

관수로시스템의 최적설계

Optimal Design of Irrigation Water Distribution System

安 泰 鎮*

Ahn, Tae-jin

Abstract

This paper presents three optimization analyses for constructing an irrigation pipe network for upland crop. A Sample network involving a pump and a storage tank is solved using the proposed three analyses. The first analysis is to resolve the sample network to get optimal pipe diameters considering the planned water level of the storage tank. With the increase of pipe size, energy cost is decreased but the costs of pipelines are increased. The second analysis is to get new optimal location of the storage tank and pipe diameters to compare to the results of the first analysis. The solutions obtained in the second analysis have a smaller cost than those obtained by the first analysis. The results of the second analysis imply that there would exist the optimal pumping heads or fixed heads at any pump or tank system.

In the optimization models the pipe diameters are treated as discrete variables which are commercially available diameters. It is known that when the pipe cost versus hydraulic gradient curve is convex, adjacent diameters or one diameter may appear at each link. From the third analysis, it is shown that if a few designed links are just fixed as existing pipe diameters, the pipe cost versus hydraulic gradient curve would be neither convex nor concave. Consequently, the neither convex nor concave pipe cost-hydraulic gradient relationship may yield nonadjacent diameters, adjacent diameters or one diameter as the optimal solution at a link.

I. 서 론

정부의 농업기반조성사업을 대행하고 있는 농어촌진흥공사는 농수산물 시장개방을 앞두고 발작물의 국제경쟁력을 강화하기 위하여 1994년부터 발기반조성사업을 착수하였다. 발기반정비사업은 주

로 농도, 용수개발, 용수로, 배수로 및 밭경지정리 등으로 구성되어 있으며 장기적으로는 우리나라 밭의 총면적 756천ha중 15%에 해당하는 110천ha를 개발대상으로 하였고 1994년도에는 3.6천ha에 대해 발기반정비사업을 위한 설계를 완료하였다. 과수, 채소, 특용작물 및 화훼지구를 조성하는데

* 농어촌진흥공사 농어촌연구원

키워드 : 관로시스템, 최적설계, 선형계획, 수학적 모형, 최적동수경사, 인접관경, 목적함수, 제약조건

있어서 용수로는 관수로시스템을 이용하고 있다. 발기반조성사업에서 수원공은 주로 지하수를 이용하고 있으며, 이 지하수를 높은 위치에 설치한 배수조에 저류한 후 관로를 통하여 포장에 공급하는 것으로 하고 있다. 이 관수로시스템은 계획, 설계 그리고 분석단계를 통하여 결정되는데, 계획단계에서는 경작하고자 하는 작물의 소비수량을 각 수요지점에서 추정하며, 설계단계에서는 지형상태를 고려한 배관형태와 각 管路의 管經 및 교차점(Node)에서의 설계수두를 결정하고, 분석단계에서는 결정된 필요수량과 관내유량 및 수요지점에서의 수두를 계산하여 설계내역이 수리학적으로 타당한가를 판단한다.

종래의 관수로시스템 설계는 관로의 배관형태(Pipe layout)와 설계제원 즉 관경 수조의 위치 및 펌프의 양정이 주어진 상태에서 관로의 유량과 교차점에서의 수두 등을 계산하는 것이다. 이러한 분석은 설계수요량에 대하여 관수로시스템의 성능을 평가할 때 필요한 것이며 비선형방정식인 에너지방정식과 선형방정식인 연속방정식으로 구성되는 연합방정식을 해석함으로써 분석할 수 있다. 이때 관로의 관경은 추측된 값이므로 종래의 방법으로는 계산한 결과가 최적해라고 하기에는 무리가 있다. 그러므로 Mays와 Cullinane(1986) 등은 종래의 시산법에 의한 설계방법은 설계의 최적성이 결여되었다고 지적한 바 있으며 Alperovits와 Shamir(1977) 등 많은 학자들이 관수로시스템의 설계, 운영 및 보수 등에 관해 연구하였다. 최적화 이론을 도입한 관수로시스템의 설계는 설계조건에 관한 최적설계제원을 찾는 데 있다. 즉 설계조건은 각 교차점에서의 수요량, 설계수두, 배수조의 양수장 위치와 제약 조건 등이고, 설계제원은 관로에서의 관경의 크기, 수조와 양수장위치 및 양정 등이다.

관수로시스템의 최적설계를 위한 수학적 모형을 글로 표현하면 아래와 같다.

최소화(Minimize) : 관수로시스템의 전체설치 및 관리비용

제약조건(Subject to) : i) 연속방정식 ii) 에너지방정식 iii) 설계수두 iv) 배수조의 지반고 v) 펌프의 최대양정 등

위에서 관수로시스템의 전체비용은 관로, 펌프장공사비와 유지관리비, 배수조공사비 등이고 이 전체비용은 관경, 양정 및 배수조위치의 함수이며 이들은 관로의 유량이나 교차점의 설계수두의 영향을 받는다. 관경, 양정 및 배수조위치와 같은 결정변수(Decision variables)로 표현되는 최적값은 목적함수의 값이 최적치가 될 수 있도록 제약조건을 만족시킨다.

발관개용 용수로시스템의 주목적은 작물이 필요로 하는 시기에 필요한 용수를 공급하는 것이다. 발작물의 수확량은 기온, 일조량, 비료, 병, 태풍, 강우량, 강우시기, 배수, 용수관리 등의 영향을 받으나, 여기서는 적당한 물관리가 수확량을 최대로 한다고 가정한다. 본 연구에서는 농어촌진흥공사에서 설계한 어느 과수단지지구를 표본지구로 택하여 i) 배수조위치에 따른 관수로 시스템 총 비용의 변화와 ii) 관로내 동수경사와 관로의 비용 곡선에 의한 최적관경을 선택하는 과정을 규명하고자 한다.

II. 모형정립

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

(모형 P0) : 최소화(Minimize) :

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

제약조건(Subject to) :

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

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

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

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

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

여기서

$C_{(i,j)m}$ = 관경 m 인 임의의 관로(i,j)의 단위길이 당 비용(원 / m)

$x_{(i,j)m}$ = 관경 m 인 임의의 관로(i,j)의 길이(m)

C_{li} = 배수조지점 i 에서 배수조의 단위높이당 공사비(원 / m)

C_{z_i} = 주펌프장 i 에서 주펌프의 단위양정고당 펌프설치비(원 / m)

C_{3s} = kWh당 전력료(원 / kWh)

H_{S_i} = 배수조지점 i 에서 배수조의 관리수심(m)

H_{P_i} = 주펌프지점 i 에서 주펌프의 양정고(m)

$H_{S_i}^{ele}$ = 배수조지점 i 에서 배수조바닥의 지반고(EL. m)

γ = 물의 단위중량(kg / m^3)

ΔT_i = 주펌프지점 i 에서 펌프가동시간(Hr)

Q_{P_i} = 주펌프지점 i 에서 주펌프의 양수량(m^3 / sec)

η_i = 주펌프지점 i 에서 주펌프의 효율(%)

s = 배수조의 총개수

S = 주펌프의 총개수

$Q_{(i,k)}, Q_{(k,i)}$ = 임의의 관로(i)의 유량(m^3 / sec)

q_i = 수요지점 i 에서 수요량(m^3 / sec)

$r(k)$ = 주펌프 또는 배수조와 임의 수요지점 k 로 연결한 경로(path)

p = 폐합회로 또는 수원공을 연결한 경로

B = 주수원공만을 연결한 경로의 총개수

b_p = 폐합회로(loop)에서는 0이고 주수원공을 연결한 경로사이의 표고차

A = 관로(i,j)의 총개수

$L_{(i,j)}$ = 임의의 관로(i,j)의 길이(m)

N = 주펌프나 배수조지점을 제외한 수요지점의 총개수

H_k^{min} = 임의 수요지점 k 에서 설계수두(EL. m)

관마찰 에너지손실에 의한 동수경사(Hydraulic gradient)는 Scobey 공식을 적용하였으며 SI단위계로서 $J_{1(i,j)} = K_{j(i,j)} V_{(i,j)}^{1.9} D_{(i,j)}^{-1.1}$ 이다. 여기서 $K_j = 0.00259 KS$ 이고, KS 는 관종류에 따른 상수, $V_{(i,j)}$ 는 관로(i,j)의 유속(m / sec), 그리고 $D_{(i,j)}$ 는

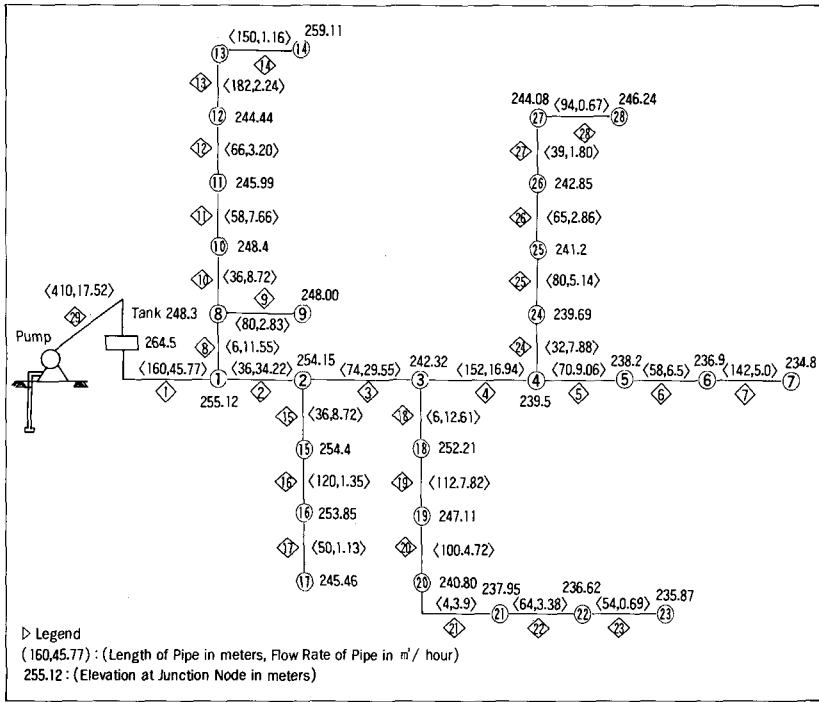
관로(i,j)의 관경(m)이다. 마찰이외의 에너지손실에 의한 동수경사 $J_{2(i,j)} = K_{m(i,j)} Q_{(i,j)}^2 D_{(i,j)}^{-4} L_{(i,j)}^{-1}$ 이다. 여기서 $K_{m(i,j)}$ 는 관로(i,j)로 환산한 기타손실계수, $Q_{(i,j)}$ 는 관로(i,j)의 유량(m^3 / sec), $D_{(i,j)}$ 는 관로(i,j)의 관경(m), 그리고 $L_{(i,j)}$ 는 관로(i,j)의 길이(m)이다.

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 각 교차점에서 설계수두, 식(4)는 어느 경로에서 에너지손실의 합, 식(5)는 관로의 길이조건을 각각 나타내고 있다. 모형 P0는 非線型計劃(Nonlinear programming)이지만 관로의 유량을 알면 線型計劃(Linear programming)으로 변환된다. 제약조건식(3)에서 (+)부호는 관로내 흐름의 방향이 지정된 경로의 방향과 같으면 양수이고 그렇지 않으면 음수이다. 마찬가지로 제약조건식(4)에서 (+)부호는 두개의 수원공을 연결한 경로에서 관로내 흐름의 방향이 경로의 방향과 같으면 양수이고 그렇지 않으면 음수이다.

III. 표본지구의 분석

1. 표본지구개요

농어촌진흥공사에서 발기반조성사업으로 1994년도에 설계완료한 본사업지구는 북위 36° 50', 동경 120° 30'에 위치한 구룡지대로서 행정구역상으로는 경북 영풍군 풍기읍 전구 1,2리에 걸쳐 있다. 본 지구는 소백산의 자락에 위치한 곳으로 주위엔 비교적 높은 산봉우리들이 있으며 묘적봉(EL. 1148m)과 연화봉(EL. 139m)에서 발원하는 남원천의 발원지역으로 예전에는 논이었던 경작지를 밭으로 전환하여 과수단지로 이용하고 있다. 용수원으로는 심층암반 지하수를 개발하여 하루 420 m^3 을 양수할 수 있으며 이 용수를 용량이 80 m^3 인 배수조에 저류하는데 배수조의 저수위는 표고 264.5m이고 고수위는 표고 267.4m이다. 배수지에 저류한 용수는 시간당 45.77 m^3 으로 설치된 급수관을 통하여 21.54ha인 포장에 급수하는 것으로 계



<Fig. 1> Irrigation pipe network in Chungu project

획하였다. (<Fig. 1> 참조)

수요지점에서의 필요수량을 추정하기 위하여 Blaney & Criddle식으로 과수에 관하여 소비수량을 5월 상순부터 8월 하순까지 계산한 결과 평균 소비수량은 1.7mm/day이고 최대소비수량은 3.4mm/day이었다. 따라서 관개효율을 80%라 할 때의

$$\text{조용수량 } q = 3.4 \frac{\text{mm}}{\text{day}} \cdot \frac{1}{0.8}$$

$$\frac{10,000 \text{ m}^3}{1 \text{ ha}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1,000 \text{ mm}} = 42.5 \text{ m}^3 / \text{day} / \text{ha},$$

$$1 \text{ ha 당 단위용수량 } q_k = 42.5 \frac{\text{m}^3}{\text{day} \cdot \text{ha}}$$

$$\frac{1 \text{ day}}{86,400 \text{ sec}} \cdot \frac{24 \text{ hrs}}{20 \text{ hrs}} = 0.00059 \text{ m}^3 / \text{sec} / \text{ha} \text{이다.}$$

그러므로 급수면적이 21.54ha인 본지구는 배수로로부터 시간당 45.77m³의 용수가 급수면적에 공급된다. 지하수 양수를 위한 관정수중모타펌프의 능력은 10hp이고 전양정은 77m이며 양수량은 시간당 17.5m³이다. 본 지구와 같이 시간당 필요수량, Q₂(45.77m³/hr)이 시간당 지하수 채수량, Q₁(17.5m³/hr)보다 많을 때는 관수로시스템에 배수조를 설치해야 한다. 배수조의 규모결정에 관하여 본지

구의 사업계획서에서는 다음 V₁과 V₂값중 작은 값으로 배수조 용량으로 결정하였다. 즉 V₁ = 4Q₁ = 4(17.5) = 70m³, V₂ = 20(Q₂ - Q₁) = 20(45.77 - 17.5) = 565.4m³ 이어서 본 지구의 배수조용량은 80m³으로 계획하였다. 단면형태는 직경 5.5m의 원형으로 높이는 3.4m이다. 관로배관형태는 그림 1에서 보는 바와 같이 樹支狀配管(Tree pipe network)으로 28개의 교차점과 29개의 관로로 구성되어 있다. 1번관로부터 28번관까지는 급수관로로 하고 PE관으로 설계하였으며 29번 관로는 송수관로로 하여 PE관보다 고강도인 PFP관으로 계획하였다. 각 교차점에서 수요일, 지반고 및 설계수두와 각 관로의 길이는 <Table 1>에 나타내었다. 본 지구의 관수로시스템의 전체비용을 연간 비용으로 표현하기 위하여 연간 상환계수 R (Annual capital recovery factor)를 도입하였다.

$$\text{즉, } R = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = \frac{0.1(1+0.1)^{30}}{(1+0.1)^{30} - 1}$$

= 0.106 여기서 i는 연간이자율, n는 시스템의 내

<Table 1> Node and link data for Chungu irrigation network

Node number	Demand (m ³ /hr)	Elevation (EL. m)	Minimum Head(m)	Minimum Head, H _k ^{min} (EL. m)	Link No.	Length (m)
1	0.0	255.12	5	260.12	1	160
2	0.0	254.15	5	259.15	2	36
3	0.0	242.32	10	252.32	3	74
4	0.0	239.50	10	249.50	4	152
5	2.56	238.20	10	248.20	5	70
6	1.5	236.90	10	246.90	6	58
7	5.0	234.80	10	244.80	7	142
8	0.0	248.30	10	258.30	8	6
9	2.83	248.00	10	258.00	9	80
10	1.06	248.40	10	258.40	10	36
11	4.46	245.99	10	255.99	11	58
12	0.96	244.44	10	254.44	12	66
13	1.08	250.70	10	260.70	13	184
14	1.16	259.11	3	262.11	14	150
15	3.32	254.40	5	259.40	15	36
16	0.22	253.85	5	258.85	16	120
17	1.13	245.46	10	255.46	17	50
18	4.79	252.21	5	257.21	18	6
19	3.10	247.11	10	257.11	19	112
20	0.82	240.80	10	250.80	20	100
21	0.52	237.95	10	247.95	21	4
22	2.69	236.62	10	246.62	22	64
23	0.69	235.87	10	245.87	23	54
24	2.74	239.69	10	249.69	24	32
25	2.28	241.20	10	251.20	25	80
26	1.06	242.85	10	252.85	26	65
27	1.13	244.08	10	254.08	27	39
28	0.67	246.24	10	256.24	28	94
29	-45.77	N.W.L. 264.5			29	410

<Table 2> Diameter and cost data for Chungu project

Diameter (mm)	Capital cost (₩/ m)	Annual cost (₩/ m / Year)
30	3,565	377
40	4,666	494
50	6,378	676
65	8,238	873
75	10,233	1,084
100	14,829	1,571
125	19,940	2,113
150	23,988	2,542

구년수(Project life)이다. 연간상환비용 c는 전체비용 C에 연간상환계수 R를 곱하여 구한다. <Table 2>는 PE관의 단위길이당 시장가격과 접합부설비를 합한 비용(Capital cost)과 그에 상당하는 연간상환비용(Annual capital recovery cost)을 나타냈다.

2. 표본관로배관의 분석

표본배관은 다음 3가지 경우에 관해 분석하여 보았다. 분석 1에서는 현재 배관형태에서 배수조의 저수위를 관리수위로 하여 배수관로의 관경을 구하였고, 분석 2에서는 연간 전력료를 고려함으로써 현재의 배수조의 위치를 얼마나 높이 설치할 수 있는가를 분석하였으며, 분석 3에서는 분석 2의 경우에서 간선관로라 할 수 있는 관로번호 1, 2, 3 및 4를 현재설계의 관경으로 고정시키고 남은 관로의 관경을 구하였다. 각 경우의 수학적모형은 모형 P0를 근본으로 하여 각 경우에 상응하도록 변경하였다.

가. 분석 1

분석 1에서 적용한 모형은 모형 P0을 배경으로 한 모형 P1이다.

(모형 P1) : 최소화(Minimize)

$$: \sum_{(i,j)} \sum_m C_{(i,j)m} X_{(i,j)m} \quad \dots(6)$$

제약조건(Subject to) :

$$- \sum_{K:(i,k) \in A} Q_{(i,k)} + \sum_{K:(k,i) \in A} Q_{(k,i)} = q_i$$

$$; i \in N \quad \dots(7)$$

$$- \sum_{(i,j) \in r(k)} [(\pm) \sum_m (J_{1(i,j)m} + J_{2(i,j)m}) X_{(i,j)m}]$$

$$+ [H_{Si} + H_{Si}^{ele}] \geq H_K^{min}$$

$$; i \in s, k \in N \quad \dots(8)$$

$$\sum_m X_{(i,j)m} - L_{(i,j)} = 0 ; (i, j) \in A \quad \dots(9)$$

$$X_{(i,j)m} \geq 0$$

모형 P1에서 (H_{si}+H_{si}^{ele})는 현재 배수조의 저수위 표고 264.5m로 하였고, 각 교차점에서 H_k^{min}는 Table 1에 있는 지반고에 설계수두를 더한 것이다. 모형 P1에서 결정변수의 수는 28개 관로에 6

<Table 3> Optimal solution for Chungu irrigation network by P1

Link No.	Dia. (mm)	Length (m)	Head loss (m)	Node No.	Head (EL. m)	Head (m)
1	150	71.46	0.259	1	263.424	8.304
	125	88.54	0.807	2	262.801	8.651
2	100	36.00	0.623	3	261.334	19.014
3	100	58.70	0.715	4	258.814	19.314
	75	15.30	0.752	5	256.210	18.010
4	75	152.0	2.520	6	255.055	18.155
5	50	70.0	2.604	7	253.381	18.581
6	50	58.0	1.155	8	263.404	15.104
7	50	142.0	1.674	9	263.079	15.079
8	100	6.0	0.021	10	263.222	14.822
9	50	80.0	0.324	11	263.002	17.012
10	75	36.0	0.181	12	262.907	18.467
11	75	58.0	0.220	13	262.438	11.738
12	65	66.0	0.095	14	262.110	3.0
13	50	184.0	0.469	15	262.390	7.99
14	40	150.0	0.327	16	260.962	7.112
15	50	36.0	0.411	17	260.531	15.071
16	30	120.0	1.428	18	260.752	8.542
17	30	50.0	0.431	19	257.645	10.535
18	50	6.0	0.582	20	256.581	15.781
19	50	112.0	3.107	21	256.535	18.585
20	50	100.0	1.064	22	256.170	19.550
21	50	4.0	0.046	23	255.988	20.118
22	50	64.0	0.365	24	258.546	18.856
23	30	54.0	0.182	25	257.545	16.345
24	65	32.0	0.268	26	256.745	13.895
25	50	80.0	1.001	27	256.542	12.462
26	40	65.0	0.800	28	256.240	10.000
27	40	39.0	0.203			
28	30	94.0	0.296			

개 상업용 후보관경을 곱하면 구해지며 여기서는 168개가 된다. 제약조건의 규모는 56×168의 행렬로 표현된다. 모형 P1을 해석한 결과 연간 총관로의 상환비용은 1,773,834원이고 각 관로의 최적관경과 각 교차점의 최적수두는 <Table 3>에 나타내었다.

나. 분석 2

분석 2에서 적용한 모형 P2는 다음과 같다.

(모형 P2) : 최소화(Minimize) :

$$\sum_{(i,j)} \sum_m C_{(i,j)m} X_{(i,j)m} + \sum_{i \in S} C_{3i} \frac{\gamma \Delta T_i}{\eta_i} Q_{Pi} H_{ai} \dots (10)$$

제약조건(Subject to) :

$$- \sum_{K: (i,k) \in A} Q_{(i,k)} + \sum_{K: (k,j) \in A} Q_{(k,j)} = q_i : i \in N \dots (11)$$

$$- \sum_{(i,k) \in r(k)} (\pm) \sum_m [J_{1(i,j)m} + J_{2(i,j)m}] X_{(i,j)m}$$

$$+ H_{ai} \geq H_K^{\min} - [H_{Si} + H_{Si}^{ele}]$$

$$: i \in s, k \in N, i \in S \dots (12)$$

$$\sum_m X_{(i,j)m} - L_{(i,j)} = 0 : (i,j) \in A \dots (13)$$

$$X_{(i,j)m} \geq 0$$

모형 P2에서 $(H_{Si} + H_{Si}^{ele})$ 는 모형 P1에서와 같이 현재 배수조의 저수위로 하였으며 H_{ai} 를 도입하였는데 이는 펌프의 추가양정이고 이 추가양정만큼 배수조를 높게 설치할 수 있다. 배수조 규모를 고정시킨 모형 P2에서 배수조의 공사비는 현재의 배수조의 위치보다 높은 곳에 설치한다고 하여도 변치 않는다고 가정하였다. 본지구에서 FRP재료인 배수조 규모는 80m²으로 설치위치에 따른 공사비 변화는 거의 무시해도 타당하리라 판단된다.

모형 P2의 목적함수에 포함되어 있는 H_p 의 비용계수는 다음과 같이 결정하였다. 먼저 년간 평균 펌프가동시간 ΔT 를 계산하는데 있어서 일평균조용수량은 1.7mm로 택하여 년평균양수량을 계산하였다.

$$\text{즉, } 1.7 \frac{\text{mm}}{\text{day}} \cdot (120\text{days}) (21.54\text{ha}) \frac{10,000 \text{m}^3}{1\text{ha}}$$

$$\frac{1\text{m}}{1,000\text{mm}} = 43,942 \text{m}^3$$

이 년평균 양수량 43,942m³을 현재 펌프의 능력 17.52m³/hr으로 나누면 연간 펌프가동시간은 약 2,500시간으로 추정된다. 다음 본 지구의 전력료는 한국전력공사 전기공급규정(1994. 11)에 따라 농업용전기(병)으로 구분되어 월기본 요금이 kW당 950원이고 전력사용료는 kWh당 32.4원이다. 현재 전구관정모타의 용량(Capacity)은

$$\frac{9.8QH}{\eta} (1+\alpha) = \frac{9.8(0.005)77}{0.58} (1.25) = 8.13$$

kW이고 양정고 1m당 0.1057Kw만큼 증가한다. 따라서 추가양정 m당 연간 비용계수는

- i) 기본요금 : $0.1057kW/m \times 950원/kW \times 1.1 \times 4개월 = 440원/m$
- ii) 전력사용료 : $0.1057kW/m \times 32.4원/kWh \times 2,500hr \times 1.1 = 9,410원/m$

그러므로 $(440+9,410)원/m = 9,850원/m$ 이다.

여기에 송수관로(29번)내 단위 m 당 손실수두는 0.0355m 발생하여 0.00374kW 전력이 추가로 필요하며 양정 1m 당 비용계수는 9,850(1.0355)원/m이므로 약 $10,200(원/m) \cdot H_a$ 으로 추정되었다.

모형 P2를 해석한 결과 연간 총관로의 상환비용은 1,521,528원이고 연간 추가 전력료는 81,165원

<Table 4> Optimal solution for Chungu irrigation network by P2

Link No.	Dia. (mm)	Length (m)	Head loss (m)	Node No.	Head (EL. m)	Head (m)
1	100	160	4.320	1	268.137	13.017
2	100	36	0.623	2	267.514	13.364
3	75	74	3.635	3	263.879	21.559
4	65	152	5.064	4	258.815	19.315
5	50	70	2.604	5	256.211	18.011
6	50	58	1.155	6	255.056	18.156
7	50	142	1.675	7	253.381	18.581
8	50	6	0.491	8	267.646	19.346
9	50	80	0.323	9	267.323	19.323
10	50	36	1.286	10	266.360	17.960
11	50	58	1.578	11	264.782	18.792
12	50	66	0.339	12	264.443	20.003
13	50	184	0.469	13	263.974	13.274
14	30	150	1.335	14	262.639	3.529
15	50	36	0.411	15	267.103	12.703
16	30	120	1.428	16	265.675	11.825
17	30	50	0.431	17	265.244	19.784
18	50	6	0.582	18	263.297	11.087
19	50	112	3.107	19	250.190	13.080
20	50	100	1.064	20	259.126	18.326
21	50	4	0.046	21	259.080	21.130
22	50	64	0.365	22	258.715	22.095
23	30	54	0.182	23	258.533	22.663
24	65	32	0.268	24	258.547	18.857
25	50	80	1.001	25	257.546	16.346
26	40	65	0.800	26	256.746	13.896
27	40	39	0.203	27	256.543	12.463
28	30	94	0.296	28	256.247	10.007

이며 추가분양정고는 7.96m 이어서 현재의 배수조 위치에서 7.96m 만큼 높게 설치하여 운영하여도 관로의 비용은 절감할 수 있다. 각 관로의 관경과 각 교차점의 최적수두는 <Table 4>에 나타내었다.

다. 분석 3

분석 3에서 간선관로라 할 수 있는 관로 1, 2, 3 및 4의 관경을 현재설계내역으로 고정하기 위하여 모형 P2를 근본으로 하여 목적함수만 변경하였다 (모형 P3). 즉, 고정시키고자 하는 관로에 상당하는 관로의 비용계수만을 변경하였는바 설계관경보다 작은 후보관경들의 비용계수들을 설계관경의 비용계수로 하였다. 모형 P3를 해석한 결과 연간

<Table 5> Optimal solution for Chungu irrigation network by P3

Link No.	Dia. (mm)	Length (m)	Head loss (m)	Node No.	Head (EL. m)	Head (m)
1	150	160	0.601	1	265.205	10.085
2	125	36	0.214	2	264.991	10.841
3	125	40.87	0.169	3	263.195	20.875
	75	33.13	1.627	4	262.576	23.076
4	100	152	0.619	5	259.972	21.772
5	50	70	2.604	6	258.817	21.917
6	50	58	1.155	7	257.142	22.342
7	50	142	1.675	8	265.059	16.759
8	65	6	0.146	9	264.736	16.736
9	50	80	0.323	10	264.697	16.297
10	65	36	0.362	11	264.256	18.266
11	65	58	0.441	12	263.917	19.477
12	50	66	0.339	13	263.448	12.748
13	50	184	0.469	14	262.113	3.003
14	30	150	1.335	15	264.580	10.180
15	50	36	0.411	16	263.152	9.302
16	30	120	1.428	17	262.721	17.261
17	30	50	0.431	18	262.613	10.403
18	50	6	0.582	19	259.506	12.396
19	50	112	3.107	20	258.442	17.642
20	50	100	1.064	21	258.396	20.446
21	50	4	0.046	22	258.031	21.411
22	50	64	0.365	23	257.849	21.979
23	30	54	0.182	24	261.625	21.935
24	50	32	0.951	25	260.624	19.424
25	50	80	1.001	26	257.367	14.517
26	30	65	3.257	27	256.546	12.466
27	30	39	0.821	28	256.250	10.010
28	30	94	0.296			

총관로의 비용은 1,879,873원이고 연간 추가 전력료는 13,321원이며 추가양정은 1.306m이다. 각 관로의 관경과 각 교차점의 최적수두는 <Table 5>에 나타내었다.

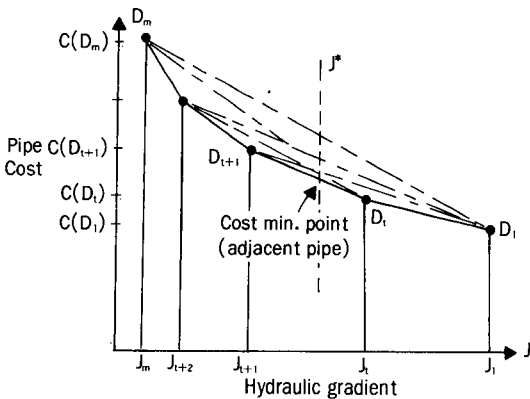
목적함수가 이산형(Discrete)인 선형계획에서 각 관로의 최적관경은 동수경사-관경비용(Hydraulic gradient-cost)의 관계에 따라 결정된다. 동수경사-관경비용 곡선이 볼록(Convex)곡선이면 最適動水傾斜에 따라 하나의 관경을 선택하거나 두개의 인접한 관경(Adjacent pipe diameters)을 선택한다. <Fig. 2-a>에서 동수경사 J 는 관로유량이 일정한 상태에서 임의의 관경 D 에 상응하는 동수경사이며, $C(D)$ 는 임의의 관경에 상응하는 단위길이당 관로의 비용이고 m 는 후보관경의 수이다. 동수경사-관경비용 곡선이 볼록(Convex)곡선인 <Fig. 2-a>에서 J^* 를 최적동

수경사라 하면 선형계획(Linear programming)은 (D_{t+1}, D_t) , (D_{t+1}, D_t) , (D_{t+2}, D_t) ... 등에서 인접한 관경인 (D_{t+1}, D_t) 이 유일한 최소비용의 조합이므로 항상 (D_{t+1}, D_t) 을 선택한다(<Table 3>의 1번관로 참조). 또한 최적동수경사 J^* 가 D_t 에 상응하는 동수경사 J 와 일치한다면 선형계획은 관경 D_t 하나만 선택한다. 일반적으로 시장에 유통되고 있는 관의 관경과 단위길이당 비용은 동수경사-관경비용 곡선이 볼록(Convex)곡선으로 조합되고 있다. 마찬가지로 <Fig. 2-b>와 같이 동수경사-관경비용 곡선이 오목(Convex)곡선이면 최적동수경사에 따라 하나의 관경을 선택하거나 두개의 인접하지 않는 관경(Nonadjacent pipe diameters)을 선택한다. 분석 3에서와 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 선택하는데 이는 <Table 5>의 관로 3번과 같이 인접하지 않은 관경(125mm과 75mm)을 보면 알 수 있다.

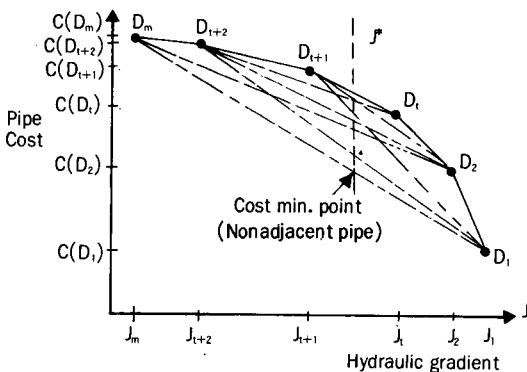
IV. 결론

펌프와 배수조를 포함한 관수로시스템에서 최적설계를 구현하기 위해서는 펌프에 의한 급수시스템의 비용을 비교하여야 하지만 본 지구는 수원이 지하수이어서 시간당 지하수채수량이 시간당 관개용수량보다 작게 계획되었다. 따라서 배수조의 적정규모결정이 해결해야 할 문제인데 여기서는 고려하지 않고 사업계획서를 인용하였다. 관수로시스템설계에서 종래의 방법인 근사해석법은 일부 수요지점들에서 설계수두외의 잉여수두를 수반하지만 최적화이론을 도입하면 그 잉여수두를 제거하여 수리학적으로 최적설계를 구현할 수 있다.

분석 1에서 설계된 배수조의 저수위를 관리수위로 하여 해석한 결과 연간총관로의 비용은 1,773,834원이었다. 일반적으로 관로의 관경들이 작아지면 관로에 의한 에너지손실이 증가하여 펌프의 양정은 크게 되어 관로의 비용은 작아지지만 펌프의 전력료는 증가한다. 관로의 관경들이 커지면 그 반대이므로 어느 관수로시스템이나 전체비용을 최소



<Fig. 2-a> Convex hydraulic gradient-cost relation for a link with a constant flow rate



<Fig. 2-b> Concave hydraulic gradient-cost relationship for a link with a constant flow rate

화하는 최적양정고와 최적관경들이 존재한다. 본 지구의 배수조의 용수는 지하수로 저류되기 때문에 전력료는 관수로시스템의 전체비용변화에 크게 영향을 미친다. 분석 2에서는 연간전력료를 연간 관로비용에 포함하여 분석한 결과, 배수조의 위치를 계획보다 7.96m 만큼 높게 설치하면 연간총관로의 상환비용은 1,521,528원이고 연간 추가 전력료는 81,165원으로 되어 분석 1의 관로의 비용보다 작음을 알 수 있다. 이는 우리나라의 농업용 전력료가 주택용 전력료보다 저렴하기 때문이며 장래에는 배수조의 위치를 더 높게 설치함으로 전체관로의 비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 수요지점에서 보다 안정된 수압을 확보할 수 있으리라 판단된다. 만약에 지형조건에 따라 배수조의 설치계약이 있을 때는 모형 P2의 조건식에 배수조위치 제약조건식을 추가 하면 된다. 분석 3은 기존에 설치된 관로시스템의 확장에 적용할 수 있는데 목적함수가 이산형(Discrete)이고, 동수경사-관경비용곡선이 볼록도 아니고 오목도 아닌(Neither convex nor concave) 곡선으로 변환되어 최적동수경사에 따라 하나의 관경 또는 두개의 인접하거나 인접하지 않는 관경을 선택함을 알 수 있다.

참고문헌

1. 농어촌진흥공사, 1994. 진구지구받기반정비사업계획서.
2. 농어촌진흥공사, 1994. 받기반정비사업 조사설계요령.
3. Alperovits, E., and U. Shamir, 1977. Design of optimal water distribution systems. Water Resources Research, Vol. 13, Dec., pp. 885~900.
4. Bhave, P.R., 1985. Optimal expansion of water distribution systems. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 111, No. 2, pp. 177~197.
5. Bhave, P.R., and V.V. Sonak, 1992. A Critical study of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks. Water Resources Research, Vol. 28, No. 6, June, pp. 1577~1584.
6. Dennis, J.E., and R.B. Schnabel, 1983. Numerical methods for unconstrained optimization and non-linear equation. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
7. Fujiwara, O., and D.B. Khang, 1990. A Two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. Water Resources Reserch, Vol. 26, No. 4, Apr., pp. 539~549.
8. Fujiwara, O., Jenchaimahakoon, B., and C.P. Edirisinghe, 1987. A Modified linear programming gradient for optimal design of looped water distribution networks. Water Resources Research, Vol. 23, No. 6, June, pp. 977~982.
9. Gessler, J., 1982. Optimization of pipe networks. proc. 9th Int. Symp. on Urban Hydrology, Hydraulic and Sediment control, Univ. of Kentucky, KY, pp. 165~171.
10. Kessler, A., and U. Shamir, 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.
11. May, L.W., 1986. A Review and evaluation of reliability concepts for design of water distribution systems. Report presented for Department of Army under Water Supply design Work Unit 31733, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, Jan.
12. Watanatada, T., 1973. Least cost design of water distribution. J. of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99(HY9), pp. 1497~1514.

약 력

안 태 진



1980. 한양대학교 공과대학 토목과 졸업
 1982. 고려대 대학원 수공학 M.S.
 1985. University of Arizona M.S.
 1993. Virginia Polytechnic Institute and State University Ph. D.
 현재 농어촌진흥공사 농어촌연구원, 연구원