

## 밭관개용 관수로 시스템의 최적설계

(Optimal Design of Water Distribution System for Upland crops in Korea)

안 태진\* . 박 용섭\*\* . 전 호원\*\*\* . 박 정응\*\*\*\*

### 1. 서론

정부의 농업기반조성사업을 대행하고있는 농어촌진흥공사는 농수산물 시장개방을 앞두고 밭작물의 국제경쟁력을 강화하기 위하여 시설농업의 일환으로 1994년부터 밭기반조성사업을 착수하였다. 밭기반정비사업은 주로 농도, 용수개발, 용수로, 배수로 및 밭경지정리 등으로 구성되어 있으며 장기적으로는 우리나라 밭의 총면적 756천ha중 15%에 해당하는 110천ha를 개발대상으로 하였고 1994년도에는 3.6천ha에 대해 밭기반정비사업을 위한 설계를 완료하였다. 과수, 채소, 특용작물 및 화훼지구를 조성하는데 있어서 용수로시스템으로는 관로시스템을 이용하고 있다. 밭기반조성사업에서 수원공은 주로 지하수를 이용하고 있으며 이 지하수를 높은 위치에 설치한 배수로에 저류한 후 관로를 통하여 포장에 공급하는 것으로 하고 있다. 이 관수로시스템은 계획, 설계 그리고 분석단계를 통하여 결정되는데 계획단계에서는 경작하고자 하는 작물의 소비수량 즉 수요량을 각 수요지점에서 추정한다. 설계단계에서는 지형상태를 고려한 배관형태와 각 관로의 관경 및 교차점에서 설계수두를 결정하고 분석단계에서는 결정된 수요량과 관내유량과 수요지점의 수두를 계산하여 설계내역이 수리학적으로 타당한가를 판단한다.

밭관개용 용수로시스템의 주목적은 과수단지의 작물이 필요로 하는 시기에 필요로 하는 용수를 공급하는 것이다. 밭작물의 수확량은 기온, 일조량, 비료, 병, 태풍, 강우량, 강우시기, 배수, 용수관리등의 영향을 받으나 여기서는 적당한 물관리가 최대수확량을 생산한다고 가정한다. 본연구에서는 농어촌진흥공사에서 설계한 어느 과수단지지구를 표본지구로 택하여 i) 배수로위치에 따른 관로비용의 변화와 ii) 관로내 동수경사와 관로의 비용과의 관계 등을 규명하고자 한다.

---

\* 농어촌진흥공사, 농어촌연구원, 연구원  
\*\* 극동건설(주), 엔지니어링 사업부, 차장  
\*\*\* 명지대학교, 토목공학과, 박사과정  
\*\*\*\* 서울산업대학교, 토목공학과, 교수

## 2. 모형정립

다음과 같은 수학적모형 P0은 배수조와 펌프장을 포함한 관로시스템에 적용할 수 있다.

(모형 P0) : 최소화 (Minimize) :

$$\sum_{(i,j) \in m} C_{(i,j)m} x_{(i,j)m} + \sum_{i \in S} C_{1i} Hs_i + \sum_{i \in S} C_{2i} Hp_i + \sum_{i \in S} C_{3i} \frac{\gamma \Delta T_i}{\eta_i} Qp_i Hp_i \quad \dots (1)$$

제약조건 (Subject to) :

$$- \sum_{K:(i,k) \in A} Q_{(i,k)} + \sum_{K:(i,k) \in A} Q_{(i,k)} = q_i \quad ; \quad i \in N \quad \dots (2)$$

$$- \sum_{(i,k) \in \sigma(k)} (\pm) \sum_m [J_{1(i,j)m} + J_{2(i,j)m}] x_{(i,j)m} + [Hs_i + Hs_i^{ele}] + [Hp_i + Hp_i^{ele}] \geq H_k^{\min} \quad ; \quad i \in S, k \in N, i \in S \quad \dots (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in p} (\pm) \sum_m [J_{1(i,j)m} + J_{2(i,j)m}] x_{(i,j)m} = b_p \quad ; \quad p \in B \quad \dots (4)$$

$$\sum_m x_{(i,j)m} - L_{(i,j)} = 0 \quad ; \quad (i,j) \in A \quad \dots (5)$$

$$x_{(i,j)m} \geq 0, \quad Hs_i \geq 0, \quad Hp_i \geq 0$$

여기서

- $C_{(i,j)m}$  = 어느 관로 (i, j) 에서 m번째 관경의 단위길이당 비용
- $x_{(i,j)m}$  = 어느 관로 (i, j) 에서 m번째 관경의 길이
- $C_{1i}$  = 배수조지점 i에서 배수조의 단위높이당 공사비
- $C_{2i}$  = 주펌프장 i에서 주펌프의 단위양정고당 펌프설치비
- $C_{3i}$  = kwh당 전력료
- $Hs_i$  = 배수조지점 i에서 배수조의 높이
- $Hp_i$  = 주펌프지점 i에서 주펌프의 양정고
- $Hs_i^{ele}$  = 배수조지점 i에서 배수조바닥의 지반고
- $Hp_i^{ele}$  = 주펌프지점 i에서 주펌프 흡입구의 지반고
- $\gamma$  = 물의 단위중량
- $\Delta T_i$  = 주펌프지점 i에서 펌프가동시간
- $Qp_i$  = 주펌프지점 i에서 주펌프의 양수량
- $\eta_i$  = 주펌프지점 i에서 주펌프의 효율
- $s$  = 배수조의 총개수
- $S$  = 주펌프의 총개수
- $Q_{(i,j)}$  = 어느 관로 (i, j) 의 유량
- $q_i$  = 수요지점 i에서 수요량
- $r(k)$  = 주펌프 또는 배수조와 임의 수요지점 k로 연결한 경로 (path)

- B = 주수원공을 연결한 경로의 총개수
- $b_p$  = 폐합회로(loop)에서는 0이고 주수원공을 연결한 경로사이의 표고차
- A = 관로 (i, j)의 총개수
- $L_{(i,j)}$  = 어느 관로 (i, j)의 길이
- N = 주펌프나 배수조지점을 제외한 수요지점의 총개수
- $H_k^{\min}$  = 임의 수요지점 k에서 설계수두

관마찰 에너지손실에 의한 동수경사(Hydraulic gradient)는 Scobey공식을 적용하였으며 SI단위계로서  $J_{(i,j)} = K_{f(i,j)} V_{(i,j)}^{1.9} D_{(i,j)}^{-1.1}$  이다. 여기서  $K_f = 0.00259$  KS이고, KS는 관종류에 따른 상수,  $V_{(i,j)}$ 는 관로 (i, j)의 유속(m/sec), 그리고  $D_{(i,j)}$ 는 관로 (i, j)의 관경(m)이다. 마찰이외의 에너지손실에 의한 동수경사  $J_{2(i,j)} = K_{m(i,j)} Q_{(i,j)}^2 D_{(i,j)}^{-4} L_{(i,j)}^{-1}$  이다. 여기서  $K_{m(i,j)}$ 는 관로 (i, j)로 환산한 기타손실계수,  $Q_{(i,j)}$ 는 관로 (i, j)의 유량( $m^3/sec$ ),  $D_{(i,j)}$ 는 관로 (i, j)의 관경(m), 그리고  $L_{(i,j)}$ 는 관로 (i, j)의 길이(m)이다.

제약조건식 (3)에서 ( $\pm$ ) 부호는 관로내 흐름의 방향이 지정된 경로의 방향과 같으면 양수이고 그렇지 않으면 음수이다. 마찬가지로 제약조건식 (4)에서 ( $\pm$ ) 부호는 두개의 수원공을 연결한 경로에서 관로내 흐름의 방향이 경로의 방향과 같으면 양수이고 그렇지 않으면 음수이다. 식 (1)은 수학적모형의 목적함수로서 시스템내의 관로의 비용, 배수조비용, 주펌프비용 및 주펌프전력료를 합친 것이다. 식 (2)에서 식 (5)까지는 제약조건식으로서 식 (2)는 교차점에서 연속방정식, 식 (3)은 각교차점에서 설계수두, 식 (4)는 어느경로에서 에너지손실의 합, 식 (5)는 관로의 길이조건을 각각 나타내고 있다. 모형 PO는 비선형계획(Nonlinear Programming)이지만 관로의 유량을 알면 선형계획으로 변환된다.

### 3. 표본지구의 분석

#### 3.1 표본지구개요

농어촌진흥공사에서 발기반조성사업으로 1994년도에 설계완료한 본사업지구는 북위  $36^{\circ} 50'$ , 동경  $120^{\circ} 30'$  에 위치한 구릉지대로서 행정구역상으로는 경북 영풍군 풍기읍 전구1, 2리에 걸쳐 있다. 용수원으로 심층암반 지하수를 개발하여 하루  $420m^3$ 을 양수할 수 있으며 이 용수를 용량이  $80m^3$ 인 배수조에 저류하는데 배수조의 저수위는 표고 264.5m이고 고수위는 표고 267.4m 이다. 배수지에 저류한 용수는 시간당  $45.77m^3$ 으로 설치된 급수관로를 통하여 21.54ha인 포장에 급수하는 것으로 계획하였다. (그림1 참조)

수요지점의 수요량 즉 용수량을 추정하기 위하여 Blaney & Criddle식으로 과수에 관하여 소비수량을 5월 상순부터 8월 하순까지 계산한 결과 평균소비수량은 1.7mm/day이고 최대소비수량은 3.4mm/day이었다. 급수면적이 21.54ha인 본지구는 배수조로부터 시간당  $45.77m^3$ 의 용수가 급수면적에 공급된다. 지하수 양수를 위한 관정수중모타펌프의 능력은 10HP이고 양수량은 시간당  $17.5m^3$ 이다. 배수조 용량은  $80m^3$ 으로 계획하였다. 관로배관형태는 그림1에서 보는바와같이 수지상배관(Tree pipe network)으로 28개의 교차점과 29개의 관로로 구성되어 있다. 1번관로부터 28

변관로까지는 급수관로라 하고 PE관으로 설계하였으며 29번 관로는 송수관로라 하여 PE관보다 고강도인 PFP관으로 계획하였다. 수지상배관의 전체비용을 연간 비용으로 표현하기 위하여 연간상환계수 R (Annual capital recovery factor)를 도입하기로 한다. 즉,  $R = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = \frac{0.1(1+0.1)^{30}}{(1+0.1)^{30} - 1} = 0.106$  여기서 i는 연간이자율, n는 시스템의 내구연한이다. 연간상환비용 c는 전체비용 C에 연간상환계수 R를 곱하여 구한다.

### 3.2 표본관로배관의 분석

표본배관은 다음 3가지 경우에 관해 분석하여 보았다. 분석1에서는 현재 배관형태 내에서 배수조의 저수위를 관리수위로 하여 배수관로의 관경을 구하였고, 분석2에서는 연간전력료를 고려함으로써 현재의 배수조의 위치를 얼마나 높이 설치할 수 있는가를 분석하였으며, 분석3에서는 분석2의 경우에서 간선관로라 할 수 있는 관로번호 1, 2, 3 및 4를 현재설계의 관경치로 고정시키고 남은관로의 관경을 구하였다. 각 경우의 수학적모형은 모형 P0를 근본으로 하여 각경우에 상응하도록 변경하였다.

#### 3.2.1 분석1

모형P1에서  $(H_{Si} + H_{Si}^{st})$ 는 현재 배수조의 저수위 표고 264.4m으로 하였고, 각 교차점에서  $H_k^{min}$ 는 지반고에 설계수두를 더한것이다. 모형P1에서 결정변수의 수는 28개 관로에 6개 상업용 후보관경을 곱하면 구해지며 여기서는 168개가 된다. 제약조건식의 규모는  $56 \times 168$ 의 행렬로 표현된다. 모형P1을 해석한 결과 연간 총관로의 비용은 1,773,834원 이었다.

#### 3.2.2 분석2

모형P2에서  $(H_{Si} + H_{Si}^{st})$ 는 모형P1에서와 같이 현재 배수조의 저수위로 하였으며  $H_{Pi}$ 를 도입하였는데 이는 펌프의 추가양정고이고 이 추가양정고만큼 배수조를 높게 설치할 수 있다. 배수조 규모를 고정시킨 모형P2에서 배수조의 공사비는 현재의 배수조의 위치보다 높은 곳에 설치한다고 하여도 변치 않는다고 가정하였다. 본 지구에서 FRP재료인 배수조 규모는 80m<sup>3</sup>으로 설치위치에 따른 공사비 변화는 거의 무시해도 타당하리라 판단된다.

모형P2의 목적함수에 포함되어있는  $H_p$ 의 비용계수는 양정고 1m당 약 10,200 (원/m)으로 추정되었다. 본지구의 전력료는 한국전력공사 전기공급규정 (1994. 11)에 따라 농업용전기(병)으로 구분되어 월기본요금인 KW당 950원이고 전력사용료는 KWh 당 32.4원이다.

모형P2를 해석한 결과 연간 총관로의 비용은 1,521,528원이고 연간전력료 추가 부담은 81,165원이며 추가분양정고는 7.96m이어서 현재의 배수조 위치에서 7.96m만큼 높게 설치하여 운영하여도 관로의 비용은 절감할 수 있다.

### 3.2.3 분석3

분석3에서는 간선관로라 할 수 있는 관로 1, 2, 3 및 4의 관경을 현재설계내역으로 고정하기위하여 모형 P2를 근본으로 하여 목적함수만 변경하였다(모형P3). 즉, 고정시키고자 하는 관로에 상당하는 관로의 비용계수만을 변경하였는바 설계관경보다 작은 후보관경들의 비용계수들을 설계관경의 비용계수로 하였다.

모형 P3를 해석한 결과 연간 총관로의 비용은 1,879,873원이고 연간전력료 추가 부담은 13,321원이며 추가분양정고는 1.306m이다. 분리형(Discrete)인 선형계획에서 각 관로의 최적관경은 동수경사 - 관경비용(Hydraulic gradient - cost)의 관계에 따라 결정된다. 즉, 동수경사 - 관경비용 곡선이 볼록(Convex)곡선이면 최적동수경사에 따라 하나의 관경을 선택하거나 두개의 인접한 관경(Adjacent pipe diameters)을 선택하고 동수경사 - 관경비용 곡선이 오목(Concave)곡선이면 최적동수경사에 따라 하나의 관경을 선택하거나 두개의 인접하지 않는 관경(Nonadjacent pipe diameters)을 선택한다. 분석3에서와 같이 목적함수를 변경하면 동수경사 - 관경비용곡선은 볼록도 아니고 오목도 아닌(Neither convex nor concave)곡선이 되어 최적동수경사에 따라 하나의 관경 또는 두개의 인접하거나 인접하지 않는 관경을 선택한다.

## 4. 결론

펌프와 배수조를 포함한 관로시스템에서 최적설계를 구현하기 위해서는 펌프에 의한 급수시스템의 비용과 펌프와 배수조에 의한 급수시스템의 비용을 비교하여야 하지만 본지구는 수원이 지하수이어서 시간당 지하수채수량이 시간당 관개용수량보다 작게 계획되었다. 따라서 배수조의 적정규모결정이 해결해야 할 문제인데 여기서는 고려하지 않았다. 다만 분석2에서 보는바와 같이 계획된 배수조 규모아래서 농업용 전력료는 주택용 전력료보다 경제적이므로 계획된 배수조의 위치를 더 높게 함으로 전체관로의 비용을 절감할 수 있다. 지형조건에 따라 배수조위치 제약이 있을 때는 모형 P0의 조건식에 배수조위치 제약조건식을 추가 하면된다. 분석3에서 보는 바와 같이 분리형(Discrete)인 선형계획에서 동수경사 - 관경비용곡선은 볼록도 아니고 오목도 아닌(Neither convex nor concave)곡선은 최적동수경사에 따라 하나의 관경 또는 두개의 인접하거나 인접하지 않는 관경을 선택하는데 이는 기존에 설치된 관로시스템에 적용 할 수 있다.

## 참고문헌

1. 농어촌진흥공사 (1994), 지구지구발기반정비사업계획서, 영풍군, 농어촌진흥공사.
2. 농어촌진흥공사 (1994), 발기반정비사업 조사설계요령, 농어촌진흥공사.
3. Alperovits, E., and Shamir, U. (1977) Design of optimal water distribution systems. Water Resources Research, Vol. 13, Dec., pp. 885-900.
4. Dennis, J. E., and Schnabel, R. B. (1983) Numerical methods for unconstrained optimization and non-linear equation. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
5. Kessler, A., and Shamir, U. (1989) Analysis of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks. Water Resources

Research, Vol. 25, No. 7, July, pp. 1469-1480.

6. Watanatada, T. (1973) Least cost design of water distribution. J. of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99 (HY9), pp. 1497-1514.

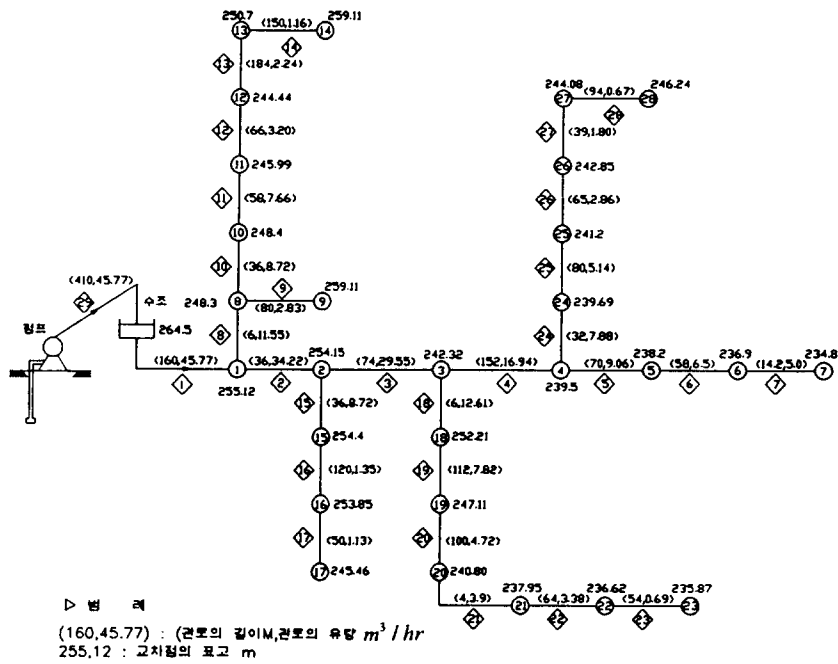


그림 1. 전구지구 발관계용 관수로 시스템