

수요관리를 통한 수자원 관리 시스템¹⁾

김 승 권

고려대학교 산업공학과

요약

1994년 봄부터 남부지역으로 심화되기 시작한 가뭄은 우리에게 물관리의 중요성을 다시금 일깨워주고 있다. 본 논문에서는 가용 수자원의 수요와 공급사이의 불균형을 해소시키고 물의 생산성을 높이기 위한 방안을 수요관리의 측면에서 고찰한다. ASCE의 국가 물 정책위원회에서 제시한 "물 보존을 위한 정책선언 (Water Conservation Policy Statement)"의 9가지의 정책분야를 중심으로 가능한 절수 관리 방안들을 외국의 사례를 통하여 구체적으로 재조명해 보고 절수를 새로운 공급원으로 하여 시스템분석 기법을 활용하는 방안과 우리가 하여야 할 과업을 정리해 본다.

1본 내용은 삼성 지구환경연구소가 1995년 3월 22일 주최한 "세계 물의 날 기념 수자원의 효율적인 활용을 위한 정책 토론회"에서 발표된 제 4주제의 내용을 수정 보완한 것임.

1. 서론

1994년 봄부터 남부지역으로 심화되기 시작한 가뭄은 이제 우리와 함께하고 있어서 심각한 사회적 경제적, 환경적으로 어려움을 야기시키고 있다. 더우기 가뭄으로 인하여 물 부족에다 수질악화까지 겹쳐서 더 더욱 물의 부족에 시달리는 악순환이 시작되게 되었다. 인구의 급격한 증가와 산업사회의 발달로 전 국토의 도시화는 가속되고 있다. 그리고 그로 인하여 야기되는 환경오염과 자연파괴 등은 세계적인 기상이변의 추세와 맞물려서 심각한 물공급의 부조화를 야기시키고 있다. 이같은 기상이변은 일시적인 현상으로 그칠 것 같지 않고 우리나라의 강우형태에도 영향을 미칠 것으로 생각되며 가뭄과 홍수가 반복된다든지 지속적인 가뭄 또는 홍수가 발생할 가능성도 배제할 수 없다. 강우 자료들이 시계열 특성으로 보여주고 있는 “지속성 효과(persistent effect)”를 생각하면 올해도 지역에 따라 가뭄이 계속될 가능성이 있다고 생각된다.

이같은 가뭄은 우리에게 물관리의 중요성을 다시금 일깨워 주고있다. 따라서 가용 수자원인 물의 수요와 공급을 일치시키기 위한 방안을 물의 특히 수요관리의 측면에서 가능한 절수 관리 방안들을 재조명해 보고, 새로운 공급원이라고도 할 수 있는 재처리에 따른 절수원(節水源)의 운영방안에 대한 제언과 우리가 대비하여야 할 과업에 대한 생각을 정리해보기로 한다.

2. 수자원 관리 방안

우리나라의 수자원은 부족한 편은 아니라고 생각되나, 급격한 산업사회로의 이행으로 용수 수요는 수년전에 비하여 예상외로 급격히 증가하고 있는데 반하여 수질오염과 생태계 파괴로 인한 실제 가용수의 양은 줄어들고 있다고 생각된다. 이에 대한 재 실사 및 수요 공급분석를 통하여 닥쳐오고 있는 심각한 물 부족현상에 대처하는 대책마련이 시급한 실정이다. 수자원 관리는 크게는 공급관리와 수요관리로 나눌 수 있다. 물은 필요한 양을 필요한 시기에 필요한 장소로 적절히 공급되도록 하여야 한다. 그런데 물은 원하는 시기에 필요한 곳에서 항상 얻을 수 있는 것은 아니다. 그러므로 공급관리란 적극적인 관리기법으로서 용수공급원의 증대, 공급효율의 증대, 인공강우, 해수의 담수화, 재처리수의 확보 등을 통하여 공급원을 확충하고 홍수를 관리하여 물의 시간적, 공간적인 용수 공급능력을 제고시켜서 유역간의 물 수급 불균형을 해소시키기 위한 관리기법이라 할 수 있다.

홀통한 공급관리를 위하여는 우선 정확한 용수 수요예측이 필요하다. 그리고, 원수확보 및 운반을 위한 초기 시설투자비가 막대하므로 장기적인 투자효과를 감안하여 처음부터 체계적이고도 경제적인 공급계획을 수립하여야 하며 그 마스터 플랜 아래서 타당한 용수공급계획이 되도록 해야한다. 장기적인 투자효과를 감안한 경제적인 계획수립이란 단위 유역 별로는 효율적이고 타당한 용수 공급 계획이 되도록 하고 시스템 전체로서는 경제적인 계획이 되도록 하는 것이다. 그리고 이 계획은 일정 기간이 지나면 실제 현실들 반영하여 계속적으로 수정 보완 되어야 한다. 미국의 캘리포니아에서는 1991년 10월 부터 주 수자원 계획을 매 5년 마다 수정 보완할 것을 법령으로 정하여 시행하고 있다. 수자원 계획수립을 위한 기본적인 문제의 골격은 투자자본의 시간적인 가치를 고려하는 공공 사업의 입지선정 및 광역 수자원 개발 계획 수립 문제로 귀결되며 OR을 활용한 여러가지 시스템 분석적인 문제 해결방법이 있다.

그러나 이같은 공급관리의 저변에는 다음과 같은 전제가 깔려있다. 즉, 물은 항상 필요로하는 만큼 생산해낼 수 있는 것으로만 생각하고 필요할 때마다 언제든지 댐이나 관정, 지하수 개발과 같은 공급확대를 통하여 추가 용수공급이 가능하게 될 것으로 생각하고 있다는 점이다. 그러나 지표수의 공급확대는 한계에 부딪혀있고, 지하수 개발도, 실사를 통하여 확인되어야 하겠지만 아직까지는 우리가 실제로 얼마의 지하수 자원을 보유하고 있는지도 모르고 있으며, 과도한 지하수 개발로 인한 지반침하, 그리고 연안지방의 해수침투 및 지하수의 오염등의 부작용으로 인하여 그의 개발도 한계에 부딪힐 것이 확실

해 보인다. 이제는 지하수 보충을 포함한 지표수와 지하수간의 연계운영을 고려하여 수질관리에 대한 중요성 및 경각심과 아울러 수자원 공급시스템의 생산성을 높여야 할 것이며 "절수" 자체만으로도 상당한 공급효과를 나타낼 수 있도록하는 시스템적 운영 기반을 구축하여야 할 것이다.

절수효과는 수요관리로 달성할 수 있다. 수요관리란 용수공급원을 개발한다기 보다는 기존의 용수공급원들을 최적 관리하거나 수요를 억제 또는 절수하여 수요를 공급가능량에 맞추어 나가는 관리방식으로 최근에는 Agenda-21으로 대표되는 21세기 UN 지구환경 보전 강령(Agenda-21, 1992; 이정전, 1995)에 따라서 설정하고 있는 지속가능 개발(sustainable development)의 개념에 의하여 환경 수용능력이 궁극적인 개발의 한계로 작용되고 있으므로 수요관리의 중요성이 더욱 부각되고 있다.

수요관리는 단기 수요관리와 장기 수요관리로 구분할 수 있다. 단기 수요관리의 방법들로서는 한발 및 가품대책으로서, 효과적인 절수기기 무료보급, 수도요금 인상, 홍보를 통한 자발적인 또는 강제 절수운동, 도시용수 수요억제, 유역간 물수송, 급수제한 등을 들 수 있고, 장기수요 관리방안은 절수를 위하여 지속적으로 추진되는 관리정책으로서 지속적인 홍보 및 국민 계몽, 절수(water conservation)를 위한 법령개정, 수도 요율체계 개선, 추가 하수재처리사용(additional waste water recycling), 지역간, 용수원간 연계운영방안(conjunctive use program), 관개방법 개선, 물은행(water banking), 프로젝트 운영방안(project operations) 변경, 유역내 저수지로의 물유입증대, 모든 용수원에 계량기 부착, 농지이용제한(물 소비가 큰 농작물 재배포기: agricultural land retirement), 절수형 산업구조 유도, 인구 분산정책 등을 들 수 있다.

3. 물보존을 위한 수요관리정책 및 관련 제반조치

수요관리는 가장 비용이 저렴하고 환경적으로 문제가 없으며 첨두수요 (peak water demand)관리에 직접적인 영향을 미칠 수있는 효과적인 수자원 관리방법이라 할 수 있다. 수요관리를 통하여 절약되는 물은 가장 확실하고 저렴한 공급원으로서 1991년 4월에 ASCE Board of Direction 에서는 ASCE의 국가 물 정책위원회에서 개발한 "물 보존을 위한 정책선언 (Water Conservation Policy Statement)"을 채택하고 절수를 새로운 공급원으로 인정하고 있다. 이제는 더 늦기전에 우리도 절수를 하나의 공급원으로 간주하여 이제는 유역간 물 수송(interbasin transfer), 용수 공급원간의 연계운영(conjunctive use) 등의 추진을 준비하여야 할 시점에 있다고 본다.

물 보존을 위한 정책선언에 의하면 다음과 같은 9가지의 정책지침(Anton, 1995) 을 주고 있다. 각 지침에 따라서 가능한 구체적인 조치들과 적용 예를 살펴보면 다음과 같다.

(1) 물사용 효율증대 : 도시, 산업, 관개용수에 소요되는 총 용수수요를 최소화하기 위하여 최소비용의 절수조치를 하여 용수생산 효율을 증대시킨다.

- 도시용수 수용가의 절수
- 수자원 관리 시스템의 최적화
- 절수형 샤워(9.5 liter/min) 및 수도꼭지 보급
- 건식 풍치지구로 변환유도
- 대용량 계량기의 영점조정과 소용량 계량기의 교체
- 여름 성수기의 물값 인상
- 수세식변기의 저수조에 넣을 플라스틱 벽돌의 제조 및 무료보급
- 초절수 수세식 변기(6 liter/flush) 설치시 설치비용 보상
- 누수관망의 포착을 위한 가정용, 다가구주택, 공업및 상업용수 무료 수지계산

(2) 누수감소와 시스템 효율증대를 위한 운영관리 개선:시스템 의 효율을 증대시키고 누수를 줄이기 위하여 처리, 저장, 수송상의 운영관리를 향상시킨다.

수도 계량기 작동검사 및 교체
주 상수관의 누수검사 및 누수관망의 교체
예방정비 및 중앙집중식 도시용수관리
물 수지 분석관리
정수설비개량과 여과기 역류시 공기의 사용,
수도요금의 월별 고지

(3) 사용수의 재처리 사용: 공중보건 위생에 저해가 되지 않는 범위에서 그리고 경제성이 있을 경우 사용수의 재사용을 추진한다.

재처리수의 재사용에 관한 법령제정
관개용수 및 골프장, 도시미화지구에 중수사용 증대
공업용수 및 지하수 침투수로 사용
하수처리장 내에서 재처리된 물 활용
중수를 발전소 냉각수로 사용
정수장 여과장 설비 역류수 재처리 활용

(4) 연구개발 및 효율적사용을 위한 홍보활동 강화: 연구개발, 공공 보조활동, 대중 교육, 그리고 더 효율적인 물사용 기술의 응용을 장려하기 위한 정보 교류 및 전파활동을 장려한다.

용수 수용가에 소책자, 간지등의 우송과 모델하우스 전시등을 통한 홍보
국민학교 학생교육을 통한 절수운동 확산
건식 풍치지구 조성 및 전시
물 절약 주간 설정 및 언론매체 활용 지속적 홍보
누수관망의 포착을 위한 가정용, 다가구주택, 공업및 상업용수 수지계산
초절수 수세식변기의 성능평가
절수 식물 재배연구
절수형 기기의 개발및 무료 보급
물절약을 위한 포스터 캠페인
저수량의 공표

(5) 계량기 부착:수량관리를 위하여 공급되는 모든 용수 공급원에 계량기를 부착시켜 관리한다.

계량되지 않고 소비되는 물은 낭비이므로 건물 신축 및 재설비시 계량기 부착 의무화 유도

(6) 물절약을 위한 가격구조 수립 장려:물 보존과 물 아끼기를 촉진 시키고 물의 정당한 가치를 반영시키기 위하여 필요한 가격구조의 형성을 지지한다.

가격구조가 물 절약에 미치는 영향은 1977년 부터 시작된 미국 아리조나주 Tucson시의 첨단 물수요 억제정책에서 큰 교훈을 얻을 수 있다(Billings et.al, 1989). Tucson시에서는 급증하는 침투 물수요를 억제하기 위하여 성수기와 비성수기에 따라 달리 적용되는 상승하는 블록요금 체계(increasing-block rates)를 운영하고 있다. 이는 물 사용량이 많은 사용자는 더 높은 단위 요금을 적용받는 제도로써 성수기 침투 물 수요억제에 강력한 힘을 발휘하여 Tucson시 수도국의 총 물값 수입의 감소로 이어지기도 했다. 결국은 물 생산비용 회수를 위하여 재 인상을 하고, 물값 조정을 위한 자율적인 시민 자문위원회가 조직된 이후로는 인플레이션 인상을 범위내의 인상폭으로 조정되어 물값 안정이 이루어진 경우가 있다. New York시에서는 수도국에서 요금인상을 통하여 절수를 유도하다가 물 판매 수입이 줄어도 그 손실을 만회하기 위하여 수도요율을 인상하는 것은 금지하고자 하는 법이 상정된 적도 있다. (ENR, 1986)

Tucson시의 예에서 보는 바와 같이 가뭄이 심한 위기의 상황에서 물값 인상이 절수에 효과적임에 틀림이 없다. 그러나 궁극적으로는 시의 물값 수입을 줄여서 투자비의 회수와 재투자를 어렵게 할 수도 있으므로 낭비를 줄이는 것과 절수의 경제성을 따져서 적절한 인상율과 인상시점을 고려하여야 한다. 수자원의 여유가 있다면, 무턱대고 수자원의 이용을 억제하는 것이 경제적이란 이론적인 근거는 없다. 다만 쓸데없는 낭비는 줄이는 것이 경제적임에 틀림이 없으므로, 이의 적절한 평가를 위하여는 우리나라의 수자원이 언제 얼마나 부족할지에 대한 정밀한 조사가 이루어지고 관리되어야 할 것이다.

Helen(1994)은 Athens시의 절수를 위한 단기대책의 효과를 ARIMA 모델로 평가하였으며 전년도에 비하여 3-4개월동안 약 17-25%의 통계적으로 유의한 절수효과가 있음을 보였다. Athens시에서는 block-rate basis로 상수도 요율을 크게 인상함과 동시에 수자원 관리 시스템의 최적화, 소비자에게 플라스틱으로 된 수세식 저수탱크에 넣을 벽돌을 무상으로 공급하고, 누수 상수도 관망을 정비하였으며, 포스터와 표어제정, 매일 헤드라인 뉴스속보, 그리고 현재 저수량 기록 공표 등의 단기처방을 통하여 예상되는 물부족 현상에 대한 적극적인 홍보를 하므로써 목적을 달성하였다. 그녀도 물 소비 감소에 큰 영향을 준 요인들 중의 하나로서 상수도 요율인상을 들고 있으나 소비자가 요율인상 하나에 의하여 반응하고 있는 것은 아니라고 결론 짓고 있다.

그외에도 용수요율의 인상이 물 소비에 미치는 영향을 전과 후의 경우에 대하여 비교한 연구로 Carver and Boland,(1980), Gibbs(1978), Cochran and Cotton(1985) 등이 있다.

(7) 법령 제정: 물 절약 및 수자원 보존을 위한 법령 제정을 지지한다.

물 사용을 위한 법적 권한의 정비

수도 사업법을 개정하여 아파트 건물 신 개축이나 도시 재개발시 초절수 수세식 변기의 설치를 유도.

공공건물 신 개축시 신형 수도설비 사용을 요구

특정업소의 중수사용 비율의 의무화

(8) 물 판매활동 강화: 수자원을 최대한도로 이용하고 시장원리에 의하여 낭비를 줄이기 위한 지역간, 또는 관리 주체간 물의 판매활동을 장려한다. 시장원리에 의하여 효율적인 자원관리를 하고자 하는 것으로서 생수판매의 허용도 이 범위에 들어간다고 할 수 있다.

지역간 물 수송을 장려하기 위하여는 공급하고 남은 잉여의 물은 다른 관리 주체에게 팔수

있다. 미국 캘리포니아주에서는 관할 지역이 광활하고 기본적으로 사막 지역에 설립된 도시들이 많아서 물관리가 주전체의 경제활동의 사활에 관계되는 만큼 여러가지 창의적인 제도와 기구를 만들어 운영하고 있다. 예를 들면, 1992년에 주정부 지원하에 물은행을 설립하여 지역간의 물수송 업무를 전담케하여 큰 성공을 거두고 있다(California State Dept. of Water Resources, 1994). 기본적으로 물 은행에서는 성수기의 잉여물을 넘겨받아 갈수기를 겪는 지역에 공급하거나 지하수 보충용 저장해 주었다가 가뭄시에 팔아서 물의 수급관리를 하는 기구로서 우리나라에서도 지역간 물수송체계가 확립된다면 앞으로 고려해볼만한 제도라고 생각된다. 이 모든 활동은 지역간 물 수송이 원활이 이루어질 수 있어야 한다는 전제가 깔려있는데 지역간 물수송 문제는 관련 지역주민간의 이해관계가 크게 걸려있는 민감한 사항이므로 다음과 같은 다섯가지 대원칙을 정하여 지역간 연계운영에 활용하고 있다.

1. 지역간 물수송은 강제성을 띠면 안된다. 물 수송이 이루어진 사실은 서류상의 물수송만으로는 인정이 안되며, 실질적인 물수송이 따라다녀야 한다. 무엇보다도 중요한 것은 물을 판매하는 쪽의 사용권이 침해되어서는 안된다.
2. 물수송의 결과로 지역내의 생태계가 해를 입어서는 절대로 안된다.
3. 물 수송으로 인하여 공급자 측의 지하수 자원이 기준이하로 줄어서는 안되며 지하수대의 손상을 입어서도 안된다.
4. 물을 받는 측에서는 그들 자신의 수자원을 도시 물 절약지침과 농업용수의 절약관리지침을 준수하여 최대한도로 효율적으로 물관리를 하고 있다는 증명을 하여야한다.
5. 물을 수송 받는 측에서 물수송에 따르는 제반 작업을 주도해야하며 수송받은 물의 사용권리를 관리하는 조직이나 기구는 지역청의 재정적 자립과 중소 농업도시의 경제상황에 미치는 영향을 고려해 주어야한다.

(9) 자율 및 강제적인 절약운동:지역 물 관리기구가 필요시 강제적 조치를 포함하여 자발적인 절수 운동을 통한 물 보존 윤리를 확립하도록 지지한다.

1987년 3월 미국 캘리포니아의 East Bay시에서는 용수 공급원인 시에라 네바다 산맥에 쌓인 눈의 적설량이 예년의 64% 수준이고 수분 함유량은 예년의 51% 밖에 되지 못하다는 사실을 알고 그해의 강우마저 충분치 못하면 전년도에 이어서 심한 가뭄을 당할 처지에 있었다. 따라서 자율적인 12% 목표 절약운동을 유도하였고 그목표가 도달되지 못하면 강력한 강제적 절약운동을 펼칠 예정이었다. 그러나 그해 예년 강우의 56%밖에 얻지 못한 두번째의 가뭄에 직면하자 25% 절약 목표를 세우고 총체적인 가뭄 극복 작전에 들어가게 되었다(Gilbert, et.al., 1990). 그들이 취한 절약운동은 수용가를 단독주택 주거자와 아파트주거자, 공업용수, 상업용수, 농업용 수용가의 다섯구룹으로 나눈후에 각 구룹별로 절약의무 목표를 할당하여 시행하였다.

겨울에는 실내에서 기본적으로 필요한 양을 사용할 것이라고 생각하여 그양을 기준으로 구룹별 최소 필요량으로 가정하고 여름 성수기에 구룹별 침투수요량에서 구룹별 겨울철 평균수요량을 감하고 남는 양들의 구룹별 분포를 구하여 그 양의 비례대로 절수목표를 할당하였다. 그리고 그에 부응하면서 약 10%의 물값 수입감소를 예상한 inclining-block rate로 물값을 인

상하여 절수정책을 시행하였다. 그 결과 목표치를 약간 상회하는 절약효과를 얻어서 결국 3년동안 계속된 가뭄을 성공적으로 극복하였다. 물값인상을 고려할때에 가격 탄력성 지표는 가뭄시에는 별 도움이 안되었다고 하며 물값인상은 다음과 같은 조치들과 병행하여 시행되었다고 한다.

1. 매일매일의 부족상황의 언론 보도를 통한 홍보
2. 물절약을 위한 교육활동
3. 자동 잠금 장치 노즐이 없는 자동차 세차금지
4. 새로운 잔디심기 금지
5. 규정준수 여부를 감독할 감시반 운영

강제적인 조치의 내용에 대한 설명요구가 약 12만건 접수되고 절수운동의 감시통제를 위한 컴퓨터 작업에 약 40인-달의 노동력이 투입되었다고 한다.

이상 ASCE의 국가 물 정책위원회에서 개발한 "물 보존을 위한 정책선언 (Water Conservation Policy Statement)"을 중심으로 절수를 위한 구체적 방안들을 살펴보고 절수를 새로운 공급원으로 인정하고 있다.

4. 지하 저수지를 활용한 재처리수의 재사용과 지하수 연계운영

통상 처리된 하수는 강이나 바다로 다시 유출시키지만, 재처리수의 재사용이란 하수처리를 통하여 정수된 물을 다시 필요한 곳에 운반하여 사용하는 것을 말한다. 따라서 하수처리의 정도가 중요한 기준이 된다. 하수 처리하여 강이나 바다에 방류시키려면 적어도 2차 처리까지는 거쳐야 하지만, 추가로 응집 침전처리와 여과 정수를 하여 다른 용도로 사용할 수 있게 하여야 한다. 경우에 따라서는 역삼투막(RO) 처리와 활성탄소 처리후 지하수 보충수로 활용하기도한다(예: Water Factory21). 처리된 재처리수는 살수, 소화용수, 세차용수, 냉각수등으로 또는 특정작물의 관개용수로, 풍치유지용 관개용수, 해수의 지하수 침투방지용, 생태계 보전용, 관광놀이 및 풍치를 위한 저수용, 기반침하를 막기위한 지하수 보충용 등으로 사용된다 (일본에서는 중수라고도 부르며 여러 가지 활용방안이 있다.(건설부, 1994)).

재처리수의 사용은 다음과 같은 두가지의 잇점을 가져다준다. 첫째는 재처리수는 지역 물관리 운영방안에 연계시켜서 사용될 수 있다. 즉, 보건 위생상 직접 음용수로는 쓸 수 없지만, 다른 용도로 쓰일 물을 대체시키므로써 실질적인 공급원의 역할을 한다. 따라서 시스템 관리 측면에서 물관리의 폭을 넓혀주어, 시스템 전체의 효율을 높여준다. 둘째는 지역에 따라서는 연수 공급을 위하여 댐과 수백 킬로에 달할 수도 있는 용수로 건설의 필요성을 감면시키므로써 비용절감은 물론 환경 생태계의 파괴를 미연에 방지해주고, 하수 발생량은 물론 처리의 비용도 줄여준다.

재처리수의 사용은 살수, 소화용수, 세차용수, 냉각수등으로 직접 사용되기도 하지만, 대개 지하수와의 연계운영을 염두에 두고 이루어지는데 대체로 처리된 재처리수를 직접 용수공급원으로 사용할 경우 보건 위생상 또는, 토질환경의 측면에서 불때 위험성이 있을 수 있기 때문이다. 예를 들면, 처리된 재처리수내에 녹아있어서 미처 제거되지 못한 염분이나 중금속등이 존재할 경우 단기적으로 별 문제 없이 사용될 수 있을 지 모르나 장기적으로 관개용수로 사용하면 농토에 염분을 축적시키는 결과를 초래하고 농토를 못쓰게 만들 수 있으며, 중금속의 경우는 중금속 오염에 따른 인체에 치명적인 부작용을 야기할 수도 있기 때문이다. 따라서 선진국에서는 수십년전부터 이를 역삼투막 처리와 활성탄소처리를 하여 이를 직접 사용하지 않고 제한된 특정지역에 설정된 지하수 유역에 지하수로 침투시켜 고갈되고 있는 지하수원을 보충하고 다시 필요한 지역에서 지하수를 뽑아 올려 사용하는 지체를 발휘하고 있다.

이는 특정 지하수대(주로 unconfined aquifer)를 지하저수지 및 여과장치로 활용하는 방안으로써 땅값

이 비싼 우리의 경우 지표면에 저수지를 만드는 대신에 토지의 활용효율을 높일 수 있으므로 지역 지하수문(geohydrology) 및 지역특성에 따라서 검토되어야 할 좋은 방안이라 할 수 있다. 이를 지하수원과의 연계를 통한 운영방안이라 한다. 다만 지하수 연계운영시에는 재처리수 내에 다량의 염분이나 suspended solid, boron, 중금속 등이 녹아 있는지와, 지하수의 염도변화량 및 다른 오염물질 등에 대한 지속적인 수질 감시체제가 가동되어야 한다.

5. 재처리수 활용을 위한 경제성 평가와 장기 수자원 관리계획

재처리를 한 중수사용의 경제성 평가시 중수 공급비용과 상수공급 비용을 톤당 생산단가르 비교하여 대안을 평가하는 것은 잘못된 결과를 가져올 수 있다. 경제성 분석시 가장 효율적인 결과를 가져다주는 의사결정 기준은 한계비용의 개념에 두어야 한다. 한계 비용(marginal cost)이란 현재의 생산 수준에서 생산을 추가로 한 단위 공급하는데 소요되는 비용을 의미하는 것으로서 이는 현 생산량의 함수이다. 이론적으로는 재처리수 활용을 할 것인가 말 것인가를 위한 경제성 평가도 한계비용의 개념으로 평가가 되어야 올바른 평가를 내릴 수 있다

현재의 공급대안에 중수 공급을 추가로 고려하는 경우, 평가대상이 되는 기존의 수자원 시스템과 전혀 다른 시스템구조를 갖는데도 불구하고 동일한 평균생산 단가를 가졌을때, 평균 단위비용 분석에 의하면 어느쪽이나 같은 경제적효과를 얻는다는 결론에 이르게 된다. 그러나 실은 수자원 공급시스템의 구성이 어떤형태로 이루어져 있는가가 추가된 절약효과를 어떻게 운영할 것인가를 결정해주므로 추가되는 단위공급량의 경제적가치가 달라지게 마련이다. 따라서 추가공급 여유용량이 전혀 없는 기존의 수자원 공급체계에서 중수이외에 고려할 수 있는 대안이 통상적인 지표수 공급시스템이라 한다면 중수의 사용이 훨씬 경제성이 있을 것으로 생각할 수 있는 것이다.

한계비용의 관점에서 볼때 현재의 공급대안에 중수공급을 추가로 고려하는 경우에는 시스템이 요구하는 최종 용수수요를 충족시키기 위하여, 중수사용을 할 경우와 중수를 활용하지 않고 운영하는 시스템 사이의 비용을 계산하여 비교하여야 적당한 평가가 된다고 할 수 있다. 즉, 중수공급 비용과 상수공급 비용을 톤당 평균 생산비용으로 일 대 일로 비교하여 중수의 경제성을 따지는 것은 기존 공급시스템들의 초기고정 투자비의 효과를 정당하게 감안해주지 못하고 시스템 측면에서의 투자 효율성 효과를 살리지 못한다는 점에서 문제가 있다. 다시 말하면, 재처리수 활용을 위한 경제성 평가도 새로운 대체 용수원 개발을 지연시켜서 얻어지는 초기투자 및 고정비용 절약 효과가 감안될 수 있도록 장기 용수공급 계획 수립의 관점에서 여러가지의 용수공급원을 재처리 대안들을 함께 고려하여 최선의 대안을 찾아내야 한다.

이 경제성 평가문제는 장기용수공급의 문제와 자연스럽게 연결이 되며 장기 공급계획문제는 시스템분석 측면에서 고려되어야 한다. 그리고 장기 용수공급계획 문제의 골격은 최적 시설확장 문제의 특성을 가지므로 다음과 같은 두가지의 관점에서 설명할 수 있다. 첫째는 수요지와 공급지 사이에 용수 서비스를 제공하는데 소요되는 운영비용과 여러 대안들의 생산및 수송시설로 표시되는 두 유형의 고정 투자비용과의 사이에서 경제적 균형을 찾는 관점 이고, 둘째는 규모의 경제성(Economies of Scale)의 관점에서 한번에 크게 투자하는 것과 자본의 시간적 가치를 보존하고자 투자시기를 최대한 늦추도록 필요한만큼 조금씩 나누어 투자하고자 하는 것과 사이의 균형을 찾는 문제로 파악될 수 있다. 이 문제는 개략적으로 다음과 같이 수학적 모형으로 구성이 가능하다. 최적화 기법을 활용한 시스템 분석 기법을 활용하면 주먹구구에 의한 방법보다 약 15% 정도의 예산 절약이 가능한 경제성 있는 해를 구할 수도 있음이 밝혀지고 있다(김승권, 1992).

$$(P) \text{ Minimize } \sum_i \sum_j \sum_t C_{ijt} D_{jt} X_{ijt} + \sum_i \sum_t f_{it} Y_{it} + \sum_i \sum_j \sum_t g_{ijt} Z_{ijt} \quad (1)$$

$$X \geq 0$$

$$Y, Z \in \{0, 1\}$$

$$S.T \quad \sum_i X_{ijt} = 1 \quad \forall j, t \quad (2)$$

$$\sum_j D_{jt} X_{ijt} \leq E_i Y_{it} + S_i \quad \forall i, t \quad (3)$$

$$D_{jt} X_{ijt} \leq B_{ijt} + F_{ijt} Z_{ijt} \quad \forall i, j, t \quad (4)$$

$$Y_{it-1} \leq Y_{it} \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$Z_{ijt-1} \leq Z_{ijt} \quad \forall i, j, t \quad (6)$$

$$Z_{ijt} \leq Y_{it}, \text{ if } D_{jt} X_{ijt} \geq B_{ijt}, \forall i, j, t, t \neq 0 \quad (7)$$

여기서, (7)식 대신에 (7A)와 (7B)식을 더하여 생각해도 된다.

$$Z_{ijt} - Y_{it} \leq M*(1-Z_{ijt}), \quad \forall i, j, t, t \neq 0 \quad (7A)$$

$$D_{jt} X_{ijt} - B_{ijt} \leq M*Z_{ijt}, \quad \forall i, j, t, t \neq 0 \quad (7B)$$

(단, M은 큰 수이다.)

2) 변수정의 및 제약식 설명

X_{ijt} : 계획기간 t에서 공급지 i에서 수요지 j로 제공되는 수요량, D_{jt} 에 대한 비율

C_{ijt} : 기간 t에서 공급지 i에서 수요지 j의 수요를 만족시킨다고 가정할 때 현재가로 계산된 단위 공급량당 총 운반 및 운영비.

D_{jt} : 기간 t에서 수요지 j에서의 용수 수요량

f_{it} : t시점에서 용수공급시설을 확장 또는 건설 할때 현재가로 할인된 고정비용의 기간 t와 t+1의 차액

$Y_{it} = \begin{cases} 1: \text{계획기간 t에서 공급지 i를 확장 또는 건설할때} \\ 0: \text{그렇지 않을때} \end{cases}$

g_{ijt} : t 시점에서 용수로로 설치할때 현재가로 할인된 고정비용의 기간 t와 t+1의 차액

$Z_{ijt} = \begin{cases} 1: \text{기간 t에서 공급지 i에서 수요지 j로 용수로로 설치할때} \\ 0: \text{그렇지 않을때} \end{cases}$

E_i : 공급지 i에서 용수공급시설의 확장 최소 단위용량

S_i : 공급지 i에서 기존 용수공급시설의 공급용량

B_{ijt} : 기간 t에서 공급지 i에서 수요지 j로의 기존 용수로의 공급 가능 총용량.

F_{ijt} : 기간 t에서 공급지 i에서 수요지 j로 용수공급시 용수로 확장 최소 단위용량.

문제의 제약식을 살펴보면; (2)는 수요를 반드시 만족시켜야 한다는 조건이고, (3)은 수요지 j의 수요를 만족시키기 위해서 기존 공급량으로는 부족할때는 새로운 용수공급시설의 건설을 고려해야 됨을 보이며 (4)는 수요를 만족시키기 위해서 새로운 용수로의 건설이나 확장을 해야됨

을 의미한다. (5)와 (6)은 한번 건설된 설비는 폐기되지 않음을 보여주는 제약식이다. 이 식들로 목적함수의 비용계수를 단위 계획기간 사이의 증분 할인 비용으로 처리한 이유가 설명될 수 있다. 즉 한번 선택된 공급시설은 계획기간 말까지 계속 유지된다고 가정하므로써 계획년도마다 할인된 증분비용을 합산하게 되며 결과적으로는 고정 투자의 총할인 비용을 계상한 것으로 된다. (7)번 제약식은 기존 용수로 용량이 용수 요구량을 감당하지 못할 경우, 새로운 용수로의 건설은 새로운 서비스를 제공할 시설 건설에 뒤따라야 된다는 것이다. 여기서 (7)식 대신에 (7A)와 (7B)식을 더하여 생각해도 된다. 즉, $D_{jt}X_{ijt} \geq B_{ijt}, \forall i, j, t, t \neq 0$ 이면 Z_{ijt} 가 1 일 경우에만 (7B)식이 성립하고 $Z_{ijt} \leq Y_{it}$ 이게 된다. 따라서, $D_{jt}X_{ijt} \geq B_{ijt}, \forall i, j, t, t \neq 0$ 이면 (7A)과 (7B)식은 $Z_{ijt} \leq Y_{it}$ 의 관계식이 성립하게 한다. 또 $D_{jt}X_{ijt} \geq B_{ijt}, \forall i, j, t, t \neq 0$ 이 아니면 (7B)식은 Z_{ijt} 가 1 이거나 0 이게 한다. Z_{ijt} 가 0 을 선택하면 (7A)식은 저절로 성립되고 따라서 $D_{jt}X_{ijt} \geq B_{ijt}, \forall i, j, t, t \neq 0$ 이 아니면 $Z_{ijt} \leq Y_{it}$ 이나 $Z_{ijt} > Y_{it}$ 는 모두 가능하게 된다.

본 모델은 기존의 용량한계가 있는 동적입지 선정문제와는 두가지 유형의 이항변수 (Y,Z)가 고려된다는 점에서 서로 다르다. 다시말하면, 기존의 연구에서는 공급설비가 세워져야만 공급이 가능했지만 ($X_{ijt} \leq Y_{it}$ 제약식), 본연구에서는 기존의 공급 설비만으로 수요를 충족시킬 수 있을 때는 설비를 세우지 않고 용수로의 추가 설립만으로도 가능하다. 즉, 공급설비가 세워지지 않더라도 고정비는 발생할 수 있다. 이것은 제약식(7)이 조건부적으로 적용되는 것을 의미하며 이의 해결은 보편적인 해법의 고안을 어렵게 하는 요소로 작용한다.

본 연구의 모델은 용수공급 시설의 확장, 건설 또는 새로운 용수로를 설치할때 고정비가 발생하는 동적 입지선정 문제 형태로서 최소비용 Network Flow 문제를 포함하며 다음과 같은 가정하에서 구성되었다. (1)각 공급지의 최대 공급량, 각 수요지의 수요량, 용수공급시설의 확장 및 건설비용, 용수로 설치 비용, 단위운반 및 운영 비용은 주어지고, 새로운 용수공급 시설의 확장규모와 용수로 확장 규모는 정해진 범위 내에서 이루어진다. (2)새로운 용수로를 설치 하였을시 단위당 운반 및 운영비용은 공급지와 수요지 사이의 용수 공급량에 비례한다. (3)계획 기간들은 離散的이며 건설에 소요되는 시간은 離散化시킨 범위 내에 있다고 보고 무시한다. (4)계획 기간은 유한하며 용수 공급 설비 설치 장소 및 수요지의 갯수도 한정되어 있다. (5)수요는 반드시 만족되어야 한다.

고려되는 용수 공급 대안들로는 중수설비의 도입, 댐 및 저수지 건설, 지역간 물수송, 지하수, 해수의 담수화 설비, 인공강우와 같은 기타 물 절약방안 등등이 될 수 있다. 즉, 수자원 부족량 파악을 위한 신뢰성 있는 각종 수문관측 및 물이용 자료를 확보할 수 있다는 전제하에 여러가지 공급방안을 한꺼번에 고려하므로써 수자원 시스템 측면에서 효율적인 분배계획과 시설도입을 위한 경제적인 방안이 찾아질 수 있을 것이며 그 속에서 수요관리를 위한 진정한 생산성 제고 방안을 찾을 수 있을 것이다.

6. 결론

수자원 관리 문제는 가뭄 해갈이 이루어진다 해서 일시적인 처방으로 수행되어서는 안되고 지속적으로 실천되도록하는 정책적인 배려가 중요하다.

이제는 지표수 활용을 위한 댐건설이 한계에 와있고, 지하수 개발도 곧 한계에 부딪힐 것이다. 따라서 전국적으로 가용한 수자원에 대한 재 실사작업이 시급히 이루어져야 할 것이며 새로운 용수원 창출 연구와 더불어 제한된 수자원을 효율적으로 활용할 수 있도록 장기 수자원 개발 및 관리 계획이 재 정립 되어야 할 것이다. 차제에 신뢰성 있는 계획수립을 위한 전국적인 지하수 및 지표수 자원의 자료수집 및 댐 저수지 운영자료 및 수질자료의 체계적 관리와 자료집의 정기적인 발간 시스템을 확립시켜서 자유로운 연구분위기를 조성하여야 하며, 귀중한 국가 자원의 낭비를 없앨 계획 및 설계를 위한 정보자산으로 후세에 남겨주어야 할 것이다.

그리고 하천 유역간, 지역간 용수공급 연계 운영체계와 용수 공급원간의 연계운영 방안 및 그를 뒷받침할 유역간 용수공급 관로 건설에 대한 조사연구와 물 사용권(water right)에 대한 법적 제도적인 정비도 이루어져야 할 것이다.

수요관리 차원에서의 물값의 인상은 가장 중요한 절수 유도책이 될 수 있으므로 신중히 검토되어야 할 것이다. 물값을 인상시켜서 절약설비 도입 보상비(rebate)를 지급하는 등의 물절약 캠페인에 필요한 재원의 일부를 조달하고 필요하다면 정부 재정의 지원으로 본문에서 살펴본 다양한 절수정책을 시행하고 물 절약운동에 동참하도록 유도하는 식의 정책도 고려해볼 수 있을 것이다. 여러 보고에 의하면 물값 인상이 강력한 절수를 유도하는 시발점이 되고있다. 따라서 우리도 물값의 적절한 인상이 고려되어야 할 것이다. 물론 용수공급설비 투자비 회수를 위하여는 물값 인상이 긍정적인 측면만 있는 것은 아닐 수도 있다. 그러나 낭비를 조장할 정도의 저렴한 물값은 국가적으로 보아서도 바람직하지 않으므로 적절한 요율인상이 신중히 고려되어야 할 것이다. 그리고 절수를 목적으로 할 경우도 요율인상 하나만으로는 소기의 목적 달성이 어렵다. 이는 지속적인 국민 계몽과 참여를 위한 캠페인, 낭비에 대한 법적, 제도적인 개선체제에 대한 지원이 지속적으로 이루어져야 효과를 발휘하는 것으로 나타났다(Anton, 1995, Helen, 1994).

이를 위하여는 전문 연구실행팀의 가동과 신문 T.V등의 언론매체를 활용한 계획적인 홍보활동이 추진 되어야할 것이며, 현장실사, 절수기기 전시, 물절약사례 영상교육, 물절약을 위한 학술 발표대회, 학교 교육 프로그램 개발, 소책자 제작배포등을 활용하고 여론 수렴을 위한 설문조사, 정책홍보 및 공청회, Hitel등의 컴퓨터 통신을 통한 여론조사 및 토론 프로그램개설 등이 필요하다.

그리고 중수사용의 경제성 평가를 위하여는 재처리비용과 상수공급 비용을 톤당 생산단가로 비교하여 대안을 일 대 일로 비교 평가하는 것은 잘못된 결과를 가져올 수 있으므로 한계비용의 개념으로 평가가 되어야한다. 즉, 재처리수 활용이 새로운 대체 용수원 개발을 지연시켜서 얻어지는 초기투자 및 고정비용 절약 효과가 감안될 수 있도록 장기 용수공급계획 수립의 관점에서 여러가지 물절약 및 공급 대안들을 함께 고려하여 최선의 대안을 찾아내야 올바른 평가를 내릴 수 있다.

이 같은 활동을 정책적으로 뒷받침하기위하여 재원의 확보와 범 국가차원의 정책개발이 이루어져야 하며 이를 위한 실질적인 법적 제도적 뒷받침이 되어야 할 것이다.

7. 참고문헌

1. Agenda21, The United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, June 3-14, 1992.
2. Anton, Walter F., "Implementing ASCE Water-Conservation Policy", J. of Water Resources Planning and Management, Vol. 121. No.1, Jan/Feb. 1995, p80-89.
3. Billings, R. B., and Day, W. M. "Demand management factors in residential water use: The Southern Arizona experience, " J. Am. Water Works Assoc., 81(3), 1989, pp.58-64.
4. California State Department of Water Resources, "November 1994 Executive Summary of the California Water Plan Update", Nov. 1994.
5. Carver, P.H., and Boland, J.J., "Short- and long-run effects of price on municipal water demand," Water Resources Research, Vol. 16, No. 4, 1980, pp. 609-616
6. Cochran R., and Cotton, A. W. , "Municipal water demand study, Oklahoma City and Tulsa, Oklahoma, "Water Resources Research, 21(7), pp.941-943.
7. ENR, "Brakes on Water Rates", Engineering News Record, 216 (18):5, 1986
8. Gibbs, K. C. "Price variable in residential water demand models," Water Resources Research, 14(1), 1978, pp. 65-73.
9. Gilbert, J.B. ,E.J. Bishop, and J. A. Weber, "Reducing Water Demand During Drought Years," J. Am. Water Works Assoc., 82(5), May, 1990, pp.34-39.
10. Helen Briassoulis, "Effectiveness of Water-Conservation Measures in Greater Athens Area", J. of Water Resources Planning and Management, Vol.120. No.6, Dec. 1994, p764-777.
11. 건설부 , "중수도 기술개발 방안 연구", 1994. 6.
12. 김승권, "장기 용수공급계획 수립을 위한 스프레드시트 모형", 대한 토목학회지, 제12권, 제3호, 1992, 9월, pp. 153-162.
13. 이정전, "물의 경제성 제고와 효율적인 물관리 정책", 세계 물의 날 기념 수자원의 효율적 활용을 위한 정책토론회 보고서 p51-64, 주최 삼성지구환경연구소, 후원: 환경부, 1995년 3월 22일.