

관수로시스템의 유속계수 추정기법에 관한 연구

Study on Estimating Hazen-Williams' Coefficient in Branching Pipeline System

김영화*, 임재식*, 박영진*
Kim, Young-hwa Lim, Jae-sik Park, Young-jin

Abstract

To make a real hydraulic simulation model, Hazen-Williams' coefficient must be calibrated using the measured discharges and hydraulic head loss. In this paper, calibrating method of Hazen-Williams' coefficient was proposed for pipeline system. The calibrating model was made by the error functions of the difference between the measured hydraulic head loss and the calculated hydraulic head loss. The Hazen-Williams' coefficient was successfully estimated by Levenberg-Marquardt method, a nonlinear least square method. The adaptability of this method was proven by comparing the Hazen-Williams' coefficient between the estimated values and the measured values in a branching pipeline system.

I. 서론

농업용의 용수로에서는 수자원의 효율적인 물관리를 위하여 관수로로 계획되고 있는 사업 지구가 증가하고 있다. 관수로 설계의 기초가 되는 유속공식은 경험식인 Hazen-Williams식(이하 H-W식)이 주로 사용되고 있으며 H-W식의 유속계수는 관로의 종류에 따라 다르나 설계 시에는 유속계수의 표준치에 곡관손실 등을 고려한 수치를 적용하고 있는 실정이다. 이에 반하여, 실제의 물관리에 사용하기 위한 해석모델을 작성하기 위해서는 현지관로에 적합한 유속계수를 실측유황으로부터 추정하여 사용할 필

요가 있다.

또한, 관로의 수리모델을 작성하는데는 밸브, 엘보, 분기관 등의 제반손실계수를 검토하여 수리모델을 작성할 필요가 있으나, 수리모델의 간단한 Calibrating기법이 개발되어 있지 않은 상태이다. 유속계수의 추정방법에 관련된 연구로는 이와키와 Ormsbee의 정상해석으로 검토하는 방법, James의 비정상해석으로 검토하는 방법 등이 있다.

본 연구에서는 현지관로에 적합한 수리모델을 작성할때 필요한 관수로 전체의 유속계수를 수원수위, 말단 분수공의 수위 및 말단관로의 측정유량으로 추정하는 기법을 제안했다. 이 기

* 농어촌진흥공사 농어촌연구원

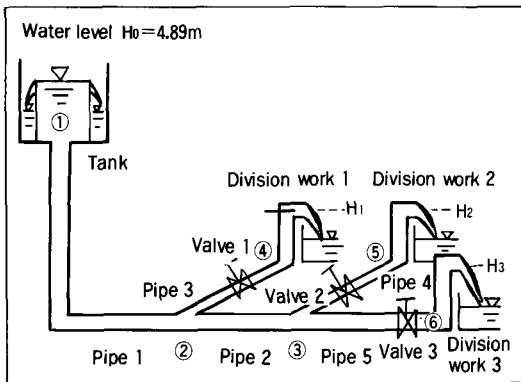
키워드 : 정상해석, 비선형최소자승법, Hazen-Williams' Coefficient, Levenberg-Marquardt법, 상대오차, 관수로 시스템

법은 정상상태 관수로의 총손실수두의 측정치와 계산치 간의 차를 오차함수로 취급하여 비선형최소자승법인 Levenberg-Marquardt 방법으로 관수로 전체의 유속계수를 추정하는 방법이다. 따라서, 본 논문에서 말하는 유속계수에는 추정모델에 고려하지 않는 미소의 손실계수는 추정하는 단계에서 포함되지며, 일반적인 직선관로로서의 유속계수의 개념과는 차이가 있다. 이 기법은 실험장치에 적용하여 그 유효성이 검증되었다.

II. 유속계수 추정모델

1. 실험장치의 개요

〈Fig. 1〉의 관수로는 상류의 저수조의 수위가 $H_0=4.89m$ 로 일정하게 유지되도록 제작되었으며, 관수로의 형태는 분기식이며 저수조에서 분수공 말단까지는 자연압에 의하여 송수되는 급수시스템이다. 관로는 관경 0.1m, 길이 4m의 염화비닐관(VP, VU)으로 전장 282m에 걸쳐서 제작되었으며 관로도중에는 90°의 엘보가 24개소, 45°엘보가 2개소 설치되어 있다. 말단 분수공에는 유량제어용의 버터플라이 밸브가 3개소, 관로도중에 압력 제어용의 제수변이 3개소 설치되어 있다. 분수공 말단의 방류형식은 개수로에 공중방류하는 형식이다. 관수로시스템의 제원은 〈Table 1〉에 나타내었다.



〈Fig. 1〉 Diagram of branching pipeline system

〈Table 1〉 Dimensions of branching pipeline system

No	Dia-meter (m)	Pipe length (m)	Number of valve	Small head loss factor
1	0.1	46.0	-	유입, 굴곡90도 : 9개소, 제수밸브 : 3개소
2	0.1	120.1	-	굴곡 90도 : 4개소, 굴곡 45도 : 2개소
3	0.1	3.7	1	굴곡 90도 : 3개소, 유출
4	0.1	3.0	2	굴곡 90도 : 3개소, 유출
5	0.1	116.1	3	굴곡 90도 : 9개소, 유출

2. 추정모델

〈Fig. 2〉는 저수조, 분기(分岐), 말단수위를 절점으로 하여 관수로를 수지상으로 나타낸 유향 그래프(Directed graph)이다. 여기서는 수원으로부터 말단까지의 경로를 회로 I, II, III으로 표현하고 있으며, 각 회로의 손실수두의 관계식을 식(1)~(3)으로 나타내었다.

$$H_0 - H_1 = b_1 c_1^{-1.85} + b_3 c_3^{-1.85} + \Delta H_{a1} + \Delta H_{a3} \quad (1)$$

$$H_0 - H_2 = b_1 c_1^{-1.85} + b_2 c_2^{-1.85} + b_4 c_4^{-1.85} + \Delta H_{a1} + \Delta H_{a2} + \Delta H_{a4} \quad (2)$$

$$H_0 - H_3 = b_1 c_1^{-1.85} + b_2 c_2^{-1.85} + b_5 c_5^{-1.85} + \Delta H_{a1} + \Delta H_{a2} + \Delta H_{a5} \quad (3)$$

여기서 H_0 : 수원의 수위(m), H_i : 말단수위(m), ($i=1\sim3$), c_i : Hazen-Williams의 유속계수, $b_i=10.667L_i D_i^{-4.87} Q_i^{1.85}$, L_i : 관길이(m), D_i : 관경(m), Q_i : 유량(m^3/s), ΔH_{ai} : 엘보, 유입, 유출, 밸브등의 국소손실수두(m), $i=1, 5$ 이다. 식(1)~(3)의 국소손실수두 ΔH_{ai} 를 좌변에 이동하면

$$\Delta H_1 = H_0 - H_1 - \Delta H_{a1} - \Delta H_{a3} = b_1 c_1^{-1.85} + b_3 c_3^{-1.85} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_2 &= H_0 - H_2 - \Delta H a_1 - \Delta H a_2 \\ -\Delta H a_4 &= b_1 c_1^{-1.85} + b_2 c_2^{-1.85} \\ &+ b_4 c_4^{-1.85} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_3 &= H_0 - H_3 - \Delta H a_1 - \Delta H a_2 \\ -\Delta H a_5 &= b_1 c_1^{-1.85} + b_2 c_2^{-1.85} \\ &+ b_5 c_5^{-1.85} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 \\ = 3b_1 c_1^{-1.85} + 2b_2 c_2^{-1.85} + b_3 c_3^{-1.85} \\ + b_4 c_4^{-1.85} + b_5 c_5^{-1.85} \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다. 식(7)은 관수로 시스템의 총에너지를 나타내고 있으며, 이것은 개개 회로의 에너지를 더하여도 시스템 전체의 에너지는 변하지 않는다는 원칙에 근거를 두고 있다.

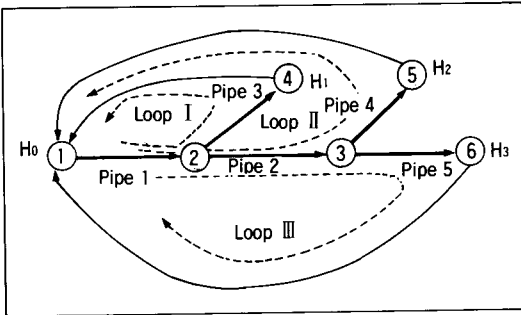
식(7)을 벡터로 나타내면

$$y = A \cdot x \quad (8)$$

가 된다. 여기서, $A = \{3b_1, 2b_2, b_3, b_4, b_5\}$, $y = \{\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3\}$, $x = \{c_1^{-1.85}, c_2^{-1.85}, c_3^{-1.85}, c_4^{-1.85}, c_5^{-1.85}\}$ 이다. 식(8)의 각 회로의 수위수두와 말단 수두차 벡터 y 와 직관부의 마찰손실수두의 합인 $A \cdot x$ 수두의 차를 오차함수 f 로 정의하면

$$f = y - A \cdot x \quad (9)$$

이 된다. 오차함수의 식(9)는 측정된 수만큼 존재하며, 유속계수 x 는 관로의 수만큼 존재한다.



<Fig. 2> Directed graph of branching pipeline system

분기점에 있어서의 유량의 연속식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_4 + Q_5 \\ Q_1 &= Q_3 + Q_4 + Q_5 \end{aligned} \quad (10)$$

3. 비선형 최소자승법

식(9)의 오차함수가 유속계수에 관하여 비선형이기 때문에 해법으로는 비선형최소자승법을 이용하였다. 최소자승문제는 n 개의 미지파라미터 $x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 에 관하여 m 개의 함수 $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$, 즉

$$f_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

에 대하여, 이들 자승의 합

$$S(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m f_i^2(x) \quad (12)$$

을 최소로 하는 x 를 구하는 것이다. 여기서, n 은 미지파라미터의 갯수, m 은 실측치의 갯수이다.

자승합 $S(x)$ 가 x 에 대하여 극소가 되기 위해서는, 그 일차미분이 0이 되는 조건이 필요하다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial S(x)}{\partial x_j} = \sum \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} = f_j(x) = 0, \\ (j=0, 1, \dots, n) \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)을 만족하는 x_j 가 극소점이 되기 위해서는 $S(x)$ 의 이차미분행렬이 양정수가 되어야 한다. $S(x)$ 의 이차미분은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 S(x)}{\partial x_j \partial x_i} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_i} \\ + \sum_{i=1}^m \frac{\partial^2 f_i(x)}{\partial x_j \partial x_i} f_i(x), \quad (j=0, \dots, n) \end{aligned} \quad (14)$$

이 식의 제2항은 $f_i(x)$ 의 비선형성(이차미분)

으로부터 발생하는 항이다. 비선형최소자승법의 알고리즘은 식(13)의 연립방정식을 푸는 것이다. 비선형최소자승법의 해법으로서는 비교적 간단하며 성능이 좋은 것으로 알려져 있는 다음의 Levenberg-Marquardt법 (이하 L-M법)을 이용한다.

$$\{J^T(x^k)J(x^k) + \mu^k I\} \Delta x^k = -J^T(x^k)f(x^k) \quad (15)$$

여기서 $J^T(x^k)$: Jacobian Matrix의 전치행렬, $J(x^k) = \{\partial f(x^k) / \partial x_j^k\}$ = Jacobian Matrix, μ^k : Marquardt Number, I : 단위행렬, Δx^k : 해, $f(x^k)$: 함수, k : 미지수의 갯수이다.

4. L-M법 알고리즘

(1) 기본식으로는 식(15)를 이용한다.

(2) 자코비안 행렬의 $J(x^k)$ 는 함수 $f(x^k)$ 을 이용하여 전진차분법으로 구한다. 각 파라미터 $f(x^k)$ 의 차분 변화량은 일원적으로 $h = \epsilon^{0.5}$ 로 한다. 여기서 ϵ 는 계산기 오차이다.

(3) 실제로 Δx^k 를 계산하기 위해서는 식(16)의 정규방정식을 설정하여 푸는 것이 아니고 식(16)이 다음의 선형최소자승문제와 같기 때문에 다음 식을 이용한다.

$$\left[\frac{J(x^k)}{\mu^k I} \right] \Delta x^k = \left[\frac{-f(x^k)}{0} \right] \quad (16)$$

이것을 수치적으로 안정성이 높은 하우스홀더법으로 풀어, Δx^k 를 구한다.

(4) 마르카트수의 조절

• 마르카트수의 초기치 μ^0 는 x^0 의 Jacobian Matrix의 Norm으로부터 계산한다.

• μ^k 를 가지고 식(16)에서 구한 x^k 를 S 가 감소하지 않은 경우는 $\mu^{k+1} = 2\mu^k$ 로 대체하여 식(16)의 계산을 반복한다.

• $S(x^k + \Delta x^k)$ 가 $S(x^k)$ 보다 감소한 경우에는 $x^k = x^k + \Delta x^k$ 로 하여 다음 사이클로 전진한다. 제 k 사이클에서 μ^k 를 증대시킨 일이 없으면 μ^{k+1}

$= 0.5\mu^k$ 로 감소시키고, 증대시킨 것이 있으면 $\mu^{k+1} = \mu^k$ 로 대체한다.

• μ^k 가 증대했을 경우에 너무 큰 수치로 나타나는 경우에는 수렴실패이며, 이때는 처리를 중단한다.

• 파라미터의 변화량이 충분히 작아진 경우에는 수렴된 것으로 본다.

$$\|\Delta x^k\| \leq \max\{1, \|\Delta x^k\|\} \cdot \text{TOL} \quad (17)$$

여기서, TOL: 수렴판정을 위한 제어치이며, 본 해석에서는 1.0×10^{-15} 을 이용하였다.

III. 실험에 의한 유속계수의 측정

1. 측정개요

유속계수의 측정치는 <Fig. 1> 관로의 각구간에서 측정된 수두 $H(m)$ 와 분수공의 말단에서 측정된 유량 $Q(m^3/s)$ 를 사용하여 관수로의 평균 유속공식의 경험식인 Hazen-Williams식을 변형한 식(18)로 구하였다.

$$c = 3.59 H_c^{-0.54} D^{-2.59} Q^{0.54} L \quad (18)$$

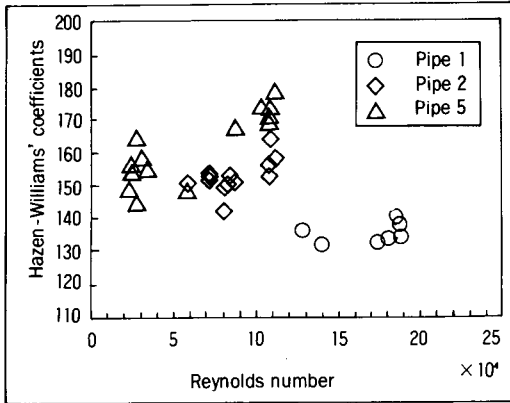
여기서, c : 유속계수, H_c : 직선관로의 손실수두 (m) , D : 관경 (m) , Q : 유량 (m^3/s) , L : 관의 길이 (m) 이다.

여기서 $H_c(m)$ 는 관로구간의 손실수두의 측정치에서 엘보의 손실수두를 빼서 구한 직선관로로 취급한 손실수두이며, 엘보의 손실수두는 다음식으로 구하였다.

$$H_b = f_b \frac{v^2}{2g} \quad (19)$$

H_b : 엘보 손실수두 (m) , f_b : 엘보 손실계수, v : 평균유속 (m/s) , g : 중력가속도 (m/s^2) 이다.

각 말단관로의 유속계수의 측정치를 구할 때 사용한 손실수두는 분기점의 수두와 밸브의 1차



<Fig. 3> Measured values of Hazen-Williams' coefficients

압력부의 수두이다. 각 관로의 수두는 직경 0.02m의 투명한 염화비닐관(Manometer)을 사용하여 측정하였고, 유량(m³/s)은 말단에서 용적 0.0659(m³)의 계량기를 사용하여 측정하였다.

2. 측정결과

관로구간의 유속계수는 <Fig. 3>에 나타내었다. 관로 1의 유속계수는 Reynolds수 1.2×10⁵~2.0×10⁵일 때 130~140을 나타내고 있지만, 이 평균치는 염화비닐관의 유속과 비교하면

약간 작다. 관로 2의 유속계수는 Reynolds수 6.0×10⁴~1.1×10⁵일 때에 140~160을 나타내고 있으며, 이 평균치는 염화비닐관의 수치와 거의 같다. 관로 5의 유속계수는 Reynolds수 2.0×10⁴~1.1×10⁵일 때에 150~175를 나타내며, 이 평균치는 염화비닐관의 최대치에 가까운 결과이다.

관로 1, 2, 5는 Reynolds수가 증가하면 유속계수가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 일반적인 조도계수의 특성과 같은 경향이나, 같은 재질임에도 불구하고 관로구간에 따라 차이가 나는 것은 다음과 같은 이유로 생각된다.

- 식(18)을 이용하여 관로구간의 유속계수(측정치)를 구할 때 관로양단의 수두차(손실수두)에서 곡관의 손실수두를 빼서 식(18)의 손실수두로 취급하였으므로 관로구간의 손실수두에 미소 손실이 포함되어 있다.

- 관로1의 경우 버터플라이형의 제수변이 3개소 포함되어 있으나 이를 제거하지 않았기 때문에 유속계수에 포함되어 나타났다.

- 그외에 유량의 측정오차 및 곡관의 손실수두의 계산치오차, 관로연결부의 시공차이 등에 의한 제반미소오차가 집적되어 나타났다.

<Table 2> Measured values of flow rates and heads at division works

No	Division work 1			Division work 2			Division work 3		
	Value Opening%	flow ratesQ ₃ m ³ /s	Head H ₁ (m)	Value Opening%	flow ratesQ ₄ m ³ /s	Head H ₂ (m)	Value Opening%	flow ratesQ ₅ m ³ /s	Head H ₃ (m)
1	16.7	0.00097	1.115	16.7	0.00142	0.960	16.7	0.00041	0.946
2	25.0	0.00300	1.134	25.0	0.00366	0.981	25.0	0.00183	0.981
3	33.3	0.00348	1.115	33.3	0.00359	0.977	33.3	0.00219	0.989
4	50.0	0.00564	1.226	50.0	0.00342	0.995	50.0	0.00223	0.989
5	58.3	0.00649	1.252	58.3	0.00330	0.994	58.3	0.00197	0.981
6	66.6	0.00703	1.264	66.6	0.00336	0.995	66.6	0.00186	0.979
7	33.3	0.00345	1.146	41.7	0.00378	1.002	41.7	0.00270	1.051
8	41.7	0.00467	1.184	41.7	0.00354	0.978	41.7	0.00237	0.996
9	25.0	0.00287	1.156	25.0	0.00337	0.971	25.0	0.00180	0.984
10	25.0	0.00246	1.142	50.0	0.00423	1.019	75.0	0.00311	1.041
11	50.0	0.00633	1.256	75.0	0.00440	1.025	25.0	0.00064	0.989
12	75.0	0.00770	1.298	25.0	0.00141	0.947	50.0	0.00259	1.038
13	16.7	0.00066	1.105	41.7	0.00414	1.013	83.3	0.00390	1.056
14	41.7	0.00560	1.225	66.6	0.00545	1.045	16.7	0.00090	0.963
15	66.6	0.00849	1.325	16.7	0.00014	0.923	41.7	0.00282	1.046
16	16.7	0.00049	1.097	41.7	0.00392	1.005	66.6	0.00372	1.048
17	75.0	0.00726	1.233	75.0	0.00393	1.006	25.0	0.00056	0.979
18	50.0	0.00579	1.236	25.0	0.00172	0.951	50.0	0.00314	1.057

IV. 추정모델의 검증

1. 유량과 수위 측정

유속계수를 추정하기 위해서는 관로제원(관구경, 관길이, 엘보 각도)의 자료 및 수원과 말단수위의 측정자료가 필요하다. 관로제원에 관해서는 설계서등을 참고하였으며, 유량 및 수두 등은 분수공마다 밸브개도(%)를 임의로 설정하여 측정하였다. 이 측정치를 <Table 2>에 나타내었다.

2. 검토에

유속계수를 추정할 때 영향을 미치는 파라메터로서 곡관의 손실계수와 말단수위를 생각할 수 있다. 90도 곡관의 손실계수는 활면관이 $f_b=1.1$, 조면관이 $f_b=1.3$ 이나, 실험에 의하여 구한 실측치의 평균치는 $f_b=1.5$ 이다. 이 때문에 유속계수를 추정할 때 곡관 손실계수의 영향은 최소치 $f_b=1.1$ 과 최대치 $f_b=1.5$ 를 설정하여 검토했다. 관수로 실험장치의 말단분수공의 방류형태는 공기중의 관로에서 개수로로 방류하는 형태이다. 이 경우에는 관로말단에서 수두를 측정하는 것은 곤란하기 때문에, 말단관로의 유출구 직전의 밸브하류측 수두를 측정하여, 이 측정치와 말단관로의 유출구의 중심표고(이것을 관측표고로 표현하였다)를 (근거: 관끝의 유출구의 흐름을 오리피스로 생각했음) 설정하여, 이들이 유속계수의 추정치에 미치는 영향을 검토했다. 검토에는 <Table 3>에 나타내었다.

<Table 3> Investigation case

No	Loss coefficient of elbo(f_b)	Head of division work(m)
1	1.1	Measured value
2	1.1	Center of pipe
3	1.5	Measured value
4	1.5	Center of pipe

3. 평가방법

추정된 유속계수는 실측치와의 비교 및 상대오

차로 평가하였다. 또한, 유속계수의 추정치를 가지고 관망해석모델에서 구한 유량의 계산치와 실측치를 비교하였으며, 이들에 대하여 상대오차를 이용하여 평가하였다.

$$\text{상대오차(\%)} = \frac{\text{측정치} - \text{추정치}}{\text{측정치}} \times 100 \quad (20)$$

4. 검증결과

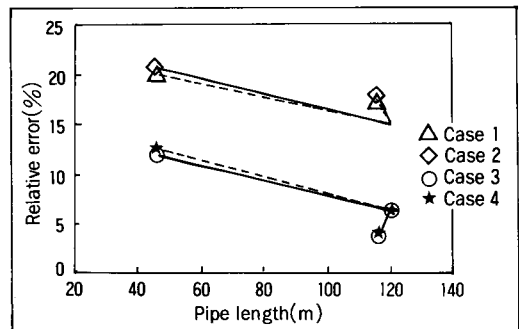
유속계수는 식(9)의 오차함수를 가지고 비선형최소자승법의 L-M법으로 구하였다. 유속계수 추정시 사용한 말단수위의 데이터는 밸브 하류 1.0m 지점의 측정치에서 밸브손실수두를 제외한 수치를 이용하였다.

<Table 4>에는 <Table 3>에 제시된 수치를 이용하여 검토된 유속계수의 추정치를 실측치와 비교하여 제시하였다. 이것으로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- 곡관의 손실계수의 적용수치에 의한 차이가

<Table 4> The estimated values and the measured values of Hazen-Williams' coefficients

Case	Pipe					
	1	2	3	4	5	
Estimated value	1	108	128	133	149	135
	2	107	128	132	148	134
	3	119	141	156	177	157
	4	118	141	154	175	156
Measured value	130~140	140~160	-	-	150~175	



<Fig. 4> Relative error of Hazen-Williams' coefficients

(경우 1과 경우 3을 비교하고, 경우 2와 경우 4를 비교하였을 때), 유속계수의 추정치에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

- 말단수위의 차이가(경우 1과 경우 2를 비교하고 경우 3과 경우 4를 비교하였을 때) 유속계수의 추정치에는 거의 영향을 미치지 않았다.

- 경우 1과 경우 2의 유속계수의 추정치를 측정치와 비교하면 약간 작은 값을 보이고 있으나 경우 3과 경우 4의 추정치는 실측치와 유사한 값을 보였다.

- 유속계수의 측정치와 추정치는 관로마다 다르게 나타났으며 관로 1의 경우는 Reynolds Number가 큰 경우이나 유속계수는 다른 관로와 비교하여 작게 나타났다. 이는 조도계수의 일반적인 특성과 같은 경향이다.

다음은, 유속계수에 대한 추정치와 측정치의 상대오차를 이용하여 평가한다. <Fig. 4>는 상대오차를 관로길이 경우 1과 2로 나타내었다. 이것을 보면 굴곡손실계수에 $f_b=1.1$ 을 적용한 경우 1과 2보다, $f_b=1.5$ 를 적용한 경우 3과 4의 상대오차가 현저하게 작게 나타나고 있다. 또한, 말단수위의 측정치와 관측표고치에 의한 상대오차가 거의 없다는 것을 명확히 알 수 있다.

5. 정상류해석

본 연구에서는 유량경계에 의한 손실수두의 계산 및 수위경계에 의한 유량의 계산치는 다카쿠와의 절점수두법을 이용하여 구하였다. 관수로의 기초방정식은 임의절점의 연속식과 임의절점 a, b 간의 유량과 수두의 관계식으로 구성된다. 관수로의 평균유속공식은 수도용의 관수로에서 일반적으로 사용되고 있는 경험식인 Hazen-Williams공식을 이용하였다.

평균 유속공식을 유량에 관한 식으로 변환하면 다음 식과 같이 된다.

$$Q=0.27853c D^{2.83} \Delta H_c^{0.54} L^{-0.54} \quad (21)$$

여기서, Q : 유량(m^3/s), c : 유속계수, D : 관

경(m), ΔH_c : 마찰손실수두(m), L : 관로장(m)이다.

관로가 절점 a, b 를 연결하고 있을 경우 식 (21)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Q_{ab} &= 0.27853 c_{ab} D_{ab}^{2.83} \Delta H_{cab}^{0.54} L_{ab}^{-0.54} \\ &= K_{ab} (E_a - E_b)^{0.54} \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, $K_{ab}=0.27853 c_{ab} D_{ab}^{2.83} L_{ab}^{-0.54}$, $\Delta H_{cab}=E_a - E_b$, E_a , E_b 는 각각 절점 a, b의 에너지, Q_{ab} : 관로유량(m^3/s)를 나타내고 있다.

임의절점 a, b 간의 관로에 엘보 등의 곡관이 있을 경우에는 유량과 손실수두의 관계는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Q_{ab} &= 3.477 f_{bab}^{-0.5} D_{ab}^2 \Delta H_{bab}^{0.5} \\ &= M_{ab} (E_a - E_b)^{0.5} \end{aligned} \quad (23)$$

여기서, $M_{ab}=3.477 f_{bab}^{-0.5} D_{ab}^2$, $\Delta H_{bab}=E_a - E_b$, Q_{ab} : 곡관유량(m^3/s), f_{bab} : 곡관손실계수, ΔH_{bab} : 곡관손실수두(m)이다. 관로구간에 엘보가 다수 있을 경우에는 각각의 계수를 합하여 하나의 구간의 계수로 생각하면 계산을 간략화시킬 수 있다. 임의구간 a, b 간에 밸브가 있을 경우, 유량과 손실수두의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q_{ab} &= 3.477 f_{vab}^{-0.5} D_{ab}^2 \Delta H_{vab}^{0.5} \\ &= N_{ab} (E_a - E_b)^{0.5} \end{aligned} \quad (24)$$

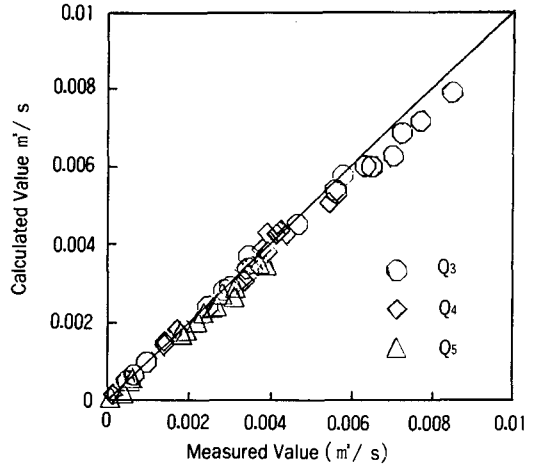
여기서, $N_{ab}=3.477 f_v^{-0.5} D_{ab}^2$, $\Delta H_{vab}=E_a - E_b$, Q_{ab} : 밸브유량(m^3/s), f_{vab} : 밸브손실계수, ΔH_{vab} : 밸브손실수두(m)이다.

식(22)~(24)는 E_a , E_b 에 관하여 비선형이기 때문에 다카쿠와의 방법에 따라서 선형화하여, E_a , E_b 에 관한 연립일차방정식의 문제로 근사하여 Gauss Seidal법에 의하여 E_a , E_b 를 구한다. 이렇게하여 계산된 유량이 각 절점에서의 연속조건을 만족할 때까지 보정계산을 반복하여 허용오차를 만족하면 계산이 종료된다.

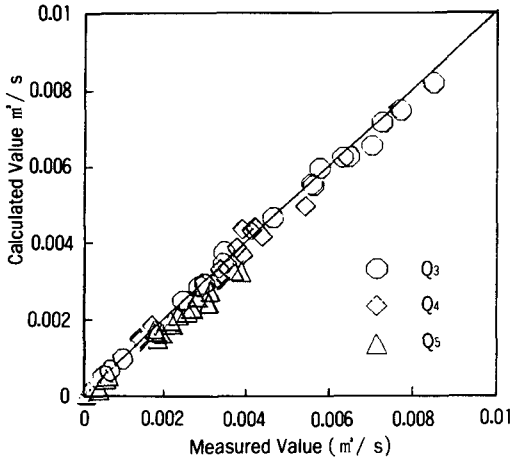
6. 유량고찰

유속계수의 추정치를 유량에 의하여 검토하기 위하여 다카쿠와의 절점수두법으로 유량을 계산하였다. 유량의 계산치를 구할때 사용한 유속계수는 추정모델에서 구한 유속계수를 사용하였다. 유량의 계산치와 측정치를 비교하면 <Fig. 5. 1~5. 4>가 되는데 유량은 거의 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

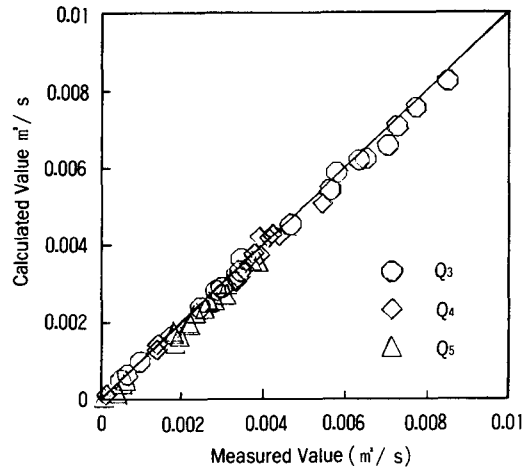
<Fig. 6>의 상대오차는 어떤 경우에 대해서도 거의 같은 정도를 나타내고 있으며, 이것으로부터 유속계수의 추정치가 측정치와 비교하여 약간



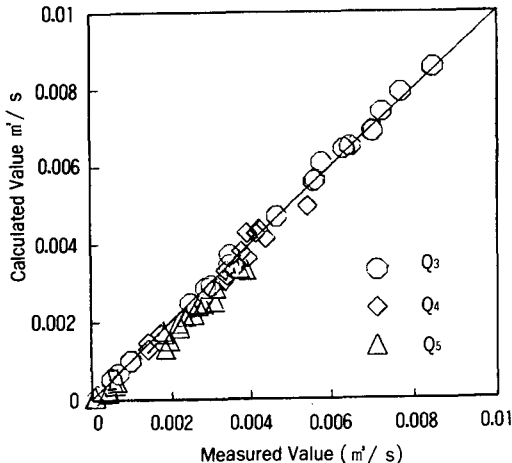
<Fig. 5.3> Comparison of flow rates in Case 3



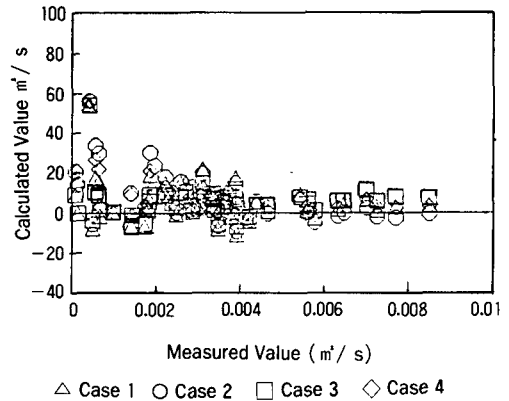
<Fig. 5.1> Comparison of flow rates in Case 1



<Fig. 5.4> Comparison of flow rates in Case 4



<Fig. 5.2> Comparison of flow rates in Case 2



<Fig. 6> Relative error of flow rates

작은 수치를 나타내어도 유량에는 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

이상의 검토에서, 유속계수의 추정치는 파라미터 및 경계조건에 의하여 약간 영향을 받으나, 본 기법으로 구한 유속계수를 이용하여 계산한 유량의 계산치와 실측치는 거의 일치하는 결과를 보였다.

IV. 결 론

관수로의 수리모델을 검정(Calibrating)하기 위한 방법으로 수리모델의 유속계수에 미소손실을 포함시켜 추정하는 기법을 개발하여 그 이론적인 전개방법을 기술하였다. 본 논문의 내용을 간단하게 요약하면 다음과 같다

1. 수원수위 및 말단수위, 말단유량을 사용하여 관로 구간별로 관로계 전체의 유속계수를 추정하는 기법을 개발하였다.

2. 본기법은 관로의 총 손실수두의 계산치와 실측치의 차를 오차함수로서 설정하여, 비선형최소자승법인 L-M법으로 관수로 전체의 유속계수를 추정하는 방법이다.

3. 따라서, 본기법에 의한 추정치에는 관로의 미소손실계수등이 포함되어 해석적으로 추정되므로 순수한 직선관로의 유속계수의 개념과는 약간 차이가 있음을 언급한다.

4. 본 추정기법을 관수로의 실험장치틀 통하여 검증한 결과 유속계수의 추정치는 측정치와 유사하게 나타났으며, 이 추정치를 이용하여 계산한 유량도 측정유량과 거의 비슷하게 계산되어 본 방법의 타당성이 실험을 통하여 입증되었다.

본 연구는 일본 농림수산성 농업공학연구소의 실험장치를 이용하여 실시되었다.

참고문헌

1. Lencastre, Armando, 1987. Handbook of Hydraulic Engineering, pp. 382~383
2. Onizuka, Kotaro, 1986. System Dynamics

Approach to Pipe Network Analysis, ASCE, Vol. 112(8), pp. 728~749.

3. Ormsbee, Lindell E, 1986. Explicit Pipe-Network Calibration, ASCE, Vol. 112(2), pp. 166~182.
4. Walski, Thomas M, 1983. Technique for Calibration Network Models, ASCE, Vol. 109(4), pp. 360~372.
5. 高桑哲夫, 1969. 配水管網流量計算法に關する研究(Ⅲ) 節点エネルギー位を未知數とした計算法, 水道協會雜誌, No423, pp. 46~60.
6. 農林水産省構造改善局, 1988. 土地改良事業計劃設計基準, 파이프라인, pp. 25~73.
7. 大野 豊, 譚野和男, 1990. 新版數値計算ハンドブック, 오니ム社, pp. 778~787.
8. 岩木, 1988. 配水管網モデルにおける流速係數の同定法, 水道協會雜誌, Vol. 644, pp. 2~8.

약 력

김 영 화



1985. 전남대학교 농과대학 농공학과
1993. 동경농공대학 대학원 농학박사
1993. 일본농림수산성 농업공학연구소
특별연구원
1996. 농어촌진흥공사 농어촌연구원
책임연구원

임 재 식



1973. 충북대학교 농과대학 농공학과
졸업
1996. 농어촌진흥공사 농어촌연구원
책임연구원

박 영 진



1994. 서울대학교 농업생명과학대학 농공
학과 졸업
1996. 서울대학교 대학원 농학석사
현재 농어촌진흥공사 농어촌연구원
연구원