

황구지천 수직교 지점에서의 최적 단위도 및 침투율의 결정

Determination of Optimal Unit Hydrographs and Infiltration Rate Functions at the site of the Su-Jik Bridge in the HwangGuJichen River

안태진⁺·조병돈^{**}·류희정^{***}

Ahn, Taejin⁺·Cho, Byung Doon^{**}·Lyu, Heui Jeong^{***}

:: Abstract ::

This paper is to present the determination of the optimal loss rate parameters and unit hydrographs from the observed single rainfall-runoff event using optimization model. The linear program models has been formulated to derive the optimal unit hydrographs and loss rate parameters for the site of the Su-Jik Bridge in the HwangGuJichen River; one minimizes the summation of the absolute residual between predicted and observed runoff ordinates. In the perturbation stage of parameters the trial and error method has been adopted to determine the loss rate parameters for Kostiakov's, Philip's, Horton's, and Green-Ampt's equation. The unique unit hydrograph ordinates for a given rainfall-runoff event is exclusively obtained with Φ index, but unit hydrograph ordinates depend upon the parameters for each loss rate equations. In this paper the single rainfall-runoff event observed from the sample watershed is considered to test the proposed method. The optimal unit hydrograph obtained by the optimization model has smaller deviations than the ones by the conventional method.

Keywords: Optimal Unit Hydrograph, Linear Program Model, Loss Rate Parameter, HwangGuJichen

:: 요 지 ::

본 연구는 최적화모형을 이용하여 관측된 단일 강우-유출 사상으로부터 최적단위도와 침투율 공식

+ To whom correspondes should be addressed. ahntj@hnu.hankyong.ac.kr

* 환경대학교 토목공학과 부교수

Asso. Prof., Dept. of Civil Engrg., Hankyong National Univ., Ansong, Kyonggi 456-749, Korea

** 경기도 이천시 부시장

Deputy Mayor, LiChun city government, Kyonggi 456-749, Korea

*** 환경대학교 토목공학과 교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Hankyong National Univ., Ansong, Kyonggi 456-749, Korea

의 매개변수를 결정하였다. 단일 강우-유출사상으로부터 절대오차누계를 최소로 하는 선형계획모형을 정립하고, 황구지천 수직교 지점에서의 최적침투율과 단위도를 결정하였다. 침투율 공식의 섭동 단계에서는 시산법을 적용하여 Kostikov, Philip, Horton 및 Green-Ampt 공식의 매개변수를 결정하였다. \emptyset 지표법에 의한 단위도 종거의 값은 유일하게 결정되지만 침투율 공식의 매개변수에 따라 단위도의 종거는 변한다. 본 연구에서는 관측된 단일 강우-유출사상에 관하여 제안된 모형을 적용하였으며 종래의 방법에 의한 오차보다 작은 단위도를 구할 수 있었다.

핵심용어: 최적단위도, 선형계획모형, 침투율 매개변수, 황구지천

1. 서론

단위도는 치수 사업에 있어서 계획 홍수수문곡선을 결정하는데 가장 근본적인 사항이다. 수문관측시설이 없는 유역은 말할 것도 없고, 하천 정비기본계획, 하천 실시설계 등과 같은 중규모 치수사업 이상 하천내 홍수관리를 위한 계획홍수수문곡선의 추정시, 수문계측자료가 있는 경우에도 간접적인 방법으로 계획 홍수수문곡선을 추정하고 있는 실정이다. 따라서 수자원 관련 사업에서 홍수량은 가장 근본이 되는 수문량임에도 불구하고 소홀히 다루어져 계획홍수량 관련 시설의 규모가 불합리하게 설계되고 운영되는 경우가 많다.

직접관측에 의한 단위도의 유도는 단일 또는 복합 강우-유출사상으로부터 \emptyset 지표법으로 손실우량을 계산한 후, 종래의 방법으로 단위도를 유도할 수 있다. 임의 유역은 임의 강우사상에 반응하는 고유의 유역 특성이 있어 고유의 단위도를 갖는다는 것이 단위도의 가정임을 고려할 때 단일 강우-유출사상으로부터 유도한 단위도를 그 유역의 대표단위도로 확정하는 것은 무리임을 알 수 있다. 동일한 유역이라 할지라도 강우사상에 따라 단위도의 종거와 지속기간은 달라지므로 여러 개의 강우-유출사상을 고려할 필요가 있다. 이때 유역 단위도의 종거와 지속기간은 각각 강우사상으로부터 구한 단위도의 종거와 지속기간을 평균하여 결정할 수 있지만(Ponce, 1989), 각 단위도의 기저시간, 침투유량의 크기

및 침투유량이 발생하는 시각을 어떤 기준으로 평균하여야 하는지에 대한 의문점이 대두된다 (Mawdsley와 Tagg, 1981). 그리하여 최소자승법(least squares methods), 선형 및 비선형 계획법 등으로 여러 개의 강우-유출사상을 동시에 해석하여 단위도를 유도하는 방법이 제시되었다. 그러나 Singh(1976)은 최소자승법에 의한 단위도 유도는 단위도 종거의 비부성(non-negativity)을 보증할 수 없다고 지적하였다. 다행스럽게도 선형 및 비선형계획법은 모형내 변수의 비부성조건을 두어 단위도 종거의 비부성을 보증한다.

Mays와 Coles(1980)은 선형계획모형으로 복합 강우-유출사상으로부터 단위도를 결정하였으며, 손실우량은 \emptyset 지표법으로 결정하였다. Mays와 Taur(1982)는 비선형계획으로 손실우량의 분포가 주어지지 않은 조건에서 단위도를 결정하였고, Unver와 Mays(1984)는 비선형계획인 단위도와 침투식의 매개변수를 결정하였으나, 주어진 초기해에 따라 결과가 달라지므로 만족할 만한 결과를 얻기 위해서는 여러 개의 초기해를 상정하여 비선형계획을 실행하였다. Prasad 등(1999)은 단위도와 Kostikov, Philip 및 Green-Ampt의 침투식의 매개변수를 선형계획 모형을 이용하여 결정하였다. Mays와 Coles(1980), Mays와 Taur(1982), Unver와 Mays(1984) 및 Prasad 등 (1999)에서 적용한 모형은 선형 또는 비선형 제약회귀모형에서 절대오차누계를 최소화하는 모형이다(Reklaitis

등, 1983).

본 연구에서는 강우 및 유출자료를 보유하고 있는 황구지천 수직교 지점에서의 단위도와 침투율을 산정하였다. 침투율 공식으로는 ϕ -index, Kostiakov, Philip, Horton 및 Green-Ampt 공식을 상정하였다. 수직교 지점에서의 단일 강우-유출사상으로부터 ϕ 지표법으로 유역의 평균침투능을 산정한 후, 종래의 방법으로 단위도를 유도하였다. 또한 절대오차누계를 최소로 하는 선형계획모형을 정립하고, 최적침투율과 단위도를 결정하였다. 산정된 단위도의 적정성은 유도된 단위도와 유효강우량을 합성함으로써 구한 직접유출수문곡선(Direct Runoff Hydrograph, DRH)를 강우-유출사상에서 구한 DRH와 비교함으로써 평가하였다.

2. 최적화 모형

2.1 선형제약회귀(constrained regression)모형

선형계획(linear programming, LP)은 제약 조건식 아래에서 목적함수를 최소 또는 최대화하는 수학적모형이다. Q_i^c 를 계산유출량, Q_i 를 관측유출량이라 하면 오차 e_i 는 계산유출량과 관측유출량의 차이이다. 만약에 계산유출량이 선형식으로 표현된다면 계산유출량의 매개변수를 결정하기 위하여 절대오차누계를 최소화하는 선형제약회귀모형(constrained regression, CR)을 정립하면 모형 1-1과 같다(Reklaitis 등, 1983).

모형 1-1에서 양수값의 편차 또는 음수값의 편차(positive or negative deviation)를 허용하기 위하여 비음수성 변수(nonnegative variables)인 e_i^+ 와 e_i^- 를 도입하면, $|e_i|$ 는 $e_i^+ + e_i^-$ 이 된다. 여기서 e_i^+ 는 절대잔차의 양수부분을, e_i^- 는 음수부분을 의미한다. 선형계획 모형에서 e_i^+ 와 e_i^- 중에서 하나가 양수이면 다

른 하나는 0으로 처리된다. 따라서 e_i^+ 가 양수이고 e_i^- 가 0이면 잔차는 양수이고, e_i^+ 가 0이고 e_i^- 가 양수이면 잔차는 음수이다. 따라서 모형 1-1에 두 개의 비음수성 변수를 도입하면 모형 1-2로 재정립되어 선형계획 프로그램에 의하여 해석될 수 있다.

(모형 1-1)

$$\min. z = \sum_{i=1}^n |e_i| = \sum_{i=1}^n |Q_i^c - Q_i| \quad (1)$$

$$\text{s. t. } Q_i^c - e_i = Q_i \quad (2)$$

$$e_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, n$$

(모형 1-2)

$$\min. z = \sum_{i=1}^n e_i^+ + e_i^- \quad (3)$$

$$\text{s. t. } Q_i^c + e_i^+ - e_i^- = Q_i \quad (4)$$

$$e_i^+, e_i^- \geq 0 \quad i = 1, \dots, n$$

계산유출량이 선형식으로 표현된다면 계산유출량의 매개변수를 결정하기 위하여 절대최대 오차를 최소화하는 선형제약회귀모형을 본 연구에서는 모형 2와 같이 정립하였다.

2.2 단위도의 결정을 위한 선형계획모형

모형 2는 관측 유출수문곡선(direct runoff hydrograph, DRH) $Q_{i,n}$ 의 중거와 계산 유출수문곡선(DRH) $Q_{i,n}^c$ 의 편차인 절대오차누계를 최소화함으로써 단위도(unit hydrograph, UH)를 유도한다. 모형 2은 비선형계획이지만 손실우량 $H_{i,n}$ 이 주어진다면 선형계획 모형으로 변환된다(Prasad 등, 1999). 본 연구에서는 모형 1에 추가하여 단위도와 침투식의 매개변수를 결

정하기 위한 선형제약모형을 절대최대오차를 최소화하는 모형 2를 정립하였다. 모형 2에서 비음수성 변수인 $Z_{i,n}$ 와 $V_{i,n}$ 을 도입하여 양수값의 편차 또는 음수값의 편차를 허용하였다. $Z_{i,n}$ 는 절대잔차의 양수부분을, $V_{i,n}$ 는 음수부분을 의미한다.

(모형 2)

$$\min Z_o = \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^{N_i} (Z_{i,n} + V_{i,n}) \quad (5)$$

s. t.

$$\begin{aligned} &(R_{i,n} - H_{i,n})U_1 + (R_{i,n-1} - H_{i,n-1})U_2 \\ &+ (R_{i,n-m+1} - H_{i,n-m+1})U_m \\ &+ \dots + Z_{i,n} - V_{i,n} = Q_{i,n} \end{aligned} \quad (6)$$

$$(R_{i,n} - H_{i,n}) \geq 0 \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^{L_i} (R_{i,n} - H_{i,n}) = D_i \quad (8)$$

$$C \sum_{m=1}^M U_m = 1 \quad (9)$$

$$Z_{i,n}, V_{i,n}, U_m \geq 0$$

여기서 $i = 1, 2, \dots, I$

i = 관측 DRH의 개수

I = 관측 DRH의 총 개수

$n = 1, 2, \dots, N_i$

n = 각 관측 DRH 종거의 개수

N_i = i 번째 관측 DRH 종거의 총 개수

$m = 1, 2, \dots, M$

m = UH 종거의 개수

M = UH 종거의 총개수

Z_o = 목적함수

$Z_{i,n}$ = i 번째 관측 DRH의 n 번째 종거에서 관측 DRH 종거 $Q_{i,n}$ 보다 아래에 있는 계산 DRH 종거 $Q_{i,n}^c$ 와의 편차

$V_{i,n}$ = i 번째 관측 DRH의 n 번째 종거에서 관측 DRH 종거 $Q_{i,n}$ 보다 위에 있는 계산 DRH 종거 $Q_{i,n}^c$ 와의 편차

R = Δt 기간 총강우량

H = Δt 기간 손실우량

U = UH의 종거

D = 직접유출 체적

Δt = DRH와 UH의 시간간격

L_i = i 번째 강우사상에서의 유효우량 시간간격의 수

i 번째 강우사상의 직접유출체적 D_i 는 다음과

같이 계산된다. 즉 $D_i = C \sum_{n=1}^{N_i} Q_{i,n}$ 이며 C 는 직접유출체적을 유출고(mm)를 환산하기 위한 상수이다.

모형 2는 비선형계획이나 손실우량 $H_{i,n}$ 이 주어진다면 선형계획 모형으로 변환되며 결정변수는 단위도 U_m 와 양음수 오차 $Z_{i,n}, V_{i,n}$ 이다. 임의 기간 Δt 내 침투손실은 다음 식 (10.a)와 (10.b)로 결정되며 각 침투량식을 고려할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_{i,n} &= F_{i,n} - F_{i,n-1} = \int_{t_{n-1}}^{t_n} f(t)dt \\ \text{if } R_{i,n} &> \int_{t_{n-1}}^{t_n} f(t)dt \end{aligned} \quad (10.a)$$

$$\begin{aligned} H_{i,n} &= R_{i,n} \\ \text{if } R_{i,n} &\leq \int_{t_{n-1}}^{t_n} f(t)dt \end{aligned} \quad (10.b)$$

여기서 $F_{i,n}$ 와 $F_{i,n-1}$ 는 각각 n 및 $n-1$ 기간에

서의 누가침투손실량이다.

3. 침투량공식

본 연구에서 고려한 침투량 공식은 다음과 같다. Kostiakov 공식은 임의 시간 t에서의 침투율(infiltration rate, f) 또는 손실율(loss rate)과 누가침투량(cumulative infiltration, F)을 각각 식 (11)과 (12)로 표시하였다.

$$f = A\alpha t^{\alpha-1} \quad (11)$$

$$F = At^\alpha \quad (12)$$

여기서 A와 α 는 각각 손실율 매개변수이며, α 는 일반적으로 0에서 1사이의 값을 갖는다.

Philip 공식의 침투율과 누가침투량 공식은 각각 식 (13) 및 식 (14)과 같다.

$$f = \frac{S}{2\sqrt{t}} + K \quad (13)$$

$$F = S\sqrt{t} + Kt \quad (14)$$

여기서 S는 흡수성(sorptivity)이고 K는 최종침투율(ultimate infiltration rate)으로 각각 손실율 매개변수이다.

Kostiakov 공식과 Philip 공식과 달리 Green-Ampt 공식은 초기토양수분조건을 고려하고 있으며 침투율과 누가침투량 공식은 각각 식 (15) 및 식 (16)과 같다.

$$f = K\left(1 + \frac{a}{F}\right) \quad (15)$$

$$F = Kt + a \ln\left(1 + \frac{F}{a}\right) \quad (16)$$

여기서 $a = S_f \Delta \theta$ 이며 S_f 는 습윤면 토양흡입수 두이고 $\Delta \theta$ 는 저류가능공극이다.

Horton은 침투능 실측자료를 이용하여 침투율과 누가침투량 공식을 각각 식 (17) 및 식 (18)과 같이 제안하였다.

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \quad (17)$$

$$F = f_c t + \frac{1}{k}(f_o - f_c)(1 - e^{-kt}) \quad (18)$$

여기서 f_o 는 초기침투능이고 f_c 는 최종침투능이며 k는 토양의 종류와 식생피복에 따라 결정되는 상수이다.

이상의 침투율공식에서 침투는 시간의 함수로 표현되어 각 공식의 매개변수가 결정되면 침투능 및 침투량은 강우량의 크기에 관계없이 동일하다. 그리하여 Unver와 Mays(1984)는 강우강도를 고려한 침투량 공식을 제안하여 단위도를 유도한 바 있다.

강우-유출 사상 계측지점에서의 단위도 유도 절차는 다음과 같다.

- ① 강우-유출 사상 선정
- ② 손실우량은 \emptyset 지표법으로 결정
- ③ 각 침투식 상정
- ④ 시산법을 적용하여 침투식의 매개변수를 섭동함으로서 모형 2에 의한 단위도의 종거 및 침투식의 매개변수를 결정

4. 단위도의 산정 및 평가

4.1 종래방법에 의한 단위도

강우에 의한 유출자료가 있는 수직교 지점에서의 단위도를 산정하기 위하여 2004년 6월의 강우-유출사상을 선정하였으며, 유역면적은 213.2 km²이다.

황구지천 유역에는 수원 및 양감강우관측소가

있으며 유역평균강우량 산정을 위한 방법은 티센법을 적용하였다. 수원강우관측소의 티센계수는 0.796이고 양감강우관측소의 티센계수는 0.204이다. 직접유출수문곡선(DRH)을 산정하기 위한 총유량과 기저유량의 분리는 수평직선분리법을 적용하였다. 2004년 6월 호우시 수직교지점에서의 강우-유출 사상은 <표 1>의 8번째 칸과 같다. 2004년 6월 호우시 총우량은 75.6 mm이었으며 DRH의 합계를 유역면적으로 나누어 유효우량을 계산하면 26.1 mm가 된다. 손실

우량을 이용하여 ϕ 지표를 계산하면 10.2 mm/hr가 된다. 또한 산정된 DRH와 유효우량을 이용하여 단위도(Unit Hydrograph, UH)를 계산한 결과는 <표 1>과 같다. 유효우량주상도에서 유효우량의 지속기간인 단위도의 지속기간은 3시간으로 산정되었으며, 3hr-단위도에 의한 S-수문곡선에서의 평형유출량은 약 $194.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 평형유출량 $Q_e = 2.778(213.1)/3 = 197 \text{ m}^3/\text{s}$ 과 유사하여 단위도의 지속기간은 적절한 것으로 평가된다.

표 1. 강우-유출사상 및 단위도(2004. 6)

월. 일. 시	강우량(mm/hr)			유량 (m^3/s)	기저 유량 (m^3/s)	직접 유출량 (m^3/s)	종래방법단 위도 (m^3/s)	LP모형	
	수원	양감	계					유효우량 cm	단위도 (m^3/s)
6. 19. 17	2.0	1.0	1.8	6					
6. 19. 18	5.0	6.0	5.2	6					
6. 19. 19	9.0	9.0	9.0	11	11	0	0.00	0.00	11.20
6. 19. 20	12.0	13.0	12.2	14	11	3	1.15	0.20	42.10
6. 19. 21	27.0	17.0	25.0	36	11	25	9.62	1.48	81.36
6. 19. 22	16.0	33.0	19.5	100	11	89	34.23	0.93	72.19
6. 19. 23	6.0	25.0	9.9	185	11	174	66.92		77.46
6. 20. 00	4.0	11.0	5.4	209	11	198	76.15		61.07
6. 20. 01	3.0	2.0	2.8	205	11	194	74.62		52.88
6. 20. 02	0.0	0.0	0.0	184	11	173	66.54		34.73
6. 20. 03	0.0	0.0	0.0	153	11	142	54.62		27.11
6. 20. 04	0.0	1.0	0.2	117	11	106	40.77		17.92
6. 20. 05	1.0	3.0	1.4	87	11	76	29.23		16.36
6. 20. 06	0.0	0.0	0.0	66	11	55	21.15		10.59
6. 20. 07	0.0	0.0	0.0	54	11	43	16.54		10.53
6. 20. 08	0.0	0.0	0.0	44	11	33	12.69		7.80
6. 20. 09	2.0	5.0	2.6	38	11	27	10.38		8.32
6. 20. 10	0.0	0.0	0.0	35	11	24	9.23		7.17
6. 20. 11	0.0	0.0	0.0	32	11	21	8.08		8.27
6. 20. 12	0.0	0.0	0.0	31	11	20	7.69		5.46
6. 20. 13	0.0	0.0	0.0	31	11	20	7.69		6.13
6. 20. 14	0.0	0.0	0.0	28	11	17	6.54		4.25
6. 20. 15	1.0	0.0	0.8	26	11	15	5.77		5.02
6. 20. 16	0.0	0.0	0.0	24	11	13	5.00		3.08
6. 20. 17	0.0	0.0	0.0	23	11	12	4.62		3.89
6. 20. 18	0.0	0.0	0.0	21	11	10	3.85		1.93
6. 20. 19	0.0	0.0	0.0	20	11	9	3.46		2.64
6. 20. 20	0.0	0.0	0.0	18	11	7	2.69		1.50
6. 20. 21	0.0	0.0	0.0	17	11	6	2.31		1.66
6. 20. 22	0.0	0.0	0.0	16	11	5	1.92		0.79
6. 20. 23	0.0	0.0	0.0	15	11	4	1.54		1.47
6. 21. 00	0.0	0.0	0.0	14	11	3	1.15		0.42
6. 21. 01	0.0	0.0	0.0	14	11	3	1.15		0.00
6. 21. 02	0.0	0.0	0.0	13	11	2	0.77		6.42
6. 21. 03	0.0	1.0	0.2	12	11	1	0.38		
6. 21. 04	1.0	2.0	1.2	12	11	1	0.38		

4.2 선형계획에 의한 단위도 산정

모형 1에서 i 번째 강우사상의 직접유출체적 D_i 는 다음과 같이 계산된다. 즉 $D_i = C \sum_{n=1}^{N_i} Q_{i,n}$

이며 C 는 직접유출체적을 유출고(mm)를 환산하기 위한 상수이며 본 연구에서는 10 mm를 단위유출고로 하였다.

$$c = \frac{1000 \text{ m} \cdot 3600 \text{ sec}}{213.1 \text{ km}^2 (1000 \text{ m})^2} = 0.001688$$

선형계획모형을 적용하여 산정한 단위도는 <표 1>의 10번째 칸에 나타내었다.

4.3 단위도의 평가

종래의 방법 및 선형계획모형으로 유도한 단위도를 평가하는 절차는 다음과 같다.

- (1) 강우주상도(rainfall hytograph, RH)
- (2) 유효강우주상도(effective rainfall hytograph, ERH) 결정
- (3) ERH와 UH를 합성함으로써 직접유출수

문곡선(Direct Runoff Hydrograph, DRH)을 산정

- (4) 관측 DRH 및 계산 DRH를 이용한 표준제곱근오차 계산

2004년 6월 강우-유출사상에서 종래의 방법에 의한 단위도를 이용한 DRH의 평균제곱근오차(root mean squared error, RMSE)는 $44.75 \text{ m}^3/\text{s}$ 이나 선형계획모형에 의한 표준제곱근오차는 $1.77 \text{ m}^3/\text{s}$ 이었다. 또한 (그림 1)은 관측된 DRH와 계산된 DRH를 나타내었으며 선형계획모형에 의한 DRH는 관측 DRH의 형상을 양호하게 재현하고 있으나, 종래 방법에 의한 DRH는 첨두유량이 발생하는 시점이 실제 보다 늦게 재현되는 것으로 분석되었다.

4.4 최적침투율 산정

2004년 6월 호우에 관하여 상정된 침투율 공식의 최적매개변수를 산정하였으며, 최적침투율 공식에 의한 유효우량을 산정하고 이에 따른 최적단위도를 유도하였다. Kostiakov, Philip, Horton 및 Green - Ampt 침투율 공식의 매개변수 산정 절차는 다음과 같다.

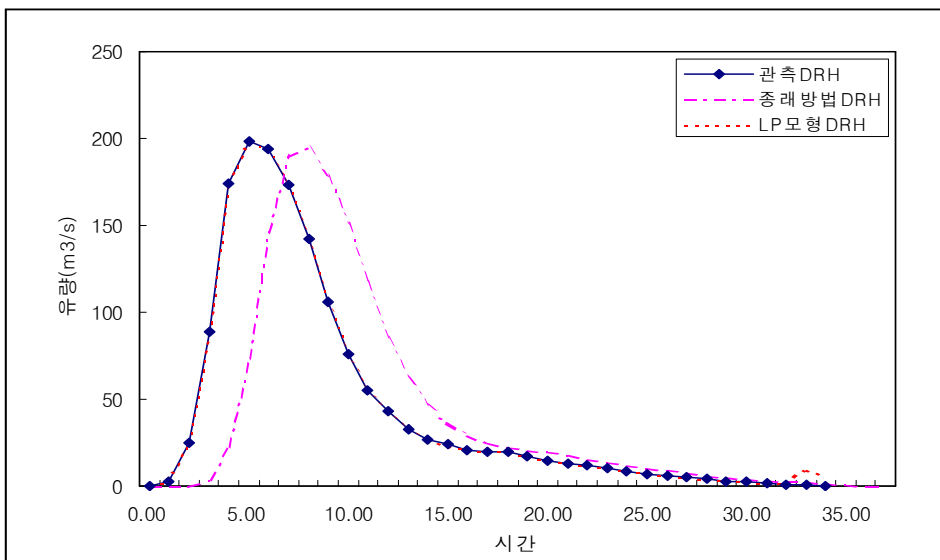


그림 1. 관측 DRH와 계산 DRH(2004. 6)

Step 1 : 시산법에 의하여 침투량 산정식의 매개변수를 결정하고, 이에 따른 유효우량의 분포를 결정한다.

Step 2 : 결정한 유효우량 분포와 직접유출량을 선형계획모형인 모형2에 적용하여 단위도를 유도한다.

Step 3 : 계산된 단위도와 유효우량으로 유출

수문곡선의 종거를 계산하고 관측유출수문곡선과의 평균계급근오차(RMSE)를 계산하여 RMSE가 가장 작은 매개변수를 침투율식의 최적매개변수로 하였다.

<표 2>에는 각 침투율의 매개변수와 최적침투율식에 의한 단위도를 나타내었다. <표 2>에

표 2. 최적단위도 및 침투율(2004. 6.)

Time	Recorded Data		ϕ -index		Kostiakov's Equation		Philip's Equation		Green-Ampt's Equation		Horton's Equation	
	Total Rainfall, (mm)	DROs, (m ³ /s)	ERH, (mm)	UHOs (m ³ /s)	ERH, (mm)	UHOs (m ³ /s)	ERH, (mm)	UHOs (m ³ /s)	ERH, (mm)	UHOs (m ³ /s)	ERH, (mm)	UHOs (m ³ /s)
6.19. 19:00	9.0	0	0	11.20	0	8.79	0	15.05	0	14.39	0	11.69
6.19. 20:00	12.2	3	2.0	42.10	3.2	38.04	0.4	45.63	0.6	45.03	1.8	42.73
6.19. 21:00	25.0	25	14.8	81.36	14.6	81.78	15.4	80.58	15.5	80.39	14.8	81.36
6.19. 22:00	19.5	89	9.3	72.19	8.3	71.95	10.3	72.71	10.0	72.95	9.5	72.15
6.19. 23:00	9.9	174	0	77.46	0	78.37	0	75.78	0	75.75	0	77.37
6.20. 00:00		198		61.07		62.07		60.33		60.77		60.82
6.20. 01:00		194		52.88		54.14		50.97		51.08		52.71
6.20. 02:00		173		34.73		35.75		34.06		34.42		34.50
6.20. 03:00		142		27.11		27.74		26.11		26.13		27.04
6.20. 04:00		106		17.92		18.24		17.85		18.02		17.82
6.20. 05:00		76		16.36		16.73		15.71		15.70		16.34
6.20. 06:00		55		10.59		10.76		10.66		10.77		10.53
6.20. 07:00		43		10.53		10.65		10.20		10.16		10.54
6.20. 08:00		33		7.80		7.87		7.90		7.97		7.76
6.20. 09:00		27		8.32		8.36		8.16		8.12		8.34
6.20. 10:00		24		7.17		7.09		7.32		7.35		7.16
6.20. 11:00		21		8.27		8.47		7.95		7.94		8.26
6.20. 12:00		20		5.46		5.50		5.57		5.62		5.44
6.20. 13:00		20		6.13		6.24		5.90		5.88		6.13
6.20. 14:00		17		4.25		4.23		4.37		4.41		4.24
6.20. 15:00		15		5.02		5.15		4.79		4.77		5.01
6.20. 16:00		13		3.08		3.04		3.20		3.23		3.07
6.20. 17:00		12		3.89		4.01		3.65		3.64		3.88
6.20. 18:00		10		1.93		1.92		2.04		2.07		1.92
6.20. 19:00		9		2.64		2.68		2.49		2.47		2.64
6.20. 20:00		7		1.50		1.53		1.54		1.57		1.48
6.20. 21:00		6		1.66		1.71		1.55		1.53		1.66
6.20. 22:00		5		0.79		0.75		0.88		0.89		0.78
6.20. 23:00		4		1.47		1.52		1.35		1.34		1.47
6.21. 00:00		3		0.42		0.51		0.40		0.42		0.40
6.21. 01:00		3		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00
6.21. 02:00		2		6.42		6.19		7.04		6.93		6.47
6.21. 03:00		1										
6.21. 04:00		1										
RMSE				1.77		1.64		2.11		2.06		1.80
Optimal Loss Rate Parameters						$\alpha=1.11$ A=9.0		S=3.8 K=8.0		a=0.5 K=9.5		$f_c=7.0$ $f_o=10.4$ k=0.03

율과 축산폐수처리장의 TN 방류수기준을 고려할 때 처리효율은 비교적 양호한편이지만 유출은 각 침투률식에 의한 직접유출수문곡선의 종거를 나타내었으며, Kostiakov 침투률 산정식에 의한 단위도가 가장 작은 오차를 수반하였다.

2004년 6월 강우-유출사상에 관하여 시간 t (min)에 관한 산정된 누가침투량(cumulative infiltration, F)(mm)공식은 다음과 같다.

· Kostiakov 공식 : $F = 9.0t^{1.1}$

· Philip 공식 : $F = 3.8\sqrt{t} + 8.0t$

· Green-Ampt 공식 :

$$F = 9.5t + 0.5 \ln \left(1 + \frac{F}{0.5} \right)$$

· Horton 공식 :

$$F = 7.0t + \frac{1}{0.03} (10.4 - 7.0)(1 - e^{-0.03t})$$

4. 결론

강우-유출사상으로부터 유역의 단위도와 침투율을 결정하기 위하여 관측치와 계산치의 절대오차누계를 최소화하는 모형을 정립하였다. 관측된 강우-유출사상으로부터 최종누가침투량을 결정하고 매개변수를 섭동시킴으로서 오차가 가장 작은 Kostiakov, Philip, Horton 및 Green-Ampt공식의 매개변수와 단위도를 결정하였다. 유역평균침투능 ϕ 지표를 적용하면 유일한 단위도가 결정되지만, Kostiakov, Philip, Horton, Green-Ampt공식 등과 같은 각종 침투식은 매개변수에 따라 유효우량의 분포가 변하므로 단위도의 종거와 침투율은 달라진다. 본 연구에서는 2004년 6월 호우사상에 관하여 상정한 침투율 공식 중에서 Kostiakov 식이 가장 작은 오차를 수반되는 것으로 분석되었다. 또한 최적화

모형에 의한 단위도는 종래 방법에 의한 단위도에 비하여 작은 오차를 수반하여 개선된 단위도라 할 수 있다. 본 연구는 직접관측에 의한 단위도 및 침투율 공식을 결정함으로써 치수사업 수립시 강우사상에 적용하면 타당한 홍수수문곡선 결정에 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 한강홍수통제소(2004). "한강수계 수문자료 homepage".
- 건설교통부(2002). "안성천 하천정비기본계획 보완" .
- Mays, L. W. and Coles, S. L. (1980). "Optimization of unit hydrograph determination.", J. of Hydr. Div., ASCE, Vol. 106, No. 1, pp. 85-97.
- Mays, L. W. and Taur, C. K. (1982). "Unit hydrograph via nonlinear programming.", Water Resources Research, Vol. 18, No. 4, pp. 744-752.
- Mawdsley J. A. and Tagg, A. F. (1981). "Identification of unit hydrographs from multi-event analysis.", J. of Hydrology, 49, pp. 315-327.
- Ponce, V. M. (1989). Engineering Hydrology: Principles and Practices, Prentice Hall.
- Prasad, T. D., R. Gupta, and S. Prakash (1999). "Determination of optimal loss rate parameters and unit hydrograph.", J. of Hydrologic Engineering, ASCE, Vol. 4, No. 1, pp. 83-87.
- Reklaitis, G. V., Ravindran, A., and Ragsdell, K. M. (1983). Engineering Optimization: Methods and Application, John Wiley and Sons.
- Singh, K. P. (1976). "Unit hydrograph- A

comparative study", Water Resources
Bulletin, AWRA, Vol. 12, No., 2, p. 381.
Unver, O. and Mays L. W. (1984). "Optimal

determination of loss rate functions and
unit hydrograph.", Water Resources
Research, Vol. 20, No. 2, pp. 203-214.