

<강 좌>

FUZZY이론의 수문학에의 적용(I)

조 원 철* 심 재 현**

인간의 사고형식과 기계의 사고형식의 큰 차이점은 인간의 사고가 감성, 애매성, 기호, 예감 등과 같은 정서적인 면이 많이 포함되어 있는 반면에, 기계의 사고는 완전한 논리에 의존한다는 점이다. 인간은 “짧다”, “키가 크다”와 같은 상황에 대한 정보가 사람마다 서로 다르므로 애매한 형식의 사고와 판단에 의해 결정한다. 이러한 인간의 감성적인 사고와 판단방법을 정량화하여 컴퓨터에 의해 인간의 고도의 사고방식을 수치적으로 해결하고자 하는 것이 퍼지이론(fuzzy theory)이라 할 수 있다.

퍼지이론은 1965년 미국의 Zadeh 교수가 인간의 주관적인 사고와 판단을 모형화하여 이를 정량적으로 취급하는 퍼지집합이론(fuzzy set theory)을 제창한 이후 인공지능(artificial intelligence), 전문가 시스템(expert system), 데이터 베이스(data base), CAD/CAM, 패턴인식, 시스템 제어, Kalman filtering, 최적화 등의 다양한 분야에서 적용, 발전되어 오고 있다.

본 기고에서는 전세계적으로 각광을 받고 있는 퍼지이론의 수문학에서의 적용성에 대해 간단하게 소개하기로 한다. 퍼지이론이 적용가능한 수문학분야를 조사해 본 결과 우수배제펌프의 제어, 유출량 및 강우량 예측, 그리고 댐의 방류량 제어 등에 적용가능한 것으로 나타났다.

본 기고의 순서를 요약하면 다음과 같다.

1. 우수배제펌프장에서의 적용
2. 유출량 예측에서의 적용
3. 태풍성 강우량 예측에 대한 적용
4. 댐군의 실시간 제어에서의 적용

1. 우수배제펌프장에서의 제어

현재 서울특별시에서는 우수배제펌프를 제어하기 위해 우수지내 수위를 기준으로 하여 펌프조작자의 경험에 의한 조작을 병행하고 있다. 그러나 수위기준에 의한 펌프조작은 펌프조작시각의 유입량에 대한 정보와 이후 유입량에 대한 정보가 전혀 고려되지 않아 급변하는 유입량의 변화에 대한 신속한 대처가 불가능하여 침수위험성이 매우 높다. 그러나 내수침수의 위험성이 매우 높은 것으로 나타난 우수지도 수년간 침수가 되지 않았던 것은 실제 펌프조작자가 수위만을 기준으로 한 조작을 하지 않고, 다년간의 경험에 의한 조작으로 내수유입량을 적절하게 배제시킨 결과라는 사실을 알게 되었다. 이러한 경험적인 조작을 이론적으로 정량화하기 위해 이들의 경험을 퍼지제어이론(fuzzy control theory)으로 해석하여 우수배제펌프의 가상조작을 함으로서 내수유입량을 적절하게 배수할 수 있는 지 여부를 검토하였다. 대상 우수 배제펌프장은 서울특별시의 도림 1 우수지 및 우수배제펌프장이며, 한강의 홍수특성상 자연방류가 없이 홍수 초기부터 펌프의 강제토출량에 의해서만 유입량을 배제하는 경우를 기준으로 택하였다.

1.1 제어규칙 설정

본 연구에서는 펌프조작시각에서의 우수지 수위와 유입량의 2가지 정보를 퍼지입력변수로 선정하였다. 퍼지변수는 상태를 표현해 주는 정도에 따라 일반적으로 5~7개의 상태정보(state information)를 사용하며 본 연구에서는 우수지 수위와 유입량의 상태에 대한 정보를 퍼지제어엔진에 입력하기 위해 VS(very small), SM(small), AS(approximately small), ME(mean), AB(ap-

* 연세대학교 토목공학과 부교수

** 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정

proximately big), BI(big), VB(very big)의 7개 퍼지변수를 사용하였다. 또한 퍼지변수의 구성함수(membership function)는 연속형 구성함수중 삼각형으로 가정하였다. 본 연구에서 가정한 7개의 삼각형의 퍼지변수에 대한 구성함수를 그림으로 표시하면 다음과 같다.

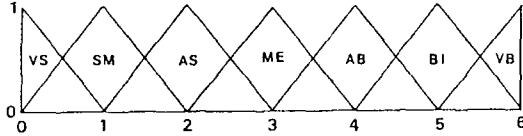


그림 1. 본 연구에서 정의된 퍼지변수의 구성 함수

유수지 수위와 유입량에 대해 전술한 바와 같이 7개의 상태로 나누어 판단할 때 펌프토출량의 출력제어는 크게 다음과 같은 2가지 제어규칙으로 나눌 수 있었으며 각각을 제어규칙 1, 2라 칭하였다. 유수지 수위(X)의 상태와 유입량(Y)의 상태에 따라 펌프토출량(Z)를 결정하는 퍼지제어규칙을 나타낸 것이 표 1과 표 2이다.

표 1. 펌프 제어규칙 1

X \ Y	VS	SM	AS	ME	AB	BI	VB
VS	VS	VS	SM	SM	AS	AS	ME
SM	VS	SM	SM	AS	AS	ME	ME
AS	SM	SM	AS	AS	ME	ME	AB
ME	SM	AS	AS	ME	ME	AB	AB
AB	AS	AS	ME	ME	AB	AB	BI
BI	AS	ME	ME	AB	AB	BI	BI
VB	ME	ME	AB	AB	BI	BI	VB

표 2. 펌프 제어규칙 2

X \ Y	VS	SM	AS	ME	AB	BI	VB
VS	VS	SM	SM	AS	AS	ME	ME
SM	SM	SM	AS	AS	ME	ME	AB
AS	SM	AS	AS	ME	ME	AB	AB
ME	AS	AS	ME	ME	AB	AB	BI
AB	AS	ME	ME	AB	AB	BI	BI
BI	ME	ME	AB	AB	BI	BI	VB
VB	ME	AB	AB	BI	BI	VB	VB

1.2 제어결과

전술한 바와 같이 도림 1 유수지에 대해 기존의 수위기준에 의한 우수배제 펌프의 제어와 퍼지제어이론에 의한 펌프제어 결과를 재현기간 10년의 설계강우가 해당유역에 발생할 경우에 대한 각 펌프제어규칙에 따른 수위변화로 나타낸 것이 그림 2이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 기존의 수위기준에 의한 우수배제펌프의 제어에 비해 퍼지제어에 의한 결과가 수위를 더 낮출 수 있는 것으로 나타났으며, 제어규칙 1에 비해 제어규칙 2가 양호한 결과를 보여주고 있어 퍼지제어이론이 우수배제펌프의 조작에 있어 적용가능하다는 사실을 나타내고 있다.

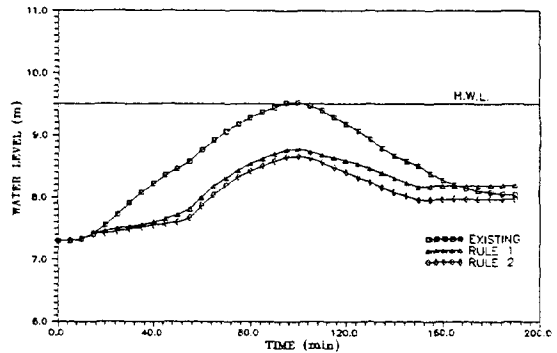


그림 2. 기존의 펌프제어와 퍼지제어에 의한 수위비교 (도림 1, 재현기간 10년)

2. 유출량 예측에서의 적용

본 절에서는 유출예측문제에서의 fuzzy 집합이론의 응용가능성을 검토한 연구로서 강우시 충분한 수문정보가 없는 중소하천유역에서의 유출예측에 적용한 일본의 藤田睦博의 연구를 소개하기로 한다.

2.1 기본개념

유출계를 그림 3과 같은 선형 tank 모형으로 고려하였다. 여기에서 $x(t)$ 는 tank 상부의 pipe 내 유량으로, 기호 D는 유량을 조절하는 판을 의미한다. 또한 tank에서의 유출량을 $Q_{out}(t)$ 라 하고, $Q_s(t)$ 는 목표유량이다. 편차 $e(t)$ 를 줄이기 위해 pipe의 조절판을 조절하는 것으로 정의하여 이들을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$e(t) = Q_{out}(t) - Q_s(t) \quad (1)$$

조절판 통과후 유량은 조절판의 열린 정도 B(t)와 조절판 통과전의 유량의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$x_{inp}(t) = B(t) \cdot X(t) \quad 0 \leq B(t) \leq 1 \quad (2)$$

이와 같은 tank의 제어문제를 유출계와 비교하면 $x_{inp}(t)$ 는 유효유량에 해당하는 것으로 유출계의 時定數 (유출계수의 시간에 따르는 변화)를 구하는 문제가 된다. 그림 3의 조절판 D를 제어하는 경우를 생각해 보기로 하자. 목표유량으로 부터의 편차 $e(t)$ 가 +의 값으로 클 경우에는 빨리 조절판을 닫고, -의 값이 클 때에는 조절판을 열면 된다.

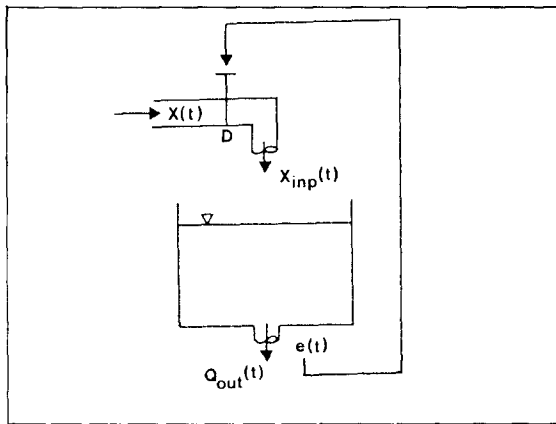


그림 3. 선형탱크모형

2.2 퍼지추론

이상의 문제를 fuzzy 이론을 기초로 하여 fuzzy 추론법을 사용하기 위해 목표치로 부터 편차 $e(t)$ 와 시간증분 $\Delta e(t)$ 를 사용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\Delta e(t) = \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

표 3에서는 제안한 rule의 예를 나타내고 있다. 표에서 NB, NM, NS는 각각 Negative Big, Negative Medium, Negative Small을 의미하며, PB, PM, PS는 Positive Big, Positive Medium, Positive Small을 의미한다. 또한 ZO는 약 0을 나타낸다. 표 3의 NB, NM, NS, ...는 각각 그림 4에 나타낸 구성 함수가 대응되는 값이다.

제어출력의 증분을 ΔB 라 하면 표 3은 다음의 13개 조건부 명제로 나타낼 수 있다.

- if e is NB then Δe is ZO then ΔB is PB
- or
- if e is NM then Δe is ZO then ΔB is PM

- or
- if e is NS then Δe is ZO then ΔB is PS
- or
- if e is ZO then Δe is NB then ΔB is PB
- or
- if e is ZO then Δe is NM then ΔB is PM
- or
- if e is PM then Δe is ZO then ΔB is NM
- or
- if e is PB then Δe is ZO then ΔB is NB

설정된 규칙들을 퍼지 합집합과 교집합의 연산을 통해 퍼지출력을 구하는 과정을 그림으로 나타낸 것이 그림 5이다.

표 3. 제어규칙 예

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

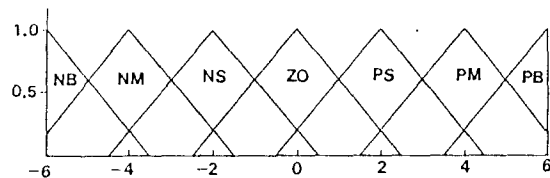


그림 4. 규격화된 구성 함수

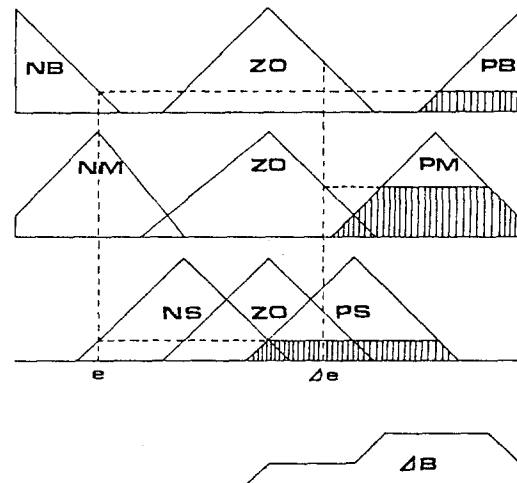


그림 5. 출력정보량을 구하기 위한 입력정보량 구성함수의 합성

2.3. 제어특성의 검토

그림 3의 tank에서의 時定數를 K라 하면

$$K \frac{dQ}{dt} + Q = x_{inp}(t) \tag{5}$$

여기서 $t=t_i$ 일 때 $Q=Q_i$ 이다.

식 (5)의 해는

$$Q(t) = Q_1 \exp\left(-\frac{t-t_1}{K}\right) + \int_{t_1}^t \frac{1}{K} \exp\left(-\frac{t-\tau}{K}\right) x_{inp}(\tau) d\tau \tag{6}$$

여기서

$$t=i\Delta t, \quad t_1=(i-1)\Delta t, \quad Q(t)=Q_i \tag{7}$$

이고, 시각 $t \sim t_1$ 간의 $x_{inp}(\tau)$ 는 $x_{inp}(t_1)$ 이 주어지면

$$Q_i = Q_{i-1} \exp\left(-\frac{\Delta t}{K}\right) + x_{inp}(i-1) \{1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{K}\right)\} \tag{8}$$

i 시각에서

$$\begin{aligned} e(i) &= Q_i - Q_{set}(i) \\ \Delta e(i) &= e(i) - e(i-1) \end{aligned} \tag{9}$$

가 됨을 알 수 있으며, 식(4)에 의한 제어출력의 증분 ΔB_i 가 얻어진다.

$$\begin{aligned} B_i &= B_{i-1} + \Delta B_i \\ x_{inp}(i) &= B_i \cdot x \end{aligned} \tag{10}$$

따라서 시간 step을 증가시키면서 얻을 수 있다.

실제 계산에서는 그림 5에 나타난 바와 같은 규격화된 구성함수를 정의하여 식 (9)에서 $e(i)$, $\Delta e(i)$ 는 적당한 축척모수(scale parameter)를 곱하여 구성함수의 변역 (-6, 6) 내에서만 정의되도록 한다.

$$\begin{aligned} e(i) &= \begin{cases} 6 & \alpha e(i) > 6 \\ \alpha e(i) & -6 \leq \alpha e(i) \leq 6 \\ -6 & \alpha e(i) < -6 \end{cases} \\ \Delta e(i) &= \begin{cases} 6 & \beta \Delta e(i) > 6 \\ \beta \Delta e(i) & -6 \leq \beta \Delta e(i) \leq 6 \\ -6 & \beta \Delta e(i) < -6 \end{cases} \end{aligned} \tag{11}$$

마찬가지로 B_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B(i) = \begin{cases} 1 & \gamma B_i > 1 \\ \gamma B_i & 0 \leq \gamma B_i \leq 1 \\ -0 & \gamma B_i < 0 \end{cases} \tag{12}$$

2.4. 실유역에서의 계산예.

유출모형에서는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$S = B(t) \cdot Q^{0.5} \tag{13}$$

S : 저류량(mm), Q : 유출량(mm/hr)

저류계수 B(t)를 시간의 함수로 하여 제어변수로 사용하였다. 이후의 A 식에서 예측치는 $\hat{\cdot}$ 기호를 사용하여 실측치와 구분하기로 한다. 식(13)에 연속방정식을 대입하면 다음 식이 성립된다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \{B(t) \cdot \hat{Q}(t)^{0.5}\} + Q(t) &= r(t - \Delta t) \\ \hat{Q} \{(i-1) \cdot \Delta t\} &= Q \{(i-1) \cdot \Delta t\} \end{aligned} \tag{14}$$

여기에서 $r(t)$, $Q(t)$ 는 실측우량과 실측유량이다. 예측의 시간간격(lead time)을 t_r 라 하면 식(14)의 우변에는 $r(t)$ 가 없이 $r(t - \Delta t)$ 가 된다.

실측자료는 일본의 新流川의 자료를 사용하였고 축척모수는 다음과 같이 취하였다.

$$\alpha = 5, \quad \beta = 5, \quad \gamma = 2 \tag{15}$$

또한 식(13)의 저류계수 B(t)의 초기치는 $B(0) = 30$ 을 사용하였다. 그림 6은 新流川유역에서의 계산결과를 나타낸 것이다.

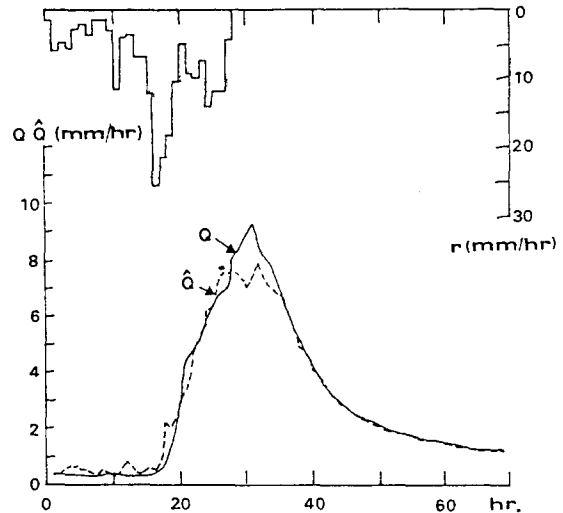


그림 6. 新流川의 적용결과 (日本)

3. 맺음말

본 기고는 수문학에서 적용될 수 있는 퍼지제어기

법에 대해 요약한 것으로 필자의 연구외에도 일본에서 발표된 논문을 요약한 내용이 포함되어 있음을 밝혀둔다. 다음 호에는 태풍성 강우의 예측 및 댐군의 실시간 제어에 대한 내용을 소개할 예정이다. 복잡한 내용을 지면관계상 요약하였기 때문에 잘 이해가 안 되시는 독자도 많을 것으로 생각된다. 자세한 내용이나 자료를 원하시는 분은 개인적으로 연락해 주기를 바라면서 이 글을 맺는다.

4. 참고문헌

1. 水本雅晴, (1988) ファジィ理論とその應用, サイエンス社.
2. 天笠美知夫, (1987) システム構成論 — ファジィ理論を基礎として, 森山書店.
3. 西田俊夫, (1991) おはなしファジィ— あいまいさを科學する, 日本規格協會.
4. 向殿政男, (1990) 本多中二, ファジィ— あいまいの科學, 岩波書店.
5. 寺野壽郎, (1989) 淺居喜代治, 菅野道夫, ファジィシステム入門, オーム社.
6. 坂和正敏, (1990) ファジィ理論の基礎と應用, 森北出版株式會社.
7. 藤田睦博, (1987) “あいまい理論の流出豫測への應用”, pp.125-130, 第31回 水理講演會 論文集.
8. Bart Kosko, (1992) Neural Networks and Fuzzy Systems, Prentice Hall.
9. Constantin V. Negoita and Dan Ralescu, Simulation, Knowledge-Based Computing, and Fuzzy Statistics, Van Nostrand Reinhold Company.
10. George J. Klir and Tina A. Folger, (1988) Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information, Prentice Hall.
11. H. -J. Zimmermann, (1985) Fuzzy Set Theory—and Its Applications, Kluwer-Nijhoff Publishing.