

線形計劃法에 의한 代表單位圖 誘導

A Derivation of the Representative Unit Hydrograph from
Multiperiod Complex Storm by Linear Programming

권오현* · 류태상** · 유주환***

Kwon, Oh Hun · Ryu, Tae Sang · Yoo, Ju Hwan

Abstract

This paper presents an algorithm to derive the representative unit hydrograph for the real environment of a watershed. For a given watershed, the conventional methods give several different unit hydrographs by storm events. In this study the LP model is somewhat modified based on the previous study by Mays et als. as follows: the objective function is designed to minimize the sum of weighted residuals. An additional constraint of moving average is added to prevent the unit hydrograph from the occurrence of oscillation which was not active in Mays's paper. Configuration of rainfall matrix was improved to reduce its dimension in accordance with Diskin's review point. In spite of the superiority of LP approach in terms of representativeness, all the methods were very sensitive to the validity of baseflow separation and rainfall-loss. Several methods of the separations for rainfall excesses and direct runoffs were applied and no preferred methods were identified. This is the matter of judgement considering catchment and rainfall characteristics. This algorithm was applied to a real watershed of the Wi stream in the Nak-dong river.

Compared with the IHP results by conventional methods, this optimized representative unit hydrograph demonstrated relatively smaller and shorter values in terms of the peak discharge and the basin lag respectively, and the oscillation of its falling limb successfully eliminated owing to the additional constraints of moving averages.

요 지

본 논문은 여러개의 복합호우 자료로써 선형계획법에 의한 대표단위도를 유도하는 알고리즘을 제 공한다. 주어진 한 유역에서 종전의 방법은 여러 호우사상에 대해서 각각 단위도를 유도하여 첨두유량 및 시간에 대한 특성치 평균법을 썼다. 본 연구에서 사용한 LP모형은 Mays 등이 제안한 모형을 다음과 같이 수정하였다. 목적함수는 가중치를 부여한 잔차의 합의 최소화로 설계하였고, Mays 논문에서 실 제로는 적용하지 않은 부등호 제약보다 더 적극적인 2점 이동평균에 의한 부등식 제약조건을 두어 하강부의 진동을 제거하였다. 또한 Diskin이 지적한대로 강우 행렬의 구성을 개선하여 행렬의 차원을 줄였다. LP접근법은 대표값을 나타내는 우월성에도 불구하고 기저유출과 손실유량 분리의 정도에 매우 민감하였다. 유효유량 및 직접유출량 분리를 위해 몇가지 방법을 적용하였으나 뚜렷이 우월한 방법은

* 정희원 · 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정희원 · 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

*** 정희원 · 충남대학교 대학원 박사과정

없었다. 이것은 유역과 강우의 특성을 고려하여 판단할 문제였다. 본 연구의 알고리즘을 낙동강 지류 위치에 적용하여 대표단위도를 유도하였다.

기존의 IHP 성과와 비교할 때, 최적화된 대표단위 유량도의 첨두유량은 상대적으로 작고, 발생시간은 빨라졌으며, 하강부의 진동은 이동 평균법의 제약 조건에 의하여 성공적으로 소거할 수 있었다.

1. 서 론

Sherman(1932)이 제안한 단위유량도의 기본개념에 따르면 한 유역에서 일정한 특성을 지닌 호우로 인한 유출 수문곡선은 일정한 특성을 갖는다. 그러나 실제로는 어떤 한 유역에서 여러 호우사상으로부터 각각 유도된 단위도는 호우마다 다르다. 이는 주로 자료에 포함된 오류와 유역을 선형계로 취급한 단위도 이론의 기본 가정의 한계성에 기인한 것이다. 따라서 선형계 이론과, 강우의 시간적, 공간적 균일성에 근거한 단위도 이론을 바탕으로 하여 여러개의 복합호우(Multiperiod storm)로부터 대표단위도(Representative Unit Hydrograph)를 최적화 기법으로 유도함으로써 단일 복합호우(Complex storm)에 의한 단위도 유도에 포함되는 여러가지 문제점을 해결하려는 연구가 Mays 등^(1,2,3)에 의해 진행되었다.

이 방법은 복합호우로부터 유도된 여러개의 단위도를 첨두유량 및 시간별로 평균하는 방법보다 훨씬 대표성을 갖으며, Singh 등⁽⁷⁾이 단위도 유도를 위한 9 가지 기법을 비교한 결과 선형계획법(LP), 조화함수법(HA), 최소자승법(LS) 등에 의한 방법이 우수한 것으로 평가되었고, 특히 선형계획법에 의한 방법은 자료에 포함된 오류를 최적화 기법으로 소거함으로써 대표단위도를 얻는데 효율적이다.

Sherman의 가정에 입각한 시간적, 공간적 균등 강우강도를 갖는 강우-유출 현상은 비교적 큰 유역계에서 흔하지 않다. 따라서 복합강우에 의한 유출 수문곡선으로부터 단위도를 유도할 수 있는 방법의 필요성이 대두되었다. 연구 초기인 1939년 Collins⁽⁸⁾는 시행 착오법에 근거한 방법을 제안하였으며, 그 후 특정 지속기간의 단위도 종거 계산을 위하여 선형연립방정식의 해를 구하거나 또는 회귀분석 기법등을 도입하였다.^(10,11)

일반적으로 단위도는 逆次過程으로 유도되기 때문에 필연적으로 자료의 오차 효과가 파급된다. 따

라서 오차의 영향을 극복하기 위하여 선형계획법(LP)에 의해 관측치와 계산치의 차를 최소로 하는 단위도를 유도하고자 하는 연구가 Eagleson 등⁽¹¹⁾, Deininger⁽¹²⁾, Singh 등⁽⁶⁾에 의해 수행되었다.

그러나 이러한 연구는 모두 단일 호우사상을 대상으로 한 것이며, 복합강우(Complex storm)에 의한 방법은 Newton과 Vinyard⁽¹⁰⁾의 이완법(Successive over Relaxation), Diskin과 Boneh⁽¹³⁾에 의한 다변수 검색방법(Multivariable Search Method) 등이 있다.

80년대 이르러 복합 강우군(Multiperiod storm)의 유효강우와 직접유출량으로부터 최적화 기법으로 단위도 종거를 구하는 방법이 제시되었다. Mays와 Coles⁽¹⁾는 선형계획법을 적용함에 있어서, 유효강우와 직접 유출량을 既知로 취급하였으므로, 실용적으로 손실우량의 산정이나 기저유출 분리에 따른 이 방법의 유용성은 보이지 못하였다. 또한 이들이 제안한 선형계획 모형에서는 단위도를 유도함에 있어서 가중치를 부여치 않아 첨두유량 종거를 나머지 종거와 동일한 비중으로 취급함으로써 수문 분석에서 첨두유량의 중요성이 무시되었고 첨두유량 이후 하강부의 진동을 제거하기 위하여 부등호제약식으로 단순 감소곡선 형태를 추구하고 있다. 한편 Mays와 Taur⁽²⁾는 편차의 제곱을 최소화하는 비선형계획법을 적용하였는데 LP에 비하여 계산시간 및 계산용량이 증대된 반면에, 최적 단위도 결정에 있어서 특별한 향상은 가져오지 못했다고 결론지었다. Bruen과 Dooge⁽⁴⁾는 최소자승법으로 단위도를 유도함에 있어서 여러가지 오차로 인하여 단위도 종거가 진동이 생기는 등의 수치해석적인 악조건을 극복하기 위해 정규방정식에서 강우 행렬에 매개변수를 도입하여 고유치(Eigenvalue)를 적절히 조정하여 하강부의 진동을 제거하였고 강우행렬이 Toeplitz 행렬임을 착안하여 Farden의 알고리즘⁽¹⁴⁾으로 기억용량과 연산시간을 절약한 장점을 갖고 있다.

국내에서는 이순탁 등⁽¹⁵⁾의 단위도 유도 모형과, 윤용남 등⁽¹⁶⁾, 고재용 등⁽¹⁷⁾의 개념적인 모형에 대한 연구가 있다. 선형 이산형 Black-Box계에 대한 해석으로 안상진과 이원호⁽¹⁸⁾는 Matrix해법을 이용하여 하나의 복합강우(Complex storm)로부터 단위도를 결정하였으나 단위도 하강부의 진동 처리나 유역 대표 단위도 결정에 관한 제시는 없다.

본 연구에서는 Mays등의 선형계획법을 바탕으로 하여 여러개의 복합 강우군에 대한 실측치로 대표 단위도를 구함으로써 이 방법의 실용성을 보여주고자 하였다.

특히 본 연구에서는 목적함수에 가중치를 부여하여 침투유량의 중요도를 높여 주고 또한 침투유량 이후의 수문곡선 하강부에 생기는 진동을 효과적으로 제거할 수 있도록 2점 이동평균 부등호 제약조건을 부가하였다. 그리고 기저유출 분리는 수정 N-일법, 수평분리법등 유출특성에 따라 선택적으로 적용하였으며, 유효강우 결정은 초기-일정 손실률법 (Initial and Uniform Loss Rate)⁽²³⁾을 사용하였다.

2. 복합 호우군으로부터 대표 단위도 유도

한 유역의 복합호우를 가급적 많이 동시에 고려하여 최적화 기법으로 단위도를 유도함으로써 강우 및 유출 자료의 오차와 선형 이론에 따른 모순점을 소거하여 대표성을 갖는 단위도를 유도할 수 있다. 여기서 여러개의 복합호우를 복합호우군이라고 칭한다.

복합호우군에 대한 직접유출 Q, 유효강우 P, 단위도종거 U 관계를 이산형의 회선적분식으로 나타내면

$$Q_{i,n} = P_{i,n}U_1 + P_{i,n-1}U_2 + \dots + P_{i,n-m+1}U_m \quad (1)$$

$$n=1, 2, \dots, N_i; m=1, 2, \dots, M_i; i=1, 2, \dots, I$$

여기서,

i : 독립된 관측수문곡선 및 호우군을 나타내는 일련번호

I : 독립된 관측수문곡선 및 호우군의 총 수

n : i 번째 관측수문곡선의 종거 번호

m : 독립된 일정 지속시간을 갖는 단위도 종거의 번호

M_i : i번째 호우에 대한 단위도의 종거 수

N_i : i번째 관측수문곡선의 종거 수

관측수문곡선의 종거 수 N_i와 단위도의 종거 수 M_i 및 유효강우 수 L_i사이의 관계는

$$N_i = M_i + L_i - 1, i=1, 2, \dots, I \quad (2)$$

또한 단위도 이론에 따라 단위 유효우량에 의한 단위도 면적이 1이 되어야 하므로

$$\Delta t \sum_{m=1}^{M_i} U_m = 1 \quad (3)$$

$$U_m \geq 0, m=1, 2, \dots, M_i$$

2.1 선형계획 모형 구성

Mays 및 Coles⁽¹⁾는 그림 1과 같이 관측 수문곡선 종거 Q와 계산 수문곡선 종거 \hat{Q} 와의 차를 식 (4)와 같이 표현하였다.

$$\hat{Q}_{i,n} = Q_{i,n} - Z_{i,n} + V_{i,n}, n=1, 2, \dots, N_i, i=1, 2, \dots, I \quad (4)$$

여기서,

Q_{i,n}: i번째 복합강우의 n번째 유출수문곡선 종거 관측치

$\hat{Q}_{i,n}$: 위의 이론적 계산치

$$\epsilon_{i,n} = Q_{i,n} - \hat{Q}_{i,n}$$

$$\epsilon_{i,n} \geq 0 \text{이면, } Z_{i,n} = \epsilon_{i,n}, V_{i,n} = 0.0$$

$$\epsilon_{i,n} \leq 0 \text{ 이면, } V_{i,n} = -\epsilon_{i,n}, Z_{i,n} = 0.0$$

이 식에서 이론 수문곡선 종거 \hat{Q} 는 이산형 회선적분식 (1)로 계산하였다.

그러나 Mays 등은 선형계획모형에서 유량에 가중치를 부여하지 않아서 침투유량의 중요성을 고려치 않았으며, 또한 행렬구성에 있어서 식 (5)와 같이 정의되는 단위도 종거수 중 최대치 M이 I번 반복되어 행렬이 거대해지는 번잡함을 초래하였다.⁽¹³⁾

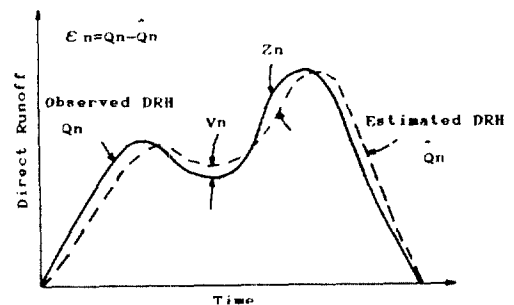


그림 1. 실측치와 계산치의 차

$$M = \text{Max}\{M_i, M_j, M_k, \dots\} \quad (5)$$

여기서 i, j, k, \dots, I 는 개별 복합호우 단위도 종거수의 일련번호이다. 그리고 Mays 및 Coles는 수문곡선 하강부의 진동을 제거하기 위하여 조건식 (6)을 제안하였다.

$$U_m > U_{m+1} \quad (6)$$

여기서 m 은 단위도의 침두종거 시간 이후의 시간축을 나타낸다. 즉, 침두시간 이후의 단위도 종거치는 그 앞의 종거값을 넘지 못하게 함으로써 진동을 막을 수 있다고 하였으나 실제 계산에는 적용하지 않았다. 이와 같은 부등식 조건으로는 부드러운 곡선을 기대할 수 없으며, 극단적으로는 경사진 계단형의 결과를 얻을 우려가 있다.

본 연구에서는 이상의 문제점을 보완하여 목적함수에는 식 (7)과 같이 가중치를 부여하였다. 여기서 가중치 $W_{i,n}$ 은 미국공병단에서 적용하는 식 (9)⁽²³⁾에 의하였는데, 관측수문곡선의 종거가 평균종거치보다 큰 부분의 가중치가 1 보다 커지게 되므로 침두유량의 중요성을 강조하는 효과가 기대된다. 또한 침두유량 이후의 하강부에 발생하는 진동을 제거하기 위하여 식 (8c)와 같이 침두시간 m_p 점 이후의 단위도 종거에 그점 전후의 단위도 종거의 산술평균보다 크지 않도록 하는 2점 이동평균 제약조건을 주므로써 하강부 수문곡선이 매끈한 곡선이 되도록 하면서, 관측치와 계산치의 편차를 최소화하도록 다음과 같이 목적함수 Z_0 를 설정하였다.

$$\text{O.F. Min } Z_0 = \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^{N_i} W_{i,n}(Z_{i,n} + V_{i,n}) \quad (7)$$

s.t.

$$P_{i,n}U_1 + P_{i,n-1}U_2 + \dots + P_{i,n-m+1}U_m + Z_{i,n} - V_{i,n} = Q_{i,n} \quad (8a)$$

$$K \sum_{m=1}^M U_m = 1 \quad (8b)$$

$$-U_{m-1} + 2U_m - U_{m+1} \leq 0 \quad (m > m_p; \quad m_p \text{는 단위도의 침두유량 종거 번호}) \quad (8c)$$

$$U_m \geq 0, \quad Z_{i,n} \geq 0, \quad V_{i,n} \geq 0 \quad (8d)$$

여기서,

K : 단위 환산계수

$W_{i,n}$: 가중치로 다음과 같이 계산됨

$$W_{i,n} = \frac{Q_{ave,i} + Q_{i,n}}{2Q_{ave,i}} \quad (9)$$

$n=1, 2, \dots, N_i; \quad m=1, 2, \dots, M; \quad i=1, 2, \dots, I$

$Q_{ave,i}$: i 번째 호우의 관측수문곡선 종거값의 산술 평균값

$Q_{i,n}$: i 번째 호우의 관측수문곡선의 n 번째 종거값

2.2 행렬의 구성

선형계획문제는 다음과 같이 표준형(standard form)으로 표현된다.

$$\text{O.F. Min } Z = \underline{C}^T \underline{X} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } [\underline{A}] \underline{X} = \underline{B}, \quad B_i, X_i \geq 0, \quad \forall i \quad (11)$$

본 연구에서 제안한 선형계획 모형을 표준형으로 변환하기 위해서 결정변수와 제약 조건식의 수 즉, 행렬의 차원에 대한 고려가 선행되어야 한다. Wormleaton⁽¹⁹⁾이 지적한 바와 같이 대표단위도 종거수를 식 (5)의 M 으로 정했을 때 각 호우에 대한 유출수문곡선 종거수 N_i 는, 식 (12)와 같이 수정된다.

$$N_i' = M + L_i - 1 \quad (12)$$

따라서 $N_i' - N_i$ 또는 $M - M_i$ 만큼 Q_{N_i+1} 에서 $Q_{N_i'}$ 까지 값을 0으로 놓아야 하므로 제약 조건식 수가 더 많이 필요하다. 또한 식 (8c)의 제약조건을 침두유량 이후에 적용해야 되므로 제약 조건식의 수는 부등호제약 조건식 수 α 만큼 증가된다. 식 (11)의 차원을 식 (15)와 같이 나타낼 때,

제약조건식의 수;

$$a = \sum_{i=1}^I N_i + 1 + \alpha + \sum_{i=1}^I (M - M_i) \quad (13)$$

여기서, $\alpha = M - m_p - 1$

결정변수의 수;

$$b = 2 \sum_{i=1}^I N_i + M + 2 \sum_{i=1}^I (M - M_i) + \alpha \quad (14)$$

제약조건식의 차원;

[A]: $(a \times b)$ 행렬

$$\begin{aligned} \underline{X} &: (b \times 1) \text{ 벡터} \\ \underline{B} &: (a \times 1) \text{ 벡터} \end{aligned} \quad (15)$$

따라서 제약조건식 (11)의 행렬을 분할행렬로 나타내어 구성하면 식 (16)과 같다.

$$\begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \\ A^3 \end{bmatrix} \underline{X} = \underline{B} \quad (16)$$

여기서, $[A^1]$ 은 강우행렬이고, $[A^2]$ 는 단위도 면적 계산, $[A^3]$ 는 이동평균 부등호 제약행렬로서, 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} [A^1] &= \begin{bmatrix} P_{1,1} & 0 & \dots & 1 & -1 & \dots & 0 \\ P_{1,2} & P_{1,1} & 0 & \dots & 1 & -1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1,N1} & \dots & \dots & P_{1,1} & 0 & \dots & \dots \\ P_{2,1} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{2,2} & P_{1,1} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{2,N2} & \dots & \dots & P_{2,1} & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1,1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1,2} & P_{1,1} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1,N1} & \dots & \dots & P_{1,1} & 0 & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2N_1 \times b) \\ [A^2] &= \begin{bmatrix} K & K & K & \dots & \dots & K & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (1 \times b) \\ [A^3] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & -1 & 2 & -1 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (N_2 \times b) \end{aligned} \quad (17)$$

3. 수치 적용

3.1 적용 유역 선정

본 연구에서 제시한 선형계획 모형방법을 검증하기 위한 적용대상 유역은 단위유량도의 기본가정을 충족할 수 있는 소유역으로서, 시우량과 시수위 기록 및 수위-유량 관계식을 쓸 수 있어야 한다.

이와 같은 조건을 갖춘 자료를 구하기 위하여 국제수문개발계획(IHP)에 의한 대표 유역 조사성과를 검토한 결과 기존 성과⁽²⁰⁾의 대부분은 단위도, 주지하수 감수곡선등 분석성과는 있으나 시간단위 유량 및 유량 자료등 기초 자료가 제시되어 있지 않다.

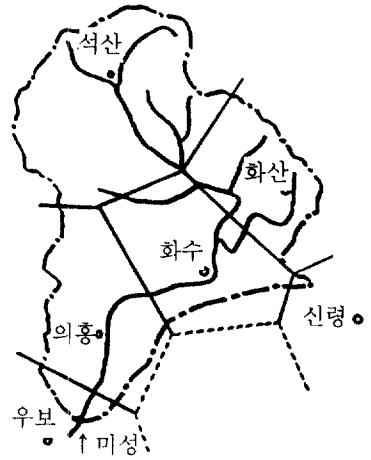


그림 2. 미성 수위표 티센망도

표 1. 위천 유역 미성 수위표 티센 계수⁽²⁰⁾

관측소명	면적(km ²)	Thiessen계수
우 보	3.26	0.019
신 령	0.15	0.001
의 홍	37.70	0.220
화 수	36.45	0.213
화 산	27.74	0.162
석 산	65.95	0.385
계	171.25	1.000

본 연구에서는 기초 자료를 얻을 수 있었던 위천, 보청천, 평창강을 검토한 결과, 위천 유역을 선택하였다.

평창강 유역은 호우 기록은 다수 있었으나 단위도 기본 가정에 적합한 호우 선택이 어려웠으며, 또한 이 유역은 석회암 지대로서 본 연구의 대상으로서 적합치 않았다. 보청천 유역은 호우 기록이 적었으며, 특히 강우의 공간 균등분포 등 기본 조건이 충족되지 않았다고 판단되었다.

본 연구에 적합한 위천 유역은 낙동강 지류로서 유역 면적이 472.5km²이고 유로 연장은 42.8km이다. 또한 분석 지점으로서의 강우의 균등분포 조건에 비교적 일치되도록 유역면적이 다소 작은 미성 지점을 선택하였다. 미성 수위표 지점은 유역면적이 171.3km²이고 유로 연장은 30.9km이다.

3.2 평균 강우 선정

평균 시우량은 그림 2의 위천유역 미성수위표 기준 티센망에 의하였으며 티센계수는 표 1과 같다.

3.3 기저유출 분리

단위도의 유도에 있어서 기저유출의 분리와 유효우량의 산정 방법의 타당성에 따라 대표 단위도의 성패가 좌우된다고 할 수 있다. 본 연구에서는 수평직선 분리법, 수정 N-일법, 미국공병단 방법⁽²¹⁾ 등을 망라하여 복합호우의 우량분포와 유출양상을 고려하여, 기저 유출을 분리하고 그 성과를 비교 검토하여 수정 N-일법과 수평 직선 분리법을 적용하였다.

수평직선분리법은 가장 간편한 방법으로 중간유출의 영향이 적은 소유역 또는 침투가 적은 산악지대 유출에 적합한 방법이다. 수정 N-일법은 기존 성과⁽²⁰⁾에 의하면 식 (17)과 같다.

$$N = 0.241 A^{0.468} \quad (17)$$

여기서,

N : 침투유량 부터 직접유출 종료까지 시간(일)

A : 유역면적 (Km²)

미국공병단에서 사용하는 방법은 비교적 큰 유역에 적합한 것으로 알려져 있고 기저 유출 분리 방법의 컴퓨터 처리와 다중침투곡선(Multi-peaked Hydrograph)의 기저 유출 분리에 유리하다고 판단되지만 본 유역의 경우와 같이 유역면적이 적을 경우에는 유효우량과 직접유출 발생 시간이 일치되지 않는 등 적합하지 않았다.

3.4 유효 강우 결정

유역의 실제 침투능은 강우가 계속됨에 따라 지수함수적으로 감소된다고 할 수 있으나, 호우 강도가 큰 홍수 분석에서는 Φ -index법이 매우 편리하여 적용가능하다고 볼 수 있다.

다만 초기손실이 너무 과소 평가되는 단점을 갖고 있는데, Ford⁽²²⁾는 Φ -index법을 다소 개선한 초기손실 및 일정손실률 방법을 제안했다. 이 방법은 그림 3 및 7과 같이 직접유출이 발생되기 이전의 모든 강우는 손실된다고 보고 그 이후로는 손실량이 일정하다고 보는 것으로 비교적 큰 유역일 경우 적합하다고 알려져 있다. IHP조사 성과를 검토한 결과 지수 함수적인 침투능 공식이나 Φ -index법은

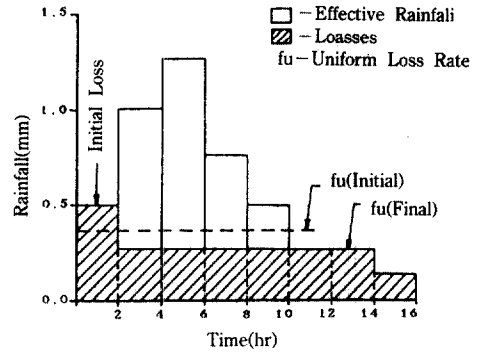


그림 3. 초기 - 일정손실률법

로는 유효강우와 직접유출 발생 시각을 일치시키기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 그림 3과 같이 초기-일정 손실률법을 적용하였다.

3.5 입력 자료

본 연구에서 적용한 호우사상은 표 2와 같이 5개의 복합호우를 선정하였다. 기저유출의 분리는 유출 상승 기점으로부터 가급적 수평 직선법을 적용하려고 했다. 이는 Singh 등⁽⁵⁾이 언급한 것처럼 자료의 오류가 있을 경우 이 방법이 좋은 결과를 얻을 수 있기 때문이다.

수평 분리법에 의한 기저유출 분리가 적합치 않은 수문곡선은 중간유출을 고려하였는데, 중간유출의 상승기점은 침투 유출 시간으로 보고, 직접유출의 종점은 수정 N-일법과 주 지하수 감수곡선법을 비교하여 판단하였다.

4. 계산 결과 및 검토

4.1 모형 구성 및 연산

적용 모형의 차원에 관한 주요 수치는 다음과 같다.

$$I=5, L_1=6, L_2=9, L_3=9, L_4=2, L_5=5,$$

$$N_1=32, N_2=23, N_3=26, N_4=18, N_5=23,$$

$$N_1'=32, N_2'=35, N_3'=35, N_4'=28,$$

$$N_5'=31, \sum_{i=1}^5 N_i'=161$$

$$M_1=27, M_2=15, M_3=18, M_4=17,$$

$$M_5=19, M = \max[M_i] = 27, \alpha = 23,$$

$$\sum N_i = 122, \sum M_i = 96, a = 185, b = 372.$$

표 2 . 미성 수위표 강우-유출 입력자료

구분	No. 1		No. 2		No. 3		No. 4		No. 5	
	1986.7.21-7.22		1990.6.24-6.28		1990.7.18-7.21		1990.9.10-9.14		1990.9.23-9.27	
시간 (hr.)	유효우량 (mm)	직접유출량 (cms)	유효우량 (mm)	유출량 (cms)	유효우량 (mm)	직접유출량 (cms)	유효우량 (mm)	직접유출량 (cms)	유효우량 (mm)	직접유출량 (cms)
1	.1	1.3	.8	2.1	0.0	.4	10.2	15.6	12.4	41.6
2	2.2	2.7	.6	4.5	18.5	31.2	4.1	75.5	8.9	81.3
3	1.4	9.2	.0	6.9	8.6	104.2		91.6	.4	96.7
4	1.3	17.1	.4	9.0	6.4	142.0		83.0	.6	101.9
5	10.5	29.3	1.7	11.0	4.4	173.0		73.0	2.1	107.5
6	4.2	38.5	3.3	22.7	.0	164.5		62.0		108.3
7		55.1	1.9	35.4	.0	147.2		51.1		98.9
8		69.6	.1	39.4	.0	133.6		41.3		85.7
9		81.4	.3	39.2	.8	128.5		35.4		73.1
10		81.9		38.5		124.3		32.3		61.6
11		77.5		33.5		115.9		28.7		49.6
12		69.8		28.9		102.1		24.9		42.1
13		62.0		27.3		85.5		20.9		38.0
14		54.9		25.1		70.3		17.0		33.7
15		47.2		22.3		56.6		13.3		29.5
16		40.7		19.3		50.4		9.6		25.4
17		34.6		16.1		44.3		6.2		21.4
18		30.5		13.0		38.3		3.0		17.5
19		24.9		10.0		32.6				13.9
20		21.8		7.0		27.2				10.4
21		18.2		4.2		22.2				7.2
22		16.2		1.6		17.6				4.3
23		12.8		.2		13.3				1.5
24		11.0				9.4				
25		7.8				5.9				
26		6.5				2.6				
27		4.4								
28		3.5								
29		1.0								
30		.8								
31		.4								
32		.3								

5개의 복합 호우군과 그 유출 수문곡선 자료로 부터 식 (10), (11)의 강우, 단위도 및 유출 행렬은 다음과 같이 구성하였다. X에서 성분 Y는 부등호 제약식의 slack변수이고, K는 식 (21)과 같다.

$$C^T = W_{i,n} [\overbrace{0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0}^{50 \text{ 개}} \ \overbrace{1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1}^{322 \text{ 개}}] \quad (18)$$

표 3. 복합 호우별 침투 특성치

자료 번호	관측 기간	침투시간 (hr)	침투유량 (hr ⁻¹)
1	1986.7.21 ~ 7.22	5	0.0941460
2	1990.6.24 ~ 6.28	2	0.1063968
3	1990.7.18 ~ 7.21	4	0.1057277
4	1990.9.10 ~ 9.14	2	0.1427213
5	1990.9.23 ~ 9.27	3	0.0991297
	침투시간평균	3.2	0.1096243
	대표 단위도	2	0.1019500

$$X = \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_{27} \\ Z_{1,1} \\ V_{1,1} \\ \vdots \\ Z_{5,31} \\ V_{5,31} \\ Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_{23} \end{bmatrix}_{372 \times 1} \quad B = \begin{bmatrix} 1.3 \\ \vdots \\ 0.3 \\ \vdots \\ 41.6 \\ \vdots \\ 1.5 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{185 \times 1} \quad (19)$$

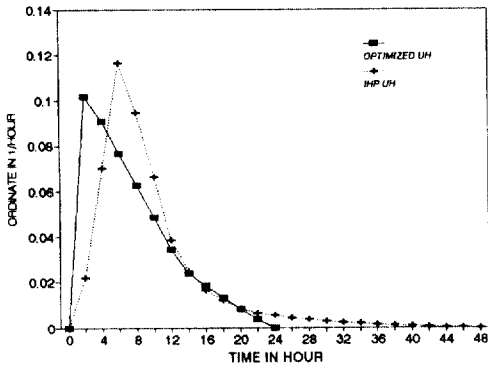


그림 6. 대표단위도와 IHP 2-시간 단위도 비교

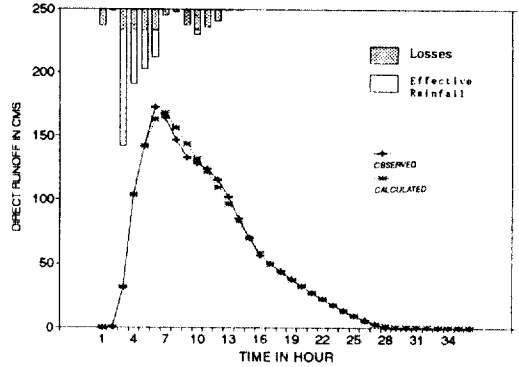


그림 7(c). 대표단위도 유량과 관측치(90.7.18)

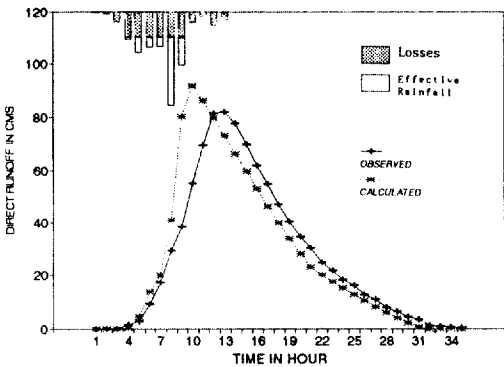


그림 7(a). 대표단위도 유량과 관측치(86.7.22)

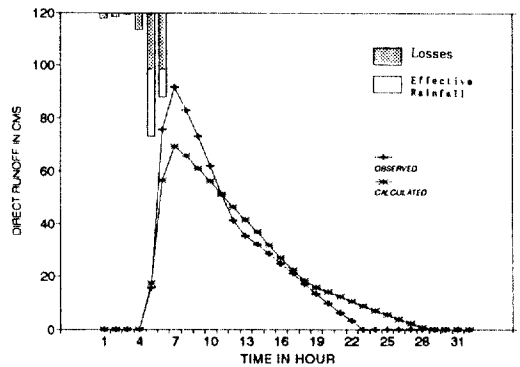


그림 7(d). 대표단위도 유량과 관측치(90.9.10)

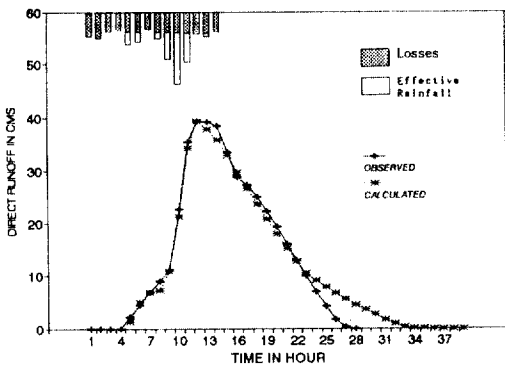


그림 7(b). 대표단위도 유량과 관측치(90.6.24)

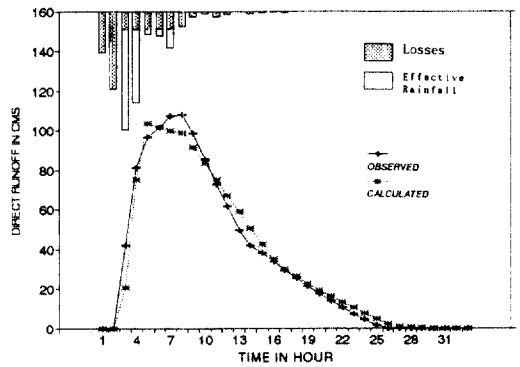


그림 7(e). 대표단위도 유량과 관측치(90.9.23)

론으로서 본질적으로 강우-유출의 비선형성을 모형화하는데 제한이 따른다. 또한 강우의 시간적, 공간적 균일성을 가정함으로써 유효우량과 직접유출 자료를 획득하는데 오차를 수반하게 된다. 따라서 침투유량을 평균 유역 단위도를 구하는 종래의 방법에는 여러가지 오차가 포함된다.

본 연구는 여러개의 호우군으로부터 최적화된 단위도를 구함으로써, 대표성을 갖는 단위도를 유도하였다.

1) 컴퓨터의 용량이 허용하는 한, 가급적 많은 복합 호우 사상을 동시에 고려하면 더욱 대표성을 높일 수 있다.

2) 기저유출 분리와 유효강우 결정방법은 대표단위도 유도에 직접적인 영향을 주므로 실제 자료 분석시에는 세밀한 주의가 필요하다. 그러나 홍수 유출 분석등 단기간 해석에서 손실우량은 Φ -index 법의 개선형인 초기-일정률 손실법이 이론의 단순성도 불구하고 적용할 만하다고 판단된다.

3) 이동평균 부등호 제약조건식을 추가하여 단위도 하강부의 진동 부분을 부드럽게 만들 수 있었다.

4) 목적함수에 가중치를 부여함으로써 산술평균 법에 비해 첨두부가 개선되었으며, 실측 자료와 비교할 때 적절한 홍수량을 제시해 준다.

5) 그러나 본 연구는 종래 해법에서 단위도 종거 오차의 누가적 파급을 제거하고, 호우별 관측오차를 보다 합리적으로 배분, 처리하는데 의의가 있으며, Sherman의 단위도 기본 가정에 내제된 모순을 해소해 주는 것은 아니다.

참 고 문 헌

- Mays, L. W., and S. L. Coles, "Optimization of Unit Hydrograph Determination", *J. Hydraulic Div.*, ASCE, 106(HY1), 1980, pp. 85-97.
- Mays, L. W., and C. K. Taur, "Unit Hydrographs via Nonlinear Programming", *W. R. R.*, 18(4), 1982, pp. 744-752.
- Olçay ünver and L. W. Mays, "Optimal Determination of Loss Rate Functions and Unit Hydrographs", *W. R. R.*, Vol. 20, 1984.
- Bruen, M. and Dooge, J. C. I., "An Efficient and Robust Method for Estimating Unit Hydrograph Ordinates", *J. Hydrol. Vol. 70*, No. 1-24, pp. 1-25.
- Singh, K. P., "Unit Hydrographs - A Comparative Study", *Water Bull.* 12, p. 381, 1976.
- Singh, V. P. and A. Baniukiewicz, "A Study of Some Empirical Methods of Determining the Unit Hydrograph", *Interim Report No. 1*, W. R. R. Institute, Mississippi State University, 1981.
- Singh, V. P., A. Baniukiewicz and R. S. Ram, *Some Empirical Methods of Determining the Unit Hydrograph in Rainfall-Runoff Relationship*, Water Resources Pub., edited by V. P. Singh, 1982, pp. 67-90.
- Collins, W. T., "Runoff Distribution Graphs from Precipitation Occurring in More than One Time Unit", *Civil Engineering* 9(9), 1939.
- Linsley, R. K. et al., *Hydrology for Engineers*, McGraw-Hill, 1958.
- Newton, D. W. and J. W. Vinyard, "Computer Determined Unit Hydrographs From Floods", *J. Hydraulic Div.*, ASCE, 93, 1967, pp. 219-234.
- Eagleson, P. S. et al., "Computation of Optimum Realizable Unit Hydrographs", *W. R. R.*, Vol. 2, No. 4, 1966.
- Deininger R. A., "Linear Program for Hydrologic Analysis", *W. R. R.*, 5, 1969, pp. 1105-1109.
- Diskin, M. H. and A. Boneh, "Determination of An Optimal IUH for Linear, Time-Invariant System from Multi-storm Records", *J. Hydrol.*, 24, 1975, pp. 57-76.
- Farden, D. C., "Solution of a Toeplitz Set of Linear Equations", *I. E. E. E. Trans. Antennas Propag.*, AP-24; 906-907, 1976.
- 이순탁, 최상열, "하천 유역의 유출해석을 위한 단위유량도 모델", 영남대학교 대학원, 1984.
- 윤용남, 김재형, "소유역의 홍수유출 계산을 위한 단일 선형저수지 모형의 적용", *한국수문학회지*, 제 19권, 제1호, 1986, p. 65-74.
- 고재웅, 서영제, "선형저수지 모형의 매개변수 연구", *한국수문학회지*, 제20권, 제3호, 1987, pp. 229-235.
- 안 상진, 이 원호, "복합강우로부터 단위도 유도", 충북대학교 대학원, 1987.
- Wormleaton P. R., "Discussion on Optimization of Unit Hydrograph Determination by Mays et als.", *J. Hydraulic Div.*, ASCE, 106(HY12), 1980, pp. 2076-2078.
- 건설부, *국제수문개발계획(IHP) 대표유역 연구 조사 보고서*, 1983-1989.
- Hoggan, D. H., *Computer Assisted Flood Plain Hydrology and Hydraulics*, McGraw-Hill., 1989, pp. 45-70.
- Ford, D. T., "Discussion on Optimization of Unit Hydrograph Determination by Mays et al.", *J. Hydraulic Div.*, ASCE, 106(HY11), 1980, pp. 1951-1954.
- Hydrologic Engineering Center, *HEC-1, Flood Hydrograph Package*, U. S. Army Corps of Engineers, Davis, Calif., 1973.
- Linus Schrage, *LINDO(Release 5.0)*, Graduate School of Business, University of Chicago, The Scientific Press, 1991.

(接受 : 993. 1. 7)