

김 중 훈*

지난 호에서는 최적화 이론이 관망 시스템의 설계와 운영에 어떻게 적용될 수 있는지 살펴 보았다. 이번호에서는 최적화 이론이 댐 운영에는 어떻게 적용될 수 있는지 알아 보기로 한다.

1. OR 및 수자원시스템공학의 유래
2. 최적화 기법의 소개
3. 관망 시스템에의 적용
4. 댐 운영에의 적용
5. 지하수 펌핑계획에의 적용
6. 도시 배수설계에의 적용

4. 댐 운영에의 적용

최적화 모형은 여러 제약조건식들을 범하지 않는 범위내에서 목적함수를 최소 또는 최대화시키는 결정변수들을 결정하는 형태로 만들어진다. 목적함수와 제약조건식들은 수학적으로 결정변수들의 함수로 나타내진다. 특히 댐 운영문제에 있어서 결정변수는 방류량과 기간별 저류량이 된다. 제약조건으로는 주로 물수지 방정식, 저류한계(최대 또는 최소), 방류한계, 하류보장유량, 요구발전량 등을 포함한다. 목적함수는 여러형태로 나타내어질 수 있는데 이익을 최대화하거나 경비를 최소화시키는 형태, 가용수량 또는 물공급의 신뢰도를 최대화하는 형태, 수력발전을 최대화하는 형태등이 있다.

복잡한 수자원 시스템의 계획을 위해서는 최적운영절차를 필요로 하게 된다. 따라서 저수지 시스템

의 계획을 위한 최적의 운영법칙을 찾기위한 많은 연구가 있어왔다(간혹 이 최적운영법칙은 그 저수지의 최적용량을 결정하는데 쓰이기도 한다). 그러나 모든 저수지의 최적운영에 적용될 수 있는 어떤 알고리즘이란 존재하지 않는다. 어떤 방법을 택할 것인가는 그 저수지만의 특성, 획득가능한 자료, 주어지는 목적함수와 제약조건 등에 의해 결정되어야 한다. 일반적으로는 선형계획법(linear programming), 동적계획법(dynamic programming), 비선형계획법(nonlinear programming) 등으로 나누어 볼 수 있는데 위 방법들의 혼합형이 쓰이기도 한다.

저수지 시스템의 실시간 운영이란 기존의 저수지 시스템을 최적으로 운영하되 어떤 목적을 위한 방류량이 상당히 짧은 시간 간격으로 결정되어지는 것을 의미한다. 실시간 최적운영 모형은 계속해서 들어오는 새로운 정보자료를 고려하는 입력과정에 어려움이 없어야 하며 모형의 운영시간 간격과 새로운 정보자료 입력 시간간격 등에 비하여 프로그램의 실행시간이 짧아야 한다.

제약조건식에 나타나는 저수지로의 유입유량은 언제나 수문학적 불확실성을 내포한다. 저수지의 운영계획을 세우기 위해서 유입유량에 관한 불확실성의 문제는 추계학적 방법(stochastic programming)이나 기회-제약조건식(chance-constraint)의 형태로 해결하기도 한다. 실시간 운영 문제에서는 다양한 수문학적 매개변수들, 확률분포, 실측자료등을 이용한 유입유량을 예측하는 방법들이 쓰인다.

* 고려대학교 토목환경공학과 조교수

4.1 선형계획법(LP) 모형

선형계획법을 이용한 저수지 운영모형의 목적함수는 저수지 용량(또는 총비용)을 최소화하는 것일 경우가 많으며 이 저수지 용량은 주어진 모든 제약조건을 만족해야하는 것임은 물론이다. 또한 일년간의 전체 순이익을 최대화시키는 목적함수의 형태도 많은데 이 경우 연간 전체 순이익은 각 운영기간에 있어서의 저류량과 방류량의 함수로 나타내어진다.

Dortman(1962)은 선형계획법을 이용한 3가지의 모형을 보여 주었는데, 첫째 모형은 간략화된 유역의 계획문제에 적용하는 제일 간단한 형태이다. 이 모형은 이듬해로의 저류량의 이월이 고려되지 않고 매년 똑같은 우기와 건기의 두 계절의 저수지로의 유입량만을 고려하는 단순성(한계성)을 보인다. 둘째 모형에서는 이듬해로의 이월 저류량을 산정할 수 있으며, 셋째 모형에서는 저수지로의 유입량을 추계학적으로 고려하게 된다. 위의 세 모형은 모두 mass balance를 포함한 여러 제약조건을 만족시키고 동시에 경제적 목적함수를 최대화시키는 결정변수를 구하는 모형이며 이 때 결정변수는 저류용량과 목표방류량이다.

선형계획법과 동적계획법의 LP-DP의 혼합해법을 이용하여 미국 캘리포니아주의 Central Valley Project를 위해 실시간 저수지 최적운동을 결정하는 모형도 있다(Beckor와 Yeh, 1974). 이 모형은 몇몇 목적함수를 제약조건식으로 변환시킨 다음 선형계획법을 이용하여 각 운영기간중의 방류로 인한 저수지 내의 저류수가 가지는 위치에너지의 손실을 최소화시키는 것이다. 이 때 선형계획법의 해는 다수의 운영기간을 위한 전진동적계획법(forward dynamic programming)에 embed된다.

결정론적 모형에서는 저수지로의 유입유량은 계절평균유입량을 사용하거나 과거의 극한 상황으로부터 구한다. 그러나 실제로는 모든 수문학적 매개변수들은 불확실성을 내포하고 있다. 만약 중요한 변수가 불확실하다면 그로인한 시스템의 효율저하와 손실이 얼마나 되는지 광범위한 해석을 통하여 밝혀야 한다. 간혹 몇몇 매개변수의 불확실성은 민감도 분석으로 대신되기도 하지만 불확실성을 명확히 고려한다고 볼 수는 없으며 때로는 만족할 만한

결과를 보이지 못한다. 따라서 유입유량과 같은 특정 매개변수가 불확정적이라고 보는 추계학적 선형계획법(stochastic LP)이 사용되기도 한다.

추계학적 선형계획법 모형에는 stochastic LP for Markov process, stochastic programming with resource, chance-constrained LP, linear decision rules(LDR) 등이 있으나 유입유량의 추계학적 성향을 선형계획법에 잘 반영시킬 수 있는 chance-constrained 모델이 다른 방법들에 비해 더 유리한 것으로 사료된다.

4.2 동적계획법(DP) 모형

동적계획법은 여러단계의 의사결정과정을 거치는 최적화 기법으로서 Bellman(1957)에 의해 그 기본이론이 정립되었다. 이후 DP는 수자원 시스템의 최적화에 널리 쓰이게 되었는데 이 기법이 많이 쓰이게 된데에는 수자원 시스템이 가지는 비선형성과 추계학적 특성이 DP의 형태로 변환될 수 있다는 장점이 있었다. 뿐만 아니라 DP는 많은 변수의 크고 복잡한 문제를 작은 여러 부문제(subproblem)로 나누어 반복적으로 해석함으로써 효과적으로 해를 구해낼 수 있다. 이와 같이 여러 subproblem으로 나누는 작업을 decomposition이라 하는데 DP를 여러 댐의 연계운영에 적용하려면 꼭 필요하게 된다. 그 이유는 너무나 많은 반복 계산이 요구되어 거의 계산이 불가능해지기 때문인데 이것을 흔히 “curse of dimensionality”라 한다. 따라서 상태변수의 갯수와 밀접한 함수관계를 가지는 “curse of dimensionality”의 문제를 해결하기 위해서는 decomposition은 물론 상태변수의 갯수를 최대한 줄여야 한다. 상태변수란 시스템의 상태를 나타내는 변수로서 저수지 문제에 있어서는 각 운영단계(stage)에서의 저수지내의 저류량(storage)이라고 할 수 있다. 실제로 저류량은 continuous한 변수로 봐야하나 DP에서는 discrete하게 취급된다. 따라서 상태변수의 갯수를 많이 고려하여야 continuous한 실제상황과 유사해지고 갯수를 줄일수록 저류량을 성기게 나타내게 되는 문제점이 야기된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 DDDP(discrete differential dynamic programming)가 연구되었다. 이 방법은 각 stage에

서의 상태변수의 가능영역을 두어 실제로 현재의 iteration에서 선택가능한 상태변수의 갯수에 제한을 가함으로써 “curse of dimensionality”를 피해 보려는 것이다. 다음 iteration에서는 상태변수의 영역을 바꾸어 주면서 목적함수가 국지최적에 도달할 때까지 계산을 반복하게 된다. 저수지 문제는 크게 계획에 관한 연구와 운영에 관한 연구의 두가지로 구분된다. 더 나아가 운영에 관한 문제는 단기간 운영과 장기간 운영으로 나눌 수 있다. 단기간(시간별 또는 일별) 운영에 있어서는 물수요량과 유입량을 확정적이라고 볼 수 있으나 장기간(월별 또는 년별) 운영에서는 유입량의 추계학적 특성을 감안해야 할 경우가 많다. DP는 그 특성상 stochastic DP를 취급하기에 적합한 기법이다.

4.3 비선형계획법(NLP) 모형

비선형계획법(NLP)은 수자원 시스템분야에서 LP나 DP만큼 많이 쓰이지는 않았는데 이는 많은 컴퓨터 용량과 시간이 요구되고 최적화의 수렴과정이 느린데 기인된다. NLP모형은 LP모형에 비하여 아주 복잡한 수식이 요구되는데다 DP와 같이 유입유량의 추계학적 특성을 잘 반영하지도 못하는 문제점이 있다. 그럼에도 불구하고 비선형계획법은 문제를 더욱 현실적으로 수식화 할 수 있고 다른 기법의 이론적 근거를 제시해 주기도 한다. 뿐만 아니라 비선형계획법은 다른 기법이 다룰 수 없는 비선형 제약조건식들도 효과적으로 처리할 수 있다.

일반적으로 저수지 시스템에는 비선형 제약조건식들을 목적함수에 penalty항으로 넣어주고 선형 제약조건식만을 해석하는 conjugate gradient projection 방법과 Lagrangian gradient 방법의 두가지가 주로 사용되었다. 저수지 시스템에 적용된 몇몇 NLP모형을 통해 보면 프로그램의 실행에는 문제가 없으나 컴퓨터의 용량과 수렴속도가 주된 문제점으로 나타났다. 따라서 더욱 효율적인 알고리즘의 개발과 더불어 컴퓨터 속도가 향상되어감에 따라 비선형계획법을 이용한 저수지모형은 더욱 효율적인 방법이 될 것이다.

4.4 실시간 운영 모형

실시간 저수지 최적화 모형은 일반적으로 예측

정보에 근거해서 운영되게 된다. 저수지의 유입 유량예측과 기타 입력자료들은 시간이 경과함에 따라 신뢰성이 떨어지게 되고 그 결과가 가능한 최선의 정보에 근거한 매우 체계적이고 계획적인 의사결정이 필요하게 된다. 따라서 실시간 운영을 위한 의사결정의 전체모형은 장기간과 단기간의 모형으로 분리하여 같이 해석하게 된다. 이 두 모형은 각각 저수지의 유입유량 예측을 필요로 하는데 장기간 예측은 대체로 과거기록을 근거로 한 추계학적 예측을 필요로 한다. 통상적으로 장기간 모형은 계절, 월, 또는 주 단위의 시간간격으로 일년정도를 내다보며 매 시간간격마다 다시 예측해야 한다.

단기간 모형은 장기간 모형의 시간간격에 따라 총예측기간을 취하게 되며 예측 시간간격은 1일로 하거나 수력발전 위주일 경우는 매시간으로 하게 되며 역시 매 시간간격마다 다시 예측해야 한다. 실시간 저수지 운영의 최적화 개념은 미국 캘리포니아주 Central Valley Project(CVP)에 적용되었는데(Yeh, 1979) 이 시스템은 총 9개의 저수지와 9개의 수력발전소, 3개의 운하와 4개의 양수장으로 구성되어 있다. 이 모형은 일년동안의 월별모형, 한달동안의 일별모형, 24시간동안의 시간별모형을 차례로 최적화해 나가는 것으로서 한 모형에서의 결과(일별 방류량 또는 월별 저류량 등)는 반복계산을 하게 된다. 시간별 모형은 시간별 방류량을 새로운 계획하기 위한 것이며 목적함수는 24시간 동안의 수력발전을 최대화하는 것이다. 이 때 제약조건으로는 일별모형에서 결정된 발전소별 방류량조건, 시간별 요구발전량조건, 기타 여러장비와 관련된 적절한 조건들이 있다. CVP의 전형적인 운영기록과 최적운영의 결과를 비교한 결과, 최적운영이 시간별 요구발전량 조건을 더 잘 따를 뿐만 아니라 총발전량에 있어서도 더욱 효율적이었다.

위의 예는 利水측면이 강조된 모형이며 治水를 위한 실시간 운영 모형은 하류의 침수피해를 최소화하는 각 저수지로부터의 방류량계획을 위한 것이다. 상류 유역에서의 기상 및 강우자료는 telemeter를 통해 수시로 입력되어야 하며 이로부터 저수지의 유입유량을 예측하게 된다. 방류된 유량의 정확한 하도홍수추적을 위해 수리모델로 부정류 모

델이 사용되기도 하는데 이 경우 수리모델은 부 프로그램으로 본 프로그램(대개의 경우 NLP)에 연계(interface)되어 많은 반복계산과정을 거치게 된다.

4.5 실무적용에의 문제점

최적화 기법의 댐 운영에의 성공적인 적용이 문헌에 많이 보고되었음에도 불구하고 댐 관리자가 실제로 매일 매일의 방류량 및 발전량 계획을 위해 쓰기를 꺼려하는 이유는 대체로 다음과 같다고 본다.

- 1) 대부분의 댐 관리자는 그 컴퓨터 모형의 개발에 직접적으로 관여하지 않았으므로 그 모형을 사용하는데 불편을 느끼며 이 문제는 특히 매일 매일의 운영에서 대하게 되는 여러 상황에 대처하기위해 그 모형을 수정해야 할 경우 더욱 심하게 된다.
- 2) 발표된 대부분의 모형은 저수지 시스템이 너무 단순화되어 실제의 시스템에 맞게 고치는데 어려움이 있으며 대부분의 연구결과 보고서는 실무적용의 입장에서 볼때는 너무 형편없이 설명되어있다.
- 3) 모형의 개발자와 사용자 간의 의견교환이 부족하다.

5. 맺음말

더 많은 내용을 실었으면 하는 아쉬움이 있으나, 더 자세하고 깊은 내용을 위해서는 참고문헌을 이용하기 바라며 아울러 본 기고는 Yeh(1985)의 "Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review"에서 많은 부분 발췌했음을 밝힌다. 다음 호에서는 최적화기법이 지하수 펌핑계획과 도시 배수설계에 어떻게 적용될 수 있는지 알아보기로 한다.

참 고 문 헌

박명기, 고석구, 권오현(1995), "선형결정술에 의한 다목적댐의 운영을 고찰", 한국수자원학회, 학술발

표회 논문집, 수원대학교, pp. 363-369.

연규방, 심순보(1994), "Network 모형에 의한 수자원의 최적분배", 한국수문학회, 한국수문학회지, 제27권, 제1호, pp. 111-121.

윤용남, 김중훈, 김태균(1995), "최적화모형을 이용한 수자원의 적정분배", 대한토목학회 논문집, 제15권, 제4호, pp. 855-864.

한국수자원공사(1992), 충주댐 및 소양강댐 연계운영 Hydro-Scheduling 모형개발(1차), Vol.1 월간 운영모형 및 운영을 개발.

Allen, R. B., and Bridgeman, S. G.(1986). "Dynamic programming in hydropower scheduling." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 112(3), 339-353.

Brendecke, C. M., DeOreo, W. B., Payton, E. A., and Rozaklis, L. T. (1989). "Network models of water rights and system operations." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 115(5), 684-696.

Bridgeman, S. G., Norrie, D. J. W., Cook, H. J., and Kitchen, B. (1989). "Computerized decision-guidance system for management of the Trent River multireservoir system." *Computerized decision support systems for water managers*, J. W. Labadie, L. E. Brazil, I. Corbu, and L. E. Johnson, eds., ASCE, New York, N. Y.

Burnham, M. W., and Davis, D. W. (1992). "HEC-PRM application: Missouri River reservoir system." *4th Water Resour. Operations Mgmt. Workshop*, ASCE, New York, N. Y.

Chung, I., and Helweg, O. (1985). "Modeling the California State Water Project." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 111(4), 82-98.

Chung, F. I., Archer, M. C., and Devries, J. J. (1989). "Network flow algorithm applied to California aqueduct simulation." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 115(2), 131-147.

Colon, R., and McMahon, G. F. (1987). "BRASS model: Application to Savannah River

- system reservoirs." J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 113(2), 177-190.
- Economic optimization and simulation techniques for management of regional water resource systems: River basin simulation model SIMYLD -II program description.* (1972). Texas Water Development Board, Austin, Tex.
- Engineering and design hydropower.* (1985). EM 1110-2-1701, U.S. Army Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, Washington, D. C.
- Ford, D. T. (1990). "Reservoir storage reallocation analysis with PC." J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 116(3), 402-416.
- Gilbert, K. C., and Shane, R. M. (1982). "TVA hydro scheduling model: Theoretical aspects." J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 108(1), 1-20.
- Giles, J. E., and Wunderlich, W. O. (1981). "Weekly multipurpose planning model for TVA reservoir system." J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 107(2), 1-20.
- HEC-5 simulation of flood control and conservation systems, user's manual.* (1982). U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, Calif.
- Karpack, L. M., and Palmer, R. N. (1992). "Use of interactive simulation environments for evaluation of water supply reliability." Proc., Water Resour. Sessions at Water Forum '92, M. Karamouz, ed., 144-149, ASCE, New York, N. Y.
- Labadie, J. W., Pineda, A. M., and Bode, D. A. (1984). *Network analysis of raw supplies under complex water rights and exchanges: Documentation for program MODSIM3.* Colorado Water Resources Institute, Fort Collins, Colo.
- Loucks, D. P., Stedinger, J. R., and Haith, D. A. (1981). *Water resources systems planning and analysis.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- Martin, Q. W.(1983). "Optimal operation of multiple reservoir systems." J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 109(1), 58-74.
- Martin, Q. W.(1987). "Optimal daily operation of surface-water system." J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 113(4), 453-470.
- Mays, L. W., and Tung, Y. K. (1992). *Hydrosystems engineering and management.* McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N. Y.
- "National study of water management during drought." (1991). Rep. 91-NDS-1, U. S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources, Fort Belvoir, Va.
- Palmer, R. N., and Hoimes, K. J (1988). "Operational guidance during droughts: Expert system approach." J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 114(6), 647-666.
- Palmer, R. N., Wright, J. R., Smith, J. A., Cohon, J. L., and ReVelle, C. S. (1980). *Policy analysis of reservoir operation in the Potomac River Basin, volume I, executive summary.* Johns Hopkins University, Baltimore, Md.
- Program description and user manual for SSARR model, streamflow synthesis & reservoir regulation.* (1975). U. S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division, Portland, Oreg.
- Randall, D., Houck, M. H., and Wright, J. R. (1990). "Drought management of exciting water supply system." J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 116(1), 1-20.
- Schuster, R, J. (1987). Colorado River simulation system, executive summery. U. S. Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver, Colo.
- Shane, R. M., and Gilbert, K. C. (1982). "TVA hydro scheduling model: Practical aspects." J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 108(1), 21-36.
- Sigvaldson, O. T. (1976). "A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system." Water Resour. Res., 12(2),263-278.
- Simonovic, S. P. (1992). "reservoir systems analysis: Closing gap between theory and practice." J. Water Resour. Plng. and Mgmt.,

ASCE, 118(3), 262-280.

Wurbs, R. A., Tibbets, M. N., Cabezas, L. M., and Roy, L. C. (1985). "State-of-the-art review and annotated bibliography of systems analysis techniques applied to reservoir operation." Tech. Rep. 136, Texas Water Resources Institute, College Station, Tex.

Wurbs, R. A., Dunn, D. D., and Walls, W. B. (1993). "Water rights analysis program (TAMUWRAP), model description and users manual." Tech. Rep. 146, Texas Water Resources Institute, College Station, Tex.

Wurbs, R. A. (1991). "Optimization of multiple-purpose reservoir system operations: a re-

view of modeling and analysis approaches." Res. Document No. 34, U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, Calif.

Yeh, W. W-G. (1985). "Reservoir Management and operations models: A state-of-the-art review." Water Resour. Res., 21(12), 1797-1818.

Yeh, W. W-G. (1981). "Real-time reservoir operations: The California Central Valley Project case study." Proc., Nat. Workshop on Reservoir System Operations, G. H. Toebes and A. A. Sheppard, ASCE, New York, N. Y.

〈지난 8월호 강좌(Ⅱ)에서 누락된 내용〉

3.2.3 복잡한 관망시스템설계의 최적화기법

앞에서 언급되었다시피 비선형계획법의 해석에서는 다룰 수 있는 결정변수의 갯수가 제한적이어서 최적설계가 가능한 전체 관망시스템의 크기(특히 관로의 갯수)에도 제한이 있게 된다. 김정환 등(1994)에 따르면 관로수가 30개이고, 용수수요 절점수가 22개, 폐합회로가 9개로 구성되어있는 고양지구 관망시스템의 경우 최적화모형에서 고려된 제약조건식은 196개, 변수는 91개로서 이는 비선형문제로서의 그 규모가 아주 작다고는 할 수 없다. 따라서 더욱 복잡하고 규모가 큰 관망의 최적화설계 문제에서는 비선형계획법(nonlinear programming)의 한계에 의해 해석이 어려워지게 된다. 이와같이 수공학분야의 최적화문제에 있어 비선형 문제의 규모가 너무 커질 경우에는 수리모의 모형(hydraulic simulation model)을 최적화모형(optimizer)에 연계(interface) 시킴으로써 문제의 크기를 최적화모형이 다룰 수 있는 크기로 줄일 수 있다. 이는 최적화문제에 있어 제약조건식의 대부분인 수리학 공식들을 수리모의모형이 대신 해석해 줌으로써 가능해지는데 이는 최적제어이론(optimal control theory)에 근거하고 있다. 그림 3.2는 최적제어이론에 의한 최적화모형과 수리모의모형과의 상호연계를 상징적으로 나타내고 있다. 수

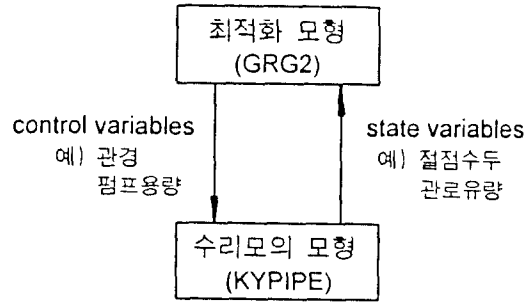


그림 3.2 최적제어이론에 의한 상호연계

리모의모형의 최적화모형에의 연계는 최적화모형만을 사용했을 경우 결여되기쉬운 여러 수리학적 세부사항까지도 고려될 수 있다는 장점도 가지고 있다. Lansey와 Mays(1989)는 위의 기법을 사용하여 최적관경은 물론 펌핑시설, 급수탱크, 밸브 등의 크기와 위치까지도 결정하였다.

3.3 관망시스템에의 기타 적용에

최적화기법은 관망시스템내의 펌핑시설의 최적 운영에도 적용이 될 수 있는데 이는 하루중 용수수요가 적을 시간동안에 급수탱크에 양수해두면 용수수요가 많을 때 펌핑시설에 부담을 덜주게 되는 원리를 이용하는 것이다. Brion과 Mays(1991), Ormsbee와 Lansey(1994)등은 펌핑시설의 최적

운영을 통해서 많은 전기비용을 절감시킴은 물론 더욱 안정된 관망시스템 운영이 가능함을 보여주었다.

노후화 되어가는 관망시스템의 관 교체 또는 갱생이 근래들어 더욱 이슈화되고 있는 가운데 최적화기법을 이용하여 노후관개량을 위한 의사결정지원을 하려는 연구로는 Lansey 등(1992), 김중훈과 Mays(1994) 등이 있는데 각 관을 교체할 것인가, 갱생할 것인가, 그대로 둘 것인가를 결정하는 모형이며 아울러 펌핑시설을 늘릴것인지도 고려한다. 김중훈 등(1995)은 수도권 광역상수도 1단계

관로시스템에 대하여 연차별 교체계획이 가능한 모형을 개발하였다.

3.4 실무적용에 있어서의 문제점

관망시스템의 설계에 있어서 최적화이론의 적용은 그동안 많은 연구가 있어왔으며 실무에서도 성공적으로 적용되리라 예상이 되어왔으나 실제로는 국내에서는 물론 외국에서도 실무에 널리 쓰이지 않고 있는 실정이다. 그렇다면 왜 최적화모형이 실무에서 아직 쓰이지 못하는지 몇가지 가능한 유추를 해 볼 필요가 있다.