이진정수법을 이용한 농업용 관수로의 최적 관경 선정 및 설계 표준화 자료 구축

Determination of the Optimal Pipe Dimeter for Irrigation Network using Binary Integer Programming and Developmenr of the Database for Design Standard

정건희* · 김영화** · 전건영*** · 김종훈****

Chung, Gunhui · Kim, YoungHwa · Jeon, GeonYeong · Kim, Joong Hoon

Abstract

The interest on the irrigation pipe network systems have been increased. The irrigation pipe network is not affected by the topography and possible to enough supply. Therefore, the network system is applied in the large scale agricultural complex. In this study, a model to optimize pipe diameters was developed to supply enough irrigation water efficiently in the branch type pipe network. The developed model was applied in a agricultural complex with several water demands, hydraulic head in the starting nodes, hydraulic gradients in the different types of the irrigation sector. The optimized pipe diameter was proposed for the standardization of the design. The decision variable of the conventional method was the length of the pipes to linearize the optimization system. In the method, more than two sizes of the diameter were proposed, which was not realistic. Therefore, in this study, the new optimization method was suggested using binary integer programming whose decision variables are the binary number to represent that the pipe with the proposed diameter was installed or not. The design standard was proposed using the simulation results from the sensitivity analysis. The result is used to find the optimal pipe diameter without the model simulation if the type of sector and water demand are known, which is very economic design for the future agriculture area.

Key words : Irrigation pipe network, Binary integer programming, Design standard, Optimal pipe diameter

요 지

최근 들어, 지형의 영향을 받지 않으면서도 안정적으로 용수공급이 가능한 관수로 시스템을 이용한 농업용수의 공급에 대한 관심이 높아지고 있어, 대규모 농업단지 개발에 관수로 시스템이 많이 활용되고 있다. 본 연구에서는 농업용 관수로가 대부분 분기형임에 착안하여, 농업용수의 안정적인 확보와 효과적이고 경제적인 공급을 위해 분기형 관수로 설계 시, 최적관경산정을 산정할 수 있는 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 농업단지에 적용하였으며, 구획형태에 따른 용수사용량별, 시점의 수도별, 동수구배별 최적 관경을 산정하여 그 분포를 파악하고 관수로 설계 표준화를 위한 자료를 제시하였다. 최적화 기법 역시 기존의 분기형 관수로 시스템의 선형화를 위해 관의 길이를 결정변수로 하였던 최적화기법에서 두가지 이상의 관경이 하나의 관로에 결정되는 단점을 막고, 절점의 압력 및 속도에 대한 제약조건을 고려하기 위해 새로운 방법의 최적화 시스템인 이진정수법을 이용하여 제안되었다. 제안된 모형은 농업용 관수로 설계의 표준을 제시하기 위해 다양한 경우에 적용하여 민감도 분석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 이용하면 농업용 관수로의 구획형태와 용수사용량이 정해지면 가능한 최적관경을 프로그램을 실행하지 않고도 손쉽게 찾을 수가 있으며, 이는 경제적인 시공이 강조되고 있는 현재 농업분야에서 향후 설계에 활용한다면 매우 유용한 자료가 될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 농업용 관수로, 이진정수법, 설계표준화, 최적 관경 설정

1. 서 론

농업용수사업에서 관수로는 대규모의 농지에 효율적이고 안정적으로 농업용수를 공급하기 위한 농업수리시설 중 하나이

다. 농업수리시설은 농업생산성을 높여 생산자 개인의 이익을 도모하는 동시에 사회 · 경제적 자본이라는 점에서 경제적으로 설계되고 관리되어야 한다. 독일의 사회 경제사학자 K. A. Wittfogel은 수도작(水稻作) 중심의 중국, 일본, 한국 등

*정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원(E-mail : gunhui@kict.re.kr)

**한국농어촌공사 농어촌연구원 생산기반연구팀 수석연구원

***한국농어촌공사 농어촌연구원 생산기반연구팀 책임연구원

****정회원 · 고려대학교 건축 · 사회환경시스템공학과 교수(교신저자)

아시아 몬순지역에서는 수리시설의 설치와 유지관리가 매우 중요하여, 이는 수력사회를 이루는 기반이 되었다고 주장하였다(김성호 등, 1996). 또한 최근에는 대단위의 농업단지를 조성하기로 계획하면서 경제적인 수리시설의 설치와 유지관리에 대한 관심이 증대되고 있으며, 그 일환으로 관수로 규격의 표준화를 시도하여 보다 효율적인 농업수리시설의 설계가 가능하도록 하는 것에 대한 요구가 증가하고 있다. 이는 막대한 예산이 투입되는 공공사업의 효율을 높이고, 지속가능한 설계를 위해 매우 중요한 과정이다.

관수로시스템은 크게 분기형(branched type)과 망형(looped type)으로 나뉘어진다. 분기형은 유량의 흐름을 수리학적 해석과 관계없이 구할 수 있으므로, 흐름해석이 비교적 간단한 반면, 망형은 용수 사용량 패턴과 양에 따라 유량의 흐름이 달라지며, 수리학적 해석을 통해서만 정확한 유량 및 흐름의 방향을 계산할 수 있다. 그러므로 망형의 해석을 위해서는 수리학적 흐름해석모형(EPANET, KY-PIPE 등)의 사용이 필수적이다. 관수로시스템의 수리학적 흐름해석은 유체의 총 에너지를 계산하고, 흐름에 따른 손실수두계산을 통해 각 절점에서의 에너지를 계산한다. 손실수두 계산을 위해서는 Darcy-Weisbach 공식, Hazen-Williams 공식, Manning's 공식 등을 사용하게 되는데 이는 모두 유량과 관경사이에 비선형적 관계를 포함하고 있다.

농업용 관수로는 압력흐름이므로 지형에 지배를 받지 않는 안정적인 용수공급이 가능하며, 수질오염을 차단할 수 있다는 장점이 있어 대단위 농업단지에 적절한 용수공급방법이다. 그러므로 10,000 ha 이상의 대규모 관개 지구에 3,000 mm 대 구경 관수로를 사용하는 등 관개지구의 광역화와 농업용 관수로의 대형화가 진행되고 있다(농림수산식품부, 농업 생산 기반 정비 사업 계획 설계 기준, 관수로편).

그러므로 본 연구에서는 분기형 관수로의 최적 관경 산정을 위한 모듈을 개발하고, 농업단지에 적용하여, 향후 농업용 관수로 설계 시 표준화된 관경설계가 가능하도록 하는 방법을 제안하였다.

2. 연구방법

2.1 선형계획법을 이용한 분기형 관수로의 최적 설계 이론

앞에서 언급한 바와 같이 관수로의 흐름해석을 위해 사용되는 손실수두 계산식들은 유량과 관경 사이의 비선형 관계를 포함하고 있으므로, 필연적으로 관수로 설계를 위한 시스템은 비선형이 된다. 그러나 Karmeli et al.(1968), Gupta(1969), Calhoun(1971), Gupta et al.(1972)은 분기형 관망시스템의 최적설계를 선형계획법(linear programming)으로 수식화하였다. 선형화는 기존의 비선형계획법에서 결정변수로 사용되던 관경을 상업용 관으로 미리 설정한 후, 해당 상업용 관의 길이를 결정변수로 지정하여 가능하였다. 선형화된 최적 관경 산정 시스템의 목적함수와 제약조건 식들은 다음과 같다.

일반적으로 관망시스템의 목적은 각 수요처에서 요구되는 수량을 충분한 수압으로 도달시키는 것이며, 설계 시 이러한 목적을 만족시키면서도 경제적인 시스템을 구축하는 것을 기

본 목적으로 한다. 그러므로 최적화모형의 목적함수는 관망시스템 전체의 시설비를 최소화 하는 것이다. 목적함수를 식으로 나타내면

$$\text{Min}Z = \sum_{(i,j) \in I} \sum_{m: M_{ij}} C_{ij,m} X_{ij,m} + \sum_k CP_k XP_k \quad (1)$$

여기서 $C_{ij,m}$ 은 단위길이 당 관비용이며, I 는 전체 관망시스템 내의 관의 집합, 아랫첨자 (i, j) 는 절점 i 와 j 사이의 관을 나타내고, M_{ij} 는 절점 i 와 j 사이의 관으로 선택될 수 있는 직경이 m 인 상업용 규격관경의 집합을 나타낸다. $X_{ij,m}$ 은 m 의 관경을 가지는 관의 길이이며, CP_k 는 펌프 k 의 단위양당 당 설치비용이며, XP_k 는 펌프 k 의 양정고이다.

제약조건으로는 관의 길이에 대한 제약조건, 필요압력수두에 관한 제약조건, 결정변수 값이 음수일 수 없다는 비음조건 등이 있다. 관의 길이에 관한 제약조건식은 다음과 같이 주어진다.

$$\sum_{m: M_{ij}} X_{ij,m} = L_{ij} \quad (i,j) \in I \quad (2)$$

여기서 L_{ij} 는 (i, j) 구간의 관의 총길이를 말한다. $X_{ij,m}$ 은 (i, j) 구간의 관의 전체길이가 아니라 각각의 관경을 가진 관 길이를 나타낸다. 예를 들어 10개의 상업용 규격관경을 고려한다면 (i, j) 구간내의 각각의 규격관경을 가진 10개의 관이 조합을 이루고 있다고 보면 된다. 따라서 위의 제약조건은 그 10개의 관의 총길이는 (i, j) 구간의 길이와 같다는 의미이다. 이론상으로는 한 구간 내에서 10개 관경 각각에 대한 길이가 다 구해질 수 있지만, 실제 최적결과로는 대개의 경우 한 구간에 1개의 관경이 선택되며, 간혹 두 개의 관경이 선택되는 경우도 있다.

압력수두에 관한 제약조건은 용수를 공급하는데 있어서 용수의 사용성을 향상시키기 위해 각 수요절점에서 일정 압력수두 이상을 유지시켜 주어야 한다는 것으로서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$H_{D,n} + H_{\min,n} \leq H_s + \sum_k XP_k - \sum_{(i,j) \in I_n} \sum_{m: M_{ij}} J_{ij,m} X_{ij,m} \quad n = 1, 2, \dots, N$$

$H_{\min,n}$ 은 수요지점 n 에서 요구되는 최소압력수두이며, H_s 는 배수지(source)에서의 위치수두, $H_{D,n}$ 은 수요지점 n 의 표고이다. $J_{ij,m}$ 은 (i, j) 구간의 직경 m 인 관경별 관에서의 단위길이 당 손실수두이며, Hazen-Williams 공식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$J = \frac{10.66 Q^{1.852}}{C^{1.852} D^{4.871}} \quad (3)$$

여기서 C 는 관의 마찰을 나타내는 마찰손실계수, Q 는 유량(m^3/s), D 는 관경(m)을 나타낸다. 이 식에서 C , Q 는 각 관에 대하여 이미 주어진 값이며, 관경 D 도 상업용 규격관경으로 정해져 있으므로 각 관경별로 $J_{ij,m}$ 은 미리 구해지는 값이다.

마지막으로 결정변수인 관 길이와 펌프양정고의 값은 음수일 수 없다는 비음조건 (non-negativity)은 다음과 같다.

$$X_{i,j,m} \geq 0 \quad (4)$$

$$XP_k \geq 0 \quad (5)$$

Schaake and Lai(1971)은 비선형계획법(nonlinear programming)을 이용한 분기형관망의 최적설계를 시도하였으나 선형계획법을 이용한 방법에 비해서 더 나은 결과나 계산상의 이점을 보여주지는 못하였다. 이는 비선형계획법을 이용하여 해를 찾는 방법이 국지해에 빠지기 쉽고, 초기값에 많은 부분 영향을 받기 때문이다.

2.2 이진정수법을 이용한 최적 관수로 설계 시스템

앞에서 설명한 바와 같이 선형계획법을 이용하여 설계한 관수로에서는 간혹 같은 관로에 두 개 이상의 관경이 선택되는 경우가 발생하여 실제 설계와 다른 결과를 주는 단점이 있었다. 그러므로 본 연구에서는 관수로 시스템의 비선형성을 고려하면서도, 최적해를 빠르게 찾을 수 있는 방법을 이진정수법을 이용하여 제안하였다.

본 연구에서는 농업용 관수로의 최적 관경 설계를 위해 GAMS(General Algebraic Modeling System)를 사용하였다. GAMS는 선형, 비선형, 혼합정수의 최적화 문제를 모델링하기 위해 특별히 디자인 된 프로그램으로 복잡하고 규모가 큰 모델에 특히 유용하게 사용된다. GAMS는 퍼스널 컴퓨터, 워크스테이션, 메인 프레임 및 슈퍼컴퓨터에서 운영 가능하며, 정확한 모델을 구축하는데 있어서 수정을 많이 해야 하는 동종의 문제 중 하나를 처리하는데, 매우 콤팩트하고 자연스런 방법으로 문제들을 모델링 한다는 장점이 있다. 사용자는 공식을 신속하고 쉽게 변경할 수 있고, 하나의 Solver에서 또 다른 Solver로 변경할 수 있으며 아무런 문제없이 선형에서 비선형으로 변환할 수 있다.

제안된 농업용수공급모형을 네트워크 $G=(I, J)$ 로 나타낼 때, I 는 전체 네트워크를 구성하는 아크, 즉 관로를 나타내며, J 는 각 관로에 건설된 관의 관경을 나타낸다. 농업용수공급모형은 대부분 기존의 하천으로 방류되어 유실되는 유량을 재이용하는 것을 목적으로 하므로, 기존의 관로 시스템이 존재하지 않는 것으로 가정하였으며, 관로의 네트워크 형태는 분기형으로 가정하였다.

건설 가능한 상업용 관의 직경을 미리 가능한 해의 집합으로 설정한 후, 해당 관경을 가지는 관이 관로에 건설될 것인지 아닌지를 나타내는 이진변수를 결정변수로 지정하였다. 건설 가능한 관경이 해당 관로에 건설 되었을 때의 에너지 손실은 Hazen-Williams 공식을 이용하여 계산하였다. 제안된 농업용수공급모형의 목적함수는 총 공사비의 최소화이며 이때 사용량 즉 농지의 수요량은 알고 있다고 가정한다.

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} L_{ij}^{1.1} x_{ij} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \forall i, \quad (7)$$

$$\sum_{i: i \in UP_i} \sum_{j \in J} S_{ij} L_{ij} x_{ij} \leq \sum_{i: i \in UP_i} z_i + RL - H, \forall i, \quad (8)$$

$$V_l \sum_{j \in J} \pi D_{ij}^2 x_{ij} \leq 4q_i \leq V_h \sum_{j \in J} \pi D_{ij}^2 x_{ij} \quad \forall i, \quad (9)$$

$$x_{ij} = \{0, 1\}, \quad \forall i, \quad \forall j, \quad (10)$$

관로의 집합인 I 는 특정관로의 흐름 방향을 고려할 때 상류에 위치하는 관로들의 집합인 UP_i 를 하위 집합으로 가지며, 네트워크의 개별 관로 i 를 요소로 가진다. 관 직경을 나타내는 집합인 J 는 건설가능한 관 직경 j 를 요소로 가진다. 결정변수는 관경 j 를 가지는 관을 관로 i 에 설치할 것인가를 결정하는 이진변수 x_{ij} 이다. 이는 관로 i 에 관경 j 를 가지는 관이 건설될 경우 1을, 건설되지 않을 경우 0을 가진다. 시스템의 목적함수는 공사비를 최소화(식 (6))하는 것이다. 공사비의 계산을 위한 계수는 c 로 나타내고, 각 관로의 길이 L_i , 건설된 관로의 직경 D_{ij} 를 이용하여 공사비를 계산한다.

식 (7)는 관로 i 에 건설되는 관경은 한가지여야 한다는 제약조건이며, 식 (8)의 모든 절점에서의 압력은 최소요구압력(H)보다 커야한다는 제약조건이다. 좌변은 수원의 총 에너지(RL)에서 물이 흘러온 경로를 통하여 관로 i 의 끝 노드까지의 Hazen-Williams 공식을 이용한 마찰손실을 나타내며, 이때 관로 i 의 끝 노드의 표고는 z_i 이다. 여기서 S_{ij} 는 관로 i 에 관경 j 가 건설되었을 경우에 발생하는 단위길이 당 마찰손실을 Hazen-Williams 공식으로 계산한 값으로 다음과 같이 계산된다.

$$S_{ij} = \frac{10.66 q_i^{1.852}}{C_{HW}^{1.852} D_{ij}^{4.871}} \quad (11)$$

여기서 C_{HW} 는 Hazen-Williams 마찰계수이며, q_i 는 관로 i 에 흐르는 유량이다. 농업용수공급모형을 건설하는 시점에서는 모든 지점에서의 수요량을 알고 있으며, 수요량을 모두 공급한다는 가정을 하였으므로, 분기형의 관로에서 각 관에 흐르는 유량은 미리 알 수 있다.

식 (9)는 관내 유속이 최소유속(V_l)과 최대유속(V_h) 사이에서 유지되어야 한다는 것이다. 이는 관내 침전 및 부식 방지를 위한 제약조건이다. 식 (10)는 결정변수 x_{ij} 가 이진변수임을 나타낸다.

최종적으로 구성된 모형은 이진정수계획법(Binary Integer Programming)으로 GAMS/CPLEX(http://www.gams.com/solvers/solver_s.htm#CPLEX)를 이용하여 최적화를 시행하였다.

3. 농업용 관수로에 적용

농업용수공급 관로 설계 표준화를 위해 지거 관로의 설계 표준화를 위한 사전 작업으로 지거 관로의 구획형태별, 용수 공급량 별 표준 관로 설정을 시도하였다. 구획 형태별 지거 관로의 특성은 다음의 Table 1과 같다. 구획형태는 총 5개(1형, 2형, 3형, 4형, 5형)로 나뉘며, 각 구획형태는 지거관의 총 길이와 급수장치의 개수에 따라 달라진다. 구획형태 중 1, 2, 3형은 Fig. 1에 나타나 있다. 지거관의 표준화는 각 구획

Table 1. 구획형태 별 지거관로의 입력자료

구획형태	지거길이(m)	포장면적(ha)	급수장치		비고
			위치	개수	
1형	350	4(100×400 m)	양쪽	8	급수장치 1개소당 급수량 단위용수량 - 노지밭 : 0.0014306 m ³ /s/ha - 시설밭 : 0.0009986 m ³ /s/ha - 논 : 0.0026 m ³ /s/ha
2형	550	6(100×600 m)	"	12	
3형	750	8(100×800 m)	"	16	
4형	950	10(100×1,000 m)	"	20	
5형	1,150	12(100×1,200 m)	"	24

Fig. 1. 지거관로 배관도

형태별로 노지밭, 시설밭, 논에 해당하는 용수공급량을 공급한다는 가정 하에 시도한다. 관의 번호를 살펴보면, 1번 관로가 지거의 가장 마지막 관로를 뜻하며 관의 번호가 커질수록 상류 즉 수원에 가까운 것을 뜻한다.

설계 표준화를 목적으로 다양한 조건에서의 최적 관경을 결정하기 위해 지거 관로 설계 조건을 다음과 같이 설정한 후, 지거말단부 수압을 계산하였다.

- 조건 1 : 지거단위의 포장규격 및 지거관 연장 설정(총 5개의 구획형태로 구분)

- 조건 2 : 지거 시점부 압력(5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m) 가정
- 조건 3 : 동수구배(2‰, 3‰, 5‰) 가정
- 조건 4 : 용수수요량(노지밭, 시설밭, 논) 가정

위의 조건을 고려한 결과 구획형태에 따른 시점수압을 다르게 선정하였을 때, 동수구배에 따라 달라지는 말단부의 압력은 Table 2와 같다. 동수구배에 따라 달라지는 말단부의 압력은 각 관경별 유량이 결정되어 있으므로, 최적관경 탐색을

Table 2. 구획형태, 시점수압, 동수구배에 따른 지거관 말단압력

(a) 시점수압이 35 m 인 경우

구획 형태	지거길이 (m)	포장면적 (ha)	시점수압 (m)	동수구배에 따른 손실수두 (m)			동수구배에 따른 말단수두 (m)		
				2‰	3‰	5‰	2‰	3‰	5‰
1형	350	4(100×400 m)	35	0.7	1.05	1.75	34.3	33.95	33.25
2형	550	6(100×600 m)	35	1.1	1.65	2.75	33.9	33.35	32.25
3형	750	8(100×800 m)	35	1.5	2.25	3.75	33.5	32.75	31.25
4형	950	10(100×1,000 m)	35	1.9	2.85	4.75	33.1	32.15	30.25
5형	1,150	12(100×1,200 m)	35	2.3	3.45	5.75	32.7	31.55	29.25

(b) 시점수압이 30 m 인 경우

구획 형태	지거길이 (m)	포장면적 (ha)	시점수압 (m)	동수구배에 따른 손실수두 (m)			동수구배에 따른 말단수두 (m)		
				2‰	3‰	5‰	2‰	3‰	5‰
1형	350	4(100×400 m)	30	0.7	1.05	1.75	29.3	28.95	28.25
2형	550	6(100×600 m)	30	1.1	1.65	2.75	28.9	28.35	27.25
3형	750	8(100×800 m)	30	1.5	2.25	3.75	28.5	27.75	26.25
4형	950	10(100×1,000 m)	30	1.9	2.85	4.75	28.1	27.15	25.25
5형	1,150	12(100×1,200 m)	30	2.3	3.45	5.75	27.7	26.55	24.25

(c) 시점수압이 25 m 인 경우

구획 형태	지거길이 (m)	포장면적 (ha)	시점수압 (m)	동수구배에 따른 손실수두 (m)			동수구배에 따른 말단수두 (m)		
				2‰	3‰	5‰	2‰	3‰	5‰
1형	350	4(100×400 m)	25	0.7	1.05	1.75	24.3	23.95	23.25
2형	550	6(100×600 m)	25	1.1	1.65	2.75	23.9	23.35	22.25
3형	750	8(100×800 m)	25	1.5	2.25	3.75	23.5	22.75	21.25
4형	950	10(100×1,000 m)	25	1.9	2.85	4.75	23.1	22.15	20.25
5형	1,150	12(100×1,200 m)	25	2.3	3.45	5.75	22.7	21.55	19.25

(d) 시점수압이 20 m 인 경우

구획 형태	지거길이 (m)	포장면적 (ha)	시점수압 (m)	동수구배에 따른 손실수두 (m)			동수구배에 따른 말단수두 (m)		
				2‰	3‰	5‰	2‰	3‰	5‰
1형	350	4(100×400m)	20	0.7	1.05	1.75	19.3	18.95	18.25
2형	550	6(100×600m)	20	1.1	1.65	2.75	18.9	18.35	17.25
3형	750	8(100×800m)	20	1.5	2.25	3.75	18.5	17.75	16.25
4형	950	10(100×1,000m)	20	1.9	2.85	4.75	18.1	17.15	15.25
5형	1,150	12(100×1,200m)	20	2.3	3.45	5.75	17.7	16.55	14.25

(e) 시점수압이 15 m 인 경우

구획 형태	지거길이 (m)	포장면적 (ha)	시점수압 (m)	동수구배에 따른 손실수두 (m)			동수구배에 따른 말단수두 (m)		
				2‰	3‰	5‰	2‰	3‰	5‰
1형	350	4(100×400 m)	15	0.7	1.05	1.75	14.3	13.95	13.25
2형	550	6(100×600 m)	15	1.1	1.65	2.75	13.9	13.35	12.25
3형	750	8(100×800 m)	15	1.5	2.25	3.75	13.5	12.75	11.25
4형	950	10(100×1,000 m)	15	1.9	2.85	4.75	13.1	12.15	10.25
5형	1,150	12(100×1,200 m)	15	2.3	3.45	5.75	12.7	11.55	9.25

(f) 시점수압이 10 m 인 경우

구획 형태	지거길이 (m)	포장면적 (ha)	시점수압 (m)	동수구배에 따른 손실수두 (m)			동수구배에 따른 말단수두 (m)		
				2‰	3‰	5‰	2‰	3‰	5‰
1형	350	4(100×400 m)	10	0.7	1.05	1.75	9.3	8.95	8.25
2형	550	6(100×600 m)	10	1.1	1.65	2.75	8.9	8.35	7.25
3형	750	8(100×800 m)	10	1.5	2.25	3.75	8.5	7.75	6.25
4형	950	10(100×1,000 m)	10	1.9	2.85	4.75	8.1	7.15	5.25
5형	1,150	12(100×1,200 m)	10	2.3	3.45	5.75	7.7	6.55	4.25
5형	1,150	12(100×1,200 m)	5	2.3	3.45	5.75	2.7	1.55	-0.75

Table 2. Continued

(g) 시점수압이 5 m 인 경우

구획 형태	지거길이 (m)	포장면적 (ha)	시점수압 (m)	동수구배에 따른 손실수두 (m)			동수구배에 따른 말단수두 (m)		
				2‰	3‰	5‰	2‰	3‰	5‰
1형	350	4(100×400 m)	5	0.7	1.05	1.75	4.3	3.95	3.25
2형	550	6(100×600 m)	5	1.1	1.65	2.75	3.9	3.35	2.25
3형	750	8(100×800 m)	5	1.5	2.25	3.75	3.5	2.75	1.25
4형	950	10(100×1,000 m)	5	1.9	2.85	4.75	3.1	2.15	0.25

Fig. 2. 구획형태 (1형 ~ 5형) 별 최적 관경 분포

하기 전이라도 Hazen-Williams 식을 이용하여 손실수두 계산을 하여 결정할 수 있다. 최적 관경 탐색을 위해 상업용관의 관경인 75 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm를 적용 대상관으로 선정하였다. 각 구획형태별 경우의 수는 총 63(=7×3×3)으로, 구획형태별 최적관경산정결과는 다음의 Fig. 2와 같다. 그림에 계산된 결과는 각 구획형태별로 동수구배에 따라 지거의 마지막 지점의 수압을 만족시키기 위해 선택된 최적 관경이다. 1형은 총 4개의 관로만을 가진 짧은 관수로이고 5형은 총 12개의 가장 긴 관수로이다. Fig. 2에서 보는 것과 같이 관수로의 길이가 길어질수록 가장 마지

막에 위치하는 관로의 관경이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 관길이가 길어짐에 따라 마찰로 인한 손실을 줄이기 위해 관경을 크게 하여 유속을 작게 하기 위함이다. 그러나 일반적으로 가장 마지막에 위치하는 관의 관경은 대체로 75 mm나 100 mm로 용수수요량에 따라 달라지지는 것으로 나타났다. 예를 들어, 논($0.0026 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ha}$)의 용수수요량은 노지밭($0.0014306 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ha}$)의 1.85배, 시설밭($0.0009986 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ha}$)의 2.6배에 달하므로 논일 경우 시설밭일 경우보다 더 큰 관경의 관수를 필요로 한다.

또한 동수구배에 따라 각 관별 최적관경의 빈도수를 그려

Fig. 3. 동수구배에 따른 관경분포

본 결과는 Fig. 3과 같다. 그 결과 동수구배가 클수록 작은 관으로 설계가 가능한 것으로 나타났다. 이는 작은 관을 건설하면 유속이 증가하고, 그 결과 손실수두경사(동수구배) 증가가 나타나기 때문이다. 이렇게 작은 관을 건설하게 되면, 관내 유속 또한 증가하지만, 설계유속인 0.7~1.0 m/s를 만족시키기 위한 제약조건으로 인해 최적 설계가 가능하다.

4. 결 론

본 연구에서는 수자원 부족이라는 당면한 현실에서 인간생활의 가장 근간이 되는 농업의 지속가능성 확보를 위한 용수 공급을 효과적이고 경제적으로 공급하기 위해 분기형 관수로의 최적관경산정을 위한 모듈을 이진정수법을 이용하여 개발하고, 농업단지에 적용하여 구획형태에 따른 용수사용량별, 시

점의 수두별, 동수구배별, 최적 관경을 산정하여 그 분포를 파악하고 표준화를 위한 자료를 제시하였다. 기존의 분기형 관수로 시스템의 선형화를 위해 관의 길이를 결정변수로 하였던 최적화기법에서 두 가지 이상의 관경이 하나의 관로에 결정되는 단점을 막고, 절점의 압력 및 속도에 대한 제약조건을 고려하기 위해 이진정수법을 이용한 새로운 방법의 최적화 시스템이 제안되었다. 이진정수법은 관망해석 시 필연적으로 야기되는 비선형성을 고려하면서도 기 선택된 관경의 관이 건설될 것인가의 여부를 표시하는 이진변수를 결정변수로 최적 관경을 구하므로 기존의 선형화된 모형에서 발생하였던 다양한 관경이 하나의 관에 결정되는 단점을 피할 수 있다는 장점이 있다. 또한 비선형성을 고려하면서도 기존의 방법과 같이 별도의 수리화학적 해석모형을 이용하지 않고도 손쉽게 최적해를 구할 수 있으면서, 비선형계획법에 비해 손색이 없는 최적해를 구할 수 있다.

제안된 모형은 농업용 관수로 설계의 표준을 제시하기 위해 다양한 경우에 적용하여, 민감도 분석이 수행되었다. 그 결과를 이용하여 농업용 관수로의 구획형태와 용수사용량이 정해지면 가능한 최적관경을 프로그램을 실행하지 않고도 손쉽게 찾을 수가 있으며, 이는 경제적인 시공이 강조되고 있는 현재 농업분야에서 향후 설계에 활용한다면 매우 유용한 자료가 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 ‘스마트위터 그리드’ 설계를 위한 기초 설계기술 개발을 위해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김성호, 김정부, 김정호, 이두순, 박성재, 백선기, 백석두, 홍순명. (1996) **수리조직 활성화와 쌀생산 전업화에 관한 연구**, 한국농촌경제연구원.
- 농림수산식품부 (2009) **농업생산기반정비사업계획설계기준(관수로편)**.
- Calhoun, C. (1971) Optimization of Pipe Systems by Linear Programming, Control of Low in Closed Conduits, J. P. Tullis, ed., Colorado State Univ., Ft. Collins, pp. 175-192.
- Gupta, I. (1969) Linear programming analysis of a water supply system, *Transactions of American Institute of Industrial Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 56-61.
- Gupta, I., Hassan, M.S. and Cook, J. (1972) Linear Programming Analysis of a Water Supply System with Multiple Supply Points, *AIIE Trans.* Vol. 4, No. 3, pp. 200-204.
- Kameli, D., Gadish, Y., and Meyers, S. (1968) Design of Optimal Water Distribution Networks, *J. Pipeline Div. ASCE*, Vol. 94, No. 1, pp. 1-9.
- Schaake, J. and Lai, D. (1969) Linear Programming and Dynamic Programming - Application of Water Distribution Network Design, Report 116, MIT Press, Cambridge, Mass.

© 논문접수일 : 2012년 09월 07일
 © 심사외뢰일 : 2012년 09월 10일
 © 심사완료일 : 2012년 09월 18일