

제 11 장 관망해석에서의 컴퓨터 응용

안 태 진

11.1 서 론

일반적으로 관수로 시스템은 계획, 설계 그리고 분석단계를 통하여 결정되는데, 계획단계에서는 수요량을 각 수요지점에서 추정하며, 설계단계에서는 지형상태를 고려한 배관형태(pipe layout), 배수지의 관리수위, 펌프의 양정, 각 관로의 관경 및 교차점에서의 설계수두(design head) 등을 결정하고, 분석단계에서는 관내유량 및 수요지점에서의 수두를 계산하여 설계내역이 수리학적으로 타당한가를 판단한다. 관수로시스템은 폐합회로(loop)의 유무에 따라 분기형배관(tree pipe network)과 회로형배관(looped pipe network)으로 구분하는데 분기형배관은 배관내에 폐합회로가 없으며 회로형배관은 배관내 폐합회로가 1개 이상인 경우를 말한다. 분기형배관의 수리계산은 관로들의 유량이 유일해이므로 해석적 방법을 적용할 수 있지만 회로형 배관의 수리계산은 관로들의 유량이 유일해가 아니므로 해석적방법을 적용하는 것은 불가능하여 근사계산법을 이용하고 있다.

회로형배관의 수리계산에 적용하고 있는 근사계산법으로는 선형이론방법(Linear theory method), 뉴턴-랩선방법(Newton-Raphson method) 및 Hardy Cross방법 등이 있다. 수리계산 프로그램은 TDHNET27²²⁾, KYPIPE¹⁹⁾, WADISO¹⁷⁾, CYBERNET⁸⁾, WATERCAD⁹⁾, LOOP¹³⁾ 등이 있고, 최적화 모형을 적용하여 관경을 결정하는 WADISO, BRANCH¹⁴⁾ PIPE¹⁵⁾ 등이 있어 실제 설계에 적용할 수 있으며, 일부 프로그램은 계산 결과를 근거로 DXF file을 생성시켜 AutoCAD에 설계 도면을 작성하기도 한다. 최적화 모형 프로그램은 일반적인 수리계산 프로그램의 입력자료 이외에 여러 관경에 관한 단위공사비, 펌프 전력료 등이 필요하다. 여기서는 선형이론방법과 뉴턴-랩선방법에 관해 상술하고 관수로시스템의 수리계산을 위한 상업용프로그램인 TDHNET27의 입력화일과 출력내용에 관해 설명하고자 한다.

TDHNET27 프로그램은 KYPIPES의 입력화일을 그대로 이용할 수 있으며 KYPIPES의 대부분 기능을 수행할 수 있다. TDHNET27은 선형이론방법을 프로그램의 근본으로 하였으며 사용방법이 아주 간편하여 관수로시스템 설계에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 BRANCH와 WADISO를 간단히 소개하였다.

11.2 관수로의 수리

상수도 설계시 적용하고 있는 유속 및 손실수두 계산 식은 여러 식이 있지만, 일반적으로 많이 사용되고 있는 Hazen-Williams 공식은 다음과 같다.

$$\text{Hazen - Williams 공식: } v = 0.849 C_{hw} R_h^{0.63} S^{0.54}$$

여기서 v = 관로내 평균유속 (m/s)

C_{hw} = Hazen - Williams 계수

R_h = 동수반경 (m)

S = 에너지 경사(m/m)

Hazen-Williams 유속공식으로부터 $S = 10.667 \left(\frac{Q}{C_{hw}} \right)^{1.852} \cdot D^{-4.867}$ 이고, 임의 관로의 손실수두는 $h_f = S \cdot L$ 이다. 여기서 L 는 관로의 길이(m)이고, D 는 관경(m)이며, Q 는 관내 유량(m^3/s)이다.

상수도 수리계산에 있어서 C_{hw} 계수에 따라 관내유량과 관경이 같은 관로에서도 손실수두의 크기가 달라지므로 신중하게 C_{hw} 계수를 선택하여야 한다. 즉 C_{hw} 계수 값이 커질수록 관로의 손실수두는 작아지고 C_{hw} 계수값이 작아지면 손실수두는 커진다. 따라서 사업지구내 유지보수계획, 내구연한, 관경을 고려하여 장래 보수와 개수 중 어느 공법이 유리한지를 판단하여 결정한다. 즉 비교적 관경이 큰 송수관로에서는 관청소와 같은 보수를 염두하여 결정하고, 배수관로에서는 보수와 개수를 함께 고려하고, 급수관로에서는 개수를 염두하여 각각 합리적인 C_{hw} 계수를 결정한다. 관 재료별 C_{hw} 계수값은 다음 표 11.1과 같다.

표 11.1 Hazen - Williams 식에서의 C_{hw} 계수

		C_{hw} values for Certain Pipe Diameters					
		2.5 cm	7.6 cm	15.2 cm	30.5 cm	61.0 cm	122.0cm
Uncoated cast iron: smooth and new			121	125	130	132	134
Coated cast iron: smooth and new			129	133	138	140	141
Coated cast iron	30 years old						
	slight attack		100	106	112	117	120
	moderate attack		83	90	97	102	107
	appreciable attack		59	70	78	83	89
	severe attack		41	50	58	66	73
	60 years old						
	slight attack		90	97	102	107	112
	moderate attack		69	79	85	92	96
	appreciable attack		49	58	66	72	78
	severe attack		30	39	48	56	62
	100 years old						
	slight attack		81	89	95	100	104
	moderate attack		61	70	78	83	89
appreciable attack		40	49	57	64	71	
severe attack		21	30	39	46	51	
Miscellaneous							
Newly scraped mains			109	116	121	125	127
Newly brushed mains			97	104	108	112	115
Coated spun iron-smooth new			137	142	145	148	148
Galvanized iron-smooth,new		120	129	133			
Wrought iron-smooth, new		129	137	142			
Coated steel-smooth, new		129	137	142	145	148	148
Uncoated steel-smooth, new		134	142	145	147	150	150
Coated asbestos cement, clean			147	149	150	152	
Uncoated asbestos cement, clean			147	145	147	150	
Smooth pipe(including lead, brass, copper, polythene, and smooth PVC)-clean		140	147	149	150	152	153
PVC wavy-clean		134	142	145	147	150	150

미소손실은 밸브, 계측기, 연결부 등에서 발생하는 국지 에너지 손실을 말하며 일반적인 관로시스템에서는 무시하는 경우도 있으나, 미소손실 부위가 많은 경우에는 반드시 미소손실을 고려해야 한다. 표 11.2⁸⁾은 대표적인 미소손실계수 값을 보여주고 있다.

표 11.2 연결부 별 미소 손실 계수

Fitting	K value	Fitting	K value
Pipe Entrance		90 Smooth Bend	
Bellmouth	0.03 - 0.05	Bend radius / D =4	0.16 - 0.18
Rounded	0.12 - 0.25	Bend radius / D =2	0.19 - 0.25
Sharp Edged	0.50	Bend radius / D =1	0.35 - 0.40
Projecting	0.80		
Contraction - Sudden		Mitered Bend	
$D_2/D_1 = 0.8$	0.18	$\theta = 15^\circ$	0.05
$D_2/D_1 = 0.5$	0.37	$\theta = 30^\circ$	0.10
$D_2/D_1 = 0.2$	0.49	$\theta = 45^\circ$	0.20
Contraction - Conical		$\theta = 60^\circ$	0.35
$D_2/D_1 = 0.8$	0.05	$\theta = 90^\circ$	0.80
$D_2/D_1 = 0.5$	0.07	Tree	
$D_2/D_1 = 0.2$	0.08	Line Flow	0.30 - 0.40
Expansion - Sudden		Branch Flow	0.75 - 1.80
$D_2/D_1 = 0.8$	0.16	Cross	
$D_2/D_1 = 0.5$	0.57	Line Flow	0.50
$D_2/D_1 = 0.2$	0.92	Branch Flow	0.75
Expansion - Conical		45° Wye	
$D_2/D_1 = 0.8$	0.03	Line Flow	0.30
$D_2/D_1 = 0.5$	0.08	Branch Flow	0.50
$D_2/D_1 = 0.2$	0.13		

상수도설계에서 관로내 유속은 1 m/s를 초과하지 않도록 하지만 소방용 관로에 서 유속은 2 m/s을 상한유속으로 한다. 일반적으로 관내 유속이 0.15 m/s 이내로 계산되었다면 설계관경은 과다하다고 할 수 있으며, 관내 유속이 1.5 m/s를 초과하 면 관은 상당한 응력을 받으며, 관내 유속이 2.5 m/s를 초과하면 관내 흐름은 비정상적인 흐름이 발생할 수 있다.

관수로시스템내 공기발생은 용수공급 정지 및 관파열의 원인이 되므로 설계 및 시공에 만전을 기하여야 한다. 관로내 공기발생은 연행공기, 저압부 고속류에서 물 속에 함유된 공기의 분리현상 및 절대압력이 포화증기압 이하로 떨어지는 부분에서 의 공동현상에 기인한다. 수조에서 연결되는 관로내에 연행할 수 있는 공기를 방지 하기 위해서는 수조내 관로로부터 수심을 충분히 하거나 수조 연결 관로 관경의 약 10배되는 위치에 통기공을 설치한다. 공기의 분리현상이나 공동현상에 의한 공기발 생은 동수경사선을 가능한 한 높이거나 공기변을 설치함으로써 방지할 수 있다.

관수로 시스템내에는 기능에 따라 여러 밸브(Valve)가 있으며 밸브의 개·폐는 자동으로 동작되는 것이 바람직하다. Check 밸브는 역류가 발생할 때는 밸브를 닫히게 하여 관로내 흐름을 한 방향으로만 흐르게 하며, 항상 완전히 열린 것으로 고려한다. 유량조절밸브(Flow Control Valve, FCV)는 지정한 흐름 방향으로, 지정한 유량으로 송수하기 위하여 설치된다. 감압밸브(Pressure Regulating Valve, PRV)는 상류측보다 낮은 지정된 압력으로 유지하기 위하여 설치되며, 하류측에 바람직하지 않은 압력이나 유량을 방지한다. 압력유지밸브(Pressure Sustaining Valve, PSV)는 상류측에 지정된 압력을 유지하기 위한 밸브이다. 그 밖에 밸브를 통하여 지정된 손실수두를 발생시키는 Pressure Breaker Valve(PBV)와 손실수두의 특성을 시간에 따라 변경시키는 Throttle Control Valve (TCV) 등이 있다.

Extended Period Simulation(EPS)는 저수조내 급수와 배수, 각종 조절밸브의 개·폐 그리고 수요량 변화와 자동조절계획에 따른 관내 유량과 교차점에서의 수두 변화 등을 모의운영하는 것으로 관수로시스템의 운영에 있어서 시공 후 예상되는 변동 사항을 상정하여 검토할 수 있다. 관수로해석에 있어서 정류해석은 단순히 설계수요량과 설계수두에 충족하는 배관인지를 판단하지만 EPS는 일별, 시간별 및 분별 계획된 용수공급이 가능한지를 검토하므로 정류해석 입력자료의 물수요양상, 자세한 저수조 내역, 펌프와 밸브의 운영규칙 등의 입력자료가 필요하다. EPS는 관로내 수질을 분석하는 모형 또한 포함하고 있다.

11.3 분기형배관의 해석

분기형배관은 폐합회로가 없는 배관이므로 정상상태 수리계산시 필요한 관로의 유량은 쉽게 구할 수 있다. 그림 11.1과 같은 설계조건에서 수조의 관리수위를 결정하고자 한다.

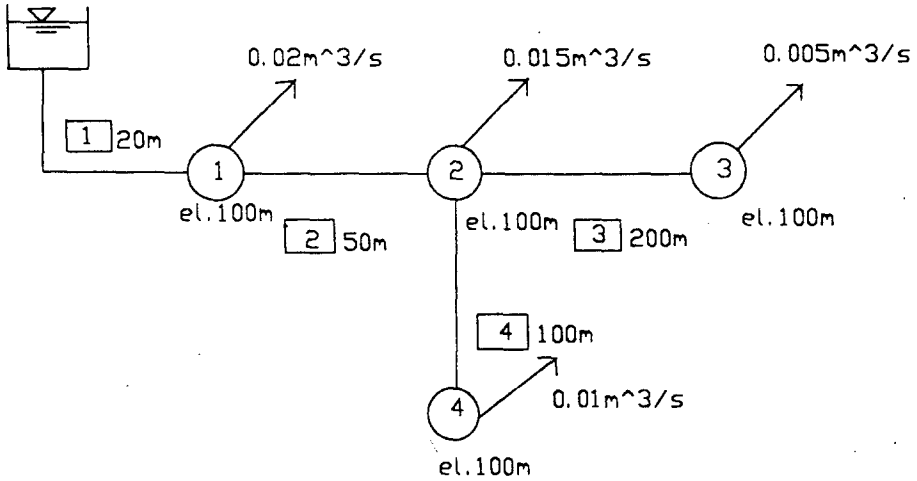


그림 11.1 표본 분기형 배관

설계조건: 관경은 0.1 m, n은 0.011, 각 교차점에서의 설계수두는 20 m이다.

Darcy-Weisbach공식에 의한 마찰손실계수

$$f = \frac{124.5 n^2}{d^{1/3}} = \frac{124.5 (0.011)^2}{(0.1)^{1/3}} = 0.015$$

단계 1. 관로의 유량 계산

연속방정식을 작성할 때 관로의 유량 및 수요량이 교차점으로 들어오는 방향으로 가정하면 양수, 나가는 방향으로 가정하면 음수로 한다. 유량 계산 후 양수의 값이면 가정한 방향으로 흐름이 진행하고 음수의 값이면 가정한 흐름 방향의 반대 방향이다.

$$Q_{(1)} - 0.01 = 0, \quad Q_{(1)} = 0.01$$

$$Q_{[5]} - 0.005 = 0, \quad Q_{[5]} = 0.005$$

$$Q_{[2]} - Q_{[3]} - Q_{[4]} - 0.015 = 0, \quad Q_{[2]} = 0.03$$

$$Q_{[1]} - Q_{[2]} - 0.02 = 0, \quad Q_{[1]} = 0.05$$

단계 2. 손실수두 계산

관로 1: $v_{[1]} = Q_{[1]} / A_{[1]} = 6.37 \text{ m/s}$

$$h_{A1} = 0.015 \frac{20}{0.1} \frac{(6.37)^2}{2g} = 6.21 \text{ m}$$

관로 2: $v_{[2]} = Q_{[2]} / A_{[2]} = 3.82 \text{ m/s}$

$$h_{A2} = 0.015 \frac{50}{0.1} \frac{(3.82)^2}{2g} = 5.58 \text{ m}$$

관로 3: $v_{[3]} = Q_{[3]} / A_{[3]} = 0.64 \text{ m/s}$

$$h_{A3} = 0.015 \frac{200}{0.1} \frac{(0.64)^2}{2g} = 0.63 \text{ m}$$

관로 4: $v_{[4]} = Q_{[4]} / A_{[4]} = 1.27 \text{ m/s}$

$$h_{A4} = 0.015 \frac{100}{0.1} \frac{(1.27)^2}{2g} = 1.23 \text{ m}$$

단계 3. 경로(path) 결정과 각 경로의 손실수두 계산

경로 I: [1] [2] [3]: $6.21 + 5.58 + 0.63 = 12.42 \text{ m}$

경로 II: [1] [2] [4]: $6.21 + 5.58 + 1.23 = 13.02 \text{ m}$

단계 4. 수조의 최소관리수위 결정

* 본 예제는 경로내 교차점의 위치수두와 설계수두의 합은 마지막 교차점의 위치수두와 설계수두의 합보다 작은 경우이다.

1) 경로 I의 마지막 교차점의 위치수두+설계수두+ 경로 I의 누가손실수두
 $= 100.0 + 20.0 + 12.42 = \text{el. } 132.42 \text{ m}$

2) 경로 II의 마지막 교차점의 위치수두+설계수두+ 경로 II의 누가손실수두
 = 100.0+20.0+13.02 = el. 133.02 m

단계 5. 수조의 최소관리수위: el. 133.02 m

수리계산 검토: 아래 표와 같이 계산수두는 설계수두보다 크므로 결정된 수조의 수위는 수리학적으로 타당함을 알 수 있다.

교차점 번호	설계수두, m	설계수두, EL. m	계산수두, EL. m
1	20	120	126.81 (133.02-6.21)
2	20	120	121.23 (133.02-6.21-5.58)
3	20	120	120.60 (133.02-6.21-5.58-0.63)
4	20	120	120.00 (133.02-6.21-5.58-1.23)

대규모 배관에 있어서 수조의 공급량과 수요량을 이용하여 관로 유량의 계산은 node-arc incidence matrix를 작성하여 역행렬을 해석함으로써 구할 수 있다. 본 예 제에 적용하면 다음과 같다.

node - arc incidence matrix

node	link					
	[1]	[2]	[3]	[4]		
tank	1	0	0	0	$Q_{[1]}$	0.05
1	-1	1	0	0	$Q_{[2]}$	-0.02
2	0	-1	1	1	$Q_{[3]}$	= -0.015
3	0	0	-1	0	$Q_{[4]}$	-0.005
4	0	0	0	-1		-0.01

즉 $\mathbf{A} \mathbf{Q} = \mathbf{F}$ 에서 $\mathbf{Q} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{F}$ 이다. 여기서 \mathbf{A} 는 matrix, \mathbf{Q} 는 관로 유량의 column vector, \mathbf{F} 는 공급량과 수요량의 column vector이다. node-arc incidence matrix의 rank를 full rank로 하기 위하여 마지막 행은 제거시키고 역행렬을 계산하여 관로의 유량을 계산한다.

그림 11.1과 같은 분기형 배관에서 교차점 3번과 4번을 연결하는 관로를 추가하면 폐합회로가 생성되므로 회로형 배관이 된다. 경제적인 측면에서 볼 때 분기형은 회로형보다 관로의 총연장은 짧으므로 경제적이다. 용수공급 신뢰도를 고려하면 분기형 배관에서 4번 관로가 과열되면 4번 교차점은 절연되어 용수를 공급받지 못하지만 회로형 배관에서는 용수공급이 지속된다. 따라서 회로형 배관이 분기형 배관보다 시스템의 신뢰도는 당연히 높다.

11.4 회로형배관의 해석

회로형배관의 수리계산절차를 관망해석이라 하는데 관망해석에 있어서 연속방정식(continuity equation) 또는 교차점방정식(junction equation)과 에너지방정식(energy equation) 또는 폐합회로방정식(loop equation)들이 항상 만족되어야 한다. 관로의 수, 교차점의 수, 폐합회로의 수 및 공급지점의 수와의 관계식은 다음 식 11.1과 같이 표현된다.

$$P = j + l + f - 1 \quad (11.1)$$

여기서 P = 관로의 수, j = 수원공 지점을 제외한 교차점의 수, l = 폐합회로의 수 및 f = 고정 수원공 지점의 수를 나타내며 어느 관망에서 관로유량을 계산하기 위하여 필요한 연속방정식과 에너지방정식의 수는 관로의 수와 같다. 관망에서 관로유량이 구해지면 손실수두계산식을 이용하여 각 교차점의 수두를 계산할 수 있다.

어느 관망의 각 교차점에서 연속방정식이 만족되기 위해서는 어느 교차점에서 총유입량은 총유출량과 같아야 하므로 다음 식 11.2와 같이 표현된다.

$$\sum Q_i - \sum Q_o = Q_e \quad (11.2)$$

여기서 Q_e =수요량 또는 공급량, Q_i =유입량, 및 Q_o =유출량이다. 어느 관망에서 연속방정식의 총수는 교차점의 총수와 같으며 부호는 교차점으로 들어오면 양수 나가면 음수로 한다.

어느 임의의 폐합회로에서 에너지방정식은 다음 식 11.3과 같이 표현된다.

$$\sum h_l = \sum E_p \quad (11.3)$$

여기서 h_l 는 폐합회로내 각 관로에서 에너지 손실수두이고 E_p 는 각 관로에서 펌프에 의한 에너지를 의미하며 폐합회로내 펌프를 설치하지 않았을 경우 폐합회로내 에너지손실의 합은 0이다.

임의 관망에서 에너지방정식의 총수는 폐합회로의 총수와 같다. 또한 수원공 지점이 2개 이상 있다면 폐합회로에 대한 에너지방정식 수 이외에 수원공 지점사이에 에너지방정식이 추가로 필요하며 식 11.4와 같다.

$$\sum h_l = \sum E_p - \Delta E \quad (11.4)$$

여기서 ΔE 는 수원공 지점사이의 수두차이며 이때 두개의 수원공 지점사이의 경로(path)는 임의로 지정하여도 무관하다. 이 경로를 의사폐합회로(Pseudo-loop)라 한다. 따라서 수원공 지점이 f 수만큼 있다면 의사폐합회로에 대한 에너지방정식은 $f-1$ 수 만큼 필요하다. 예를 들어 그림 11.2와 같은 관망에서 관로의 유량을 계산하기 위한 방정식의 총수를 세어보면 식 11.1로부터 아래와 같이 계산되어 14임을 알 수 있으며 이는 앞에서 언급한 바와 같이 관로의 총수와 같다.

$$\begin{aligned} 14(\text{관로의 총수}=\text{방정식의 총수}) &= 10(\text{교차점의 수}=\text{연속방정식의 수}) \\ &+ 3(\text{폐합회로의 수}=\text{폐합회로에 대한 에너지방정식의 수}) \\ &+ 1(f-1, \text{의사폐합회로의 수}=\text{의사폐합회로에 대한 에너지방정식의 수}). \end{aligned}$$

11.4.1 선형이론방법

관망해석문제에서 연속방정식은 선형이고 에너지방정식은 비선형이다. 에너지방정식에서 임의의 관로의 손실수두는 일반적으로 Chezy, Manning, Hazen-Williams 공식 등과 같은 평균유속공식으로부터 마찰손실수두는 $h_f=kQ^n$ 과 같이 유도할 수 있다. 여기서는 Hazen - Williams 공식으로 유도하면,

$$S = 10.667 \left(\frac{Q}{C_{hw}} \right)^{1.852} \cdot D^{-4.867} \text{이고,}$$

$h_f = S \cdot L$ 이며 $h_f = k Q^n$ 가 된다. 여기서 $k = \frac{10.667L}{C_{hw}^{1.852} D^{4.867}}$ 이고 n 는 1.852이다.

유사한 방법으로 미소손실수두 h_m 는 $h_m = M \frac{v^2}{2g} = M \frac{Q^2}{2g A^2} = \frac{M}{2g A^2} Q^2$ 이므로

$$h_m = k_m Q^2 \text{이다. 여기서 } k_m = \frac{M}{2g A^2} \text{이다.}$$

선형이론방법에서는 $|Q^{n-1}|$ 을 상수로 처리하여 에너지방정식을 선형화한다. 연속방정식과 에너지방정식으로 구성된 시스템이 선형화되면 행렬로 나타내어 Gaussian 소거법등으로 해석할 수 있다. 관망문제를 해석하기 위해 먼저 초기 $a_{bej} = k |Q_{bej}^{n-1}|$ 을 가정하여 행렬을 해석한 다음, 다음 단계 계산을 위한 $a_{aft} = k |Q_{aft}^{n-1}|$ 을 구하여 행렬을 다시 해석한다. 이 절차를 해(solution)에 수렴될때까지 반복하여 수행한다. 이 방법에서 보정된 새로운 유량 Q^{aft} 들이 과다 보정되는것을 피하기 위하여 다음 단계에서의 Q^{aft} 는 $\frac{2Q^{aft} + Q^{bef}}{3}$ 으로부터 구한 값을 사용하면 해의 수렴속도가 빠르다. 이 방법을 이용하여 관망해석을 실행하는 절차를 요약하면 다음과 같다.

선형이론방법을 이용한 관망해석 절차

단계 1. 연속방정식과 에너지방정식의 공식화 한다.

$$\sum_{i=1}^{m_l} h_{il} \pm \sum_{k=1}^{n_l} h_{pk} = dh_l \quad l=1, \dots, L \quad (11.5)$$

$$\sum_{i=1}^{m_q} Q_{iq} = U_q \quad q=1, \dots, N \quad (11.6)$$

여기서

L = 의사폐합회로를 포함한 폐합회로의 수

N = 교차점의 수

h_{il} = l 번째 폐합회로에서 i 번째 관로의 손실수두

dh_l = l 번째 폐합회로내에서 수두변화량

ml = l 번째 폐합회로내 관로의 수

pl = l 번째 폐합회로내 펌프의 수

Q_{iq} = i 번째 관로로부터 q 번째 교차점에 유입되는 유량

U_q = q 번째 교차점의 수요량

nq = q 번째 교차점에 연결된 관로의 수

단계 2. $|Q_{ii}^{n-1}|$ 을 상수로하여 Step 1의 시스템을 다음과 같이 재공식화 한다.

$$\sum_{i=1}^{m_l} k_{il} |Q_{ii}^{n-1}| Q_{il} \pm \sum_{k=1}^{m_l} hp_{ik} = dh_l \quad l=1, \dots, L \quad (11.7)$$

$$\sum_{i=1}^{m_q} Q_{iq} = U_q \quad q=1, \dots, N \quad (11.8)$$

단계 3. $a_{il} = k_{il} |Q_{ii}^{n-1}|$ 이라하여 k_{il} , n , 및 Q_{ii} 의 초기값을 지정하고, 수렴기준 α 를 지정한다.

단계 4. $a_{il}^{oit} = k_{il} |Q_{ii}^{n-1}|$ 을 계산한 후 Gaussian 소거법으로 행렬을 해석한다.

단계 5. 계산오차 ϵ 을 계산한다.

$$\epsilon = \sum_{i=1}^{np} \left| \frac{a_{il}^{bef} - a_{il}^{aft}}{a_{il}^{aft}} \right| \quad \text{또는} \quad \epsilon = \sum_{i=1}^{np} \left| \frac{Q_{il}^{bef} - Q_{il}^{aft}}{Q_{il}^{aft}} \right|$$

여기서, np 는 관로의 총수이다.

- i) 만약에 $\epsilon > \alpha$ 이면 $Q_{il}^{aft} = (2Q_{il}^{aft} + Q_{il}^{bef})/3$ 으로 계산하여 Step 4로 간다.
- ii) 만약에 $\epsilon < \alpha$ 이면 그때의 유량을 저장하고 계산을 중지한다.

11.4.2 Newton-Raphson 방법

Newton-Raphson방법은 비선형방정식을 해석하는데 좋은 방법이다. l 번째 폐합 회로에 관해 에너지방정식을 폐합회로 유량으로 표현하면 다음과 같다.

$$F(\Delta Q_l) = \sum_{i=1}^{ml} \sigma k_i (Q_{oi} + \sigma \Delta Q_l)^n = dh_l \quad (11.9)$$

여기서 ΔQ_l = 수렴을 위한 l 번째 폐합회로의 폐합회로유량(loop flow)

Q_{oi} = l 번째 관로에서 연속방정식을 만족하는 초기관로유량

ml = 폐합회로 l 의 관로의 총수

σ = 가정한 관로유량의 방향이 시계방향이면 양수, 시계반대방향이면 음수

dh_l = l 번째 폐합회로내 수두변화량

Newton-Raphson방법을 임의 폐합회로에 적용하면 식 11.10과 같다.

$$\Delta Q_l(K+1) = \Delta Q_l - \frac{\sum_{i=1}^{ml} \sigma k_i (Q_{oi} + \sigma \Delta Q_l)^n}{\sum_{i=1}^{ml} \sigma^2 k_i n (Q_{oi} + \sigma \Delta Q_l)^{n-1}} \quad (11.10)$$

여기서 $\Delta Q_l(K+1)$ 은 $(K+1)$ 계산회수에서의 폐합회로의 유량이며 σ^2 은 항상 양수이다. 이 방법에서 유의할 사항은 초기 폐합회로의 유량값을 초과하지 않도록 해야한다. 이 방법을 이용하여 관망해석을 실행하는 절차를 요약하면 다음과 같다.

Newton-Raphson 방법을 이용한 관망해석 절차

단계 1. 연속방정식을 만족하는 초기관로유량 Q_{oi} 를 지정하고 폐합회로의 유량을 가정한다.

단계 2. 에너지방정식을 폐합회로 유량으로 표현한다. 즉,

$$F(\Delta Q_i) = \sum_{i=1}^{m_i} \sigma k_i (Q_{oi} + \sigma \Delta Q_i)^n = dh_i$$

단계 3. 단계 2의 시스템을 Newton-Raphson을 적용하여 최적폐합회로의 유량을 구한다.

단계 4. $Q = Q_o + \Delta Q$ 를 이용하여 초기관로유량을 수정한다.

여기서, Q_o 는 초기관로유량, ΔQ 는 Step 3에서 얻은 보정유량, 및 Q 는 최종관로유량이다.

11.5 TDHNET27 실행예

11.5.1 TDHNET27 프로그램

TDHNET⁽²²⁾는 미국 TDH Engineering 회사에 의하여 1992년에 개발되었다. 선형이론방법을 프로그램의 근본으로 한 TDHNET27는 Math coprocessor가 있는 386형 PC이상에서 실행할 수 있으며 RAM의 크기에 따라 해석할 수 있는 관망규모가 결정된다. 640K Ram인 PC에서는 관로수가 2,000개이고 폐합회로가 667개인 관망을 해석할 수 있다. TDHNET27 프로그램은 KYPIPES의 입력화일을 그대로 이용할 수 있으며 KYPIPES의 대부분 기능을 수행할 수 있다. 본 프로그램은 C++언어로 개발되어 펌프를 포함한 관망의 해석, 설계제원의 변경, 하류측 수두를 최소로 유지하여 주는 pressure reducing valves(PRV)의 모의운영, 상류측 수두를 최대로 유지하여 주는 pressure relief valves의 모의운영 등을 수행할 수 있으며, 출력

내용을 근거로 한 DXF(drawing exchange file) 파일은 AUTOCAD를 이용한 도면 작성에 유용하다. 또한, 수조 수위, 압력조절공의 변동에 따라 관망해석을 수행하는 Extended Period Simulation (EPS) 기능도 있다.

관망해석에 있어서 단위는 영국단위계와 SI단위계를 선택하여 사용할 수 있으며, 관로의 손실수두는 Darcy-Weisbach식 또는 Hazen-Williams식을 선택할 수 있다. 다음 절의 입력파일은 일반적인 관망해석의 경우로 하였다.

11.5.2 TDHNET27의 입력파일 (참조 표 11.4)

제 1행: 다음과 같은 13개 열에 입력 항목이 있음.

- 1열) 계산형태지표 (정수,1) 0
 0 이외의 숫자는 EPS 자료가 포함됨을 나타낸다.
- 2열) 유량단위 (정수,5)
 0 : 유량 cfs, 압력 psi
 1 : 유량 gpm, 압력 psi
 2 : 유량 mgd, 압력 psi
 3 : 유량 liters/sec, 압력 Knewtons/ (SI단위)
- 3열) 파이프(관로)의 수 (정수,6-10)
- 4열) 교차점의 수 (정수,11-15)
 주) 수원공은 포함하지 말 것
- 5열) 수압조절밸브의 수 (정수,16-20)
- 6열) 입력자료지표 (정수,26-30)
 0 : 결과출력에 입력자료가 포함됨
- 7열) 최대계산회수 (정수,36-40)
 0 : 20회
- 8열) 허용오차 (실수,41-50)
 0 : 0.005
- 9열) Specific Gravity (실수,51-60)

0 : 1

10열) 동점성계수 (실수,61-70)

0 : Hazen-Williams 공식으로 손실수두를 계산

0 이상 : Darcy-Weisbach 공식사용

11열) Configuration Data 지표 (정수,71-72)

0

12열) CAD Flag(지표) (정수,73-75)

0

13열) 불연속파이프 수지정 (정수,76-80)

0 : 파이프번호 연속지정

제 2,3,4 행

제목지정 : 사업지구설명

제 5행 (생략가능)

수압조절밸브

1) 교차점수 (정수,1-5)

2) 파이프수 (정수,6-10)

3) PRV Grade

제 6행에서 6'행 까지 (관로의 개수만큼)

* 한행에 하나의 관로(예: 교차점 ① → ② 12개열에 입력 항목이 있음)

1열) 파이프상태

0 : 열린상태

1 : Check valve를 포함

2 : 닫힌상태

2열) 위쪽 파이프번호 (정수,2-5)

상류측 관로번호

0은 수원공을 의미함

3열) 아래쪽 관로번호 (정수,6-10)

하류측 파이프번호

0은 수원공을 의미함

4열) 관로의 길이 (실수,11-20)

ft 또는 m(SI단위)

5열) 관로의 직경 (실수,21-30)

inches 또는 cm(SI단위)

6열) 파이프 내부조도 (실수,31-40)

- Hazen-Williams공식을 사용할때는 (제1행의 10번이 0일때)

Hazen-Williams의 C계수를 사용 (C=80~140)

- Darcy-Weisbach공식을 사용할때는 milli-ft 또는

milli-meters(SI단위)

7열) 기타손실수두계수 (실수,41-50)

8열) 펌프지표 (실수,51-60)

0 : 관로에 펌프가 있음

-1 : 펌프의 유량-수두곡선의 3점을 입력

(다음행에서 설명)

9열) 수원공의 관리수위 (실수,61-70)

관로(파이프)가 수원공에 연결되었을때 관리수위

10열) 관로 번호

11열) X축 CAD Flag (본 예제에서는 생략)

12열) Y축 CAD Flag (본 예제에서는 생략)

제 7행 펌프가 있을때만 입력

(어느 관로에 펌프가 있을때는 제 6행 8열에 -1를 기입한다)

- ① 첫번째 펌핑고(양정고) (실수,1-10) : 양수량이 0일때 양정고
- ② 첫번째 양수량 (실수,11-20) : 0
- ③ 두번째 펌핑고(양정고)(실수,21-30) : 중간치 양수량에 상당하는 양정고
- ④ 두번째 양수량 (실수,31-40) : 중간치 양수량
- ⑤ 세번째 펌핑고(양정고)(실수,41-50) : 최대양수량에 상당하는 양정고
- ⑥ 세번째 양수량 (실수,51-60) : 최대유량

제 8행에서 8행까지 (교차점 수만큼), 교차점에 관한 자료

1열) 설계수요량 (실수,1-10)

0보다 크면 설계수요량이고 0보다 작으면 공급량을 의미함

2열) 교차점 표고 (실수,11-20)

ft 또는 meters(SI단위)

3열) 교차점 번호 (정수,21-25)

4열) 교차점 내역설명 (영문,26-75) : 본 예제에서는 생략

5열) X축 (실수,76-85) CAD Flag : 본 예제에서는 생략

6열) Y축 (실수,86-95) CAD Flag : 본 예제에서는 생략

제 9행 교차점 자료 입력 후 한행을 반드시 비워두어야 함

제10행 출력선택

1열) Limited Output flag (정수,1-5)

1 : limited output 선택가능

2열) # of high/low nodes (정수,6-10)

0

3열) Limited Output의 파이프수 (정수,11-15)

0

4열) Limited Output의 교차점수 (정수,16-20)

0

5열) # of change situations (정수,26-30)

0

6열) Suppress Data 요약

0

제10행의 첫 번째 열을 0으로 하면 full output으로 출력되고 좀더 상세한 사항은 TDHNET27.DOC를 출력하여 참고하기로 한다.

11.5.3 표본관망의 실행 예

그림 11.2와 같은 관망을 표본관망으로 하였으며 표 11.3에는 각 교차점의 설계 수요량과 설계수두를 수록하였다. 또한 출력화일은 표 11.5에 수록하였다. 표본관망에 관한 연속방정식과 에너지방정식은 다음과 같으며 11.4절에서 언급한 방법으로 해석할 수도 있다.

$$Q_1 - Q_2 - Q_5 - 0.01262 = 0$$

$$Q_2 + Q_3 - 0.01262 = 0$$

$$Q_4 - Q_3 - Q_6 = 0$$

$$Q_5 - Q_7 - Q_9 - 0.01893 = 0$$

$$Q_7 + Q_8 - Q_{10} - 0.01893 = 0$$

$$Q_6 - Q_8 - Q_{11} - 0.01893 = 0$$

$$Q_9 - Q_{12} - 0.01262 = 0$$

$$Q_{10} + Q_{12} - Q_{13} - 0.01893 = 0$$

$$Q_{11} + Q_{13} - Q_{14} - 0.01893 = 0$$

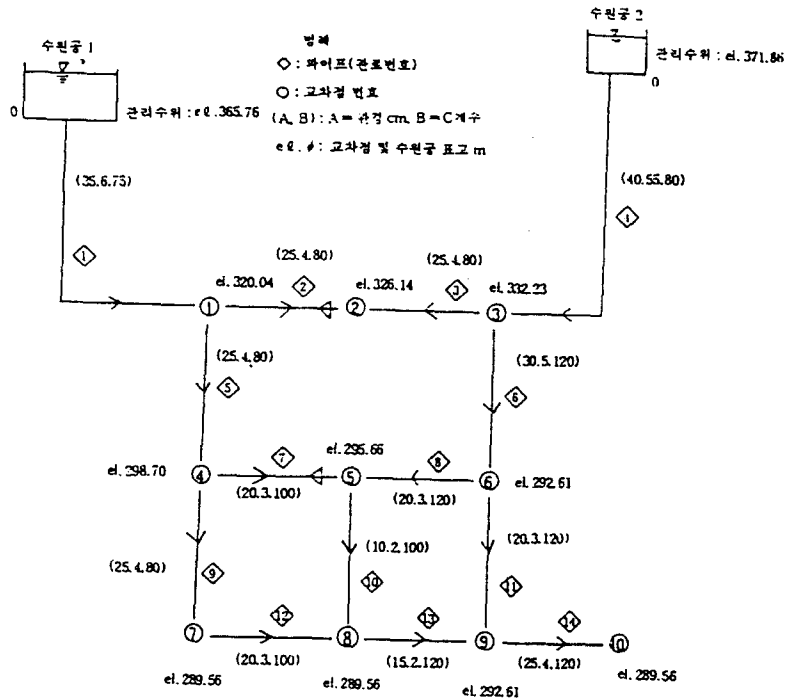
$$Q_{14} - 0.05048 = 0$$

$$365.76 - k_1 Q_1^{1.852} - k_2 Q_2^{1.852} + k_3 Q_3^{1.852} + k_4 Q_4^{1.852} - 371.86 = 0$$

$$k_2 Q_2^{1.852} - k_3 Q_3^{1.852} + k_6 Q_6^{1.852} + k_8 Q_8^{1.852} - k_7 Q_7^{1.852} - k_5 Q_5^{1.852} = 0$$

$$k_7 Q_7^{1.852} + k_{10} Q_{10}^{1.852} - k_{12} Q_{12}^{1.852} - k_9 Q_9^{1.852} = 0$$

$$-k_8 Q_8^{1.852} + k_{11} Q_{11}^{1.852} - k_{13} Q_{13}^{1.852} - k_{10} Q_{10}^{1.852} = 0$$



* 관로길이는 1609m 단 ◇ = 4828m, ◇ = 6437m * 2번과 7번관로에서 4는 논 계산후 유량의 흐름 방향

그림 11.2 표본 회로형 배관

표 11.3 표본관망의 설계수요량 및 필요수두

교차점번호	설계수요량(l/s)	설계수두(m)	설계수두(표고, m)
1	12.62	14.09	334.13
2	12.62	14.09	340.23
3	0	14.09	346.32
4	18.93	14.09	312.79
5	18.93	14.09	309.75
6	18.93	14.09	306.70
7	12.62	14.09	303.65
8	18.93	14.09	303.65
9	18.93	14.09	306.70
10	50.48	10.57	300.13

표 11.4 TDHNET27의 입력화일

```

1) 2) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13)
0 3 14 10 0 0 20 0.005 1.0 0.0 1 0 1 ←제 1행
Gessler Problem ←제 2행
demand pattern 3 ←제 3행
example input file ←제 4행
                                ←제 5행(생략 가능)

1) 2) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10)
0 0 1 4228.0 35.6 75. 0 0 365.76 1 ←제 6행
0 1 2 1609.0 25.4 80. 0 0 0 2
0 3 2 1609.0 25.4 80. 0 0 0 3
0 0 3 6437.0 40.55 120. 0 0 371.86 4
0 1 4 1609.0 25.4 80. 0 0 0 5
0 3 6 1609.0 30.5 120. 0 0 0 6
0 4 5 1609.0 20.3 100. 0 0 0 7
0 6 5 1609.0 20.3 120. 0 0 0 8
0 4 7 1609.0 25.4 80. 0 0 0 9
0 5 8 1609.0 10.2 100. 0 0 0 10
0 6 9 1609.0 20.3 120. 0 0 0 11
0 7 8 1609.0 20.3 100. 0 0 0 12
0 8 9 1609.0 15.2 120. 0 0 0 13
    
```

상수도 공학의 이론과 적용

0	9	10	1609.0	25.4	120.	.0	.0	.0	14	← 제 6'행
										← 제 7행(펌프 없음)
1)	2)	3)	4)	5)	6)					
12.62	320.04	1								← 제 8행
12.62	326.14	2								
0.0	332.23	3								
18.93	298.70	4								
18.93	295.66	5								
18.93	292.61	6								
12.62	289.56	7								
18.93	289.56	8								
18.93	292.61	9								
50.48	289.56	10								← 제 8'행
										← 제 9행 (교차점 자료 입력 후 반드시 한행을 비워 둠)
0	0	0	0	0	0					← 제 10행 (출력 선택)

표 11.5 TDHNET27의 출력 파일 요약

a. 관로

Pipe #	Nodes	Flow, l/s	Fric Loss, m	Minor	Velocity, m/s	Gradient, ‰	Grade, el. m
1	0 1	58.10	13.68	.0	0.58	2.83	365.76
2	1 2	6.58	-0.37	.0	-0.13	0.23	
3	3 2	19.20	2.70	.0	0.38	1.68	
4	0 3	124.89	16.72	.0	0.97	2.60	371.86
5	1 4	52.07	17.10	.0	1.03	10.63	
6	3 6	105.68	12.28	.0	1.45	7.63	
7	4 5	3.31	-0.20	.0	0.10	0.13	
8	6 5	28.12	7.68	.0	0.87	4.77	
9	4 7	36.44	8.83	.0	0.72	5.49	
10	5 8	5.88	16.96	.0	0.72	10.54	
11	6 9	58.64	29.96	.0	0.81	18.62	
12	7 8	23.82	7.92	.0	0.74	4.92	
13	8 9	10.77	5.32	.0	0.59	3.31	
14	9 10	50.48	7.62	.0	1.00	4.74	

표 11.5 TDHNET27의 출력 파일 요약(계속)

b. 교차점

Node #	Demand, <i>l/s</i>	Elevation, <i>m</i>	Pressure, <i>KN/m²</i>	압력수두, <i>m</i>	총수두, <i>m</i>
1	12.62	320.04	313.31	32.04	352.08
2	12.62	326.14	257.29	26.31	352.45
3	0.00	332.23	224.09	124.89	355.14
4	18.93	298.70	354.79	55.37	334.98
5	18.93	295.66	386.52	28.12	335.18
6	18.93	292.61	491.48	105.68	342.86
7	12.62	289.56	357.80	36.44	326.14
8	18.93	289.56	280.33	29.70	318.22
9	18.93	292.61	198.47	69.41	312.90
10	50.48	289.56	153.77	50.48	305.28

11.5.4 고찰

표 11.5에서 보는 바와 같이 각 교차점에서 계산된 수두들은 표 11.3의 설계수두보다 커서 수리학적으로 타당함을 알 수 있다. 표본관망의 수리계산 결과를 보면 설계수두들이 계산된 수두보다 커서 시스템의 신뢰성은 높으나 비경제적인 설계임을 알 수 있다. 그러므로 계산된 수두들이 설계수두에 근접하는 최적설계를 이루면 경제적인 설계를 지향할 수 있는데 이는 최적화 이론을 도입한 프로그램을 이용함으로써 가능하다.

표 11.5에서 교차점, 교차점의 표고, 압력, 수두 등의 계산치를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 10번 교차점의 총압력은 153.77 KN/m^2 으로 계산되었는데 이를 수두로 환산하여 본다.

$$\text{즉 } 153.77 \text{ KN/m}^2 = 153,770 \text{ N/m}^2 \cdot 1\text{Kg}/9.8\text{N} = 15,690\text{Kg/m}^2 = 1,569\text{g/cm}^2,$$

$1,569\text{g/cm}^2 \cdot \text{cm}^3/1\text{g} = 1,569\text{cm} = 15.72 \text{ m}$ 이고 10번 교차점의 수두를 표고를 환산하면 $286.56 \text{ m} - 15.72 \text{ m} = 305.28 \text{ m}$ 가 된다. 관로내 손실수두공식은 입력화일에서 Hazen-William공식이 지정되었는데 1번관로의 손실수두를 계산하면,

$$h_{K1} = K \left(\frac{Q}{C_{hu}} \right)^{1.852} D^{-4.87} L = 10.667 \left(\frac{0.0581}{75} \right)^{1.852} 0.356^{-4.87} 4828 = 13.68 \text{ m}$$

이다.

다음은 각 경로(path)를 이용하여 계산된 수두가 수리학적으로 타당한지 살펴보기로 한다. 관망내에서 수원공으로 부터 임의 교차점까지 도달하는 경로는 여러 경로가 있다. 경로내 임의 관로의 손실수두 부호는 유량의 방향이 경로와 같으면 음수이고 반대방향이면 양수로 한다. 예를 들어 교차점1에 도달하는 경로는 여러 경우가 있지만 3개의 경로만 생각하여 본다.

$$\begin{aligned} \text{즉, i) 교차점1의 수두} &= \text{수원공1의 수두} - \text{관로1번의 손실수두} (h_{K1}) \\ &= 365.76 - 13.68 = 352.08 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ii) 교차점1의 수두} &= \text{수원공2의 수두} - h_{K4} - h_{K3} - h_{K2} \\ &= 371.86 - 16.72 - 2.7 - 0.37 = 352.07 \text{ m} \end{aligned}$$

여기서 2번관로의 유량의 방향은 가정한 유량방향의 반대로 계산되었다.

$$\begin{aligned} \text{iii) 교차점1의 수두} &= \text{수원공2의 수두} - h_{K4} - h_{K6} - h_{K11} + h_{K13} + h_{K12} \\ &\quad + h_{K9} + h_{K5} \\ &= 371.86 - 16.72 - 12.28 - 29.96 + 5.32 + 7.92 \\ &\quad + 8.83 + 17.10 = 352.07 \text{ m} \end{aligned}$$

이상과 같이 각 경로에 따라 계산한 교차점1의 수두의 값은 동일해야 하며 같은 방법으로 그 외의 교차점의 수두를 검토할 수 있다.

11.6 BRANCH 실행예

11.6.1 BRANCH 프로그램

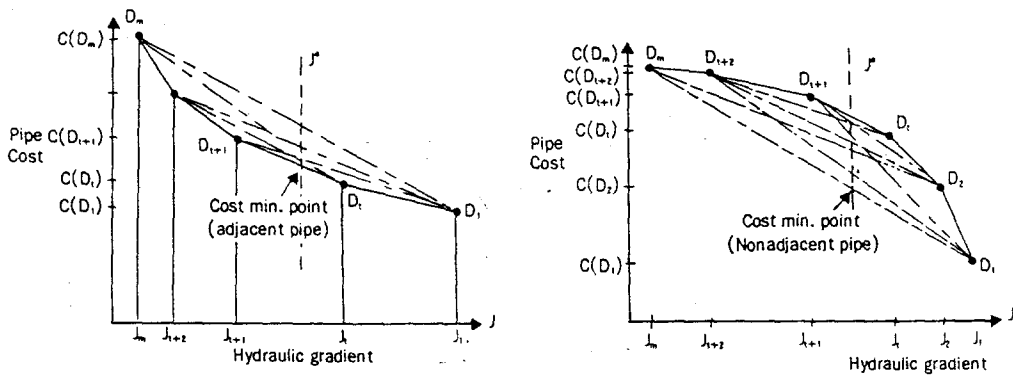
BRANCH¹⁴⁾는 선형계획(linear programming)을 도입하여 로선이 결정된 분기형 배관의 최적설계를 구하는 프로그램으로서 Puerto와 Hebert(1985)에 의하여 개발되었다. BASICA 언어로 개발된 본 프로그램은 관로수는 최대 50개, 교차점 수는 최대 51개 이내인 분기형배관에 적용할 수 있다. 관수로 시스템 설계를 위하여 최적

화 모형을 도입한 연구논문과 프로그램은 많으나 여러 사정으로 실무에 적용이 원활하지 못한 실정을 감안할 때, 본 프로그램을 이용한 최적설계를 시도할 수 있을 것이다. BRANCH는 분기형 배관에만 적용되고 또한 적용 가능한 관로의 수 때문에, 적용하는데 제약이 있지만 다음과 같은 방법으로 최적설계에 접근할 수 있을 것이다. 첫번째 단계는 관로수가 적은 경우는 바로 적용하면 되고, 관로수가 많고 수원공이 여러개인 경우는 전체배관을 소배관(sub-network)으로 분리하여 각 소배관에 관하여 BRANCH를 적용한다. 두번째 단계에서는 각 소배관을 연결하여 전체 배관으로 만들기 위해서는 연결관로가 필요하므로 상업용 최소관경을 연결관로의 관경으로 결정한다. 마지막 단계는 폐합회로(loop)를 만들기 위한 관로 역시 최소관경으로 결정하면 회로형배관이 된다. 결정된 회로형배관의 수리학적 타당성을 검토하기 위해서는 TDHNET²²⁾, KYPIPE¹⁹⁾, LOOP¹³⁾ 등과 같은 수리계산으로 검토할 수 있으며 만약에 결정된 회로형배관이 수리학적으로 타당하지 않으면 최소관경 보다 큰 관을 선택하여 다시 수리계산을 실행한다.

BRANCH는 분기형배관의 수리학적 타당성을 기약하는 수리학적 제약조건을 만족시키고, 공사비를 최소화하는 선형계획프로그램으로서 각 관로의 관경을 결정하고 그에 상응하는 관의 길이를 제공한다. 프로그램은 시설 관로뿐만 아니라 병렬관로 설계에도 적용할 수 있으며 입력자료로는 각 관로의 길이, 상업용 관경의 단위 길이당 공사비, 설계수요량, 지반고 등이며 출력자료는 최적 관경과 그 길이, 배관의 총공사비, 수리계산 등이다. 프로그램은 최대 및 최소 에너지경사를 지정하여 너무 작거나 큰 관경은 선택되지 않도록 하였다.

목적함수가 이산형(discrete)인 선형계획에서 각 관로의 최적관경은 동수경사-관경비용(hydraulic gradient - cost)의 관계에 따라 결정된다. 동수경사 - 관경비용 곡선이 볼록(convex)곡선이면 최적동수경사에 따라 하나의 관경을 선택하거나 두개의 인접한 관경(adjacent pipe diameters)을 선택한다. 그림 11.3-a에서 동수경사 J 는 관로유량이 일정한 상태에서 임의 관경 D 에 상응하는 동수경사이며, $C(D)$ 는 임의 관경에 상응하는 단위길이당 관로의 비용이고 m 은 상업용 후보관경의 수이다. 그림 11.3-a에서 J 를 최적동수경사라 하면 선형계획모형은 $(D_1, D_{t-1}), \dots, (D_{t-m+1}, D_{t-m})$ 등에서 인접한 관경인 (D_t, D_{t-1}) 으로 선택한다. 만약에 최적동수경사 J^* 가 D_t 에 상응하는 J_t 와 일치한다면 선형계획은 관경 D_t 하나만 선택한다. 일반적으로 상

업용관의 관경과 단위길이당 비용은 동수경사-관경비용 곡선은 볼록곡선으로 조합되고 있다. 마찬가지로 그림 11.3-b와 같이 동수경사-관경비용 곡선이 오목(convex)곡선이면 최적동수경사에 따라 하나의 관경을 선택하거나 두 개의 인접하지 않는 관경(nonadjacent pipe diameters)을 선택한다. 또한 동수경사-관경비용 곡선이 볼록도 아니고 오목도 아닌 곡선이 되면 최적동수경사에 따라 하나의 관경 또는 두 개의 인접하거나 인접하지 않는 관경을 선택한다.



a. 볼록곡선(convex curve)

b. 오목곡선(concave curve)

그림 11.3 유량이 일정한 관로에서 동수경사-관로비용 곡선

사용자 지침서에 의하면 BRANCH는 농촌지역 분기형배관과 여러 저수조를 포함한 배관 설계에 아주 유용하다고 소개하고 있으며, 펌프 양정고의 여러 안으로부터 설계양정고를 결정하고, 펌프 운영비를 계산하도록 하였다. 또한 프로그램 LOOP와 연계하여 대규모 회로형배관을 설계하는 절차를 사용자 지침서에 담았다.

11.6.2 표본배관의 실행 예

표본배관은 그림 11.4와 같은 분기형배관이며 입력화일은 표 11.6, 출력화일은 표 11.7과 같다.

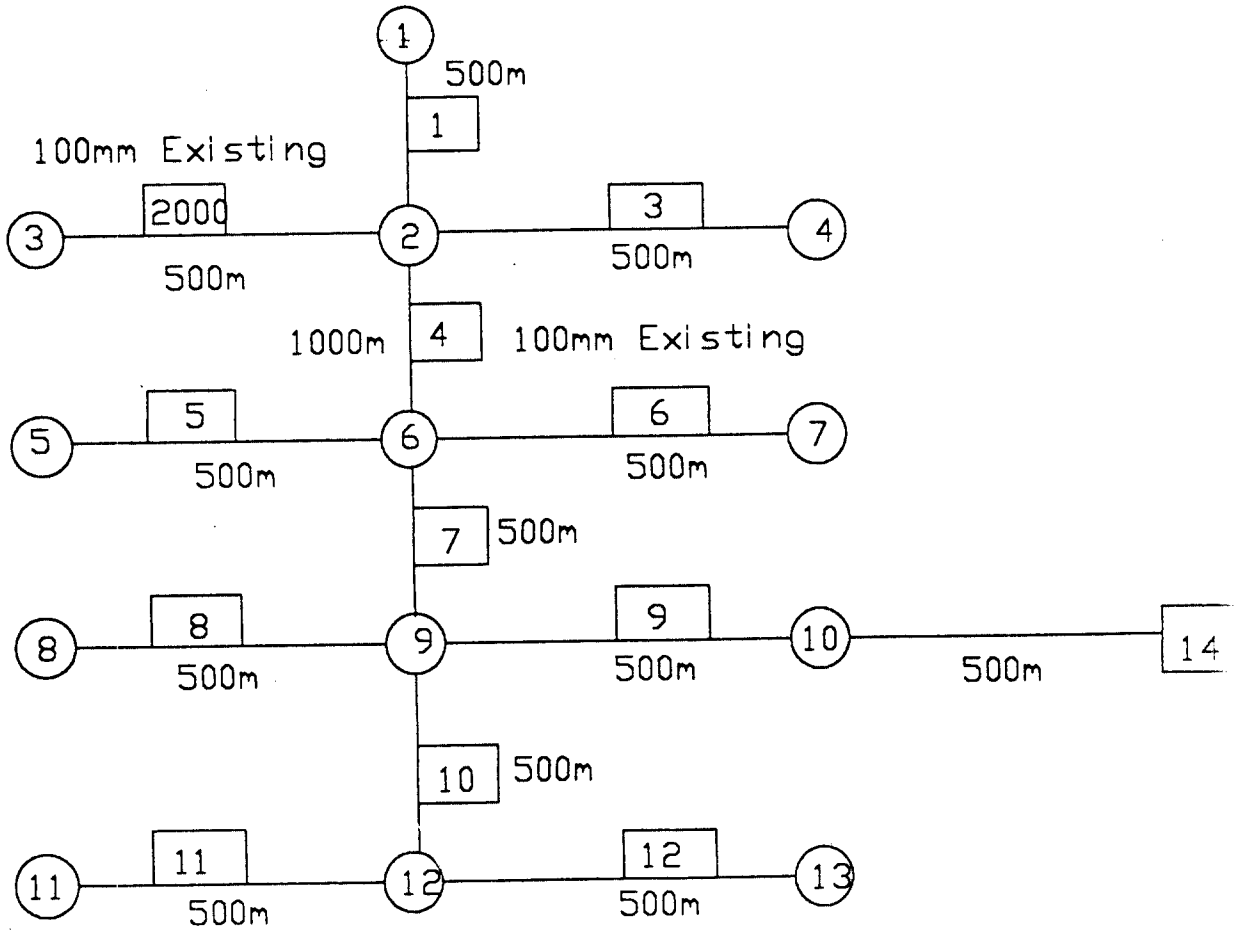


그림 11.4 표본 배관

표 11.6 BRANCH 입력화일

Title: Branch network sample design

No. of Pipes(관로의 수): 13

No. of Nodes(교차점의 수): 14

Peak Factor: 1

Residual Head(설계수두): 10

상수도 공학의 이론과 적용

Min. HL/KM(최소동수경사): 0.05

Max. HL/KM(최대동수경사): 20

PIPE(관로번호) No.	N O D E(절점번호) From To		LENGTH (관로길이)	DIA (관경)	HWC (계수)
1	1	2	500.0	0	0
2000	2	3	500.0	100	110
3	2	4	500.0	0	0
4	2	6	500.0	100	110
5	6	5	500.0	0	0
6	6	7	500.0	0	0
7	6	9	500.0	0	0
8	9	8	500.0	0	0
9	10	9	500.0	0	0
10	9	12	500.0	0	0
11	12	11	500.0	0	0
12	12	13	500.0	0	0
13	14	10	500.0	0	0

(절점번호) NODE #	(수요 및 공급량) FIX	(지반고) FLOW	ELEVATION
1	.0	.0	25.0
2	.0	-3.0	.0
3	.0	-3.0	.0
4	.0	-3.0	.0
5	.0	-3.0	.0
6	.0	-3.0	.0
7	.0	-3.0	.0

8	.0	-3.0	.0
9	.0	-3.0	.0
10	.0	-3.0	.0
11	.0	-3.0	.0
12	.0	-3.0	.0
13	.0	-3.0	.0
14	1.0	10.0	.0

표 11.7 BRANCH 출력화일 요약

AVAILABLE PIPES:

DIA (mm) (후보관경)	HWC (계수)	UNIT COST (단위비용)
75	100	75.
100	110	120.
150	110	200.
200	110	300.
250	120	430.

SUMMARY

DIAM (mm)	LENGTH (m)	COST
75	2,983.6	223,772.83
100	516.4	61,963.46
150	2,000.0	400,000.00
200	500.0	150,000.00

T O T A L = 835,736.25

상수도 공학의 이론과 적용

Pipe #	NODE		FLOW (lps)	DIAM (mm)	HWC	HLOSS	HL/KM (m)	Length (m)	COST
	from	to							
1	1	2	26.	200	110	2.64	5.28	500.	150,000
2000	2	3	3.	100	110	1.42	2.84	500.	-
3	2	4	3.	75	100	6.87	13.75	500.	37,500
4	2	6	17.	100	110	2.86	5.73	500.	-
				150	110	2.86	5.73	500.	100,000
5	6	5	3.	75	100	6.87	13.75	500.	37,500
6	6	7	3.	75	100	6.87	13.75	500.	37,500
7	6	9	8.	150	110	1.21	2.42	500.	100,000
8	9	8	3.	75	100	6.87	13.75	500.	37,500
9	10	9	7.	100	110	6.81	13.61	500.	60,000
10	9	12	9.	150	110	1.50	3.01	500.	100,000
11	12	11	3.	75	100	6.76	13.75	491.82	36,886.5
				100	110	0.02	2.84	8.18	613.5
12	12	13	3.	75	100	6.76	13.75	491.82	36,886.5
				100	110	0.02	2.84	8.18	613.5
13	14	10	10.	150	110	1.83	3.66	500.	100,000

total cost: 835,000

Node #	Flow (lps)	Elevation (m)	H G L (m)	Pressure (m)
1	26.	25.	25.0	0.0
2	-3.	.0	22.4	22.4
3	-3.	.0	20.9	20.9
4	-3.	.0	15.5	15.5
5	-3.	.0	12.6	12.6
6	-3.	.0	19.5	19.5
7	-3.	.0	12.6	12.6
8	-3.	.0	11.4	11.4
9	-3.	.0	18.3	18.3
10	-3.	.0	25.1	25.1
11	-3.	.0	10.0	10.0
12	-3.	.0	16.8	16.8
13	-3.	.0	10.0	10.0
14	10.	.0	26.9	26.9

11.7 WADISO 실행예

11.7.1 WADISO 프로그램

WADISO¹⁷⁾는 Walski 등(1990)이 개발한 관로 배관의 수리계산 및 최적화 프로그램으로서 상수도 설계, 보강, 확장 및 개수사업에 적용할 수 있다. 본 프로그램은 관망의 유량과 수두를 계산하는 수리계산부분(simulation routine), 설계조건을 충족시키는 관로의 관경 등을 결정하는 최적설계부분(optimization routine), 수조 수위와 수요량의 변동을 고려하여 수리계산을 수행하는 Extended Period Simulation (EPS)부분으로 구성되어 있다. 펌프, 압력저감밸브, 검사밸브 및 복합수조 등을 포함하여 수리 및 수리계산 기능을 수행할 수 있다. 최적화부분은 기설 상수도의 확장, 관청소에 의한 기설 상수도의 기능 개선을 위한 관로의 선택, 기설 상수도의 병렬확장에 있어서 관경을 결정하지만 대규모 시스템에 대한 적용에는 한계가 있다.

11.7.2 표본배관 실행 예

표본관망은 그림 11.5, 입력화일은 표 11.8, 출력화일은 표 11.9과 같다. 본예는 수리계산 예제이며 최적설계부분은 관경별 공사비, 단위에너지당 전력료, 상수도사업의 내구연한, 이율 등의 자료가 추가되며 자세한 내용은 사용자 지침서를 참고하기로 한다.

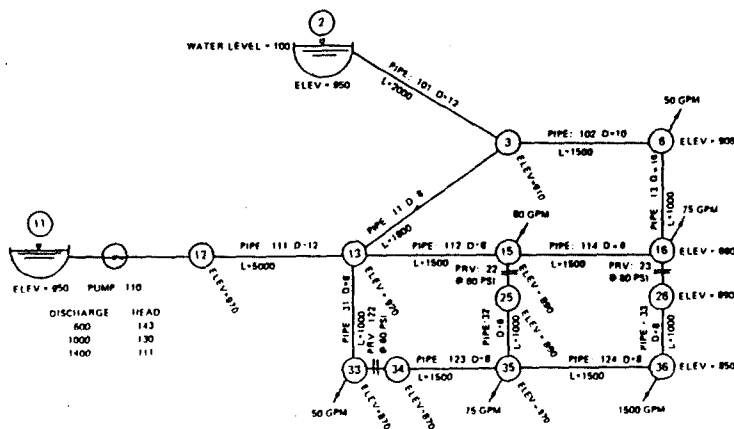


그림 11.5 수리계산 표본관망

표 11.8 수리계산 입력화일

PIPE NETWORK ANALYSIS AND OPTIMIZATION

JOB: EXAMPLE

NODE	ELEV.	DOM. LOAD
NO	FT	GPM
2	950.	WATER LEVEL: 100.
3	910.	0.
6	905.	50.
11	950.	RESERVOIR
12	970.	0.
13	920.	0.
15	890.	80.
16	890.	75.
25	890.	0.
26	890.	0.
33	870.	50.
34	870.	0.
35	870.	75.
36	850.	1500.

PIPE CONNECTIONS

PIPE	B	E	DIAM.	LENGTH	H-W-C
NO	NODE	NODE	IN.	FT.	
11	3	13	8.0	1800.	100.
13	6	16	10.0	1000.	100.
22	15	25			PRV AT 60. PSI
23	16	26			PRV AT 60. PSI
31	13	33	8.0	1000.	100.

32	25	35	8.0	1000.	100.	
33	26	36	8.0	1000.	100.	
101	2	3	12.0	2000.	100.	
102	3	6	10.0	1500.	100.	
110	11	12				PUMP
111	12	13	12.0	5000.	100.	
112	13	15	8.0	1500.	100.	
114	15	16	8.0	1500.	100.	
122	33	34				PRV AT 60. PSI
123	34	35	8.0	1500.	100.	
124	35	36	8.0	1500.	100.	

PUMP COEFFICIENTS FOR PUMP 110

Q*Q	Q	CONSTANT
-3.7772	-1.1221	151.2

표 11.9 출력화일 요약

PIPE NETWORK ANALYSIS AND OPTIMIZATION

JOB: EXAMPLE

NODE DATA

NODE NO.	ELEV. FT.	OUTPUT GPM	E.G.L. FT.	PR.HEAD FT.	PRESSURE PSI	
2	950.	-722.	1050.0	100.0	43.3	SUPPLY
3	910.		1045.0	135.5	58.7	
6	905.	50.	1030.5	125.5	54.4	
11	950.	-1108.	950.			RESERVOIR
12	970.		1075.5	105.5	45.7	

상수도 공학의 이론과 적용

13	920.		1050.3	130.3	56.5
15	890.	80.	1021.8	131.8	57.1
16	890.	75.	1021.4	131.4	56.9
25	890.		1021.8	131.8	57.1
26	890.		1021.4	131.4	56.9
33	870.	50.	1050.2	180.2	78.1
34	870.		1009.2	139.2	60.3
35	870.	75.	1009.2	139.2	60.3
36	850.	1500.	994.3	144.3	62.5

PIPE DATA

PIPE NO.	NODE FROM	NODE TO	DIAM IN.	LENGTH FT.	FLOW COEF	GPM	VEL. FT/SEC	HEAD LOSS
11	13	3	8.0	1800.0	100.	274.	1.7	4.9
13	6	16	10.0	1000.0	100.	945.	3.9	9.1
22	15	25	PRV AT	60.0	PSI	OPEN		
23	16	26	PRV AT	60.0	PSI	OPEN		
31	13	33	8.0	1000.0	100.	50.	.3	.1
32	25	35	8.0	1000.0	100.	627.	4.0	12.6
33	26	36	8.0	1000.0	100.	948.	6.1	27.1
101	2	3	12.0	2000.0	100.	722.	2.0	4.5
102	3	6	10.0	1500.0	100.	995.	4.1	15.5
110	11	12	PUMP HEAD	125.5	FT	1108.	POWER	35.HP
111	12	13	12.0	5000.0	100.	1108.	3.1	25.1
112	13	15	8.0	1500.0	100.	784.	5.0	28.6
114	15	16	8.0	1500.0	100.	78.	.5	.4
122	33	34	PRV AT	60.0	PSI	CLOSED		
123	35	34	8.0	1500.0	100.	.0	.0	.0
124	35	36	8.0	1500.0	100.	552.	3.5	14.9

11.8 KYPIPES

Wood(1980)가 개발한 KYPIPE1¹⁹⁾은 개정판이 계속 발표되고 있으며 탁월한 관망해석 프로그램으로 평가 받고 있다(KYPIPE2, 1993; KYPIPE3; KYTMP, 1996; PIPE2000, 1998). KYPIPE1은 선형이론을 근본으로 개발되었으며 저수조, 펌프, 밸브 등의 관로부속물을 고려하여 모든 형태의 관망을 해석할 수 있으며 EPS 해석이 가능하다. KYPIPE2는 KYPIPE1을 Haestad Methods Inc.에서 일부 모듈을 추가함으로써 사용자의 편의를 향상시킨 상업용 통합시스템으로 GUI에 의한 입출력 및 자료 관리 기능이 추가되었다. KYPIPE3는 다양한 Post Processor가 있으며 CAD 시스템도 가능하다.

11.8.1 입력화일 작성

그림 11.6과 같은 예제문제의 입력화일을 작성해 보기로 한다. KYPIPE가 담겨 있는 디스켓을 B drive에 넣고 B:INPUTF 으로 입력화일을 작성한 후 B:KYPIPEF 으로 프로그램을 실행시킨다.

B:INPUTF을 하고 프로그램이 묻는 대로 다음과 같이 작성한다.

a. INPUT FILE NAME = SAMPLE<Return>

b. SYSTEM DATA (1)

EPS KEY (1-EPS, RERURN FOR REGULAR SIMULATION)? <Return>

c. FLOW IDEN. CODE

0 - CFS

1 - GPM

2 - MGD

3 - L/S (SI UNITS)

CODE = ? for CFS <Return>

d. NUMBER OF PIPE = ? 7 <RETURN>

e. NUMBER OF JUNCTION NODES = ? 4 <Return>

고정수두(Fixed head nodes)는 고려하지 않는다. 본 예제에서는 A와 B절점이다.

f. NUMBER OF PRV'S ? 0 <Return> (Pressure Regulating Valves)

g. OPTION *1* - DATA CHECK? <Return> (default)

h. OPTION *2* - SUPPRESS INPUT DATA LIST? <Return> (default)

i. OPTION *3* - GEOMETRIC VERFICATION? <Return> (default)

j. OPTION *4* - MAXIMUM NO. OF TRIALS? <Return> (default)

k. OPTION *5* - RELATIVE ACCURACY? <Return> (default)

l. OPTION *6* - SPECIFIC GRAVITY? <Return> (default)

. 유체가 물이 아닌 경우에는 변경

m. OPTION *7* - KINEMATIC VISCOSITY? <Return>

Hazen - Williams 공식 사용할 때는 <default> 로 한다.

동점성계수는 $\text{ft}^2/\text{sec}(\text{m}^2/\text{sec})$ 로 한다.

n. OPTION *8* - DATA INPUT OPTION (for earlier format)? <Return>
(default)

o. OPTION *9* - NON-CONSECUTIVE NUMBERING OPTION? 1<Return>

p. DO YOU WANT TO ENTER THIS DATA (Y or N)? Y<Return>

q. LABEL DATA(2)

INPUT LABEL INFORMATION - FIRST LINE

? SAMPLE example problem<Return>

INPUT LABEL INFORMATION - SECOND LINE

? SAMPLE pipe network<Return>

INPUT LABEL INFORMATION THIRD LINE

? SAMPLE linear theory<Return>

r. INPUT DATA FOR 7 PIPES

A DEFAULT OPTION

PIPE INPUT # 1

PIPE NUMBER = ? <Return>

KEY FOR PIPE STATUS (RETURN-OPEN, 1-CV, 2-CLOSED)?

<Return>

(Check Valve: 관로내 흐름의 방향은 교차점 번호 순서와 같은 방향이며 지정한 흐름방향과 반대방향이면 밸브는 닫힌다.)

NODE # 1(INPUT -1 TO END PIPE DATA)? <Return> (no number for A)

NODE # 2 = ? 1 <Return>

LENGTH = ? 200 <Return> (must be ft.) (m)

DIAMETER = ? 6 <Return> (must be inches) (cm)

PIPE ROUGHNESS = ? 130 <Return> Use Hazen Williams Coefficient

(For Darcy pipe roughness is in millifeet or mm. e.g. for millifeet 0.0005 will be input as 0.5)

SUM OF MINOR LOSS COEFF. = ? 0 <Return>

PUMP KEY = ? <Return>

GRADE FOR FGN(Fixed Grade Node) CONNECTING THIS

PIPE = ? 215.38 <Return>

DO YOU WANT TO ENTER THIS DATA (Y or N) ? Y<Return>

s. PIPE INPUT #2

PIPE NUMBER = ? 2 <Return>

KEY FOR PIPE STATUS = ? <Return>

NODE #1 = ? 1 <Return>

NODE #2 = ? 2 <Return>

LENGTH = ? 150 <Return>

DIAMETER = ? 4 <Return>

SUM OF MINOR LOSS COEFF. = ? 0 <Return> (k from $h_L = k \frac{v^2}{2g}$)

PUMP KEY(RETURN FOR NO PUMP; POS. NO. FOR POWER; -1 TO INPUT DATA)= ? -1 <Return>

(Pos. no. for kilowatt or HP)

(pumping is in the direction indicated by the nodes are given.

i.e. from node 1 to node 2)

DO YOU WANT TO ENTER THIS DATA (Y or N)? Y<Return>

PUMP DATA (5) (그림 11.7 참조)

CUTOFF HEAD = ? 4407 <Return> (ft or meter)

INTERMEDIATE HEAD = ? 44.07 <Return>

INTERMEDIATE FLOW = ? 1 <Return>

HEAD FOR THIRD POINT = ? 22.035 <Return>

FLOW FOR THIRD POINT = ? 2 <Return>

(Note: cutoff head corresponds to zero discharge. You provide two more head-discharge values as intermediate and third point)

DO YOU WANT TO ENTER THIS DATA (Y or N) ? Y <Return>

Continue data for all pipes

t. JUNCTION DATA (6)

JUNCTION INPUT #1

JUNCTION NODE NUMBER = ? <Return>

DEMAND = ? 0 <Return>

(positive - outflow; negative - inflow)

ELEVATION = ? <Return>

DO YOU WANT TO ENTER THIS DATA (Y or N) ? Y <Return>

continue data for all junctions

u. OUTPUT OPTION DATA (8)

KEY FOR OUTPUT OPTION

0 - OUTPUT FOR ALL PIPES AND JUNCTIONS

1 - LIMITED OUTPUT

KEY = ? 0 <Return>

v. NUMBER OF JUNCTION NODES FOR MAX-MIN SUMMARY ? 0
<Return>

w. CHANGE INCORPORATED INTO DATA PRIOR TO FIRST RUN-
OPTION *14* ? <Return> (default)

x. CHANGE DATA (REG. AND EPS)

CONTINUATION KEY:

-1. -END OF CHANGES (INPUT FOR ANOTHER SYSTEM)

-2. -END OF ALL DATA

0. -(RETURN) ENTER DATA FOR ANOTHER CHANGE VALUE
FOR CONTINUATION KEY = ? -2 <Return>

*****INPUT DATA FILE(SAMPLE) HAS BEEN CREATED*****

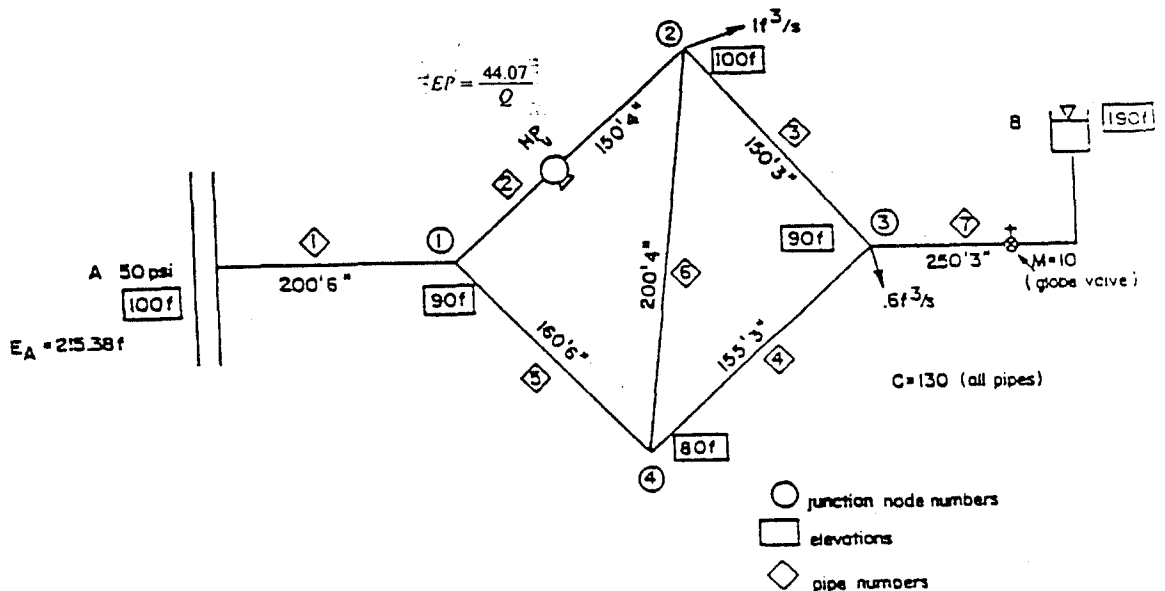


그림 11.6 표본 배관

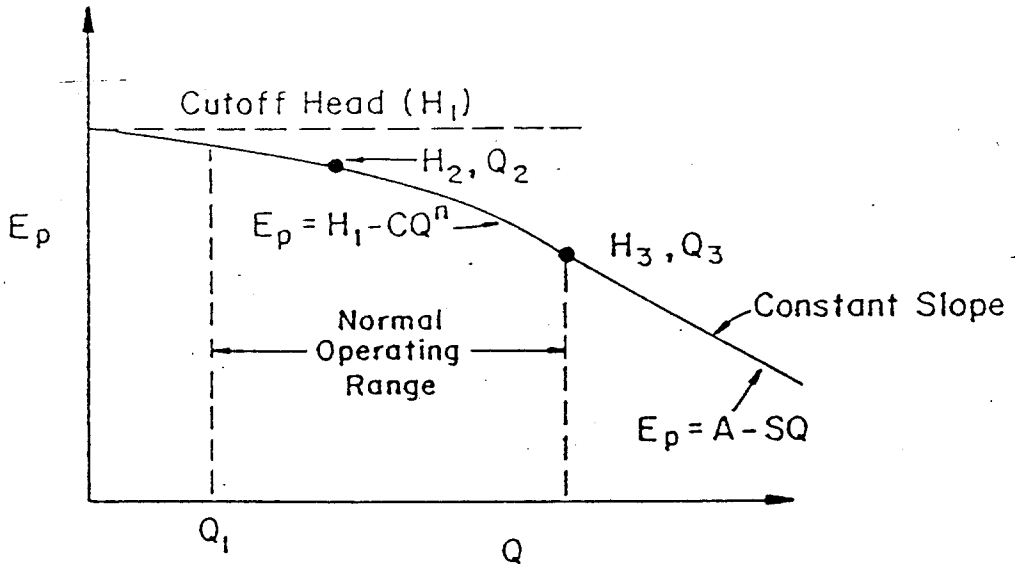


그림 11.7 펌프특성곡선

11.8.2 프로그램 실행

B: KYPIPEF

ENTER THE NAME OF THE INPUT FILE

sample <return>

ENTER THE NAME OF THE OUTPUT FILE

sample.out <return>

DO YOU WANT CREAT THE FILES FOR PIPEVIEW (Y or N)

n <Return>

11.8.3 출력

Type MORE<sample.out to view the output.

11.8.4 PRV와 EPS 해석을 위한 입력화일 작성

그림 11.6의 4번 교차점에 PRV를 포함하고 B 절점에 수위가 변하는 저수조가 있는 것으로 한다면 입력화일 작성과정에서 b. SYSTEM DATA내 EPS KEY와 f. NUMBER OF PRV"S는 1으로 입력하여야 하고, q. LABEL DATA(2)에서 PRV에 관련된 자료를 다음과 같이 입력한다.

PRV DATA (3)

INPUT DATA FOR 1 PRV"S

JUNCTION UPSTREAM OF PRV ? 4 <Return>

PIPE DOWNSTREAM FROM PRV ? 6 <Return>

GRADE SETTING FOR THIS PRV ? 185 <Return>

DO YOU WANT TO ENTER THIS DATA (Y or N) ? Y <Return>

INPUT DATA FOR 7 PIPES

A DEFAULT OPTION (입력화일작성 참조)

OUTPUT OPTION DATA (8)

KEY FOR OUTPUT OPTION

AN EPS SIMULATION WAS SPECIFIED

EPS DATA (11)

TOTAL TIME FOR EPS ? 2 <Return> (must be in hours)

TIME INCREMENT ? 0.25 <Return> (in hours)

NUMBER OF VARIABLE LEVEL TANKS ? 1 <Return>

(fixed grade node for pipe 7: node B)

NUMBER OF FIXED DEMAND JUNCTION NODES ? <Return>

(if no pressure switches are used)

NUMBER OF PRESSURE SWITCHES ? <Return>

DO YOU WANT TO ENTER THIS DATA (Y or N) ? Y <Return>

TANK DATA (12)

INPUT DATA FOR 1 TANKS

CONNECTING PIPE ? 7 <Return>

MAXIMUM ELEVATION ? 220 <Return>

MINIMUM ELEVATION ? 180 <Return>

TANK DIAMETER ? 10 <Return>

EXTERNAL TANK FLOW (-FOR OUTFLOW) ? <Return>

DO YOU WANT TO ENTER THIS DATA (Y or N) ? Y <Return>

CHANGE DATA (REG. AND EPS)

CONTINUATION KEY:

-1. -END OF CHANGES(INPUT DATA FOR ANOTHER SYSTEM)

-2. -END OF ALL DATA

0. -(RETURN) ENTER DATA FOR ANOTHER CHANGE

VALUE FOR CONTINUATION KEY = ? -2 <Return>

*****INPUT DATA FILE(SAMPLE) HAS BEEN CREATED*****

11.9 WaterCAD

WaterCAD³⁾는 관로의 정류해석, Extended Period 및 수질 모의운영, 수요지점에
서의 다수요양상 해석, 각종 밸브 운용 등을 해석할 수 있으며 관경 결정, 펌프규모
결정, 운영 검토, 관로의 갱생 검토 및 수질 검토 등을 해석할 수 있다. WaterCAD
는 프로그램내 GUI(Graphical User Interface) 기능이 있어 도면관리를 쉽게할 수

있으며, Drawing Exchange File(DXF)로 작성된 지형도 등을 포함한 기본계획 도면을 WaterCAD내로 불러 들여 수리계산 및 모의운명을 실행한 후 설계도면을 출력시킨다. 본 프로그램은 상수도시스템 뿐만 아니라 압력하수관거, 관정 등에도 적용시킬 수 있다.

11.10 Cybernet

선형이론을 근거하여 배수관망을 해석하는 프로그램인 Cybernet⁸⁾는 현재 사용하고 있는 프로그램 중 가장 우수한 프로그램 중의 하나이다. 본 프로그램은 AutoCAD로 작성된 3차원 그래픽 특성과 Cybernet의 Numerical Capacity를 이용하여 시뮬레이션을 실행한다. Window 95와 AutoCAD R14의 장점을 이용한 GUI를 구현하였으며 GIS와의 연계를 위한 각종 Database와의 연결 및 GIS program과도 결합하여 사용할 수 있다. 이용관경, 관길이, 지반고, 교차점 수요량, 조도계수, 기타 손실계수 등을 고려하는 Cybernet은 평균 물소비 양상을 고려하는 Standard analysis (STD)와 시간별 물소비를 고려하는 Extended Period Simulation analysis (EPS)를 해석할 수 있다. 수질해석과 Fire flow 해석기능 또한 포함되어 있다.

AutoCAD와 Cybernet의 Spot elevation과 Junction elevation을 이용한 scale로 작성한 3차원의 가로망에 관로의 배관을 구성하여 분석하게 되며 모든 정보는 Cybernet Drawing에 포함된다. 본 프로그램은 관로의 수에 따라 가격 차이가 있으며 해석 능력 또한 차이가 있다. 예를 들어 관로의 수가 1000이면 펌프는 62개, 교차점은 1000개, Flow meter는 62개 그리고 공급지점은 25개 이내인 경우만 해석이 가능하다. 마찰손실수두는 Hazen-Williams식과 Darcy-Weisbach식을 사용할 수 있으며 KYPIPE과의 데이터를 공유할 수 있다.

Standard analysis(STD)에서는 scenerio management와 alternative management를 이용하여 다양한 시뮬레이션을 수행하며 STD analysis를 통한 결과를 기초로 EPS analysis를 실행한다. 직·간접배수시스템을 모두 분석할 수 있으며 시간 변화에 따른 scenerio를 작성하여 각종 물수요 변화를 시뮬레이션한다. 직접배수시스템에서는 배수지의 시간별 수위를 수치 및 그림으로 표시되므로 경제적인 배수지 용량을 결정할 수 있다. 배수지와 정수장 pump와의 communication를 통한 펌프제어

가 가능한 분석을 수행할 수 있다. 펌프의 적용성 향상을 위해 펌프특성곡선과 더불어 펌프기능곡선을 적용할 수 있다. 해석결과인 System pressure, Hydraulic grade, Elevation, Fire flow 등을 지형도 및 그림으로 나타내므로 상수도 관망해석과 문제해결에 도움을 준다.

11.11 PIPE

PIPE¹⁾는 BRANCH와 같이 선형계획을 도입하여 로선이 결정된 분기형배관의 최적설계를 구하는 프로그램으로서 농어촌진흥공사(1995)에 의하여 개발되었다. C++ 언어로 개발된 본 프로그램은 대화식으로 개발되었으며 관로의 길이, 상업용 관경의 단위길이당 공사비, 설계수요량, 교차점에서의 지반고와 설계수두, Hazen - Williams 공식의 C계수, 등이며 출력자료는 각 관로의 관경, 수리계산 결과 등이다. 상업용 후보관경의 수는 최대 10개로 하였으며, 관로 수는 최대 50개, 교차점 수는 최대 51개 이내인 분기형배관에 적용할 수 있다.

PIPE도 BRANCH와 같이 분기형 배관에만 적용되고 또한 적용 가능한 관로의 수 때문에 적용하는데 제약이 있지만 BRANCH에서 제안한 방법으로 최적설계에 접근할 수 있을 것이다.

11.12 비선형계획에 의한 회로형배관의 해석

11.12.1 개설

Wood와 Charles(1972) 및 Wood와 Rayes(1981)는 비선형인 에너지방정식을 선형화한 선형이론방법을 이용하여 관망해석을 해석하였다. 상업용 프로그램인 KYPIPE와 TDHNET27는 선형이론을 근본으로 하였다. Jeppson (1977) 및 Epp와 Fowler(1970)는 비선형인 에너지방정식을 뉴턴-랩선법으로 해석하였다. 일반적으로 선형이론방법과 뉴턴-랩선법의 계산수렴속도는 비슷하나 펌프를 포함한 관로시스템의 해석에서는 선형이론방법이 뉴턴-랩선법보다 계산의 효율성이 높다. 선형이론방법과 뉴턴-랩선법은 항상 연속방정식을 만족하는 에너지방정식을 해석하는 방법이

나 여기서 적용한 비선형계획모형은 연속방정식과 에너지방정식을 함께 포함하였다. 여기서는 비선형계획을 이용한 관망해석의 적용성을 입증하기 위하여 표본관망을 선택하여 종래의 해석방법에 의한 결과와 비교검토하였다.

11.12.2 비선형계획 모형

비선형계획(nonlinear program)은 일반적으로 모형 M1으로 표현할 수 있다.

(모형 M1) 최소화(minimize): $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

제약조건(subject to):

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

선형계획(linear program)은 목적함수와 제약조건식이 선형인데 반하여 비선형계획은 그것들 모두 또는 한 변수라도 비선형인 경우를 말한다. 모형 M1은 m 개의 선형 또는 비선형조건식으로 구성되는 분석가능영역에서 n 개의 비부성(nonnegativity)인 결정변수(decision variable)로 구성된 목적함수를 최소화하는 것이다. (x_1, x_2, \dots, x_n) 들이 분석가능해라 가정하고 f 와 g_i 는 (x_1, x_2, \dots, x_n) 에 관하여 미분가능하다고 한다면 카루쉬-쿤-터커 조건(Karush-Kuhn-Tucker condition) 즉 KKT조건은 비선형계획 문제에서 최적해를 선택할 수 있도록 여러개의 해가 최적해 후보임을 보여주는 조건을 제시한다. 모형 M1의 KKT 조건은 다음과 같은 모형 M2로 표현할 수 있다.

$$\text{(모형 M2)} \quad \nabla f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m u_i \nabla g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

$$u_i \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, m$$

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad i=1, 2, \dots, m$$

$$u_i g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad i=1, 2, \dots, m$$

여기서 u_i 는 스칼라(scalars)이며 라그랑지승수(Lagrangian multipliers)라 부른다. 임의의 해가 KKT 조건을 만족한다는 것은 단지 최적해의 후보임을 알려줄 뿐이어서 모형 M2를 KKT 필요조건이라 한다. 따라서 KKT 필요조건에 만족하는 임의의 해 (x_1, x_2, \dots, x_n) 가 다음과 같은 KKT 충분조건을 만족하면 최적해라고 확정할 수 있다. 즉 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 가 의사 볼록형 함수(pseudoconvex function)이고 $i=1, 2, \dots, m$ 에 대한 $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 가 유사 볼록형 함수 (quasiconvex function)인 동시에 라그랑지승수(Lagrangian multipliers)가 $\nabla f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m u_i \nabla g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ 을 만족한다면 임의의 해인 (x_1, x_2, \dots, x_n) 를 최적해라 확정한다.

회로형배관에서 관로의 유량을 계산하기 위하여 모든 관로의 손실수두 h_f 의 합을 최소화되는 비선형계획 모형을 정립하였다. 일반적으로 손실수두 h_f 와 관로유량 Q 와의 관계는 Darcy-Weisbach공식을 이용하면 다음 식 11.11과 같이 표현할 수 있다.

$$h_f = \frac{8flQ^2}{\pi^2 g d^5} \quad (11.11)$$

여기서 f = 마찰손실계수, l = 관로의 길이, d = 관경, Q = 관로유량, h_f = 관로의 마찰손실수두이다. 식 11.11에서 $r = 8fl/\pi^2 g d^5$, $n=2$ 로 하면 $h_f = r Q^n$ 으로 되어 손실수두는 관로유량의 관계로 표현할 수 있다. r 과 n 의 값은 종래방법인 Hardy-Cross와 선형이론방법을 근거로 한 TDHNET27 그리고 비선형계획에 의한 해석에 필요한 값이다. TDHNET27에서는 비선형인 에너지방정식을 선형이론에 의거 선형방정식으로 변환한다. 즉 비선형인 마찰손실 수두식 $h_f = r Q^n$ 를 $h_f = r Q_o^n \cdot Q$ 으로 변환하여 Q_o 를 초기치로 한다. Hardy-Cross는 관로의 초기유량은 각 교차점의 연속방정식을 만족하도록 하고 순차적으로 폐회로의 유량을 보정하여 각 폐회로의 유량을 평형시키는 방법이다.

회로형배관에서 관로의 유량을 계산하기 위한 비선형계획 모형은 M3와 같이 정립할 수 있다. 이 모형은 손실수두 h_f 를 적분한 목적함수를 각 교차점의 연속방정식과 각 관로의 에너지 방정식으로 구성되는 분석가능영역에서 최소화하는 것이다.

$$\begin{aligned}
 \text{(모형 M3) minimize: } & \sum_{(i,j) \in E} \frac{r_{(i,j)}}{3} Q_{(i,j)}^3 \\
 \text{subject to: } & - \sum_{k, (i,k) \in E} Q_{(i,k)} + \sum_{k, (k,i) \in E} Q_{(k,i)} = q_i \quad i \in N \\
 & h_{(i,j)} - h_{(j,i)} = 0 \\
 & Q_{(i,j)} \geq 0 \\
 & Q_{(j,i)} \geq 0
 \end{aligned}$$

여기서 (i,j) = 임의 관로, E = 관로의 수, N = 교차점의 수, q = 수요량 또는 공급량이다.

11.12.3 표본관망의 해석

비선형계획을 이용하여 관망의 유량을 계산하기 위하여 그림 11.7과 같은 표본관망을 선택하였으며 사용한 부호는 다음과 같다.

[1], [2], [3], [4], [5]; 관로번호

①, ②, ③, ④; 교차점번호

L_i = 각 관로의 길이($i=1, \dots, 5$)

D_i = 각 관로의 구경($i=1, \dots, 5$)

q_i = 각 교차점에서 공급량 또는 수요량($i=1, \dots, 4$)

절대조도 e 는 0.26mm으로 하였으며 Darcy-Weisbach공식에서 흐름을 완전난류로 가정하면 마찰손실계수 f 는 유체내부의 마찰손실은 무시되므로 Reynolds 수와는 무관하고 오직 상대조도(e/d)에 따라서 변한다. 완전난류의 가정은 계산된 관로의 유량으로 Moody선도를 이용하여 마찰손실계수를 검토하면 무리가 없음이 확인된다. 앞에서 언급한 것과 같이 손실수두 h_f 와 관로유량 Q 와의 관계는 Darcy - Weisbach공식을 이용하면 $h = 8fLQ^2 / \pi^2 g d^5$ 는 $h_f = rQ^n$ 으로 되며 여기서, $n=2$ 이다. 각 각로에 대한 $r_{(i,j)}$ 의 계산 결과는 표 11.10과 같다.

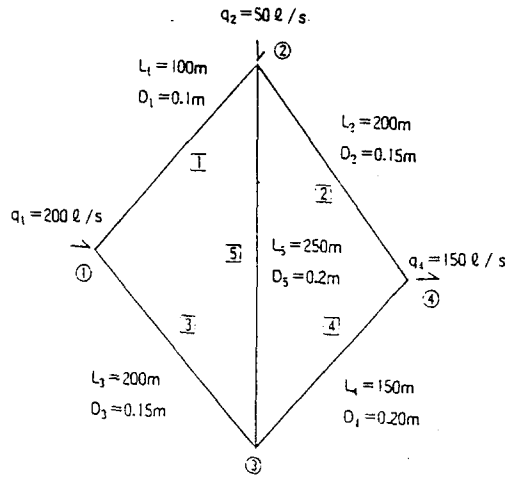


그림 11.8 표본관망

표 11.10 Darcy-Weisbach공식의 $r_{(ij)}$

관로번호	상대조도 (e/D)	마찰손실계수 (f)	r	n
1	0.0026	0.025	20658.0	2
2	0.0017	0.022	4787.8	2
3	0.0017	0.022	4787.8	2
4	0.0013	0.021	813.39	2
5	0.0013	0.021	1355.6	2

Hazen-Williams 공식을 이용하면

$$h_f = \frac{4.73l Q^{1.852}}{C_{hw}^{1.852} d^{4.87}} \text{ 는 } h_f = r Q^n \text{ 으로 되며, } h_f = \frac{4.73l}{C_{hw}^{1.852} d^{4.87}}, \text{ n}=1.852 \text{ 이다.}$$

C_{hw} 는 관의 조도에 따라 다르며 여기서는 120으로 택하였다.

각 각로에 대한 $r_{(ij)}$ 의 계산 결과는 표 11.11과 같다.

표 11.11 Hazen-Williams공식의 $r_{(ij)}$

관로번호	C_{hw}	r	n
1	120	4945.6	1.852
2	120	1373.0	1.852
3	120	1373.0	1.852
4	120	253.68	1.852
5	120	422.81	1.852

11.12.4 비선형계획 모형의 정립과 해석

비선형계획을 해석하는 전산프로그램 중의 하나인 GINO는 KKT조건을 적용하고 있으므로 목적함수는 Q 에 관하여 적분한 것이어야 한다. 또한 KKT조건은 결정변수가 양수이어야 하므로 그림 11.9와 같이 2개 교차점 사이의 2개 흐름 중 하나는 자동적으로 0으로 처리된다.

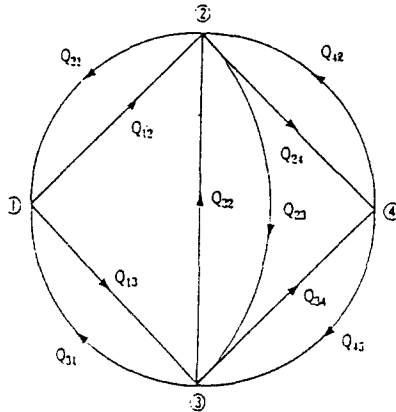


그림 11.9 GINO 프로그램에서의 흐름상태 표현

표본관망의 해석을 위한 비선형계획의 모형을 M3를 근본모형하여 정립하면 다음 모형 M4와 같다.

$$\begin{aligned}
 (\text{모형 M4}) \text{ Min. } & \frac{1}{3} (r_{12} Q_{12}^3 + r_{21} Q_{21}^3 + r_{13} Q_{13}^3 + r_{31} Q_{31}^3 + r_{23} Q_{23}^3 + r_{32} Q_{32}^3 + \\
 & r_{24} Q_{24}^3 + r_{42} Q_{42}^3 + r_{34} Q_{34}^3 + r_{43} Q_{43}^3)
 \end{aligned}$$

s.t.

$$Q_{21} + Q_{31} - Q_{12} - Q_{13} = -200$$

$$Q_{12} + Q_{32} + Q_{42} - Q_{21} - Q_{23} - Q_{24} = 50$$

$$Q_{13} + Q_{23} + Q_{43} - Q_{31} - Q_{32} - Q_{34} = 0$$

$$Q_{24} + Q_{34} - Q_{42} - Q_{43} = 150$$

$$r_{12} = 20658$$

$$r_{21} = r_{12}$$

$$r_{24} = 4787.8$$

$$r_{42} = r_{24}$$

$$r_{13} = 4787.8$$

$$r_{31} = r_{13}$$

$$r_{34} = 813.39$$

$$r_{43} = r_{34}$$

$$r_{23} = 1355.6$$

$$r_{32} = r_{23}$$

$$Q_{12} \geq 0, Q_{21} \geq 0, Q_{13} \geq 0, Q_{31} \geq 0, Q_{42} \geq 0, Q_{43} \geq 0, Q_{23} \geq 0, Q_{32} \geq 0$$

$$Q_{34} \geq 0, Q_{43} \geq 0$$

모형 M4를 비선형계획 해석용 전산프로그램의 하나인 GINO에 입력하여 계산한 결과, $Q_{12} = 65.24l/s$, $Q_{13} = 134.76l/s$, $Q_{21} = 42.11l/s$, $Q_{31} = 107.89l/s$, $Q_{32} = 26.87l/s$ 을 얻었다.

11.12.5 비교 및 고찰

Hardy Cross 방법을 사용하여 관망을 해석하는 전산프로그램인 EXGVLP를 사

용하여 표본관망을 해석한 결과, 선형계획이론을 근본으로 한 TDH로 해석한 결과, 그리고 정립한 비선형계획의 모형을 GINO에 의하여 계산한 결과는 표 11.12와 표 11.13과 같다. 표 11.12와 표 11.13에서 보는 바와 같이 각 방법에 의하여 계산한 관로의 유량은 거의 동일하여, 비교적 간단한 관망해석에는 비선형계획에 의한 해석이 용이함을 알 수 있다.

표 11.12 Darcy-Weisbach공식에 의한 유량계산 결과

관로의 유량 (l/s)	Q_{12}	Q_{13}	Q_{24}	Q_{34}	Q_{32}
비선형계획(GINO)	65.24	134.76	42.11	107.89	26.87
선형이론방법(TDHNET)	65.67	134.33	41.61	108.39	25.94
Hardy-Cross(EXGVLP)	65.24	134.76	42.11	107.89	26.87

표 11.13 Hazen-Williams공식에 의한 유량계산 결과

관로의 유량 (l/s)	Q_{12}	Q_{13}	Q_{24}	Q_{34}	Q_{32}
비선형계획(GINO)	67.03	132.97	41.22	108.78	24.19
선형이론방법(TDHNET)	67.03	132.97	41.22	108.78	24.18
Hardy-Cross(EXGVLP)	67.03	132.97	42.22	108.78	24.19

표본관망을 비선형계획의 모형으로 정립하여 해석한 결과와 Hardy-Cross와 선형이론방법(TDHNET)에 의한 결과가 잘 일치하여 비선형계획에 의한 관망해석의 적용성을 입증하였다. 비선형계획 모형은 연속방정식과 에너지방정식을 함께 고려함으로써 기존의 방법과 달리 합리적인 초기유량의 설정단계가 필요하지 않아 관로 유량의 계산수렴보다는 비선형계획의 계산수렴에 의존하게 된다. 관망의 규모가 커질 수록 목적함수에 손실수두항과 제약조건식에 연속방정식 등과 같은 추가식이 필요하며 IMSL 등에 있는 비선형계획 해석 프로그램으로 용이하게 해석할 수 있다.

11.13 요약

본 장에서 소개한 프로그램 이외에도 국내에서 개발한 WLM-Net⁴⁾, SAPID3³⁾, WHAPPL⁴⁾ 등이 있고, 미국 환경보존국 (EPA)에서 개발한 EPAnet⁴⁾ 등 다수의 상업용 프로그램이 있다. 한국수자원학회⁴⁾(1997)은 각 프로그램의 구입처, 특징, 사용 실적 등을 요약하였다.

본 장에서 소개한 프로그램들의 각종 기능과 특성을 비교한 결과는 표 11.14에 나타내었다. 상수도 수리계산 및 설계에 대한 적용은 크게 종래의 설계방법과 최적화이론을 도입한 설계방법으로 구분할 수 있다. 종래의 관수로시스템 설계는 관로의 배관형태(pipe layout)와 설계제원인 관경, 수조의 관리수위 및 펌프의 양정이 주어진 상태에서 관로의 유량과 교차점에서의 수두 등을 계산하는 것이다. 이러한 분석은 설계수요량에 관하여 관수로시스템의 성능을 평가하기 위한 것이라 할 수 있으며 이때 배관형태와 설계제원은 가정한 값이므로 종래방법으로 결정한 설계내역은 관로시스템 설계의 최적성은 결여된다. 따라서 많은 학자들이 관로시스템의 설계, 운영 및 보수의 최적성에 관하여 연구하여 왔다. 최적화이론을 적용한 관수로시스템의 설계는 수요량, 설계수두 등과 같은 설계조건에 관하여 설계제원인 관경, 수조의 관리수위, 펌프의 양정고 등을 구한다.

표 11.14 각 프로그램의 기능 및 특성

내역		Tdhnnet	Wadiso	WaterCAD	Cybernet	Branch	Pipe	Kypipe	Loop
관망 해석	저수조	0	0	0	0	0	0	0	0
	펌프	0	0	0	0	0		0	0
	감압밸브	0	0	0	0			0	0
	체크밸브	0	0	0	0			0	0
	PSV	0	0	0	0			0	0
	가압펌프	0	0	0	0			0	0
	수질변화			0	0				
	EPS	0	0	0	0			0	
설계	관경결정		0			0	0		
	경제적설계		0			0	0		
출력	일반출력	0	0	0	0	0	0	0	0
	설계도면	0		0	0			0	
해석 방법	*종래방법	*	*,**	*	*	**	**	*	*
	**최적설계								

종래의 설계방법용 프로그램의 선택은 설계지구의 특성과 과업내용을 고려하여 선택할 수 있지만 설계도면이 작성되는 프로그램이 선호되는 것은 당연하다. 이제까지는 최적화이론을 적용한 경제적인 설계방법을 도입하는데 미진하였으나 종래의 설계방법과 함께 검토가 시도되길 기대해 본다.

참 고 문 헌

1. 농어촌진흥공사 (1995), “발경지정리방안과 효율적인 관개방법 개발연구”.
2. 한국수자원공사 (1993), “압력조절에 의한 누수저감 방안 연구”.
3. 한국수자원학회 (1997), “제 5회 수공학웍샵 교재”.
4. 한국수자원학회 (1997), “'96분과위원회 연구과업 보고서”.
5. Bazaraa, Mokhtar S. and Shetty, C. M. (1979), “Nonlinear Program: Theory and Algorithms”, John Wiley.
6. Epp, R. and Fowler, A.G. (1970), “Efficient Code for Steady-state Flows in Network”, J. of Hydraulic div., ASCE, Vol. 96, No. HY1, pp. 43-56.
7. Jeppson, R.W. (1977), “Analysis of Flow in Pipe Networks”, Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI
8. Haestad Methods Inc., (1997), “CYBERTNET User's Manual”, 37, Brookside Rd. Waterbury, CT 06708 Fax 203-597-1488.
9. Haestad Methods Inc., (1997), “WaterCAD User's Manual”, 37, Brookside Rd. Waterbury, CT 06708 Fax 203-597-1488.
10. Hillier, F.S. and Lieberman, G. J. (1990), “Introduction to Operation Research”, McGraw-Hill.
11. Mott, R.L. (1990), “Applied Fluid Mechanics”, Merril Publishing Company.
12. Orth, H. M. (1986), “Model-based Design of Water Distribution and Sewage Systems”, John Wiley.
13. Puerto, D. and Hebert, P. (1985), “User Instructions for LOOP - a Computer Program in BASIC for the Hydraulic Simulation of Looped Water Distribution Networks”, UNDP, UN.

14. Puerto, D. and Hebert, P. (1985), "User Instructions for BRANCH - a Computer Program in BASIC for the Least-cost Design of Branched Water Distribution Networks", UNDP, UN.
15. Ravindrall, A., D.T. Phillips, and Solberg, J. (1987), "Operation Research: Principles and Practice", John Wiley.
16. Walski, T. M. (1984), "Analysis of Water Distribution Systems", Van Nostrand Reinhold Company.
17. Walski, T. M., Gessler, J., and Sjostrom, J. W. (1990), "Water Distribution Systems: Simulation and Sizing-WADISO User's Manual", Lewis Publishings, Inc.
18. Wood, D. J. and Charles, C.O. (1973), "Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory", J. of Hyd. Div., ASCE, Vol. 98, No. HY7, pp. 1157-1170.
19. Wood, D. J. (1980), "Computer Analysis of Flow in Pipe Networks -KYPIPE User's Manual", Univ. of Kentucky.
20. Wood, D. J. and Rayes, A.G. (1981), "Reliability and Algorithms for Pipe Network Analysis", J. of Hyd. Div., ASCE, Vol. 107, No. HY10, pp. 1145-1161.
21. Wood D. J. (1986), "Hydraulic Design Algorithms for Upgrading and Enhancing Water Distribution Systems", Univ. of Kentucky.
22. TDH Engineering (1992), "TDHNET3.2 User's Manual", 607 Ninth St. Laurel, MD 20707.