

유역권 물수지 산정방법의 개선

양 수 배 (한국종합기술개발공사 상무)

이 상 렬 (한국종합기술개발공사 부장)

장 정 호 (한국종합기술개발공사 과장)

1. 서 론

물수지 분석(Water budget analysis or water balance computation)이란 임의유역에 대한 장래의 용수수요량과 가용수량(하천유량 및 댐공급량)을 비교함으로써 지역별, 시기별 장래에 대한 물부족을 예측하여 용수공급계획을 수립하기 위한 분석과정을 말한다.

용수수요량은 크게 구분하여 생활용수, 공업용수, 농업용수 및 하천유지용수가 있으며, 각 목적별 용수는 시기별로 요구량이 틀리고 물의 순환구조가 상이하여 이용 후에는 하천으로 복귀하는 수량(회수수) 및 지체시간이 같지 않으며, 공급형식도 다양하여 하천 표류수를 취수하는 방법, 댐에서 관로를 통한 급수방법, 댐에서 방류한 물을 하류에서 취수하는 방법, 지하수를 이용하는 방법 등이 있고, 물이동에 있어서도 소유역내에서의 물이동, 소유역간의 물이동, 유역밖으로의 물이동, 유역밖에서의 물이동유입 등이 있어 실로 그 방법 및 구조가 다양하여 이를 완벽하게 적용할 수 있는 방법이 실로 지난하다.

또한 유역내에는 각종 목적으로 건설된 댐군이 있으며, 이들 댐들은 각기 운영방법이 상이하여 숫적으로 가장 많은 관개용수공급전용 댐, 식수전용 댐, 다목적 댐, 발전단일목적 댐, 또는 복합적으로 운영하는 댐이 있어 이들 댐군의 방류량과 잔여유역의 자연유량을 합친 가용수량의 분석도 지난할 것으로 판단된다.

한편 대단위 유역권에 있어서 용수공급을 하는 다목적 댐은 대부분 유역의 중·상류에 위치하고 있고 용수수용량이 크게 발생하는 지점은 중·하류에 집중되어 있어 적기에 하류의 물부족을 상류에 위치한 댐에서의 공급은 실로 쉽지 않다 하겠다. 이는 생공용수는 계절별 기상상태(기온, 강수량 등)에 따른 수요량의 변화가 적으나 유역권에서 대부분을 차지하는 농업용수는 기상과 밀접한 관계에 있어 그 수요량의 변화가 클 뿐만 아니라 실로 예측 불가능한 일이다. 예를 들면 낙동강유역에서 가장 큰 저수량을 갖고 있는 안동댐은 낙동강 하류부까지 용수공급을 하고 있으나 댐에서의 방류량이 하류에 도달하는 시간이 매우 길고 이는 갈수시에는 더욱 지체시간이 길다. 그러므로 하류부의 관계용수를 미리 예측하여 적기에 공급하는 일은 사전에 잔여유역의 유출량의 예측은 물론 강우량까지 예측이 가능하여야 만이 정확한 수량을 사전에 공급할 수 있으므로 현실적으로 불가능한 일이라 하겠다.

이와 더불어 다목적 댐은 그 어휘부터 여러 가지 목적을 위해 건설된 댐으로써 그 목적을 달성하기 위한 저수지의 운영방법이 서로 이율배반적이어서 치수목적으로는 저수지를 최대한 비워두어야 유리하고, 용수공급목적으로는 최대한 물을 저류시켜야 하며, 발전목적에서도 발전량은 가능한 한 높은 저수지 수위에서 발전하여야만 많은 에너지를 창출할 수 있으나 수력이 갖고 있는 최대 장점인 침투발전을 담당하는 댐에서는 가능한 한 일정한 침투시간에만 발전하고 비 침투시간대에는 발전하지 않는 것이 유리하다.

이와 같이 각 목적별로 필요한 시기나 시간 또는 목적달성을 위한 수요의 예측이 다양하고 이와 더불어 목적을 달성치 못할 경우에는 사회적으로 미치는 영향이 실로 천차만별이어서 복잡한 사회에서 이들 모두의 목적을 최대한 반영할 수 있는 운영방법(모든 목적합수와 유출량의 예측과 더불어 그에 따른 피해손실 및 사회적 문제점 등이 사전에 예측 가능하여야만 함)은 계속적으로 연구·조사하여야 할 과제라 하겠다.

따라서 이러한 복잡한 구조 및 형식을 1개의 모형에 반영하여 표준화된 모형에 의해 정성적·정량적으로 실제에 보다 가까운 지역별, 시기별 가용수량 및 물부족량을 예측코자 시도하였다.

2. 대유역권의 구조

일반적으로 물수지의 정확성은 수요량과 공급량의 정확한 추정을 기본으로 하고 있으며, 유역내에 지역적으로 편중된 수요량과 공급량의 구조를 적절히 해석·구현할 수 있어야 하겠다.

대유역권의 구조는 수많은 하천의 직렬 및 병렬로 연결된 구조와 더불어 용수를 공급하는 댐에서도 직렬과 병렬로 하천과 연결되어 있다. 대유역권 내의 수많은 저수지 군(group)에 의해서도 하천유량이 조절·방류되고 있으며 다양한 방류방식을 갖고 있다.

댐의 운영목적에 분류하여 보면 관개용수공급전용 댐, 식수전용 댐, 공업용수전용 댐, 발전단일목적 댐, 다목적 댐 등으로 구분할 수 있다.

공급방식에 있어서도 저수지내에서 취수하여 관로를 통한 용수공급, 하류방류를 통한 용수공급 등이 있고, 1개의 댐에 있어서도 하천유지용수 공급량, 댐의 누수량, 상시발전수량 등과 같이 상시 방류되는 물이 있는가 하면 특정 일정시간대에만 방류하는 첨두발전, 불특정 시간대에 방류되는 용수공급 등이 있다.

한편 댐의 구조적인 형식에 있어서도 남강댐과 같이 홍수시에는 여수로를 통한 방류량이 하류로 방류되지 않고 사천만으로 방류되어 월류량이 유역변경되는 댐이 있는가 하면 유역변경방식의 발전댐(섬진강댐, 도암댐 등)이나 유역변경식 공급댐(저수지내에서 취수하여 공급하는 모든 댐) 등이 있다.

또한 물이동에 있어서도 소유역내에서의 물이동, 소유역간의 물이동, 유역밖에서의 물이동 유입, 유역밖으로의 물이동 등이 있고, 물이동의 주 목적이 생활용수공급, 공업용수공급, 관개용수공급 등으로 구분할 수 있고 목적에 따라 물이동량이 계절별로 차이를 나타낸다. 이와 더불어 취수원도 다양하여 하천표류수, 저수지, 지하수 등으로 구성되어 있다.

이와 같이 대유역의 물수지분석은 앞에서 언급된 모든 사항이 적절히 표현, 해석, 구현될 수 있어야 하겠다.

3. 저수지 운영방식

앞에서 언급된 바와 같이 대유역권 내에는 수많은 저수지 군이 있으며, 이들 댐들은 건설 목적에 따라 저수지 운영방식이 상이하다.

저수지의 운영방식을 크게 분류하면 상시 일정한 유량을 방류하는 ① 일정량방류방식, 필요한 량만을 공급하는 ② water-deficit supply 방식으로 구분할 수 있다.

① 일정량방류방식

이 방식은 사전에 결정되어진 일정량을 상·하류의 여건(상류측 : 저수량, 유입량, 상류의 홍수상황, 하류측 : 하류의 유량과 수위, 수요량과 부족량 등)을 고려치 않고 방류하는 방식으로 실제적으로는 엄밀한 의미의 일정량 방류방식은 존재치 않는다. 단지 첨두발전방식에 있어서는 첨두시간에 발전한 거의 일정한 수량(저수지의 수위에 따라 다소 변동됨)을 역조정지에서 조정하여 방류하게 되므로 일정량 방류방식과 유사한 효과를 보는 실제적인 운영방식이다. 일정량방류방식의 저수지로 운영코자 계획된 댐이라 하더라도 실제적으로는 주위 여건에 따라 일정량 이상으로 방류하거나 적게 방류하게 되며, 이는 저수지의 수위가 사수위에 접근할수록 방류량에 영향을 미치고, 하류의 용수부족 상황에 따라서도 그 영향을 받는다. 생·공용수공급전용 댐의 경우에 있어서 생·공용수 수요량은 계절적인 변화가 다소 있으나 일정량방류방식과 유사하다.

② water-deficit supply 방식

이 방식은 물부족이 발생하였을 때에만 공급하는 방식으로 관로(또는 수로)를 통한 공급방식 이외에는 물부족량을 정확하게 공급하기에는 현실적으로 불가능한 방식이다. 특히 하류 방

류를 통하여 공급하는 방식에 있어서는 댐 유역을 제외한 잔여유역의 유량으로 공급가능한 수량을 제외한 부족량을 공급하여야 하며, 댐에서의 방류량이 하도를 통하여 유하하면서 잔여 유역의 유량과 합치는 과정에서 하도조절로 인하여 댐에서 방류한 유량이 smooth하게 변화되며, 하류부의 용수부족은 생활용수, 공업용수, 농업용수, 하천유지용수 등으로 구분할 수 있고, 각 소유역의 물부족은 상호간에 관련이 있어 가장 가까운 소유역의 물부족량을 공급하면 이 소유역에 공급한 물은 회귀수를 발생시켜 보다 하류부의 용수 부족량을 감소시키는 역할을 하며 각 목적별 수요량은 회귀율이 상이하고 관개용수에서도 수리안전담, 수리불안전담, 관개 전 등에 의한 토지이용상황에 따라 다르고, 저수지, 양수장, 지하수 등의 공급원에 따라서도 상이하므로 이를 상류에 위치한 댐에서 정확히 정량적으로 실시간에 파악하기란 곤란하다.

또한 water-deficit 공급방식에 의한 댐 용수 공급은 취수지점까지 도달하는 데 지체되는 시간을 고려한 취수지점에서의 잔여유역의 유량과 하류 물부족량을 정량적으로 정확히 선행하여 예측이 가능하여야만 부족량만큼 만을 선행하여 공급할 수 있으나 현실적으로 불가능한 실정이며, 특히 관개용수는 강우량에 지배를 크게 받으므로 강우량을 정확히 선행하여 예측한다는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 댐의 하류방류를 통한 용수공급은 유효하게 수요를 충족시키지 못하는 손실량이 발생하게 되며 이를 이론적으로 적용하기가 불가능한 실정이다.

③ 침투발전방식

전력수요는 시간에 따라 그 크기가 변화하며 전력량 사용 곡선이 Sine 곡선과 흡사한 경향을 나타낸다. 이 수요량 곡선중에서 하부부분을 기저부, 중간부분을 중간부, 상부부분을 첨두부로 구분하며 각 부분을 담당하는 발전방식이 상이하다.

발전방식은 크게 원자력, 화력 및 수력으로 구분되며 화력은 사용연료에 따라 무연탄, 유연탄, 석유, gas/turbine, 복합화력 및 열병합 등으로 세분되고, 수력은 일반수력발전과 양수발전으로 구분된다.

일반적으로 원자력은 발전시설용량이 1기당 100만kw 정도로써 완전정지상태에서 정격출력상태로 되는 시간이 가장 많이 소요되어 보통 수일이 소요되므로 24시간 가동하는 방식을 취한다. 그러므로 원자력은 전력수요 곡선중에서 기저부를 담당하는 것이 유리하다. 이는 24시간 발전되는 원자력의 특성을 수요측에서도 24시간 유효하게 공급코자 함에 기인한다.

화력발전소의 규모는 그 편차가 심하며 대화력발전소는 기저부 또는 중간부의 하부를 담당하며, 중규모 화력발전소는 중간부의 전력수요를 담당한다. 화력발전소는 연료를 태워 증기를 발생시켜 증기의 힘으로 터빈을 돌려 발전하는 방식으로써 가능한 한 유희시간이 짧아야만 열효율이 좋아지는 특성이 있으며 완전정지에서 정격출력상태로 소요되는 시간이 수시간에서 1일 정도 소요됨으로 인해 전력수요의 첨두부를 담당하기에는 적절한 방식이 될 수 없다.

반면 수력발전소(양수발전소 포함)는 저수지에 가두어 둔 물을 낙하시켜 위치에너지를 전기에너지로 변환시키는 방식이므로 전력수요에 대응하여 발전하여도 효율에 영향을 거의 미치지 않으며 완전 정지상태에서 정격출력상태로 소요되는 시간은 수분내로 가동된다.

따라서 수력발전소는 이러한 특성을 살려 수시간의 전력수요의 첨두부를 담당한다. 첨두발전방식(소양강댐, 충주댐, 안동댐, 합천댐 등)에 있어서는 일정한 첨두시간동안 발전하게되고 나머지 시간은 발전치 않으므로 하류의 유황은 물이 흘렀다 흐르지 않았다 하게 되어 이수 측면으로나 친수환경 측면에 바람직하지 못하므로 이를 개선하기 위해 역조정지를 두게된다. 즉 역조정지는 첨두발전시간에만 발전한 물을 모두 모아 24시간 균등히 배분하여 방류하게 되므로 상시 일정량 방류방식과 유사한 방식이 되며 그 효과가 같으므로 실제적인 운영방식이 된다.

국내에서는 저수지를 관리하는 주체가 다양하여 한국수자원공사, 한국전력공사, 농업기반공사, 환경부의 식수전용댐 등 여러기관에서 관리운영하고 있는 실정으로 각 운영주체에 따라 운영방식이 상이하고 상호간에 이윤배반적인 요소가 있어 상호간의 우호적인 운영이 긴밀하

지 못한 상황임에도 불구하고 한가지 목적의 댐으로는 경제적으로 댐 건설이 곤란하므로 여러 가지 목적을 갖는 댐 즉, 다목적댐이 경제적으로 댐 건설을 가능케 하였다.

그러나 이수, 치수의 이율배반적인 요소(치수목적으로는 저수지를 비워야하고, 이수목적으로는 저수지를 만수시켜야 유리함)가 있듯이 이수측면의 여러 가지 목적(용수공급, 발전 등)에도 상호간 이율배반적인 요소가 있다. 즉, 발전에 있어서는 항상 일정한 시간대에 발전하는 방식이 유리하나 하류부의 용수공급목적으로는 하류의 물부족이 발생했을 때에만 용수를 공급하는 것이 유리하다.

이러한 상호간의 불합리한 점을 개선코자 안동댐의 일반수력과 양수발전방식의 겸용 발전소가 생겨났으며, 이는 하류에 물부족이 발생치 않으면 첨두발전시간대에 발전한 물을 역조정에 가두어 놓고 있다가 전기가 남는 시간대에 다시 상부지로 양수하는 방식으로써 물의 낭비를 방지함과 동시에 잉여전력을 저장하는 일석이조의 효과를 달성하는 양호한 방식이라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 효과적으로 운영되고 있지 못한 까닭은 각 운영 주체간에 이해득실이 작용함에 기인한다.

④ 용수공급전용 댐

용수공급전용 댐은 그 목적에 따라 생활용수, 공업용수, 관개용수로 구분할 수 있으며, 생활용수 전용 댐(대구광역시외의 가창, 공산댐, 광주광역시외의 동북댐 등)이나 공업용수전용 댐은 대도시의 식수원이거나 공업용수를 확보하기 위해 지자체 단독으로 개발된 경우가 많고, 관개용수전용 댐은 농업기반공사에서 관리운영하고 있는 댐이 대부분이다.

이들 댐은 각기 목적에 따라 운영되고 있으며, 대부분 관로나 용수로로 통한 용수공급이 주류를 이루고 있다.

이와 같이 저수지의 운영방식은 운영 주체에 따라 다르고 건설 목적에 따라서도 상이하며 실제에 있어서 엄밀한 의미의 일정량방류방식 또는 water-deficit 공급방식만의 댐은 없다고 하여도 과언이 아니다.

이는 1개의 댐에 있어서 저수지 내에서 취수하여 관로를 통한 용수공급을 하는 댐이라 할지라도 하류 하천유지를 위한 용수공급량이나 댐의 누수량 등으로 인해 엄밀한 의미의 water-deficit 공급방식이 될 수 없으며, 일정량 공급방식에 있어서도 년중 일정한 공급량을 공급하는 댐은 없는 실정이다. 관개용수공급전용 댐의 경우에는 관개용수 수요량이 계절적(특히 기온 및 강수량에 영향을 받음)으로 편차가 심하며, 생·공용수공급전용 댐일지라도 다소 계절적으로 수요량에 차이를 나타낸다. 발전단일목적 댐의 경우에는 저수지의 수위에 따라 방류되는 수량에 차이가 있으며 특히 첨두발전인 경우에는 첨두발전 시간대에만 발전을 하게 된다.

이와 같이 목적별로 운영방식이 상이하며, 다목적 댐(일반적으로 발전, 용수공급, 홍수조절)인 경우에는 각 목적별로 운영방식이 상이하고, 이율배반적인 요소로 인해 용수공급만을 위한 운영방식이 불가능하다.

이러한 실제적인 저수지의 운영특성을 무시한 채 일정량방류방식 또는 water-deficit 공급방식에 의한 물수지에 의해 국가 수자원정책의 기본으로 삼기에는 위험 요소가 크다 할 수 있다.

따라서 각 저수지의 운영방식을 최대한 반영한 물수지를 수행함으로써 실제에 부합되는 결과를 도출시키는 것이 중요하다 할 수 있다.

4. 물수지 분석모형 개선의 필요성

앞에서 언급된 바와 같이 대 유역권의 물수지분석은 실로 복잡하고 어려운 일이다. 물수지 분석방법은 총량비교방법, 모의기법(simulation)에 의한 방법, 최적화 기법(optimization) 등이 있으며, 복잡한 유역권의 물수지분석에 있어서 수요량 및 하천유량에 따라 댐의 공급능력이

차이가 있으므로 이를 총량방법으로 분석된 값으로 국가의 수자원정책방향의 기본 틀로 설정하기에는 무리가 있으며, 또한 앞에서 언급된 바와 같이 최적화 기법의 도입은 사전에 구축되어야 할 자료 및 풀어야 할 과제가 산적한 실정이고 아직까지는 이상적인 방법이어서 이에 의한 수자원개발계획수립은 장래의 안정적인 용수수급을 보장하기에는 무리가 있으며 실무차원에서의 도입은 시기상조이므로 본 고에서는 모의기법에 의한 방법을 적용하여 물수지 방법을 개선코자 하였다.

모의기법에 의한 방법에 있어서도 물순환과정을 간략화 한 순물소모량 개념의 물수지분석 방법은 계산과 모형화의 간편성으로 인해 널리 사용되고 있으나 실제의 물이동을 정확히 구현하기가 어렵고 자료의 입력시 물이동 특성에 따라 순물소모량으로 입력할 경우와 실제 수요량으로 입력하여야 할 경우가 있어 유역내의 물이동에 따른 회귀수 및 재이용을 정확히 구현하기 어려운 단점이 있고, 하류의 물부족을 댐군에서 공급시 운영방법의 적용성에 한계가 있으므로 본 연구에서는 실제 수요량에 의한 물이동과 그에 따른 회귀관계를 반영코자 하였다.

또한 물수지분석이 유역내의 각종 용수에 대한 공급 가능여부의 판단에 있으므로 유량자료는 유역내에 인위적인 용수사용이 전혀 없을 때의 유량과 비교하여야 하므로 자연유량 자료의 사용은 필수적이다. 유출에 영향을 미치는 인자로는 유역내 각종 용수의 사용에 따른 소모량과 수많은 댐군이 자연유량에 영향을 미치고 있어 자연유량과 실측유량과는 많은 차이를 나타나게 된다. 특히 우리나라는 농업용수가 수요량의 제일 많은 부분을 차지하고 있고, 관개용수를 공급하는 형식이 다양하므로 이를 반영하는 것이 물수지분석의 중요한 인자임은 부연할 필요가 없다 하겠다.

따라서 이를 반영하기 위하여 실무차원에서 유역권 물수지분석 모형을 개발하게 되었으며 이를 SIMDAS로 명명하였다.

5. SIMDAS 프로그램 개요

① 프로그램 특징

- 본 프로그램은 FORTRAN 언어로 작성되었으며, compiler는 POWER STATION을 이용하였음.
- 검토코자 하는 case가 여러 개인 경우(각 case별로 개별 directory에 위치 가능) 이를 일괄로 처리하거나 또는 개별적으로 수행 가능함.
- 절점은 소유역 절점, 댐 절점, 기준점(하천유지수량을 검토하기 위한 절점)으로 구성할 수 있으며, 최대 400개 절점까지 작성 가능하고 절점번호 부여는 1~998까지 순번없이 무작위로 작성 가능(절점번호 0은 하구절점, 999 절점번호는 유역밖을 의미함)하며, 절점별 계산 순서는 프로그램 내부에서 sorting하여 결정함.
- 입력파일은 1개의 main file, 수개(최대 400)의 자연유량입력 file, 수개(최대 400)의 조용수량 입력 file로 구성되어 있고, 자연유량과 조용수량 입력 file을 main file에서 호출하도록 구성되어 있음.
- 절점 한도내에서는 2개 이상의 유역권을 동시에 모의 가능함.
- 각 소유역별 자연유량은 별도의 file로 작성하여 별도의 directory에 위치시킬 수 있으며, 수개의 소유역에서 공용으로 사용할 수 있음.
- 각 소유역별 관개용수의 단위면적당 조용수량은 별도의 file로 작성하여 별도의 directory에 위치시킬 수 있으며, 수개의 소유역에서 공용으로 사용할 수 있음.
- 소유역 절점의 모의운영은 유역내에 위치한 수많은 관개용수공급전용 댐 군을 1개의 관개용수공급전용 댐으로 가정하여, 잔여유역과 직렬로 연결된 것으로 가정하여 모의토록 함.
- 댐 절점의 모의운영은 상류에 위치한 절점(소유역, 댐)을 먼저 모의한 후 댐의 유입량을 결정하며, 관개용수공급전용 댐, 식수전용 댐, 공업용수전용 댐, 발전단일목적 댐, 다목적

댐 등 각종 목적으로 건설된 댐들의 고유 운영방식을 반영한 모의운영이 가능함.

- 하류의 물부족에 대하여 상류에 위치한 병렬 및 직렬로 연결된 댐군에 의해 용수 공급시 당해 단위기간의 유입량을 포함한 저수지의 저수량 비율로 공급하며, 저수지(댐)별로 하류 특정 절점 한도까지 용수공급을 제한하여 모의할 수 있음.
- 댐의 일류량이나 발전수량이 특정 절점으로의 이동이 가능함.(남강댐, 섬진강댐 등)
- 모든 절점간의 물이동이 가능하여 물이동은 생활용수, 공업용수 및 농업용수로 구분하여 적용할 수 있으며, 1개의 절점(소유역 또는 댐)에서 수개의 절점(소유역, 댐, 유역밖으로의 공급도 가능)으로 물이동, 혹은 수개의 절점에서 1개의 절점으로의 물이동, 유역밖에서 유역내 특정 절점으로의 물이동 등이 가능함.
- 물이동이나 소유역내의 생활 및 공업용수는 계절별 수요량의 변화율을 고려하거나 일정량 물이동을 반영할 수 있음.
- 기준점(하천유지수량 검토 지점)의 하천유지수량을 만족하기 위한 모의운영이 가능함.
- 각 댐별로 수면증발량을 각각 적용하거나 같은 수면증발량을 여러 댐에서 공용으로 적용할 수 있으며, 또는 수면증발량을 무시할 수 있음.
- 출력은 종합 물수지 결과의 1개 output file이 생성되고, 각 절점의 output file의 생성은 선택적으로 채택할 수 있음.
- 모의기간은 거의 제한이 없으며, 단위기간은 월별 또는 순별 모의가 가능함.

② 소유역내 관개전용 저수지의 모의

대유역권내에는 수많은 저수지가 있으며 가장 많은 수의 저수지는 관개용수공급전용 댐이라 할 수 있다. 관개용수공급전용 댐은 대부분 유역면적이 적고, 저수량도 적으나 숫자적으로 가장 많이 분포하고 있어 이들 모두의 합친 능력은 대용량 댐의 기능을 수행한다. 일례로 낙동강 유역내에는 약 5,500개 이상의 대소 저수지가 있으며 관개용수공급전용 댐의 모든 능력을 합치면 그 영향력(저류 및 방류능력)은 실로 막대하다 할 수 있다.

그러므로 물수지 분석에 있어서 관개댐 군의 능력을 무시한 물수지는 있을 수 없는 상황이나 개별 모든 댐을 모의운영하기에는 자료의 량과 출력 량이 실로 막대하므로 이를 간략화한 방법을 도입하여 각 소유역별로 소유역내에 있는 관개용수공급전용 댐군을 1개의 집수면적, 1개의 저수지, 1개의 물리면적을 갖는 저수지로 간주하였다.

소유역은 유량이 관개댐으로 유입한 후 하류로 유하하는 관개댐 유역과 관개댐을 거치지 않고 유하하는 잔여유역의 2가지로 구분할 수 있고, 관개댐 유역과 잔여유역의 연결방식에는 병렬 연결방식과 직렬 연결방식의 2가지가 있으며 실제로 있어서는 이 2가지의 복합체일 것으로 판단된다.

관개댐 유역과 잔여유역을 병렬연결로 구성하면 두 유역은 각각 물수지를 수행하게 되어 관개댐 유역은 관개댐의 월류량과 공급된 관개용수의 회귀수가 합하여 유출되고 잔여유역의 유출량은 유역내의 수요량을 공급후 회귀수와 잉여량이 합하여 유출되므로 병렬방식에 있어서 소유역 하단부의 유출량은 두 유역 유출량의 합이 된다.

반면 관개댐 유역과 잔여유역을 직렬로 구성하면 관개댐 유역이 잔여유역의 상류에 위치하고 관개댐은 그 경계에 위치하게 되므로 관개댐 유역의 물수지를 먼저 수행하고, 관개댐의 일류량과 관개댐에서 공급된 수량의 회귀수가 잔여유역의 유량과 합하여 하류의 수요량을 공급하게 된다. 이 방식에서는 관개댐에 의해 용수공급 후의 회귀수는 하류에서 재이용되는 방식이다.

소유역내에서 대부분 관개댐은 소규모로써 유역 상류부에 위치하여 자연유하로 관개용수를 공급하는 방식이며, 평야부는 소유역내에서도 하류부가 많고 대도시도 하류부에 집중되어 있어 주요 용수 수요처는 하류부에 집중되어 있다.

또한 실제적으로 소유역내에서도 상류부에서 사용하고 발생하는 회귀수는 하류부에서 재차 이용되고 있으므로 직렬연결방식이 보다 실제에 가까우므로 이를 채택하여 적용하였다.

③ 하류의 물부족에 대한 저수지 공급량

대유역권의 물부족은 지류 소유역에서의 물부족과 본류 하류부의 물부족으로 구분할 수 있으며 지류 소유역의 물부족은 광역 물공급 체계 또는 자체 소유역에서의 수자원 개발이 필요하다.

하류 물부족은 상류에 위치한 직렬 및 병렬로 연결된 댐군이 공급하며 다음과 같은 절차 및 논리에 의해 공급하는 것으로 하였다.

- 1개댐에서 공급하여야 할 소유역의 물부족량은 해당 댐에서 우선적으로 공급
- 2개댐에서 공급하여야 할 소유역의 물부족량은 상류에 위치한 1개댐에서 공급하여야 할 소유역의 공급량에서 발생하는 회귀수량(순물소모량과 조작손실량을 감한 수량)을 감한 물부족량을 2개댐의 잔여저수량(단위기간의 유입량 포함) 비율로 공급
- 위와 같은 방법으로 n개 댐에서 공급하여야 할 소유역의 물부족량은 상류에 위치한 소유역의 댐공급량에서 발생한 회귀수량을 감한 물부족량을 각 댐의 잔여저수량 비율로 공급
- 직렬로 연결된 용수공급댐인 경우에는 상류댐의 방류량을 제외한 잔여유역의 유입량으로 산정된 저수량의 비율로 공급하고, 상류댐에서의 공급량중에서 상류댐과 하류댐 사이의 소유역 순물물부족량을 감한 수량과 하류댐의 공급량을 합한 양을 하류댐에서 방류하는 것으로 가정
- 댐에서 공급하여야 수량보다 저수량이 부족한 경우에는 댐의 유효저수량 크기로 배분하여 댐의 공급능력부족량으로 하였다.

④ 저수지 물수지 방정식

• 저수지 연속방정식

$$S2 = S1 + Q_{in} - Q_{up} - Q_{lw} - Q_{ep} - Q_{sp}$$

여기서, S1 : 단위기간 초기의 저수량

S2 : 단위기간 말기의 저수량

Q_{in} : 단위기간의 유입량

Q_{up} : 저수지내에서의 유역변경 용수공급량

Q_{lw} : 댐 하류방류량 (발전수량, 하류용수공급량, 일정량 방류량 등)

Q_{ep} : 저수지의 수면증발량 = A_{ws} × F(i)

A_{ws} : 저수면적

F(i) : 수면면적당 단위기간의 증발계수

Q_{sp} : 여수로를 통한 잉여 방류량

• 발전사용수량

발전사용수량은 저수지의 수위에 따라 상이하며, 저수지의 수위가 정격수위보다 높을 때에는 일정 발전출력을 얻기 위해 수차의 guide vane을 조정하여 발전수량을 감소시키게 되며, 저수지의 수위가 정격수위보다 낮을 때에는 압력관의 유량공식과 같이 발전사용수량이 감소하게 된다. 따라서 정격수위일 때 발전사용수량은 최대치를 나타내게 되며 이를 수식으로 표시하면 아래와 같다.

1) 저수지의 수위(H)가 정격수위(RWL, rated water level)보다 높을 때

$$Pr = 9.8 \cdot Q_{gen} \cdot He \cdot \eta \text{ 를 만족하는 사용수량}$$

여기서, Pr : 정격출력(kW)

Q_{gen} : 발전사용수량(CMS)

He : 유효수두(m) = H - TWL - H_l

TWL : 방수위(tail water level, EL.m)

H_l : 손실수두(m)

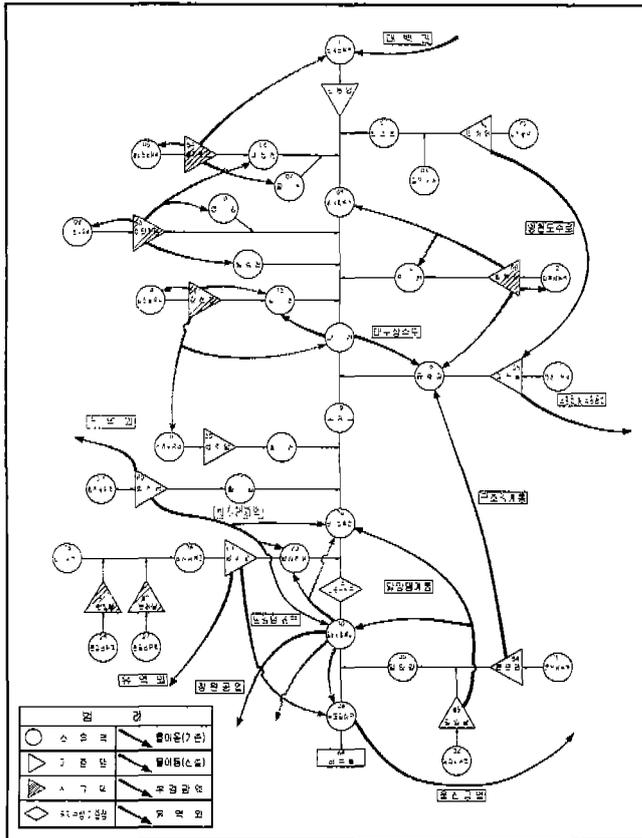
2) 저수지의 수위(H)가 정격수위(RWL)보다 낮을 때

$$Q_{gen}/Q_r = \sqrt{(H - TWL) / (RWL - TWL)}$$

여기서, Q_r : 정격사용수량(CMS)

H : 저수지 수위(EL.m)

6. 프로그램의 적용사례(낙동강유역)



<그림 1> 낙동강유역 소유역간 물이동 모식도

- 낙동강수계 전 유역의 분류 주요지점 및 중요유역을 34개 소유역으로 분할
- 분석 기준년으로는 1996년~1996년 (31개년)의 전기간을 순별로 모의운영
- 분석 CASE별로 90%이상의 신뢰도를 평가할 수 있도록 년단위를 기준으로 한 30개년 중 최대 1, 2, 3순위의 부족량, 부족일수, 부족 발생년도를 표현
- 분석결과는 낙동강유역내 다목적댐이 전부 없는 상태에서 관개용 저수지만을 고려했을 경우의 수치임.

<표 - 1> 물수지분석 결과 [2011년기준] (단위:백만 m^3 /년, 횟수/순단위)

소유역 번호	제 1 순위(30년빈도)				제 2 순위(15년빈도)				제 3 순위(10년빈도)			
	수요량	부족량	횟수	발생년	수요량	부족량	횟수	발생년	수요량	부족량	횟수	발생년
1	62.6	0.7	1	1967	64.7	0.3	1	1968	71.4	0.0	0	1994
2	70.7	2.9	2	1994	61.8	2.5	3	1996	61.7	1.5	2	1968
3	20.0	1.9	2	1968	20.4	0.3	2	1967	21.7	0.2	1	1982
4	12.5	0.0	0	1994	11.3	0.0	0	1973	11.2	0.0	0	1982
5	136.6	55.9	10	1982	126.9	44.9	9	1967	142.9	40.2	7	1973
6	217.9	84.9	9	1982	197.8	70.0	7	1967	231.2	57.5	7	1973
7	65.3	27.7	10	1982	60.1	22.2	8	1967	68.7	20.0	7	1973
8	209.8	10.4	2	1967	220.9	9.0	2	1968	176.8	2.0	1	1983
9	11.3	3.8	9	1982	12.0	3.7	8	1973	12.3	3.7	8	1994
10	147.9	48.4	9	1982	156.6	47.9	8	1973	159.9	47.3	9	1994
11	197.5	85.3	13	1994	182.5	84.4	10	1982	193.3	82.0	11	1973
12	18.1	6.8	7	1982	22.1	5.5	11	1994	18.7	5.4	6	1992
13	344.5	209.2	16	1994	285.1	149.2	12	1982	310.3	142.8	8	1973

<표 - 1> 계속

소유역 번호	제 1 순위(30년빈도)				제 2 순위(15년빈도)				제 3 순위(10년빈도)			
	수요량	부족량	횟수	발생년	수요량	부족량	횟수	발생년	수요량	부족량	횟수	발생년
14	18.4	1.8	3	1968	19.1	0.3	4	1982	19.4	0.2	2	1995
15	305.4	93.6	11	1994	258.8	85.5	9	1982	261.8	73.0	9	1995
16	1006.4	179.2	12	1968	1011.1	171.7	7	1982	1015.8	113.7	6	1976
17	10.2	0.0	0	1994	9.1	0.0	0	1973	8.6	0.0	0	1992
18	1173.1	282.6	19	1994	1083.0	254.0	19	1968	1099.4	237.0	13	1982
19	214.0	20.5	4	1982	210.5	18.0	3	1968	216.2	3.8	1	1976
20	26.5	11.1	11	1994	21.5	9.7	7	1982	22.4	8.9	7	1992
21	128.7	49.3	11	1994	107.6	43.3	9	1982	111.3	39.0	7	1992
22	160.2	60.8	10	1994	137.1	48.6	7	1992	135.4	41.6	8	1995
23	93.0	19.8	8	1994	75.2	18.6	5	1968	76.3	14.2	6	1982
24	253.6	23.4	4	1982	250.2	22.5	3	1968	261.3	5.9	1	1977
25	67.9	10.7	5	1992	67.6	9.4	4	1982	64.3	7.2	4	1968
26	44.8	7.2	5	1992	44.7	6.3	4	1982	53.6	5.0	5	1994
27	11.8	1.8	5	1992	11.7	1.6	4	1982	11.1	1.1	4	1968
28	160.0	14.8	4	1992	159.3	14.3	3	1982	151.4	8.8	3	1968
29	314.0	44.2	4	1968	405.3	23.0	3	1994	326.6	21.3	2	1982
30	418.1	70.8	3	1968	432.6	54.6	4	1982	490.4	26.3	2	1967
31	17.2	2.0	3	1982	18.4	2.0	2	1977	16.3	1.8	3	1968
32	9.8	0.0	0	1994	9.7	0.0	0	1973	8.9	0.0	0	1967
33	230.6	91.4	7	1967	251.0	84.6	7	1994	191.3	65.5	7	1982
34	1462.3	219.8	12	1968	1465.2	126.0	6	1982	1475.7	118.8	6	1966
계	7640.5	1742.5			7470.7	1434.0			7502.7	1195.8		
35	2213.6	722.9	20	1968	2207.5	465.5	19	1967	2207.5	338.1	11	1966

주) 1. 자연상태를 기준한 물수지분석 결과임.

2. 제1, 제2, 제3순위는 물부족량의 크기 순위이고, 35번 소유역은 진동지점 유지용수기준.

3. 물부족이 없을 경우에는 수요량 크기순에 해당하는 수치임.

7. 결론

물수지 분석의 신뢰성은 다음의 3가지인 ① 장래의 생·공·농 수요량, ② 소유역별 자연 유량의 정확한 산정을 기본으로 하며, ③ 유역권의 복잡한 구조(수많은 저수지의 운영 및 물 이동)를 적절히 해석할 수 있는 tool로써 이에 좌우된다.

- 자연유량이 실제 유량으로 변하는 과정에서 작용하는 주요 인자는 ① 취수에 따른 유량 감소(유역간의 물이동 포함)와 회귀수의 발생, ② 수많은 저수지(다목적댐, 관개용 저수지 군 등)의 유량 조절효과에 의해 풍수기의 유량을 저류하고 갈수기 또는 용수가 필요한 시기에 공급하는 등으로 인해 댐 하류의 유황이 변하므로 물수지 분석에 있어서 이를 적절히 반영하여 해석하여야 함은 필수적이다.
- 첫 번째 요소인 장래의 생·공·농 수요량은 국가 및 각 지자체의 정책방향과 구현성에 좌우되므로 이에 대한 장래 수요량의 추정 은 불확실성을 내포한다.
- 두 번째 요소인 유량측면에 있어서 실질적으로 하천 표류수를 전량 취수할 수 없으며, 이는 취수구의 구조, 취수보의 유무, 하상 대수층의 발달정도 등에 지배를 받으며, 통상 취수구의 표고는 과거 갈수시의 수위를 반영하여 설치하므로 갈수량(평균 갈수량의 70~80%의 유량 또는 기준 갈수량 채택)이상을 취수할 수 있는 것으로 분석함이 타당하나 이를 0으로 설정(하천수 전량을 이용)하면 소유역의 물부족을 과소하게 평가하게 된다.
- tank model에 의해 산정되는 자연유량은 갈수기의 실제유량보다 크게 산정되는 경향이 있다. 이는 가장 상부에 위치한 tank가 비워지게 되면 증발산량이 발생치 않는다는 모순점이 있으며 실제에 있어서는 모세관 현상과 토립자의 부착력으로 인해 상부 tank의 물이

하부 tank로 전량 이동할 수 없으므로 증발산량은 계속적으로 진행이 되고, 갈수기에는 지하수위가 하천수위보다 낮게 되어 하천유량이 지하수로 역류하는 관계로도 인해 증발산량은 계속적으로 진행된다. 이는 소유역에서의 물부족을 과소하게 평가하는 요인으로 작용한다.

순물소모량 개념의 물수지분석은 하천표류수보다 큰 수요량이 있어도 순물소모량이 이보다 작으면 물부족이 발생치 않는다는 모순점이 있고, 더욱이 하천표류수를 전량 취수할 수 있도록 계산되므로 이 점 또한 소유역에서의 물부족을 과소하게 평가하는 방향으로 작용한다.

반면 수요량 개념의 물수지분석은 하천유량중 취수 가능한 수량이 수요량보다 적으면 물부족으로 표시되고 취수한 수량에서 회귀수를 발생시키므로 순물소모량 개념보다는 소유역의 물부족을 크게 계산한다.

한편 소유역에서는 다만 취수로 인해 회귀수를 재차 이용하는 측면이 있어 이는 물부족을 발생치 않게 하는 요인으로 작용하며 최 상류에서는 재 이용율이 적고 하류부에서는 재 이용율이 높으므로 소유역에서의 물부족을 적게 산출하게 하는 요인으로 작용한다.

따라서 수요량 개념의 물수지분석에서는 소유역내의 관개저수지에 의해 공급된 수량은 재차 잔여유역에서 재이용되도록 계산(직렬 연결방식)하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단된다.

댐에서 하류의 물부족에 대한 공급시 댐 조작손실이 발생하게 되며 통상 수요량에 합쳐서 계산하였으나 수요처와 근거리의 위치한 댐에서의 조작손실은 적고 원거리의 위치한 댐은 유하시간이 수일 이상이 소요되므로 사전 방류를 통하여 하류의 물부족을 공급하게 되므로 조작손실율은 크게 발생하는 것이 현실적이다.

또한 다목적댐에 있어서 상시 방류하는 수량(하천유지용수, 역조정지가 있는 침투발전수량 등)은 댐과 수요처간의 유하시간에 따른 댐 조작손실은 발생치 않으며, 하류 물부족에 대한 추가적인 용수 공급시에는 사전에 방류하여야 하므로 댐 조작손실이 발생하므로 수요량에 조작손실량을 합쳐서 계산하는 방식은 비 논리적이다.

세번째 요소인 댐의 운영방법에 있어서 댐의 최적화 운영방법은 현실적이지 못하다. 이는 장래의 수요량(특히 관개용수)은 물론 하천유량까지 선행하여 예측이 가능하여야 한다.

국내의 수많은 저수지의 운영주체는 한국수자원공사(다목적댐), 한국전력공사(발전단일목적댐), 농업기반공사(관개전용댐), 각 지자체(식수전용댐, 공업용수전용댐 등)로써 각 기관과의 상호 협의체제가 없을 뿐만 아니라 일개의 다목적댐에서도 목적에 따른 운영방법이 상이하고 이율배반적인 요소가 있어 용수공급만을 위한 최적화의 운영은 현실적으로 불가능한 실정이다.

따라서 국가의 장기적인 수자원정책을 수립함에 있어 가상적인 조건을 설정하여 이에 부합되는 물수지분석 결과를 수용하기에는 위험성이 매우 크므로 각 댐별로 실제의 운영 방법을 적용한 물수지분석을 수행하여야 할 것이다.