

## 홍수예보를 위한 통합저류함수모형의 퍼지제어 ( I )

- 이론 및 모형의 수립 -

### Integrated Storage Function Model with Fuzzy Control for Flood Forecasting ( I )

- Theory and Proposal of Model -

이 정 규\* / 김 한 섭\*\*

Lee, Jong-Kyu / Kim, Hansup

---

#### Abstract

This paper presents the integrated storage function model (ISFM) to improve the accuracy of the storage function model (SFM) which is widely employed for flood runoff analysis and its forecasting in Korea. In order to achieve this objective, the optimization method is applied for estimation of parameters of the model which dominate the accuracy of the analysis, which is usually taken by empirical formulae, and they are treated as time dependent variables. The fuzzy control technique is used to determine the time variant parameters. In addition, the ISFM can be applied to the combined routing of the watershed and the channel with a residual watershed.

*keywords* : flood runoff, storage function model, optimization method, fuzzy control, ISFM

---

#### 요 지

본 논문에서는 홍수유출의 해석·예측을 위한 홍수추적 모형으로서 현재 국내에서 널리 이용되고 있는 저류함수모형을 개선하였다. 유출 해석의 정확성에 가장 큰 영향을 미치는 요인 중의 하나인 매개변수 산정에 최적화 기법을 도입하여 기존의 경험식 등에 의한 매개변수 결정의 비객관성을 개선하였으며, 결정된 매개변수들을 시변성으로 취급하고 이의 실시간 자동모정에 퍼지제어를 사용하여 시간에 따른 유역의 변동 특성에 적절히 대응할 수 있도록 하였다. 또한 홍수유출 해석시 가장 까다로운 문제점 중의 하나인 잔유역 유입량의 처리를 위하여 유역모형과 하도모형을 하나의 단일모형으로 하는 통합저류함수모형을 제안하였다.

**핵심용어** : 홍수유출, 저류함수모형, 최적화기법, 퍼지제어, 통합저류함수모형

---

\* 한양대학교 공과대학 도시환경건설공학과군 교수

Professor, Division of Urban Planning, Environmental and Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea (E-mail : leejk@email.hanyang.ac.kr)

\*\* 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

Doctoral Student, Department of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea  
(E-mail : hskim815@hymail.hanyang.ac.kr)

## 1. 서 론

우리나라는 지리적, 기후적 특성으로 매년 장마와 태풍 등이 발생하며, 이로 인한 홍수 때문에 엄청난 인명 및 재산피해를 겪고 있다. 홍수로 인한 재해규모는 산업시설과 경제규모가 커지고 생활수준이 향상됨에 따라 더욱 커지는 경향을 보이고 있으며, 최근에는 도시개발 및 하천개수 등으로 인한 도시형 홍수의 유발과 내수침수의 증대 등 그 피해내용도 다양화되고 있다. 홍수로 인한 피해를 줄이기 위해서는 댐 건설이나 하천제방 축조 등과 같은 구조물에 의한 직접적인 홍수대책 외에 비구조물에 의한 대책의 하나인 홍수에 경보의 정확성을 높여서 홍수재난에 미리 대처하는 것도 그 피해를 경감시키는 적절한 방법 중의 하나이다.

현재 국내 주요 하천의 홍수에경보시스템의 운영과 다목적댐의 홍수조절관리에는 수문학적 모형의 하나인 저류함수모형(storage function model: SFM)이 사용되고 있다. 저류함수모형은 木村(1961a)에 의해 제안되었으며, 지체개념이 도입된 저류함수와 유효강우의 개념을 이용한 강우-유출모형으로서 일본에서는 青木 등(1976), 杉山과 角屋(1984), 平松 등(1987)의 연구를 통하여 개선되어 왔으며, 국내의 연구로는 확률홍수량산정과 지역홍수빈도해석에 저류함수모형을 이용한 바 있으며(장욱, 1987), 남궁달(1985)은 저류함수모형과 운동파모형의 유사성으로부터 유역의 수문인자 및 지형인자와 매개변수의 관계를 규명하고자 하였다. 이창해(1995)는 저류함수모형의 매개변수 최적화기법으로 Brent method를 사용하였으며, 퍼지제어에 의한 시변성매개변수의 도입으로 유역저류함수모형을 개선하고자 하였다.

저류함수모형을 실제 홍수유출현상에 적용하는데 있어 가장 어려운 점은 매개변수를 결정하는 것이다. 현재, 매개변수들을 결정할 수 있는 객관적이고 합리적인 방법이 제시되어 있지 않기 때문에 모형의 매개변수를 결정할 때 경험식을 이용하거나 수문기술자의 판단에 의한 보정에 의존하고 있는 실정이다. 또한, 일반적으로 매개변수들은 강우상별로 다를 뿐 아니라 동일한 강우라 할 지라도 시간에 따라 변하는 시변성(time variant)인 특성을 가지고 있음에도 불구하고 이들 매개변수들을 상수로 취급해 왔으며, 이것은 현재로서는 시변성인 매개변수를 효과적으로 추적하여 제어할 수 있는 적절한 방법이 없었기 때문이라고 볼 수 있다(이정규, 1994; 이창해, 1995). 저류함수모형은 유역모형과

하도모형으로 나누어져 있는데, 유역에 대한 저류함수는 강우-유출 자료로부터 쉽게 구할 수 있으나, 하도에서는 유출점에서의 유량을 잔유역으로부터의 유출량과 하도 유출량을 엄밀히 분리할 수가 없기 때문에 실제 하천에서 하도저류함수를 정확하게 구할 수 없는 문제점이 있다.

본 연구는 두 부분으로 나누어 본 논문에서는 위에서 지적된 저류함수모형의 여러 문제점들을 개선하기 위하여 매개변수의 최적화 및 퍼지제어에 의한 매개변수의 실시간 보정을 통한 모형의 객관성 및 정확성 향상을 도모하고, 유역과 하도에서의 유출 계산을 단일 모형에 의해 수행할 수 있는 통합저류함수모형을 제안하고자 하며, 두 번째 논문에서는 제안된 모형을 실제 유역의 강우-유출사상에 적용하여 모형의 적용성 및 타당성을 검토하고자 한다.

## 2. 저류함수모형의 검토

### 2.1 저류함수모형

저류함수모형(storage function model: SFM)은 木村(1961a, 1961b)이 제안한 홍수유출모형으로 산지가 많은 유역에 적합도록 개발된 모형이다. 이 방법은 일본에서 많이 사용되고 있으며, 계산절차가 간편하고 홍수유출의 비선형성을 고려할 수 있는 방법이므로 선형모형보다 합리적이라고 알려져 있다.

저류함수모형은 아래와 같이 유역저류함수모형과 하도저류함수모형으로 나눌 수 있다.

#### 2.1.1 유역저류함수모형

저류함수모형은 운동방정식을 나타내는 저류함수식과 연속방정식으로 구성되어 있다. 유역에서 저류고  $s_l(\text{mm})$ 은 유효유출고  $q_l(\text{mm/hr})$ 의 지수함수로 표현할 수 있다. 즉,

$$s_l = Kq_l^P \quad (1)$$

여기서  $K$ ,  $P$ 는 유역에 대한 매개변수이다.

유역에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$r_{ave} - q_l = \frac{ds_l}{dt} \quad (2)$$

여기서  $r_{ave}$ 는 유역평균강우량(mm/hr)이다.

유역내의 유출역과 침투역이 홍수가 끝날 때까지 똑

같이 유지된다고 가정하여, 유출역에서는 전강우량을 대상으로 하여 유출계산을 행하고 침투역에서는 포화우량을 초과하는 우량만으로 유출계산을 하게된다. 따라서 총유출량  $O$  ( $m^3/sec$ )는 전유역으로부터의 직접 유출량에 기저유량  $O_i$  ( $m^3/sec$ )를 더하여 구한다(建設省水文研究會, 1971; 윤용남, 1996).

$$O = \frac{A}{3.6} [f_1 q_i + (1 - f_1) q_{sa, i}] + O_i \quad (6)$$

여기서  $A$  ( $km^2$ )는 유역면적이며,  $q_{sa, i}$  ( $mm$ )은 포화점 이후의 강우에 의한 단위유출고이다.

## 2.1.2 하도저류함수모형

### 2.1.2.1 단일하도의 경우

단일 하도의 경우 하도구간의 연속방정식은 다음과 같다.

$$I - O_i = \frac{dS_i}{dt} \quad (3)$$

여기서  $I$  ( $m^3/sec$ )는 하도구간 상류단에서의 유입량이며,  $O_i$  ( $m^3/sec$ )는 지체시간  $T_i$ 을 고려한 하도구간 하류단에서의 유출량이고  $S_i$  ( $m^3$ )은 하도저류량이다.

하도저류량  $S_i$ 과 하도의 하류단유량  $O_i$  간의 관계를 나타내는 저류함수식은 홍수류와 같은 부정류흐름일 때 다음 식으로 표시된다.

$$S_i = K' O_i^P - T_i' O_i \quad (8)$$

여기서,  $K'$ 와  $P'$ 는 하도저류함수의 매개변수이며,  $T_i'$ 은 하도의 지체시간이다. 식 (8)의 우변의 둘째 항은 하도흐름이 부정류일 때의 특성을 반영하는 것이다. 실제의 하천에서는 편의상  $T_i'$ 의 영향을 포함시켜서 새로운  $K'$ 와  $P'$ 를 결정하여 다음 식과 같이 표시하는 일이 많다(建設省水文研究會, 1971).

$$S_i = K' O_i^P \quad (9)$$

하도구간에 대한 저류함수(식 (8))를 구하면 하도의 상류단의 유입유량자료  $I(t)$ 와 연속방정식(식 (7))으로부터 홍수추적기법에 의하여 하류단의 유출량  $O_i$ 을 구할 수 있다.

### 2.1.2.2 잔유역을 포함한 하도의 홍수추적법

2.1.2.1절에서 설명한 하도의 홍수유출계산은 하도

상류로부터의 유입량만이 있는 경우에 적합한 유출계산법이다. 그러나 실제 하천의 하도구간에서는 지천 등의 국지유입이 전혀 없는 예는 극히 적고 일반적으로는 국지유입을 고려하여야 한다. 이러한 국지유입유량이 본류의 유량과 같이 관측되고 있다면 문제가 없지만, 실제로는 지류에 대한 유량관측이 거의 이루어지고 있지 않은 실정이다. 현재의 수문관측 현황을 살펴보면 유출량이 측정되고 있지 않은 잔유역을 가진 하도가 대부분이다. 따라서 잔유역에서의 유출량 추정법을 확립하는 것도 실제 하천의 홍수추적을 위하여 대단히 중요한 과제로 남아있다.

기존의 홍수추적법에서는 국지유입이 없는 하도에 대한 홍수추적을 시행할 수 있지만 잔유역 유입의 문제는 충분히 처리하기가 불가능하며, 이 때문에 실제 하천에 대한 기존 방법의 적합성이 양호하다고 말하기는 어렵다. 현재까지는 국지유입량이 미지인 잔유역문제를 명확하게 해결하는 방법을 제시하지 못하고 있다. 木村(1962b)은 잔유역을 가진 하도의 홍수추적법으로 대표유입에 의한 방법과 잔유역의 강우에 의한 방법을 제안하고 있지만, 이 방법은 여러 가지 가정을 포함하고 있기 때문에 잔유역문제를 명확하게 해석할 수 있다고 보기는 어렵다. 또한 강우에 의한 방법 역시 잔유역의 유역평균강우로부터 잔유역의 유입량을 구해야 하는 문제가 여전히 남아있다.

## 2.2 매개변수의 결정

저류함수모형의 매개변수로는 지체시간  $T_i$ 과  $T_i'$ , 저류함수의 매개변수  $K$ ,  $K'$ ,  $P$ 와  $P'$ , 일차유출률  $f_1$  등이 있다. 저류함수모형을 이용하여 유출계산을 시행할 때 가장 중요하고 어려운 문제는 유역특성에 적절한 매개변수를 어떻게 결정하느냐하는 것이다. 유역과 하도의 특성을 적절하게 대표할 수 있는 매개변수를 추정하는 방법이 모형의 적용타당성과 효율성을 평가할 수 있는 척도가 된다고 볼 수 있다. 하도에서 정상류의 저류함수를 이론적으로 구한  $P$ 의 값은 직사각형수로일 때 0.6, 삼각형수로일 때 0.8이며, 실제하천의 경우에는 0.5~0.7의 범위를 가진다(木村, 1962a).

매개변수를 결정하는 기존의 방법으로는 경험식을 이용하는 방법, 도해법에 의한 방법 등이 있으며 최근에는 수학적 모형과 컴퓨터를 이용하는 최적화에 의한 방법에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

경험식 중의 하나로 木村은 일본의 하천자료를 이용하여 지체시간에 대하여 다음과 같은 추정식을 제안하였

다(建設省水文研究會, 1971).

$$T_i = 0.0470L - 0.56 \quad (L > 11.9 \text{ km})$$

$$T_i = 0 \quad (L \leq 11.9 \text{ km}) \quad (10a)$$

$$T_i' = 7.36 \times 10^{-4} \times L' \times I'^{-0.5} \quad (10b)$$

위 식에서  $L$ 은 유출점에서 유역 내의 가장 먼 지점까지의 유로연장이며,  $L'$ 은 하도구간의 길이,  $I'$ 은 하도구간의 평균경사이다. 식 (10a)와 (10b)는 일반적인 하천에 적용할 수 있으나 정밀도가 그다지 좋지 않기 때문에 각 하천마다의 경험식을 구하여 사용하는 것이 보다 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그 외 일본의 利根川과 한강에서 구한 경험식도 있다(담운영처 담운영1부, 1993).

### 3. 매개변수의 최적화

실제 하천의 유출문제에 적용할 때 앞에서 설명한 경험식이나 도해법에 의한 방법으로 저류함수모형의 매개변수를 결정해서 사용하는데는 몇 가지 문제점이 있다. 경험공식을 사용하는 매개변수 결정방법은 모든 하천에 적용할 수 있기 때문에 특정 하천에 대한 특성이 고려될 수 없으며, 어떤 공식은 특정 하천에만 적용할 수 있으며, 강우사상의 특성에 따른 매개변수의 변동을 고려할 수 없다. 다음으로 도해법에 의한 결정 방법은  $K$ ,  $P$ ,  $T_i$ 을 결정하기 위해서 지체시간을 다양하게 가정하는 것이 번거로운 뿐 아니라 많은 시간과 노력이 필요하며, 일차유출률  $f_1$ 과 포화우량  $R_{so}$ 를 결정하는 것도 개인적 판단에 따르므로 객관성이 떨어지고 실제 강우사상의 경우에 누가관측유출고와 누가계산유출고의 관계가 분명하게 직선으로 나타나지 않는 경우가 많아서 포화점의 위치결정이 쉽지 않다.

#### 3.1 최적매개변수의 결정 방법

저류함수법의 매개변수를 결정할 때 경험식에 의해서 결정된 매개변수를 강우사상에 따라 보정하는 방법과 최적화기법으로 직접 매개변수를 결정하는 방법이 있다(이창해, 1995). 전자의 경우 다시 수동보정기법과 자동보정기법의 두 가지로 구분된다. 수동보정기법은 관측치와 수문곡선의 계산결과를 비교하여 주관적으로 판단해야 한다. 따라서 수문기술자는 모형의 특성을 완전히 이해하고 매개변수 보정에 풍부한 경험과 판단능력을 갖추고 있어야 한다. 반면에 자동보정기법은 수학

적 최적화기법을 이용하여 모형의 매개변수를 보정하는 방법이기 때문에 전문가의 판단을 필요로 하지 않는다. 최근에는 매개변수를 직접 결정하는 방법으로, 수학적 최적화기법을 사용하여 목적함수를 최소 또는 최대화하여 주어진 모형의 매개변수를 결정하는 방법에 대한 연구가 활발하다. 최적화 기법은 직접탐색법(direct search method)과 경사법(gradient method)으로 구분할 수 있다. 경사법은 수렴속도가 빠르지만 편미분에 의해 방향을 찾아가는 방법으로 편도함수를 필요로 하므로 수자원 모형에 적용하기 어렵다. 반면에 직접탐색법은 수렴속도는 느리지만 편도함수를 필요로 하지 않으므로 수문모형의 최적화기법에 적합하다. 직접탐색법에는 simplex search법, pattern search법, rotating direction법, Brent법 등이 있다. 최적화기법에 대한 상세한 내용은 문헌(Hooke와 Jeeves, 1961; Rao, 1984; Hendrickson과 Sorooshian, 1988)을 참조할 수 있다.

저류함수모형의 매개변수를 결정하는데 최적화기법을 적용한 예를 살펴보면, 남궁달(1985)은 경사법의 하나인 SDFP법으로 저류함수법의 최적매개변수를 결정하여 유역의 수문인자와 지형인자간의 관계를 검토하였다. 永井과 角屋(1987)는 저류함수모형을 대상으로 하여 오차응답면의 특성을 물리적으로 고려한 준최적결정법(quasi optimization technique)을 제안하였다. 이 방법의 특징은 간단한 가정에 의하여 오차응답면의 오목한 형상(shape of trough)을 물리적 매개변수로 하는 함수로 표시하고, 이것을 저류함수모형의  $K$ ,  $P$ ,  $T_i$ 의 최적값 결정에 활용하는 점이다. 심순보 등(1992)은 최적화기법으로 pattern search법을 사용하였으며 결정변수로는  $K$ ,  $P$ ,  $T_i$ ,  $R_{so}$ ,  $T_i'$ 을 대상으로 하였다. 이 방법은 경험적으로 산정된 매개변수를 비율 벡터를 사용하여 보정하는 것이다. 결국 5차원 최적화가 되므로 계산시간이 과다하게 필요하게 되어 실제 적용에 어려움이 따른다. 이와 같이 기존의 연구들은 매개변수 중 일부만을 대상으로 하거나 또는 대상변수가 너무 많아서 과다한 계산시간을 필요로 하는 등의 문제점이 지적되고 있다. 그러므로 아직은 저류함수모형의 매개변수를 결정하는 최적화방법이 확립되어 있다고 볼 수 없다.

이정규 등(1994)과 이창해(1995)는 Brent법(Press 등, 1986)과 회귀분석법을 사용하여 상관계수가 최대가 되도록 하여  $T_i$ ,  $K$ ,  $P$ 를 결정하였으며,  $f_1$ 과  $R_{so}$ 는 Brent법을 2차원으로 확장하여 계산치와 관측치의 오

차가 최소가 되는 값으로 결정하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 기존의 도해법에 의한 매개변수 결정법과 유사한 과정을 가지므로 이해하기 쉽고, 수작업이 필요 없이 완전 전산화 할 수 있으며, 기존의 최적매개변수 결정법과는 달리 결정변수로  $T_i$ 만을 사용하면서도 최종적으로  $K$ 와  $P$ 의 최적치를 구할 수 있다는 점이 특징이다.

### 3.2 Brent법에 의한 매개변수의 최적화

#### 3.2.1 Brent법

본 연구에서는 최적화기법으로 Brent법을 사용한다. 이 방법은 미분함수가 필요 없으며 계산 알고리즘이 간단하고 수렴속도가 빠른 장점을 가지고 있다. Brent법은 그림 1과 같은 탐색과정을 가진다. 그림 1에서 초기값으로 ①, ②, ③점을 선택하면 포물선 (a)를 이루게 되며, 이 포물선상의 최대점인 ④의 횡좌표의 위치는 간단한 수식으로 계산된다. 다음에 ①, ②, ④점을 이용하여 앞의 과정을 반복하면 다음 최대점인 ⑤가 결정되고 이러한 과정을 반복하면 허용오차범위 내에서 목적함수가 최대가 되는 점의 위치를 쉽게 탐색할 수 있다.

#### 3.2.2 $K, P, T_i$ 의 최적화

지금까지 저류함수법의 최적매개변수를 결정할 때

저류함수의 매개변수  $K, P, T_i$ 을 각각 독립변수로 취급하거나, 혹은  $P$ 를 일정한 값으로 가정하고 나머지 매개변수를 최적화하였다. 그러나 도해법에 의한 매개변수 산정의 알고리즘에서는 유출고와 유역저류고간의 관계가 거의 일직선으로 나타날 때 저류고와 유출고간의 멱회귀곡선(power regression curve)이 저류함수를 의미한다. 그러므로 멱회귀곡선식에서 저류고와 유출고 사이의 상관계수가 최대가 될 때의 지체시간이 최적지체시간이라고 볼 수 있으며, 이 때의 회귀상수가  $K$ 와  $P$ 의 최적치가 된다(이정규 등, 1994; 이창해, 1995). 저류함수를 나타내는 식 (4)에 대수값을 취하면 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} \ln(s_t) &= \ln K + P \ln(q_t) \\ Y &= A + PX \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서  $\ln(q_t)$ 과  $\ln(s_t)$ 을 선형회귀분석하면 상관계수  $R$ 을 구할 수 있다. 앞에서 설명한 Brent법에서 상관계수  $R$ 을 목적함수로 보면  $R$ 이 최대가 되는 지체시간  $T_i$ 를 탐색할 수 있고 이것이 최적지체시간이다. 또한 회귀분석에서 구한 회귀 상수  $A$ 로부터 최적 매개변수  $K$ 는 다음 식으로 구한다.

$$K = \exp(A) \quad (12)$$

이렇게 매개변수의 최적치를 구하는 방법은 기존의

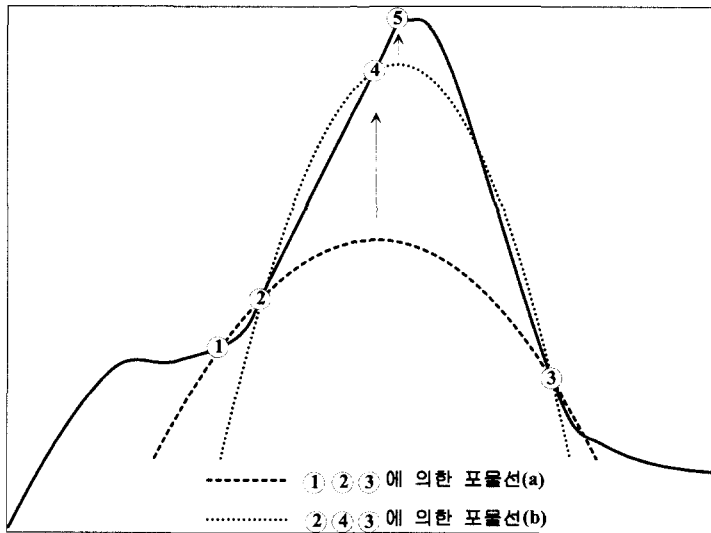


그림 1. Brent method에 의한 최적값 탐색

최적매개변수 결정법과는 달리 결정변수로  $T$ 만을 사용하면서도 아울러  $K$ 와  $P$ 의 최적치를 구할 수 있는 방법이다(이정규 등, 1994).

#### 4. 통합저류함수모형

##### 4.1 저류함수모형의 검토

일반적으로 강우-유출모형은 복잡한 수문현상을 몇 개의 매개변수를 가진 간단한 모형으로 표현하기 때문에 실제 유출현상을 정확하게 재현하는 것은 한계가 따르기 마련이다. 저류함수모형을 상세히 검토해 보면 다음과 같은 몇 가지 문제점을 지적할 수 있다(이정규 등, 1994; 이창해, 1995).

1) 유효우량을 산정할 때 포화우량에 도달하기 전과 후에 일정한 유출률을 사용하는 것은 강우-유출특성을 고려할 때 유역의 손실우량을 올바르게 표현하고 있다고 볼 수 없다.

2) 선행강우에 의한 토양의 함수율에 따른 유출특성이 고려되어 있지 않다.

3) 유출역과 침투역의 유출고는 저류함수에 의해 비선형성을 가지는데 유출량 계산시에는 선형일 때만 가능한 중첩법을 적용하는 모순이 있다.

위에 열거한 문제점을 해결하기 위해서는 강우와 유역의 유출특성에 대응하는  $f_1$ 과는 다른 개념의 유출률의 도입이 필요하다.

저류함수법의 또 다른 문제점으로는,

4) 유역내 저류상태의 변동에 따른 지체시간의 변화와 그에 수반되는 매개변수의 변화가 고려되지 않는다.

5) 평균강우량을 사용하는 집중형 모형이므로 강우 중심의 위치에 따라 유출형태가 달라지는 점이 고려되지 않는다.

이러한 문제점은 모형의 각종 매개변수들을 상수로 취급하기 때문에 발생된다고 여겨지므로, 실제 유출현상을 올바르게 재현하기 위해서는 매개변수를 시변성(time variant)으로 취급하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

한편, 하도저류함수모형에서 잔유역이 수반되는 경우에 하류단 유출점에서 실측된 총유출량으로부터 상류단 유입량 성분과 잔유역 유입량 성분을 명확하게 분리하는 것은 사실상 불가능하므로 저류함수모형을 적용할 때 불합리한 가정을 할 수밖에 없을 뿐 아니라, 하도저류량을 결정하는 명확한 방법도 제시되어 있지 않다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 유역

과 하도에 적용할 수 있는 통합저류함수모형(integrated storage function model: ISFM)을 제안하고자 하며, ISFM의 매개변수는 시변성으로 다룬다.

##### 4.2 통합저류함수모형(integrated storage function model: ISFM)

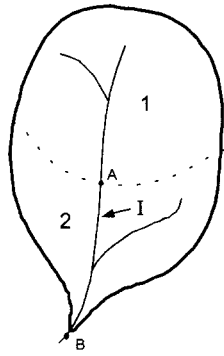
저류함수모형은 4.1절에서 지적한 바와 같은 문제점을 내포하고 있기 때문에 저류함수모형에 의한 유출추적결과는 그 정확성과 재현성에 문제가 발생하게 된다. 그러므로 저류함수모형을 수정하거나 개선할 필요성이 제기된다. 이정규 등(1994)과 이창해(1995)는 유역저류함수모형을 개선한 수정저류함수모형을 제안하였다. 수정저류함수모형은 변동유출률  $f_2$ 를 도입하였고,  $f_2$ 와 저류함수의 매개변수  $K$ 를 시변성으로 취급하였으며, 이러한 시변성 매개변수의 제어에 퍼지제어기법을 도입하여 수정모형의 재현성과 정확성이 우수함을 보여주었다. 한편 하도저류함수모형은 하도저류함수를 명확하게 구할 수 없는 문제점과 하도의 총유출량에서 잔유역으로부터의 유입량을 사실상 분리하기가 어려운 약점을 내포하고 있다.

본 연구에서는 위에 언급한 하도저류함수모형의 문제점을 개선하기 위하여 통합저류함수모형(ISFM)을 제안한다. ISFM의 개념은 하도추적시 입력값인 상류단의 유입량을 강우강도개념으로 환산한 등가강우강도  $r_{eqv}$ (equivalent rainfall intensity)와 잔유역의 실제 강우강도를 합한 결합강우강도를 잔유역에 내린 가상 강우로 가정한 후, 이것을 이용하여 수정저류함수모형으로 유출량을 계산한다는 점이 특징이다(그림 2. 참조).

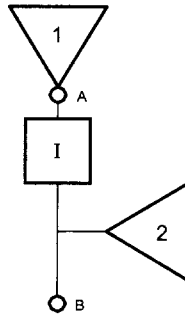
상류단 유입량에 대한 등가강우강도는 다음 식으로 계산한다.

$$r_{eqv} = \frac{3.6Q}{CA} \quad (13)$$

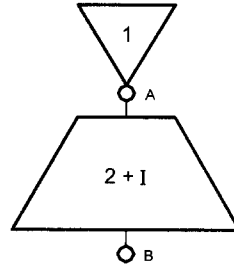
여기서  $Q$ 는 상류단 유입량( $m^3/s$ )이고(그림 2(a)의 A지점),  $C$ 는 등가강우 유출계수,  $A$ 는 잔유역 면적( $km^2$ )이다. 통합저류함수모형은 하도와 잔유역에 대하여 각각 별도로 홍수추적을 시행하지 않고 하나의 독립된 유역으로 취급하기 때문에 상류단 유입량에 대하여 별도의 하도추적을 수행할 필요가 없게 된다. ISFM을 적용하기 위하여 기존 모형의 연속방정식은 잔유역 강우에 등가강우를 합산하여 다음과 같이 수정된다.



(a) 유역현황도



(b) 기존모형



(c) 통합모형

범례	
▽	소유역
□	하도
▱	하도+ 잔유역
○	수위표

그림 2. 통합저류함수모형의 개념도

$$f(r_{ave} + r_{eqv}) - q_l = \frac{ds_l}{dt} \quad (14)$$

$$f = \frac{\int_{t_1}^{t_2} q_l dt}{\int_{t_1}^{t_2} (r_{ave} + r_{eqv}) dt} \quad (15)$$

여기서  $t_1$ 과  $t_2$ 는 수문곡선 상에서 상승부와 하강부의 유효유출고가 같은 시각을 의미하며, 이 때 사용하는 유효유출고는 일반적으로 침투유출고의 약 10~20%에 해당하는 값을 사용한다. 유출량의 계산은 식 (6)에서 유출역과 침투역의 구분을 없애고, 포화우량의 개념을 무시하면 수정저류함수모형과 같이 다음 식으로 나타낼 수 있다(이정규 등, 1994; 이창해, 1995).

$$O = \frac{A}{3.6} f_2(t) q_l + O_i \quad (16)$$

여기서  $f_2(t)$ 는 시변성 매개변수로 변동유출률이다.

다음으로, 저류함수의 매개변수  $K, P, T_1$ 을 상수로 취급하기 때문에 발생하는 문제점을 최소화하기 위해서는 유출특성이 반영될 수 있도록 매개변수에 시변성을 도입할 필요가 있다. 그러나 매개변수 모두를 시변성으로 취급하는 것은 계산과정이 복잡해지고 계산시간이나 제어효과의 측면에서 오히려 비능률적이 되는 문제점이 있으므로 본 연구에서는  $K$  만을 시변성 매개변수로 한다(이창해, 1995).

통합저류함수모형은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$s_l = K(t) q_l^P \quad (17)$$

$$f(r_{ave} + r_{eqv}) - q_l = \frac{ds_l}{dt} \quad (14)$$

$$O = \frac{A}{3.6} f_2(t) q_l + O_i \quad (16)$$

여기서 시변성 매개변수인  $f_2(t)$ 와  $K(t)$ 는 5장에서 설명될 퍼지제어기법에 의해 제어된다.

## 5. 퍼지이론의 적용

### 5.1 퍼지이론

컴퓨터가 인공지능을 가지고 인간이 원하는 바를 제대로 수행하기 위해서는 인간이 사용하는 숫자는 물론이고 애매한 표현을 처리할 수 있어야 한다. 이러한 인간의 애매한 언어나 표현을 처리할 수 있는 이론적인 바탕을 제공한 것이 퍼지이론(fuzzy theory)이다(이광형과 오길록, 1991). 퍼지이론은 Zadeh(1965)에 의해 제안되었다. Zadeh는 그의 논문 "Fuzzy Sets"에서 퍼지이론의 기초가 되는 퍼지집합에 대하여 정의하였다. 퍼지집합이란 인간사고와 같이 명확히 정의되지 않는 집합을 수학적으로 표현한 것으로 보통집합이론의 수학적 확장이라 할 수 있다. 퍼지이론은 현상의 불확실한 상태와 인간의 언어, 의미, 사고, 측정 등에 본질적으로 포함되어 있는 애매모호한(fuzzy) 표현을 수학적으로 다룰 수 있도록 집합이론의 범위를 넓혔으

며, 이 이론에 바탕을 둔 퍼지제어는 공학적으로 널리 응용되고 있다.

## 5.2 퍼지제어

주어진 규칙(rule)과 사실(fact)의 모임으로부터 논리적으로 타당한 새로운 사실(또는 규칙)을 얻어내는 과정을 추론이라 한다. 기존의 2치 논리(binary logic)에 바탕을 둔 추론방법은 매우 단순하며 그 결과가 정확하였으나 적용범위가 한정되어 있었다. Zadeh는 기존의 추론방법에 퍼지이론을 적용하여 기존의 2치 논리로는 처리할 수 없었던 추론을 자연스럽게 유도해 낼 수 있는 퍼지추론(fuzzy reasoning)이라고 하는 새로운 추론법을 발표하였다. 이처럼 퍼지추론의 기본적인 이론은 Zadeh에 의해 제시되었으나 실제 제어에의 공학적 응용은 Mamdani(1974)에 의해 시도되었다. 그는 비선형성을 가지며 동작특성이 시간에 따라 변화하는 모형 증기기관의 속도제어에 퍼지추론을 응용하여 기존의 PID(proportional integral derivative)제어에 비해 우수한 결과를 얻었다. 이것이 퍼지추론을 공학적인 분야에 응용한 최초의 사례이며 이것을 퍼지 제어(fuzzy control)라 한다. 여기서 사용된 퍼지추론법을 Mamdani의 추론이라 하며, 오늘날 퍼지제어에 가장 널리 이용되고 있는 방법 중의 하나이다.

일반적으로 퍼지제어기(fuzzy controller)는 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고 부정확하며, 불확실한 경우에 기존제어 방법들 보다 우수한 제어효과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 퍼지제어의 핵심은 일련의 언어적 형식의 제어규칙이며 여기에는 퍼지연관관계가 포함되어 있고, 퍼지합성규칙에 의해 제어입력이 형성된다. 이러한 퍼지제어기는 병렬형 제어, 논

리형 제어, 언어적 제어라는 장점을 가지고 있다. 애매한 오차입력으로부터 출력(제어입력)을 얻어내기 위한 퍼지제어기는 퍼지화도입부, 지식베이스, 의사결정논리부(추론부), 비퍼지화부로 구성되어 있으며, 각 구성요소를 약술하면 다음과 같다(이광형과 오길록, 1991).

### 5.2.1 퍼지화(fuzzification)

퍼지화란 측정된 입력변수값을 퍼지제어를 위해 적절한 퍼지값(퍼지집합)으로 바꾸는 것을 말한다. 측정된 값의 영역(range)을 그대로 퍼지변수의 영역으로 사용하기보다는, 이를 퍼지연산에 편리하도록 미리 정해놓은 입력퍼지변수의 전체집합으로 맞추어 주는 것이 편리하다. 따라서 퍼지화의 작업은 전체집합에 따라서 적절히 크기를 변환시키는 작업(scale mapping)이라 할 수 있다.

그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 횡축은 각 정보량을 퍼지화시켰을 때의 퍼지변수의 크기를 나타내며 종축은 각 퍼지변수가 속하는 정도를 나타내는 소속함수의 크기를 나타낸다. 여기서 NB(negative big), NM(negative medium), NS(negative small), ZO(zero), PS(positive small), PM(positive medium), PB(positive big)는 퍼지변수이며, 언어적 변수의 의미를 약어로 표시하는 퍼지집합의 이름이다. 소속함수는 애매한 퍼지정보량을 정량화시켜주는 함수로써, 범종형과 삼각형이 대표적이며, 두 종류의 제어효과에는 별 차이가 없는 반면에 삼각형함수가 전산화에 간편하므로 본 연구에서는 그림 3과 같은 삼각형 소속함수를 사용하였다.

### 5.2.2 지식베이스

지식베이스는 데이터베이스와 제어규칙부로 나누어

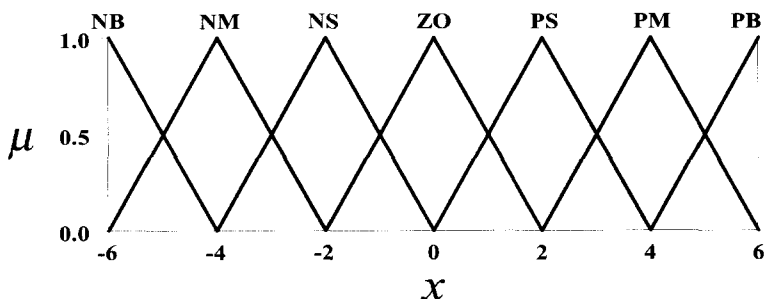


그림 3. 퍼지변수의 삼각형 소속함수



진다. 데이터베이스란 다음에 설명하는 제어규칙들의 집합으로 matrix 형태로 구성된 것을 의미한다. 제어규칙들을 설정하기 위해서는 우선 시스템의 특성을 고려해서 입력변수의 영역(range)을 몇 개로 나누게 되는데 이를 입력공간의 분할이라 한다. 일반적으로 퍼지입출력 공간의 영역분할을 하는 일정한 규칙이 있는 것은 아니고, 또한 최적의 선택규칙도 없다. 따라서 시스템의 특성에 대한 지식과 시행착오에 의해 결정하게 된다. 대개 하나의 입력변수에 대하여 7 개로 분할하면 충분하다고 알려져 있다.

### 5.2.3 제어규칙

퍼지제어를 위해서는 퍼지이론에 기초를 두고 있는 퍼지추론을 사용한다. 퍼지추론을 위한 핵심적 부분은 일련의 언어적 형식의 제어규칙이며, 여기에는 퍼지관계가 포함되어 있고 퍼지논리의 합성연산과 비퍼지화에 의해 구해진 출력치가 제어대상인 시스템 또는 모형의 제어입력이 된다.

퍼지제어의 장점은 종래의  $u = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 과 같은 관계를 수학적으로 결정해야 하는 단일 제어식이 아니고, 복수개의 if-then 형식을 가진 제어규칙으로 구성된 병렬형 제어이므로 비선형성이 크고 복잡한 플랜트의 제어에 효과적이고, 조건이 느슨하고 유연한 퍼지논리를 사용하므로 전문가의 지식을 도입하기가 용이하며, 제어규칙이 인간의 일상언어형태로 되어 있는 언어적 표현을 사용하므로 제어의 구조를 이해하기 쉽고 제어규칙의 수정이 용이하다는 것이다. 퍼지제어규칙을 구성하는데 있어서 선행되어야 할 작업은 제어의 입력으로 사용되는 상태변수와 출력인 제어입력변수를 선정하는 것이다. 퍼지제어에 사용되는 언어적 입력변수로는 상태, 상태오차, 오차의 변화량 및 오차의 누적 값 등이 있다.

유출모형의 매개변수를 제어할 때 사용할 제어입력 변수로서 본 연구에서는 상태오차와 오차의 변화량을 사용하였다. 관측유출량을  $O_m(t)$ , 계산유출량을  $O_c(t)$ 라 하면, 오차  $e(t)$ 와 오차의 변화량  $\Delta e(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$e(t) = O_c(t) - O_m(t) \quad (18)$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1) \quad (19)$$

또한, 제어출력인 변화량  $\Delta B$ 로부터 제어할 매개변수

$B(t)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B(t) = B(t-1) + \Delta B \quad (20)$$

따라서, 퍼지제어의 입출력관계는 다음과 같이 되며 이 때 입력변수  $e$ ,  $\Delta e$ 로부터 출력변수  $\Delta B$ 를 추론하는 과정에 퍼지추론이 도입된다.

$$e, \Delta e \xrightarrow{\text{fuzzy reasoning}} \Delta B \quad (21)$$

이와 같은 퍼지추론 과정에는 다음과 같은 여러 개의 제어규칙들이 포함된다.

If  $e$  is NB and  $\Delta e$  is ZO then  $\Delta B$  is PB.  
 If  $e$  is NM and  $\Delta e$  is ZO then  $\Delta B$  is PM.  
 ⋮  
 If  $e$  is ZO and  $\Delta e$  is NB then  $\Delta B$  is PB.  
 If  $e$  is ZO and  $\Delta e$  is NM then  $\Delta B$  is PM. (22)  
 ⋮  
 If  $e$  is PM and  $\Delta e$  is ZO then  $\Delta B$  is NM.  
 If  $e$  is PB and  $\Delta e$  is ZO then  $\Delta B$  is NB.

일반적으로 제어규칙은 그 추출법에 따라 도입되는 제어규칙, 퍼지변수의 형태, 추론방법 등이 달라지며, 경우에 따라서는 몇 가지 방법이 혼용되기도 하는 등, 아직 보편적이고도 명확한 이론은 정립되어 있지 않다. 그러므로 모형의 특성에 대한 이해, 제어결과와 feedback을 통한 제어규칙의 수정 및 개선 등으로 제어효과를 더욱 향상시킬 수 있을 것이다(김한섭, 1998).

본 연구에서 채택한 퍼지제어규칙은 저류함수모형에 적용했을 때 우수한 제어효과를 보인 Kosko(1992)의 제어규칙을 사용하였다(표 1.).

표 1. Kosko의 제어규칙

$e \backslash \Delta e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	NS
NS	PB	PB	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB

### 5.2.4 의사결정(퍼지추론)

퍼지제어기에서 언어적인 형태로 기술된 퍼지제어규칙을 적용하기 위해서는 논리적인 실행과정이 필요하다. 이를 퍼지추론이라고 한다. 퍼지추론방법은 크게 직접추론법, 간접추론법, 혼합추론법으로 나눌 수 있다.

본 연구에서는 다른 전자 및 기계분야와는 달리 추론은 느리지만 제어규칙의 설정이 용이하고 보편적으로 널리 사용되고 있는 직접추론법에 속하는 Mamdani 추론법(이광형과 오길록, 1991; Yager와 Filev, 1994)을 사용하였다. 이 추론법은 퍼지연관함수로 Mamdani가 제안한 minimum 연산을 이용한 퍼지합성규칙을 도입한 것이다. 추론계산식으로 각 입력변수에 대하여 대응하는 제어규칙들의 기여도(적합도)를 계산하기 위하여 다음과 같은 minimum 연산을 수행한다.

$$\mu_{z_i}(\Delta B) = \min[\mu_{X_i}(e), \mu_{Y_j}(\Delta e)] \quad (23)$$

여기서,  $X$ 는  $e$ 에 대한 퍼지집합,  $Y$ 는  $\Delta e$ 에 대한 퍼지집합이며,  $i, j$ 는 각각 퍼지변수를 나타낸다. 다음에는 각 제어규칙들을 합성하는 방법으로 다음과 같은 sup 연산을 하게 되는데, 이는 최대치를 나타내는 supreme이라는 의미이며, 이것은 결과적으로 전체 제어규칙을 나타낸다. 이것을 소속함수로 표시하면 다음 식과 같이 maximum 연산으로 표현된다.

$$\mu_z(\Delta B) = \max[\mu_{z_i}(\Delta B)] \quad (24)$$

### 5.2.5 비퍼지화(defuzzification)

5.2.4절의 추론과정에서 얻어진 결과는 퍼지집합으로 표시되므로 실제제어에 사용하기 위해서는 하나의 조정량  $\Delta B$ 를 결정하여야 한다. 이와 같이 출력부 전체 집합에서 정의된 퍼지 제어조작량을 명확한 비퍼지 제어조작량으로 변환시켜 주는 작업을 비퍼지화라 한다.

이 방법에는 최대값방법(max criterion method), 최대평균법(mean of maximum method), 무게중심법(center of area method) 등이 있다. 일반적으로 무게중심법이 다른 방법들에 비해서 우월한 성능을 보이는 경향이 있다(이광형과 오길록, 1991).

본 연구에서는 무게중심법을 사용하여 다음과 같이 조정량을 계산하였다.

$$\Delta B^* = \frac{\int \Delta B \mu_z(\Delta B) d(\Delta B)}{\int \mu_z(\Delta B) d(\Delta B)} \quad (25)$$

이런 과정을 거쳐서 결정된 조정량  $\Delta B$ 에 의하여 모형의 시변성 매개변수  $K$ 와  $f_2$ 가 각각 제어되게 된다.

## 6. 결 론

본 연구는 국내에서 강우-유출모형으로 널리 이용되고 있는 저류함수모형을 개선하였다. 기존 저류함수모형의 단점인 매개변수 산정의 부정확성과 비객관성을 개선하기 위하여 Brent법에 의한 최적매개변수를 이용하였으며, 시간에 따른 유역의 변동 특성에 적절하게 대응하기 위하여 모형의 매개변수를 시변성 매개변수로 하였으며 이의 제어에 퍼지기법을 도입함으로써 주로 수문기술자의 경험에 의존하던 매개변수 보정의 자동화 및 객관성 확보를 통해 모형의 정확성을 향상시키고자 하였다. 또한, 홍수추적시 가장 귀찮고 어려운 문제 중의 하나인 추적구간의 상류단과 하류단 사이로 유입하는 국지유입량(local inflow)의 처리 문제를 해결하기 위한 방법으로 기존의 유역모형과 하도모형을 하나의 단일모형으로 하는 통합저류함수모형(ISFM)을 제안하였다.

제안된 통합저류함수모형의 타당성을 검증하기 위하여 다음 논문에서는 국내의 하천 중 IHP 대표유역인 위천 유역과 보청천 유역에서 중소유역에 대한 모형의 적용성을 살펴보았으며, 이를 바탕으로 대유역인 남한강 유역과 낙동강 유역에서의 홍수사상을 해석함으로써 제안된 모형의 실제 홍수예경보시스템에의 적용 가능성이 검증하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: 971-1205-022-2)지원으로 수행된 연구 성과 중 일부입니다. 한국과학재단의 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 김한섭 (1998). 퍼지제어를 이용한 홍수유출량 예측. 석사학위논문, 한양대학교.
- 남궁달 (1985). "저류함수법에 의한 강우-유출모형의 변수추정." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제 18권, 제2호, pp. 175~185.
- 댐운영처 댐운영1부 (1993). 다목적댐 홍수유출해석

- 및 홍수기 저수지 운영 프로그램 해설서, 한국수자원공사.
- 심순보, 김선구, 고석구 (1992). "최적화기법에 의한 저류함수 유출모형의 자동보정." 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제12권, 제3호, pp. 127~137.
- 윤용남 (1996). 공업수문학. 청문각.
- 이광형, 오길록 (1991). 퍼지이론 및 응용-Ⅱ권:응용. 홍릉과학출판사.
- 이정규 (1994). 수자원사업에 필요한 수문설계 전산 모형 개발 - 퍼지추론의 도입 -. 국제수문개발계획 연구보고서, 건설부.
- 이정규, 이창해, 이종인 (1994). "홍수유출해석에 Fuzzy 추론의 적용성." 1994년도 학술발표회 논문집(II), 대한토목학회, pp. 279~282.
- 이창해 (1995). 시변성 매개변수를 퍼지제어하는 저류함수모형에 관한 연구. 박사학위논문, 한양대학교.
- 장욱 (1987). 저류함수모형을 이용한 유역의 확률홍수량 산정과 지역홍수빈도해석: IHP위친대표유역을 중심으로. 석사학위논문, 고려대학교.
- 建設省水文研究会 (1971). 流出計算例題集 II. 全日本建設技術協会.
- 木村俊晃 (1961a). 貯留関数による洪水流出追跡法. 建設省 土木研究所.
- 木村俊晃 (1961b). "貯留関数法(I)-貯留関数法の背景." 土木技術資料, 第3巻, 第12号, pp. 654~661.
- 木村俊晃 (1962a). "貯留関数法(II)-貯留関数法の基本的構成." 土木技術資料, 第4巻, 第1号, pp. 41~51.
- 木村俊晃 (1962b). "貯留関数法(IV-2)." 土木技術資料, 第4巻, 第7号, pp. 297~303.
- 杉山博信, 角屋睦 (1984). "山腹斜面における雨水の流下形態." 農業土木學會 論文集, 第114号, pp. 15~20.
- 永井明博, 角屋睦 (1987). "貯留関数モデルの準最適同定法." 農業土木學會論文集, 第131号, pp. 39~42.
- 青木佑久, 臼井博美, 金箱貞 (1976). "貯留関数法における遅滞時間 T1の一推定法." 土木技術資料, 第18巻, 第6号, pp. 309~313.
- 平松和昭, 田中宏平, 四ヶ所四男美, 瀬口昌洋 (1987). "貯留形モデルの非線型フィルタによる同定法と洪水解析 - 山地小流域の洪水流出に関する確率システム理論的研究(II)." 農業土木學會 論文集, 第131号, pp. 33~38.
- Hendrickson, J.D., and Sorooshian, S. (1988). "Comparison of Newton-type and direct search algorithms for calibration of conceptual rainfall-runoff models." *Water Resources Research*, Vol. 24, pp. 691~700.
- Hooke, R., and Jeeves, T.A. (1961). "Direct search solutions of numerical and statistical problems." *J. Assoc. Comput. Math.*, Vol. 8, No. 2, pp. 212~229.
- Kosko, B. (1992). *Neural Networks and Fuzzy Systems*. Prentice Hall.
- Mamdani, E.H. (1974). "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant." *IEEE Proc. Control & Science*, Vol. 121, No. 12, pp. 1585~1588.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., and Vetterling, W.T. (1986). *Numerical Recipes*. Cambridge University Press.
- Rao, S.S. (1984). *Optimization Theory and Application*. John Wiley & Sons.
- Yager, R.R., and Filev, D.P. (1994). "On a flexible structure for fuzzy systems models." *Fuzzy Sets, Neural Networks, and Soft Computing*, Edited by Yager, R.R., and Zadeh, L.A., Van Nostrand Reinhold, pp. 1~28.
- Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy Sets." *Information & Control*, Vol. 8, pp. 338~353.

(논문번호:00-053/접수:2000.08.14/심사완료:2000.10.30)