

## 저류함수법의 시변성 매개변수 조정에 퍼지이론 도입에 관한 연구

### A Study on the Introduction of Fuzzy Theory to the Adjustment of Time-Variant Parameter of Storage Function Method

이 정 규\* · 이 창 해\*\*  
Lee, Jong Kyu · Lee, Chang Hae

---

#### Abstract

The parameters of the storage function model (SFM) are taken as constants, while they have different values every rainfall events and time of the runoff. Therefore, the results of the SFM show remarkably large errors in general. In this study, the modified storage function model (MSFM), in which the time variant parameters are introduced, is proposed to improve the SFM which is a conceptual rainfall-runoff model. The fuzzy reasoning is applied as a real-time control method of the time-variant parameters of the proposed model. The applicability of the MSFM was examined in the Bochung river, a tributary of Geum river in Korea. The pattern of predicted outflow hydrograph and peak outflow by the MSFM with fuzzy control are much similar to the measured values in comparison with the results produced by the SFM.

---

#### 요 지

저류함수모형의 매개변수는 호우사상별, 유출시간별 변화를 반영하지 못하는 상수값을 가지므로 일반적으로 모형의 계산결과에 오차가 크게 나타난다. 본 연구에서 강우-유출의 개념적 모형인 저류함수모형을 개선하여 시변성 매개변수를 도입한 수정저류함수모형을 제안하였다. 제안된 모형은 시변성 매개변수의 실시간 제어방법으로 퍼지추론을 도입하였으며, 모형의 적용타당성은 금강수계의 보청천유역에 대한 호우사상을 이용하여 검토되었다. 퍼지제어에 의한 수정저류함수모형으로 예측된 유출수문곡선의 형태와 첨두유량은 기존모형의 결과보다 관측치에 잘 일치하였다.

---

\* 한양대학교 토목공학과 교수  
\*\* 대전대학교 환경공학과 전임강사

## 1. 서 론

홍수로 인한 재해규모는 나라의 산업시설과 경제 규모가 커지고 생활수준이 향상됨에 따라 점점 커지는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 홍수로 인한 피해를 줄이기 위해서는 치수시설을 확충하여 홍수 피해를 줄이는 방법외에도 홍수예경보의 정확성을 높여서 홍수재난에 미리 대처하는 것 또한 홍수피해를 경감시키는 적절한 방법중의 하나이다. 그러나 강우-유출현상에서 잘 알 수 있는 바와 같이 수문현상은 그 자체가 대단히 복잡한 복합적인 요소를 내포하고 있기 때문에 수문현상이 가지는 비선형성, 변동성, 시변성, 동역학적인 특성들을 모두 포함시켜서 물 순환과정을 모형화하기는 현실적으로 거의 불가능하기 때문에(Singh, 1988), 현재 사용중인 강우-유출모형들은 아주 단순화된 형태를 취하고 있다.

일반적으로 강우-유출모형은 수리학적 모형과 수문학적 모형으로 나눌 수 있다. 수리학적모형은 흐름의 동역학적 특성을 비교적 정확히 나타낼 수 있기 때문에(Viessman 등, 1977) 수리학적모형을 이용하여 홍수예보에 적용하려는 연구가 시도되고 있다(홍수자료 시스템의 구축, 1994; 이상호와 이길성, 1994; 지홍기와 박기호, 1994; 김원 등, 1995). 그러나 수리학적 모형은 세굴과 퇴적으로 인한 하도 횡단면의 변화, 정확한 조도계수의 추정, 하류단 경계조건 설정의 부정확성 등으로 아직은 많은 문제점이 남아 있기 때문에 실제 홍수예보에 적용하기에는 좀더 시간이 필요하리라 생각된다. 수문학적 모형은 수문과정중에서 직접적으로 강우-유출특성에 영향을 미치는 인자만을 선정하여 강우사상에 대하여 단기간의 수문곡선을 모의하는 모형이다. 현재 국내 하천의 홍수예경보시스템의 운영과 다목적댐의 홍수조절관리에 수문학적 모형인 저류함수모형을 사용해 오고 있다. 그러나 강우사상별로 분석해 본 결과 관측치와 이 모형에 의한 추정결과와는 상당한 오차를 보여 주고 있다.

개념적 모형인 저류함수모형의 가장 큰 문제점은 모형의 매개변수들이 강우사상별로 시변성(time-variant)인 특성을 가지고 있는데 반하여 이들을

상수로 취급하고 있으며, 현실적으로 적절한 매개변수를 추정하는데도 경험이 풍부한 수문기술자의 판단이 요구되고 있다. 또한 지금까지는 시변성인 매개변수를 효과적으로 추적하여 제어(control)할 수 있는 적절한 방법이 없었던 것도 문제점의 하나였다고 생각된다.

본 연구에서 도입하고자 하는 퍼지이론은 아직은 도입단계이므로 한 마디로 정의하기는 어려우나, 자연현상과 인간의 언어, 의미, 사고, 측정 등에 본질적으로 포함되어 있는 애매모호(fuzzy)한 표현을 인간의 사고 능력에 가깝게 수학적으로 다룰 수 있도록 제안된 이론이다. 수자원분야의 모형은 모형자체의 단순함과 부적절한 매개변수 값과 입력자료의 오차 등으로 인하여 모형에 의한 계산결과의 정확도가 떨어질 때가 많다. 이것은 매개변수의 특성상 상당한 변동성이 내포되고 있음에도 불구하고 이들을 상수로 취급하거나 단순하게 정의하여 사용하기 때문에 정확도가 떨어지므로 수자원 분야에도 퍼지이론을 도입하여 모형의 정확도를 향상시킬 필요성이 제기된다. 이러한 개념을 바탕으로 수자원 분야에 퍼지이론을 도입한 몇몇 연구(藤田, 1987; 小尻 등, 1987; 日向 등, 1989; Fujita와 Zhu, 1992; 高須 등, 1993; 심재현, 1992)가 있었다.

기존의 저류함수모형은 포화우량을 기준으로 획일적으로 유출률이 변화한다고 보는 점과, 저류고에 따른 지체시간의 변화에 병행되는 저류상수의 변화를 인정하지 않는 점, 그리고 유역에서의 강우 중심이 고려되지 않는 점 등으로 인해 많은 오차를 보이고 있다. 그러나 현재 대부분의 홍수예경보에 사용되고 있다는 현실적인 면을 고려하여, 가급적 모형의 기본형태를 유지하면서도 개선의 효과를 얻기 위하여 매개변수의 시간적 변화를 고려하는 것이 적절하다고 판단된다. 즉 기존의 저류함수모형에서 상수로 다루고 있는 매개변수를 본 연구에서는 시변성으로 취급한다. 시변성 매개변수의 제어 방법으로 퍼지추론법을 도입하여 예측결과의 정확도를 향상시키고, 경험이 풍부한 수문기술자의 판단을 필요로 하는 운용상의 문제점을 해결하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 저류함수모형의 검토 및 보완

기존의 저류함수모형을 유역홍수추적을 중심으로 검토하면 다음과 같다(建設省水文硏究會[일본], 1971).

지배방정식은 유출량과 저류량의 관계를 나타내는 식 (1)과 연속방정식을 나타내는 식 (2)로 구성된다.

$$S_t = KO_t^P \quad (1)$$

$$\frac{1}{3.6} fr_{avr} A - O_t = \frac{dS_t}{dt} \quad (2)$$

여기서,  $K$ 와  $P$ 는 저류함수의 매개변수이고,  $f$ 는 유입계수이며,  $r_{avr}$ 는 시간당 유역평균강우량(mm/hr),  $A$ 는 유역면적(km<sup>2</sup>),  $O_t$ 은  $O_t(t) = O(t+T_t)$ 로서 유역의 지체시간  $T_t$ 을 고려한 유역으로부터의 직접유출량(m<sup>3</sup>/sec),  $S_t$ 은 유역저류량(m<sup>3</sup>)이다.

그러나 실제의 유출계산에서는 단위면적당의 값으로 환산한 식 (3)과 (4)로 계산하고 식 (5)로 최종유출량을 구한다.

$$S_t = Kq_t^P \quad (3)$$

$$fr_{avr} - q_t = \frac{dS_t}{dt} \quad (4)$$

$$O = \frac{A}{3.6} [f q_t + (1-f_1) q_{ss,t}] + O_t \quad (5)$$

여기서,  $q_t$ 는 유효유출고(mm/hr),  $s_t$ 는 유역저류고(mm),  $f_1$ 은 초기유출률이고  $q_{ss,t}$ 은 포화점 이후의 우량으로 계산한 침투역에서의 유출량,  $O_t$ 는 기저유량(m<sup>3</sup>/sec)이다. 즉 포화점 이전에는 유출역의 유출에  $f_1$ 배하여 유출이 발생되고, 포화점 이후에는 침투역의 유출량을  $(1-f_1)$ 으로 곱하여 유출역과 침투역의 유출량을 중첩하는 것에 해당하며(建設省水文硏究會, 1971), 그림 1과 같이 유출률과 유출면적이 시간적으로 변화하는 것으로 구성되어 있다. 이때 식 (3)과 (4)의 매개변수  $K$ 와  $P$ 는 상수로 취급하고 있으며 식 (1)과 (2)의 매개변수와 값이 다르게 된다.

기존의 매개변수 결정방법은 일본 利根川유역의 경험식을 사용하는 것과 기왕의 수문자료를 분석하는 해석적 방법이 있다. 해석적 방법은 지체시간을 여러가지로 가정하고 직접유출고와 저류고를 계산하여 도시한후 시각적으로 비교하여 저류상수를 결정하고,  $f_1$ 과  $R_{ss}$ 는 계산과 실측유출고의 누가치로 누가곡선을 그려 육안에 의해 주관적으로 결정하여 사용해 왔다.

본 연구에서는 저류상수는 Brent방법(Press 등, 1986)과 회귀분석법을 사용해 상관계수가 최대가 되는 값으로 결정했으며,  $f_1$ 과  $R_{ss}$ 는 2차원 Brent 방법을 사용하여 계산치와 관측치의 오차가 최소가 되는 값으로 결정했다. 이 방법은 그림을 그리는

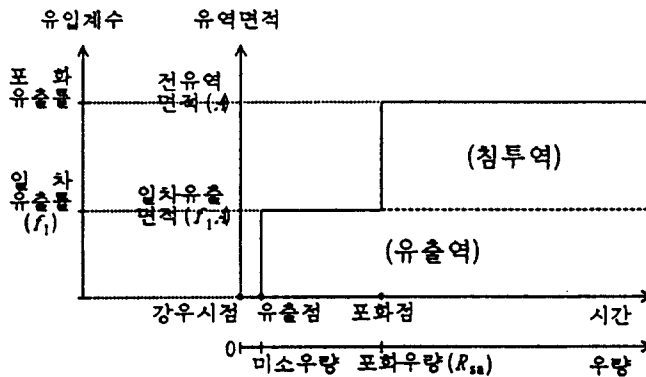


그림 1. 유출률과 유출면적의 시간적 변화

노력과 주관성을 배제하는 외에도 보다 섬세하고 정확한 결과를 얻을 수 있는 객관적인 방법으로 사료된다(이창해, 1995).

기존의 저류함수모형은 수문자료와 매개변수의 불확실성을 제외하고도, 다음과 같은 모형자체의 문제점을 내포하고 있다고 생각된다(이정규 등, 1994).

① 유효우량을 산정하는 방법으로 그림 1에서 보는 바와 같이 일차유출률과 포화우량의 개념을 사용하고 있는데, 결과적으로 유출률을 포화우량 전 후시점으로 구분하여 일정한 값으로 사용하고 있다. 이것은 유역의 손실을 효과적으로 표현하고 있다고 볼 수 없다.

② 선행강우에 의한 토양의 함수율에 따른 유출 구조의 상이함이 고려되지 않는다.

③ 유출역과 침투역의 유출고는 저류함수에 의해 비선형성을 가지는데, 식 (5)는 선형에만 가능한 중첩을 이용하여 유출을 산정하는 모순을 가지고 있다.

④ 유역의 저류상태에 따른 지체시간의 변화가 고려되지 않는다.

⑤ 지체시간의 변화에 따른 저류매개변수의 변화가 고려되지 않는다.

⑥ 평균강우량을 사용하는 집중형 모형이므로 강우중심의 공간적 위치에 따른 유출형태의 상이함이 고려되지 않는다.

문제점 ①과 ②, ③은 일차유출률과 포화우량의 개념을 사용하기 때문에 발생한 문제라 생각된다. 그러므로 이러한 문제들을 해결하기 위하여는 새로운 개념의 유출률의 도입이 필요하다.

저류상태에 따라 유역저류고는 달라지며, Manning의 유속공식을 생각하면 유속은 수심에 따라 변화하게 된다. 그러므로 저류고에 따라 유속이 달라지기 때문에 지체시간의 변화는 당연히 예상된다(문제점 ④). 이와 마찬가지로 식 (3)의 저류고와 유출고의 관계도 변할 것이므로  $K$ 와  $P$ 의 값도 유역의 저류상태에 따라 변화할 것으로 예상된다(문제점 ⑤). 그러므로  $K$ 와  $P$ ,  $T_1$ 은 저류고에 따라 시간적으로 변하는 시변성 매개변수로 취급하는 것이 타당하다고 생각된다.

앞에서 지적한 기존 저류함수모형의 문제점을 해

결하기 위하여 다음과 같은 수정 저류함수모형을 제안한다.

문제점 ①, ②, ③은 유효우량 또는 유효유출고에 해당하는 문제로 이를 해결하기 위해 연속방정식에 약간의 수정을 가하도록 한다. 즉 식 (4)에 유입계수  $f$ 를 도입하여 식 (6)을 사용한다.  $f$ 는 기왕의 강우-유출자료를 이용하여 식 (7)로부터 구할 수 있다.

$$f r_{\text{eff}} - q_t = \frac{ds_t}{dt} \quad (6)$$

$$f = \int_{t_1}^{t_2} O_t dt / \int_{t_1}^{t_2} I dt \quad (7)$$

여기서,  $t_1$ 과  $t_2$ 는 수문곡선 상에서 상승부와 하강부의 유효유출고가 같은 시각을 의미하며, 이때의 유효유출고는 일반적으로 침투유출고의 약 10~20%에 해당하는 값을 사용한다.

이러한 개념은 유효우량을 평균유출률에 해당하는 상수인 유입계수와 우량의 곱으로 표시한 것이다.

식 (5)는 유출역과 침투역의 구분을 없애고 강우-유출관계를 고려하여 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$O = \frac{A}{3.6} f_2 q_t + O_t \quad (8)$$

여기서,  $f_2$ 는 지금까지의 일차유출률  $f_1$ 과는 다른 개념의 유출률로서 식 (7)의  $f$ 와 함께 어우러져 유출률의 시간적 변화를 나타내는 것으로,  $f_2$ 를 변동유출률이라 한다(이정규 등, 1994). 그리고  $f_2$ 에 의해 유출이 제어되므로, 식 (6)에서 사용되는  $f$ 는 호우의 초기에만 유출에 영향을 미치게되어 홍수예정보의 주요 관심 대상인 침투유출에는  $f$ 의 영향은 무시될 수 있다.

문제점 ④와 ⑤는 저류함수에 관한 매개변수인  $K$ ,  $P$ ,  $T_1$ 의 시간적 변화에 관한 것으로 매개변수를 시간의 함수, 즉 시변성으로 취급하는 것이 타당할 것이다. 그러나 모든 매개변수를 시변성으로 처리

할 필요는 없다. 왜냐하면 이들 매개변수는 저류함수식에 속하는 것들로서 상호의존적인 효과가 발생될 수 있으며, 시변성매개변수가 많아질수록 이들의 제어(control)에 긴 연산시간이 필요하기 때문이다.

그러므로  $K, P, T_i$ 을 시변성 매개변수로 취급하는데 있어서, 어느 매개변수를 시변성매개변수로 취급할 것인가를 결정하여야 한다.

우선  $P$ 를 살펴보면, 식 (3)과 같이 유출고와 저류고는 지수함수의 형태를 가지고 있다. 따라서 그림 2와 같이 유출고가 1보다 클 경우  $P$ 가 증가함에 따라 저류고가 증가하지만 유출고가 1보다 작을 경우에는  $P$ 가 증가함에 따라 저류고가 감소하는 현상이 나타난다. 그러므로  $P$ 를 시변성으로 취급하여서는 효과적인 제어가 어렵다.

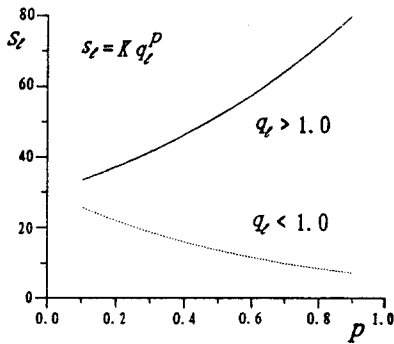


그림 2.  $P$ 의 변화에 따른 저류고변화

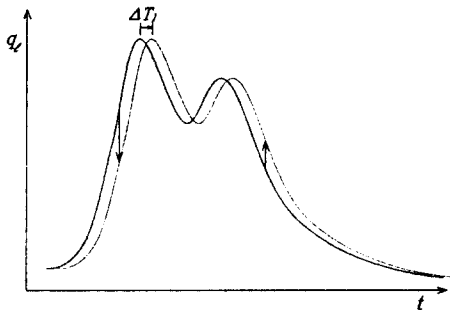


그림 3.  $T_i$ 의 변화에 따른 유출고변화

한편,  $T_i$ 에 대해 검토해 보면, 그림 3과 같이  $T_i$ 의 경우 수문곡선의 상승부에서는  $T_i$ 을 증가시키면

수문곡선의 종거는 작아지고 하강부에서는 수문곡선의 종거는 커진다. 그러므로 수문곡선의 상승부와 하강부에서  $T_i$ 의 제어결과는 반대로 나타나며,  $T_i$ 을 시변성으로 할 경우 연산프로그램에서 시간 step을 바꾸는 결과가 되어 지체시키는 과정에서 생기는 강우의 보간에 문제가 발생된다. 그리고 그림 3에서 보는 바와 같이  $T_i$ 에 의한 수문곡선 상의 수평적 이동은  $K$ 로 인한 상하로의 이동과 같은 효과를 보이므로, 저류함수의 제어는  $K$ 만을 시변성 매개변수로 하여도 충분할 것이다.

그러므로 저류함수의 매개변수 중에서 시변성매개변수로 처리되는 매개변수는  $K$ 로 결정한다.

이상의 수정저류함수모형의 특징을 정리하면 다음과 같다.

- ① 식 (4)와 (5)를 식 (6)과 (8)로 대체한다.
- ② 저류함수에서  $K$ 를 시변성매개변수로 취급한다.
- ③ 변동유출률  $f_2$ 를 도입하여 이것을 시변성매개변수로 취급한다.
- ④ 시변성매개변수  $K$ 와  $f_2$ 는 퍼지추론에 의해 제어된다.
- ⑤ 관측치는 유역내의 모든 자연현상이 복합적으로 작용된 결과이므로 계산치가 퍼지제어(fuzzy control)에 의하여 관측치에 일치하게 되면 문제점 ⑥도 자연스럽게 해소될 것이다.

기존의 저류함수법을 유역의 대표매개변수로서 계산하면 매우 큰 오차를 나타내므로, 실무에서는 수문학적 지식과 경험이 풍부한 수문기술자가 computer 화면에 출력된 계산치와 관측치를 비교하여 매개변수를 직관적으로 애매하게 보정하여 사용해오고 있다(남강 다목적댐 홍수유출 모형 개선, 1993). 그러므로 이러한 애매성에 적합한 퍼지이론의 도입은 수문기술자의 지식과 경험을 대신할 수 있으며, 본 연구에서 제안된 수정저류함수법의 필요조건이기도 하다.

### 3. 퍼지추론

퍼지이론은 Zadeh(1965)가 소속함수(member-ship function)개념을 도입하여 자연현상에 대한 표현이나 인지능력을 인간의 사고능력에 가깝도록

애매하고 다양한 표현(이것은 현상 자체가 애매하다는 의미가 아니고 동일한 현상에 대한 표현이 개인에 따라 다르다는 의미이다)을 해결하려는 방법으로 데카르트적 방법론 대신에 자연현상에 대한 다양한 인지상태를 인정하고 정량화하여 논리적으로 전개하려는 이론이다. 수문현상의 복잡성과 수문자료 및 매개변수의 다양한 변동특성을 표현하기에는 기존의 방법론으로는 한계에 이르게 되므로, 인간이 주관적으로 사고하고 다양하게 판단하는 형태를 그대로 표현하는 퍼지이론에 의한 추론 즉 퍼지추론의 도입이 필요하게 된다.

저류함수법을 예로 들어, 관측치와 예측치의 오차 및 오차의 변화율과 매개변수의 상관관계를 함수식으로 표현할 수 있다면 시변성매개변수의 결정은 간단하겠지만 현실적으로 이러한 함수관계를 유추해 내기는 쉽지않다. 그러므로 다음과 같은 퍼지추론(Mamdani, 1977)을 도입한다.

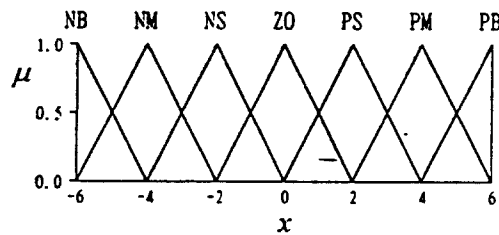


그림 4. 퍼지변수의 소속함수

그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 횡축은 각 정보량을 퍼지화 시켰을 때의 퍼지변수의 크기를 나타내며, 종축은 각 퍼지변수가 속하는 정도를 나타내는 소속함수의 크기를 나타낸다. 여기서 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB 등은 퍼지변수(fuzzy variable)이며, 언어적 변수의 의미를 약어로 표시하는 퍼지집합의 이름이다(이광형과 오길록, 1991). 또한, 7개의 퍼지변수는 NB(Negative Big), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), ZO(Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big)의 퍼지상태를 나타낸다. 소속함수는 애매한 퍼지정보량을 정량화시켜 주는 함수로써, 범종형과 삼각형이 대표적인데, 두 종류의 제어효과는 별 차이가 없는 반면에 삼각형 함수가 전산화에 간편하므로, 본 연

구에서는 그림 4와 같은 삼각형 소속함수를 사용하였다.

한편, 퍼지추론의 과정에는 표 1과 같이 여러 개의 제어규칙들이 포함된다. 제어규칙들 중에서 제1열 제4행을 나타내는 "If  $e$  is NB and  $\Delta e$  is ZO then  $\Delta B$  is PB"의 의미는 "오차가 음으로 매우 크고 오차의 변화량이 0에 가까우면 매개변수 조정량의 변화량은 양으로 크게 한다"라는 것으로 이러한 규칙이 49개로 구성된 것이다.

본 연구에서 퍼지추론을 도입하는 과정을 설명하면, 저류함수모형에서 관측유출량을  $O_m(t)$ , 계산유출량을  $O_c(t)$ 라 하면, 오차  $e(t)$ 와 오차의 변화량  $\Delta e(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$e(t) = O_c(t) - O_m(t) \quad (9)$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1) \quad (10)$$

표 1. 제어규칙(control rules)의 예

$e \backslash \Delta e$	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

그리고 퍼지추론의 출력인 변화량  $\Delta B$ 로부터 제어할 매개변수를  $B(t)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B(t) = B(t-1) + \Delta B \quad (11)$$

따라서 식 (12)와 같이 퍼지추론의 입력변수  $e$ ,  $\Delta e$ 로부터 출력변수  $\Delta B$ 를 추론하는 과정에 퍼지추론이 도입되며, 이 과정을 그림 5에서 쉽게 알 수 있다.

$$e, \Delta e \longrightarrow \Delta B \quad (12)$$

여기서 퍼지추론의 출력으로 매개변수의 변화량을 사용하는 방식을 제어계산 알고리즘에서는 속도형이라 부른다.  $B(t)$ 를 직접 후건부(consequent)의 변수로도 사용할 수 있으나, 그럴 경우 전건부(antecedent)의 변수  $\Delta e(t)$ 의 적분치를 사용할 필요가 있고, 계산이 복잡해진다. 반면에 속도형을 도입하면 제어규칙(control rule)수가 적어도 되는 이점이 있어서 많이 사용된다.

식 (3), (6) 및 (8)로 구성된 수정 저류함수모형에서  $K$ 와  $f_2$ 의 퍼지제어 입력치인  $e$ 는 식 (9) 대신에 다음과 같이 식 (13)과 (14)로 각각 다르게 계산된다.

$$e_k = q_i = \frac{q_m}{f_2} \quad (13)$$

$$e_{f_2} = O - O_m \quad (14)$$

여기서,  $q_m$ 과  $O_m$ 은 각각 직접유출고와 유출량의 관측치에 해당한다.  $\Delta e$ 도 시변성매개변수에 따라 별도로 계산된다. 한편 퍼지제어의 입력변수인  $e$ 와  $\Delta e$ 는 scale mapping작업이 필요하며, scale factor를 사용하여 변환하게 된다. 이들 scale factor의 값을 결정하는 방법이 이론적으로 나타나 있지 않으므로 시행착오에 의해 결정되는 것이 일반적이다 (이창해, 1995). 수정저류함수모형에 퍼지제어를 도입하는 흐름도는 그림 6과 같으며 scale mapping이 도입되는 단계 또한 포함되어 나타내져 있다.

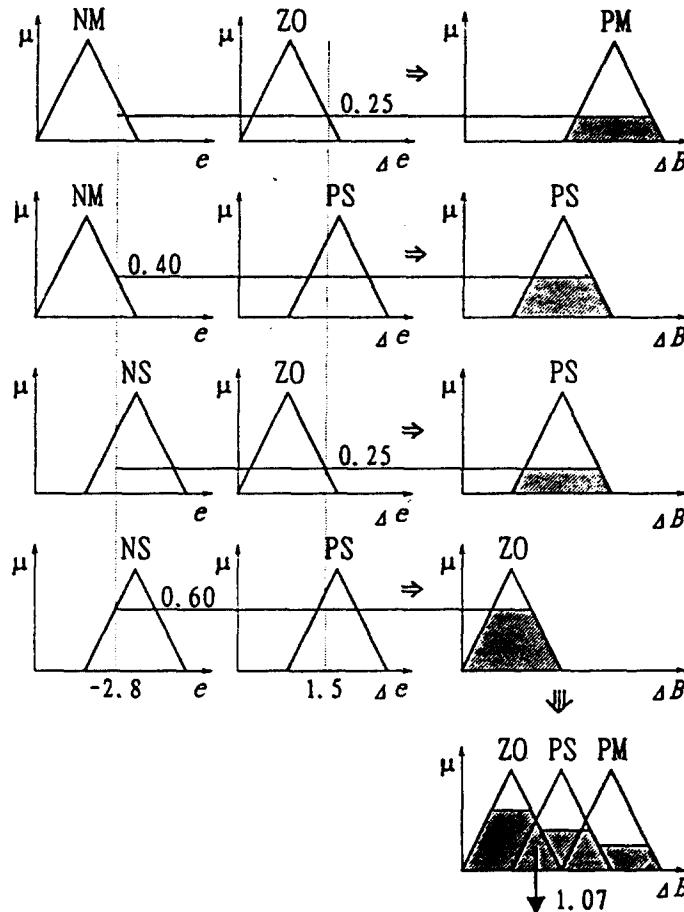


그림 5. Mamdani의 퍼지추론

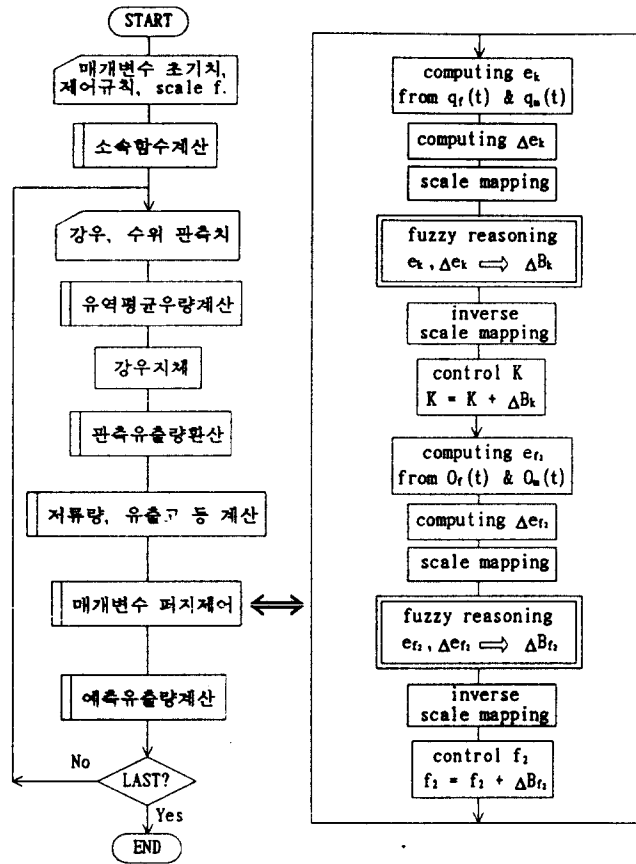


그림 6. 퍼지제어를 유역모형에 도입하는 흐름도

#### 4. 홍수사상에의 적용 및 분석

본 연구에서 제안된 방법의 적용은, IHP 수문조사사업의 대표유역으로 금강수계인 보청천유역(기대수위표지점, 346.53km<sup>2</sup>)의 1992년도 주요 호우사상(국제수문개발계획 연구보고서, 1992)에 대하여, 기존의 저류함수법에 의한 홍수유출해석과 수정저류함수법에 퍼지추론을 도입하여 4시간(lead time)의 홍수예보를 수행하였다.

각 호우사상별로 최적매개변수결정법을 사용하였으며, 그 결과를 표 2에 정리하였다. 그리고 최적매개변수 결정법과 퍼지추론에 의한 시변성매개변수의 제어를 도입한 유역의 수정저류함수모형의 타당성을 검토하기 위해 다음과 같은 4가지의 방

법을 대상유역에 대해 호우사상별로 각각 적용하였다.

(1) 각 호우사상별의 최적매개변수를 기존의 저류함수법에 적용[최적매개변수 + 저류함수모형]

(2) 유역의 대표매개변수를 기존의 저류함수법에 적용[대표매개변수 + 저류함수모형]

(3) 대표매개변수를 퍼지추론에 의하지 않고 수정저류함수법에 적용[대표매개변수 + 수정저류함수모형]

(4) 수정저류함수법에 퍼지추론을 적용[퍼지추론 + 수정저류함수모형]

적용결과는 표 2에서 보는 바와 같이 최적매개변수가 강우사상별로 현저한 차이를 보이고 있는데, 이것은 기존의 저류함수법의 문제점으로 지적될 수 있다. 대표매개변수와 사상별 최적매개변수



의 차이때문에 적용에 있어 수문기술자의 경험과 직관에 의한 매개변수 수정이 불가피하게 된다.

그림 7은 표 2의 5개 호우사상중 3개 호우사상을 선정하여 4가지 방법으로 나누어 적용해본 결과이다. 그림 7에서 (1)의 경우는 상당히 우수한 결과를 보이고 있으며, (2)의 경우는 특히 첨두홍수량에 상당한 오차를 보이고 있어 매개변수의 조정의 필요성을 나타내고 있다. (3)의 경우는 매개변수의 값이 적절하지 못하기 때문에 상당한 오차가 발생하는 것으로 추정된다. 한편 (4)의 경우는 위의 3가지 경우와 비교하여 비교적 좋은 결과를 나타내고 있으므로 수정 저류함수모형에 퍼지추론 방법을 적용하는 것이 타당하다는 것을 보여주고 있다.

표 2. 보청천 기대수위표지점의 1992년 강우사상별 최적매개변수

매개변수 강우사상	T <sub>i</sub>	K	P	R	f <sub>i</sub>	R <sub>m</sub>	f
7월 12일	4.3336	17.438	.41260	.9720	.10000	46.486	.29060
7월 16일	2.5661	23.183	.37247	.9925	.49440	42.412	.67845
8월 14일	5.7123	26.165	.99807	.9971	.23236	52.776	.23767
8월 24일	3.8629	21.555	.63467	.9979	.17617	46.656	.38135
9월 24일	5.7001	30.128	.46661	.9985	.29854	44.387	.56668
대표매개변수 (평균치)	4.4350	23.694	.57688	.9916	.26029	46.543	.43095

각 적용방법별로 계산된 유출수문곡선과 관측된 유출수문곡선과의 적합도를 검토해 보기 위해, RMSE를 관측최대유량으로 나누어 무차원화 시킨 다음과 같은 NRMSE (non-dimensional root mean square error)를 구하였다.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Q_j - Q_j)^2}}{Q_{max}} \quad (15)$$

여기서, n은 자료수, O<sub>j</sub>는 계산유출량, Q<sub>j</sub>는 관측 유출량 Q<sub>max</sub>는 관측된 첨두유출량이다.

한편, 수문곡선의 형태와 함께 홍수수문곡선에서는 첨두유량과 첨두유량의 발생시각이 홍수예보의 관점에서 중요한 의미를 가진다. 그러므로 NRMSE외에 첨두유량과 첨두발생시각의 관측치와

계산치 간의 비교기준으로 다음과 같은 식을 사용한다(Yen, 1982).

$$E_{Q_p} = \frac{O_p - Q_p}{Q_p} \quad (16)$$

여기서, E<sub>Q<sub>p</sub></sub>는 첨두유량의 상대오차, O<sub>p</sub>는 계산첨두유량, Q<sub>p</sub>는 관측첨두유량이다.

표 3은 각 적용방법으로부터 구한 유출수문곡선이 관측수문곡선의 형태를 얼마나 잘 재현하는가를 판단하는 기준인 NRMSE를 식 (15)로 계산하여 정리한 것이다.

표 3. 보청천유역의 유역 적용방법별 NRMSE

적용방법 호우사상	(1)	(2)	(3)	(4)
	최적매개변수 기준모형	대표매개변수 기준모형	대표매개변수 수정모형	퍼지제어 수정모형
7월 12일	0.1241	0.2377	0.0747	0.0612
7월 16일	0.0487	0.2000	0.1372	0.1288
8월 14일	0.0611	0.1521	0.0473	0.0404
8월 24일	0.0400	0.0883	0.0842	0.0709
9월 24일	0.0298	0.0571	0.0891	0.0594
평균	0.0607	0.1470	0.0865	0.0721

여기서 적용방법 (1)이 가장 좋은 결과를 보이고 있는데 이것은 최적매개변수 결정법의 타당성을 입증하는 것이다. 그리고 적용방법 (3)과 (4)는 적용방법 (2)보다는 우수한 결과를 나타내고 있지만 적용방법 (1)보다는 못하였다. 홍수예경보의 측면에서는 첨두유량을 정확하게 예측하는 것이 가장 중요한 일이라고 볼수 있다.

표 4는 첨두유량의 예측정도를 보여주는 E<sub>Q<sub>p</sub></sub>의 계산결과이다.

표 4. 보청천유역의 유역 적용방법별 E<sub>Q<sub>p</sub></sub>

적용방법 호우사상	(1)	(2)	(3)	(4)
	최적매개변수 기준모형	대표매개변수 기준모형	대표매개변수 수정모형	퍼지제어 수정모형
7월 12일	0.3988	0.6920	-0.0370	0.0181
7월 16일	0.1153	-0.3930	-0.1872	0.0405
8월 14일	0.0156	0.3294	-0.0329	0.0064
8월 24일	0.1577	0.3268	-0.1006	0.0216
9월 24일	0.0884	0.1860	-0.2602	-0.0703
절대치평균	0.1552	0.3854	0.1236	0.0314

표 4를 살펴보면 매개변수를 피지제어한 수정저류함수모형(적용방법(4))의 결과가 가장 우수하게 나타났으며 다음으로 적용방법 (3), (1), (2)의

순서로 침투유량의 예측정도가 떨어짐을 확인할 수 있었다.

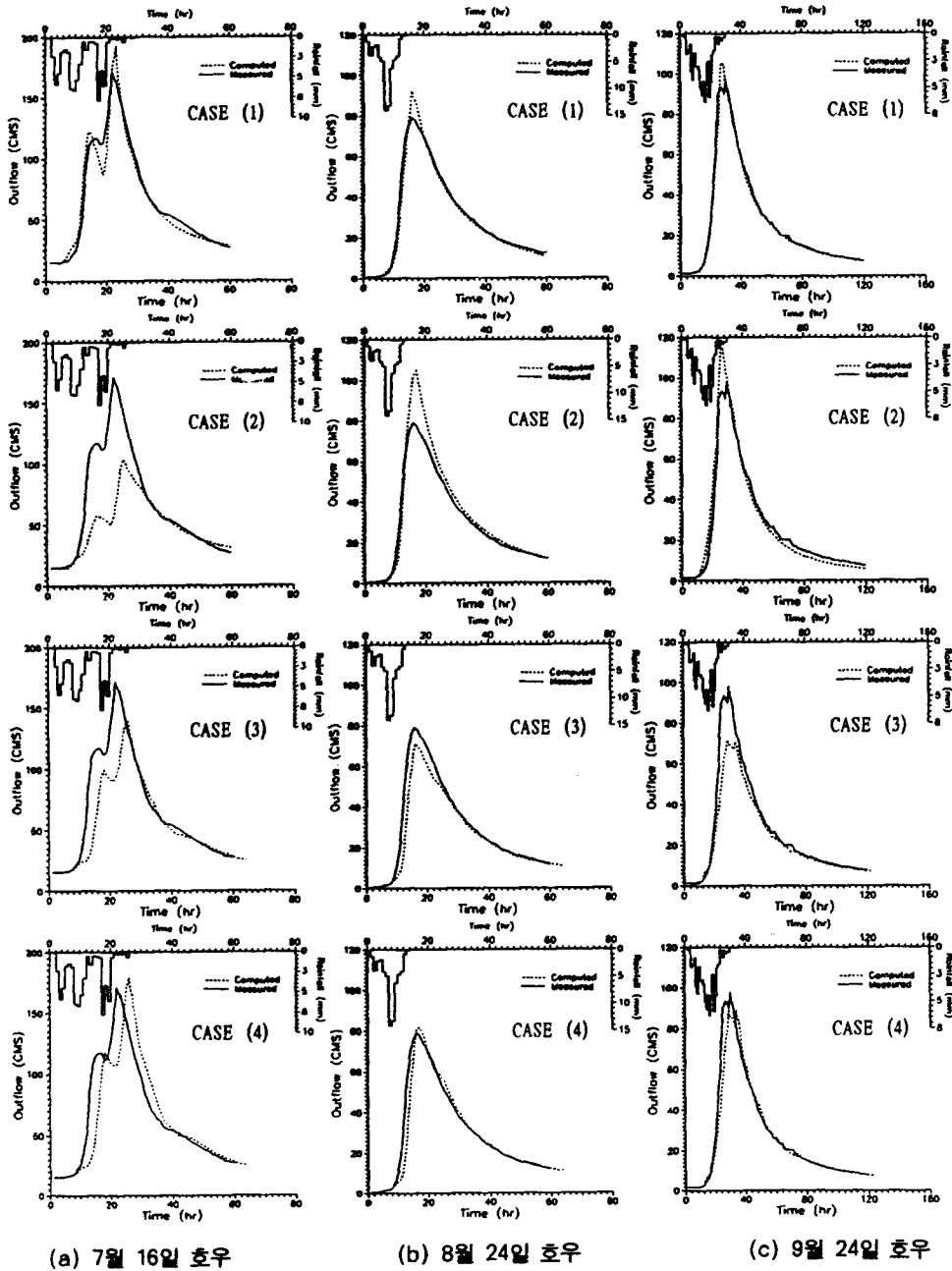


그림 7. 보청천유역의 1992년도 주요호우사상과 적용방법에 따른 유출수문곡선  
 Case (1) 최적매개변수 + 저류함수모형, Case (2) 대표매개변수 + 저류함수모형,  
 Case (3) 대표매개변수 + 수정저류함수모형, Case (4) 피지추론 + 수정저류함수모형

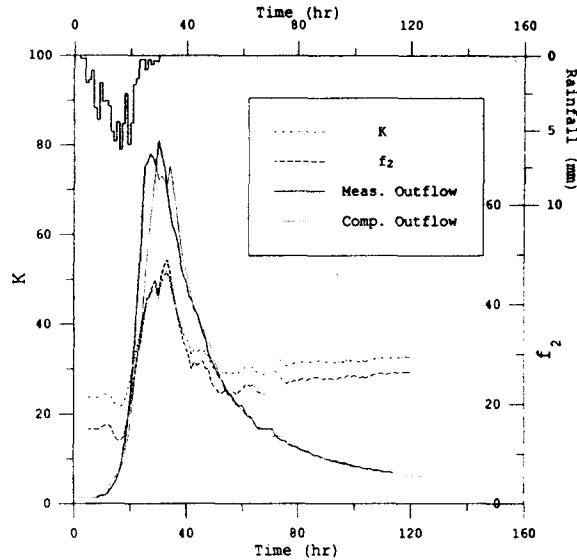


그림 8. 시변성 매개변수  $K$ 와  $f_2$ 의 시간적 변화량 [ 9월 24일 호우, Case (4) ]

그림 8은 9월 24일 호우사상에 대한 수정저류함수 모형에 퍼지추론을 적용한 결과로서 시변성 매개변수인  $K$ 와  $f_2$ 의 시간적 변화를 나타내기 위한 것이다. 여기서 실선은 관측유출량을, 점선은 계산유출량을, 1점쇄선은 시변성 매개변수인  $K$ 의 시간적 변화를, 파선은 변동유출률인  $f_2$ 의 시간적 변화를 각각 나타낸 것이며, 그림 상에서 유출량은 그림 7(c)의 Case (4)에 나타낸 것과 같기 때문에 축을 나타내지는 않았고,  $K$ 와  $f_2$ 만을 각각 왼쪽과 오른쪽에 축으로 크기를 나타냈다. 그림 8에서 나타낸 바와 같이 관측치보다 계산치가 적은 시점에서는 계산유출량이 증가되도록 시변성 매개변수의 값이 커짐을 알 수 있고, 반대의 경우에는 시변성 매개변수의 크기가 줄어들음을 확인할 수 있다. 한편 80시간 이후와 같이 오차가 적은 곳에서는 매개변수의 제어량이 작음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 저류함수모형의 일부 문제점을 개선하기 위하여 수정저류함수모형을 제안하였으며 실시간 시변성매개변수의 제어에 퍼지추론법을 도입하여 홍수예경보를 효과적으로 시행할 수 있도록

홍수수문곡선과 침투홍수량 예측의 정확도를 향상시킬 수 있는 모형을 개발하였다. 모형의 적용타당성은 금강수계인 보청천유역의 호우사상을 이용하여 검토되었다.

본 연구에서 얻어진 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 현재 사용되고 있는 저류함수모형의 매개변수값은 호우사상별, 유출시간별 변화를 반영하지 못하고 상수값을 가지므로 모형의 계산결과에 오차가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 시행착오와 육안에 의한 주관적 판단이 요구되는 기존의 해석적 매개변수 결정법을 개선한 최적매개변수 결정법은 시간과 노력의 감소와 매개변수의 정확성을 향상시켰다.

(3) 본 연구에서 수정제안된 저류함수모형은 시변성 매개변수를 도입하였으며, 매개변수 제어에 퍼지추론을 도입한 홍수예측결과는 우수한 것으로 나타났다.

앞으로의 연구과제로는 강우-유출모형에 적합한 퍼지추론기법의 개발, 제어규칙의 개선, scale factor의 결정 및 적용제어법의 도입 등의 연구가 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비(과제번호 01-E-1047)와 1994년도 건설부 IHP 개발계획 연구비의 일부 지원으로 연구가 수행되었기에 지원기관에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

국제수문개발계획(IHP) 연구보고서. (1992). 건설부.  
 김원, 김양수, 우효섭 (1995). "수리학적 모형을 이용한 실시간 홍수예측 시스템의 개발." 1995년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 443-448.  
 남강 다목적댐 홍수유출 모형 개선. (1993). 한국수자원공사.  
 심재현 (1992). "유수지 배수펌프장의 적정운용을 위한 퍼지제어모형에 관한 연구," 박사학위논문, 연세대학교.  
 이광형, 오길복 (1991). 퍼지 이론 및 응용. 홍릉과학출판사.  
 이상호, 이길성 (1994). "Muskingum-Cunge 방법에 의한 남한강 홍수추적." 한국수문학회지, 제27권, 제4호, pp. 105-114.  
 이창해 (1995). "시변성 매개변수를 퍼지제어하는 지류합수모형에 관한 연구," 박사학위논문, 한양대학교.  
 이정규, 이창해, 이종인 (1994). "홍수유출해석에 Fuzzy추론의 적용성." 1994년도 학술발표회 논문집(II), 대한토목학회, pp. 279-282.  
 지흥기, 박기호 (1994). "유출예측을 위한 하도추적모형." 한국수문학회지, 제27권, 제1호, pp. 141-150.  
 홍수자료관리 시스템의 구축. (1994). 건설부 한강홍수통제소.  
 高須修二, 廣瀬昌由, 本田敏也, 宮井貴大 (1993). "ダム貯水池操作支援システムの開発." 大ダム, No.

146, pp. 1-11.  
 藤田陸博 (1987). "あいまい理論の流出豫測への應用." 第31回水理講演會論文集, pp. 125-130.  
 小尻利治, 池淵周一, 十合貴弘 (1987). "ファジィ制御によるダム貯水池の實時間操作に関する研究." 京都大學防災研究所年報, 第30號 B-2, pp. 323-339.  
 建設省水文研究會 (1971). 流出計算例題集II, 全日本建設技術協會, pp. 81-146.  
 日向博文, 福西祐, 日野幹雄 (1989). "エキスパートシステムによるダム制御." 土木學會第44回年次學術講演會概要集, II, pp. 162-163.  
 Fujita, M., and Zhu, M.-L. (1992). "An application of fuzzy set theory to runoff prediction." *Proceedings of the Sixth IAHR International Symposium on Stochastic Hydraulics*, Taipei, pp. 727-734.  
 Mamdani, E.H. (1977). "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis." *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-26, No. 12, pp. 1182-1191.  
 Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., and Vetterling, W.T. (1986). *Numerical recipes*. Cambridge Press.  
 Singh, V.P. (1988). *Hydrologic systems: Volume I. Rainfall-runoff modeling*. Prentice Hall.  
 Viessman, W.Jr., Knapp, J.W., Lewis, G.L., and Harbraugh, T.E. (1977). *Introduction to hydrology*. IEP-A Dun-Donnelley Publisher.  
 Yen, B.C. (1982). "Some mearsures for evaluation and comparison of simulation model." *Urban stormwater hydraulics and hydrology*. Water Resources Publications, pp. 341-349.  
 Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy sets." *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353.

(접수: 1996년 4월 1일)