Day) | 안전도(%) | 부족(Day) | |
| Cikalong 취수장 | 97.3 | 108 | 98.2 | 73 | ↑ 0.9 |
| Pataruman Q95% | 63.1 | 1,481 | 64.3 | 1,436 | ↑ 1.2 |
| 농경지 Ciherang | 94.5 | 223 | 95.3 | 190 | ↑ 0.8 |

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업 글로벌기술협력 분야의 연구비지원(과제번호 15CTAP-CO96288)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 고익환, 박명기, 박상근, 김정엽, 박종택(2002) “실시간 물관리 운영시스템 개발(II) - 저수지군 모의운영 모형개발 부문-”, 2002 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 1481-1484.
2. 김승권, 이용대, 박명기(2005). 낙동강 수계 실시간 댐군 최적 연계운영의 시너지 효과, 2005년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 289-293.
3. KModSim : River Basin Management Decision Supportsystem User Manualand Documentation, Colorado State University·Korea Institute of Water & Environment, 2007. 7