

<강 좌>

FUZZY이론의 수문학에의 적용(II)

조 원 철* · 신 재 현**

지난 기고에 이어 본 기고에서는 태풍성 강우량의 예측과 저수지에서의 방류량의 실시간 제어에 대해 알아보기로 한다.

3. 태풍성 강우량의 예측에 대한 적용

본 절에서는 태풍에 의한 강우량의 변화에 대한 연구로서, 일본의 小尻利治의 연구결과를 소개하려고 한다.

태풍성 강우에 대한 수문정보량은 일반적으로 경도와 위도상에서 1도 라는 대략적인 범위로 한정되어 있어 확률론에 의한 분석은 부정확한 결과를 나타내게 되며, 그 결과에는 불확실성이 존재하게 된다. 또한 실시간 강우의 예측을 위해 강우현상의 시스템을 black box 로 취급하는 경우가 많아 시스템의 애매모호성은 더욱 증가하게 되는 것이다. 이와 같은 관점에서 본 절에서는 태풍성 강우의 예측 시스템에 퍼지제어이론을 도입하여 그 적용가능성을 알아보았다. 대상유역은 일본의 淀川유역에 대해 적용한 것을 결과로 나타내었다.

3.1 태풍의 유사성에 대한 구분

태풍의 이동특성을 나타낼 수 있는 물리량으로는 다음과 같은 4 가지가 있다.

- X_m : 동경
- Y_m : 북위
- r_m : 태풍의 방향 (8 가지)
- Z_m : 중심시도
- V_m : 진행속도

여기서 n_i 는 n 번 태풍의 i 번째 step의 상태를 의미한다. 대상영역은 동경 $122^\circ \sim 145^\circ$ 이며, 1° 마다 mesh로 분할하여 사용하였다. 또한 방향은 그림 3.1에서 표시한 바와 같이 7종류의 진행방향과 그이외의 경우를 합쳐 8가지로 분류하여 표현하였다.

임의의 태풍과 과거 태풍과의 유사도(similarity)는 다음과 같이 구할 수 있다.

시각 t 에서의 태풍의 상태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{0t} = (X_{0t}, Y_{0t}, r_{0t}, Z_{0t}) \quad (1)$$

A_{0t} 와 현 태풍의 상태 $A_m = (X_m, Y_m, r_m, Z_m)$ 와의 각 요인별 유사성은 다음과 같은 구성함수(membership function)으로 표현하기로 한다.

$$m_1(X_m, X_{0t}) = \frac{1}{\alpha_1^{k_1} |X_m - X_{0t}|} \dots \dots \dots (2)$$

$$m_2(Y_m, Y_{0t}) = \frac{1}{\alpha_2^{k_2} |Y_m - Y_{0t}|} \dots \dots \dots (3)$$

$$m_3(Z_m, Z_{0t}) = \frac{1}{\alpha_3^{k_3} |Z_m - Z_{0t}|} \dots \dots \dots (4)$$

$m_4(r_m, r_{0t})$: 표.3.1 참조

$$m_5(V_m, V_{0t}) = \frac{1}{\alpha_5^{k_5} |V_m - V_{0t}|} \dots \dots \dots (5)$$

태풍의 방향에 관한 유사도에 대한 구성함수 값은 다음과 같은 표로 나타낼 수 있다.

* 연세대학교 토목공학과 부교수
 ** 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정

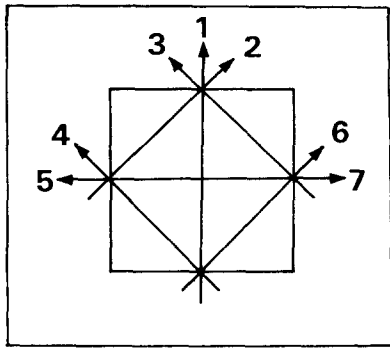


그림 3.1 mesh내 태풍방향의 분류

표3.1 태풍의 방향에 따른 구성함수 값

방향	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.0	0.5	0.5	0.5	0.2	0.5	0.2	0.0
2	0.5	1.0	0.2	0.2	0.1	1.0	0.5	0.0
3	0.5	0.2	1.0	1.0	0.5	0.2	0.1	0.0
4	0.5	0.2	1.0	1.0	0.5	0.2	0.1	0.0
5	0.2	0.1	0.5	0.5	1.0	0.1	0.0	0.0
6	0.5	1.0	0.2	0.2	0.1	1.0	0.5	0.0
7	0.2	0.5	0.1	0.1	0.0	0.5	1.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

여기서 k, α 는 각 요인의 특성을 나타내는 상수이며, 각 요인의 구성함수값을 통해 최종적인 수치를 얻는 방법에는 max-min 연산법과 相加平均法의 2가지를 사용하기로 한다.

3.2 유사도의 산정방법

태풍 A_n 와 i mesh에서의 태풍 A_m 사이의 유사도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$D(A_n, A_m) = \min \{ m_1(X_{0n}, X_m), m_2(Y_{0n}, Y_m), m_3(Z_{0n}, Z_m), m_4(r_{0n}, r_m), m_5(V_{0n}, V_m) \} \quad (6)$$

따라서 가능한 mesh 전체에 대해 유사도를 구하는 식은 다음과 같이 표현된다.

$$DD(A_n, A_m) = \max_i \{ D(A_n, A_m) \} \quad (7)$$

태풍의 유사도를 파악하는 전체기간에 대해 살펴보면 현재시각과 T시각 이전의 태풍을 대상으로 하는 유

사도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$DDD(A_n, A_m) = \min \{ DD(A_{01}, A_m), DD(A_{02}, A_m), \dots, DD(A_{0n}, A_m) \} \quad (8)$$

따라서, $DDD(A_n, A_m)$ 는 태풍 A_n 와 과거에 발생했던 태풍 A_m 과의 유사도를 나타내는 것이다.

여기에서 mesh 정보자료가 이산적인 경우, 다른 태풍간의 유사도가 일치하는 경우가 생기며, 이를 정확하게 판별하기가 어려운 경우가 있다. 이런 경우에는 상가평균한 구성함수의 수치를 그려서, 추론결과를 비교한다. min-max 연산과 같이 $m_1(X_m, X_n) \sim m_5(V_m, V_n)$ 를 사용하여 다음 식과 같이 상가평균하면 태풍간의 유사도를 구할 수 있다.

$$D(A_n, A_m) = \{ m_1(X_m, X_n) + m_2(Y_m, Y_n) + m_3(Z_m, Z_n) + m_4(r_m, r_n) + m_5(V_m, V_n) \} \quad (9)$$

3.3 총강우량의 예측

과거 통계자료로 부터 구한 비초과확률 $P(c)$ 를 가진 대상지점의 강우강도가 Z_c 인 유사태풍의 위치가 (i, j) 이고, 유사태풍이 해당 mesh 내에 지속되는 지체시간을 $TA(i, j)$ 이라할 때 대상지점의 총강우량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SUR(A_n) = \sum_{i,j} Z_c(i, j) TA(i, j) \quad (10)$$

여기서 5개의 요인으로 부터 구한 태풍의 유사도를 전건부의 적합도로 보고, 과거 태풍의 우량으로 부터 총우량을 구하게 된다. 평균강우강도에 해당하는 좌표에서 뿐만 아니라 유사태풍으로 부터 추출한 태풍의 자료를 고려하여 종합적으로 예측을 하는 것이다. 여기에서 후건부의 함수형을 고려하지 않는 추정법은 다음과 같다.

$$SUR(A_n) = \frac{\sum DDD(A_n, A_m) SUR(A_m)}{\sum DDD(A_n, A_m)} \quad (11)$$

여기서 $SUR(A_n)$ 는 해당태풍의 예측 총강우량, $SUR(A_m)$ 은 해당시각 이후에 내리는 유사태풍 A_m 의 실제 총강우량으로써 식(10)에 의해 연역적으로 구할 수 있다.

3.4 유사태풍의 추출과 총강우량의 예측 예

실제 발생한 태풍자료를 사용하여 유사태풍을 추출한다. 사용된 parameter의 수치는 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 2.0$, $k_1 = k_2 = 0.25$, $k_3 = 0.025$ 이다. 태풍(태풍번호 6707)이 관측되었다고 가정하자. 이 태풍이 북북동으로 진행되어 북위 30°, 동경 127°의 위치에 도달한 경우를 생각하면 과거 12 step의 mesh에 관해 유사태풍을 추출한다. 표 2는 상위 9개까지의 유사태풍을 나타낸 것이다. 구성함수는 같은 parameter를 사용하였는데 相加平均法을 사용하는 것이 용이하다.

표2 태풍의 유사도

(1) min-max 기법을 사용한 경우

order	typhoon name	similarity
1	6707	1.00000
2	1101	0.84090
3	1010	0.84090
4	2910	0.70711
5	3110	0.70711
6	3204	0.70711
7	3503	0.70711
8	3809	0.70711
9	3911	0.70711
10	4704	0.70711

(2) 相加平均法을 사용한 경우

order	typhoon name	similarity
1	6707	1.00000
2	1010	0.91403
3	1810	0.90963
4	5609	0.89812
5	1101	0.89693
6	6515	0.88960
7	5404	0.88764
8	3513	0.88394
9	3503	0.88305
10	6213	0.87848

표 3은 북위 29°, 동경 125°의 mesh로부터 8 step 이전의 시각에서 부터 해석한 결과이다. 태풍의 크기가 대형이었으나 예측강우량은 0 mm 이었다. 이는 해당태풍이 지금까지 없었던 패턴(진로, 강우분포)을 가지

고 있었기 때문이다. 축차계산을 하면 정확도를 향상시킬 수 있으며, 이런 정확한 결과는 홍수관리의 지표가 될 것으로 생각된다.

표3 예측 총강우량

order	typhoon name	similarity	rainfall
1	6707	1.00000	178.9
2	7803	0.94621	13.0
3	1010	0.91843	63.3
4	2312	0.91489	45.4
5	1701	0.89883	28.5
6	4704	0.89396	52.7
7	1007	0.88011	40.7
8	1004	0.87739	0.0
9	1711	0.87569	63.0
10	3503	0.87460	0.0
predicted total rainfall			34.217 mm

4. 저수지에서의 방류량의 실시간 제어

본 연구에서는 일본의 小尻利治의 연구와 日野幹雄 등의 연구를 발췌, 요약한 내용을 소개하기로 한다.

4.1 지식 base 형 저수지 조작

홍수방어 및 수자원 관리에 있어 댐저수지가 매우 중요한 역할을 하고 있다는 것은 주지의 사실이다. 그러나 홍수방어라는 치수적인 개념과 수자원 이용이라는 이수적인 개념은 서로 상반되는 개념으로 두가지 요소를 만족하는 저수지 방류량의 조절은 실시간의 개념에서 조작되어야 하겠다. 그러나 이를 뒷받침해 주는 정확한 모형의 부재로 인해 현재 대부분의 저수지는 기본 방류기준과 관리자의 경험을 통해 방류량을 조절하고 있다. 본 연구는 지식 base 형 전문가 시스템의 개념과 퍼지제어 이론을 도입하여 실시간 홍수 방어용 저수지의 조작기준을 확립하는 데 그 목적이 있다. 조작 퍼지공간으로는 유입 수문곡선, 저류량, 유입량 자료를 사용하였으며, 유입수문곡선을 data base화 하기 위해 패턴인식기법을 사용하여 대표유황을 추출하였다. 일반적으로 전문가 시스템과 퍼지제어에 의

한 실시간 저수지 조작은 다음과 같은 사항이 선행되어야 가능하다고 볼 수 있다.

- 1) 과거의 수문자료, 관리기록, 관리자의 경험을 종합한 data base
- 2) 얻어진 정보를 처리하여 조작에 필요한 형태로 보존하는 지식 base
- 3) 실시간적으로 맴관리 정보량이 입력되면 최적 방류량을 계산할 수 있는 추론기구
- 4) 관리자에게 구체적인 방류량을 제시, 설명시켜 줄 수 있는 interface 장치

그림4.1은 전술한 각 사항에 대한 부분 시스템의 적용순서를 그림으로 나타낸 것이다.

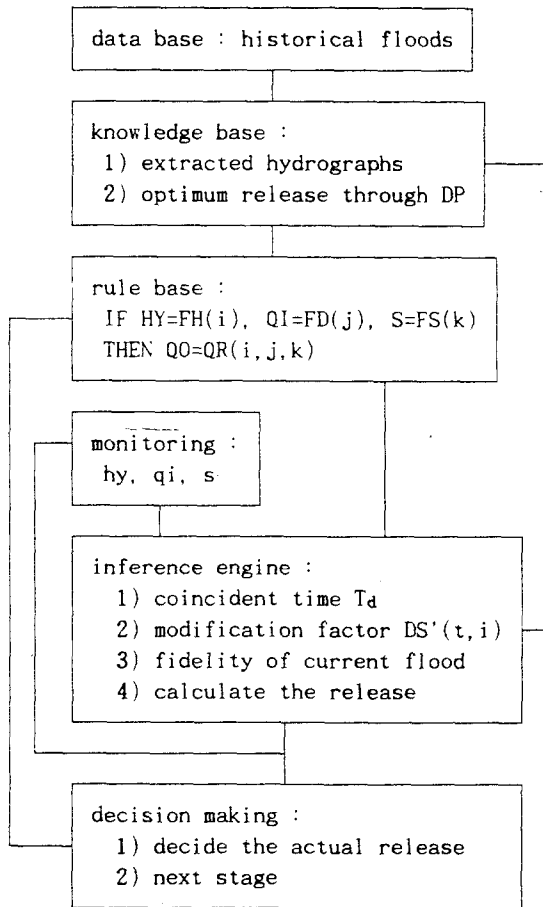


그림4.1 지식 base형 저수지 조작 순서도

4.2 부분 시스템의 모형화

저수지 조작에 필요한 자료를 수집정리하기 이전에 지식 base 를 구성해야 한다. 수집가능한 자료 및 계산량 등을 고려하여 조작공간을 저수량, 유입량, 유입 수문곡선의 3 성분으로 구성하였다. 실시간 조작에서는 방류량을 결정하는 데에 걸리는 시간이 짧아야 하는 반면 관측 자료와 예측치 사이의 불확실성을 무시할 수 없기 때문에 퍼지이론을 도입하였다.

각 성분을 자세하게 나타내면 먼저 수문곡선의 상태 공간은 최대홍수(extremely big flood), 대홍수(big flood), 계획홍수(medium flood), 일반홍수(small flood)의 4가지로 분류하였고, 저수량 FS 는 치수용량에 대해 공상태 (almost empty space), 여유공간이 많은 상태 (big space), 여유공간이 조금 있는 상태 (medium space), 여유공간이 없는 상태 (small space)로 분류하였다. 유입량 공간 FD는 계획홍수량의 100%, 75%, 50%, 25%, 5%의 6개로 분류하였다. 표4.1은 각 상태 정보량에 대해 퍼지공간을 나타낸 것이다.

분류된 수문곡선은 전체 자료로부터 패턴인식 기법을 사용하여 나눈 것으로 다음 식을 사용하여 수문곡선의 형상을 분류하였다.

$$OF_p = \max_t [\max | QI(t,n) - FQ(t,i) | / FQ(t,i)] \quad (12)$$

여기서 $FQ(t,i)$ 는 분류된 i 번째 수문곡선에서 t 시간에서 구한 유량의 평균값을 의미한다. $QI(t,n)$ 은 자료번호 n 번째의 유입 수문곡선의 유량을 의미한다. 선정된 대표수문곡선과 대상 수문곡선을 시간축을 이동시켜 중첩시키며, 중첩되는 부분이 적을 때에는 자연저감계수를 곱하여 두 수문곡선을 외삽시킨다.

다음 과정으로 홍수제어의 목적은 홍수범람의 위험성을 최소로 감소시킨다고 생각하여 다음 식으로 정의한다.

$$OF_c = \min_t [\max | QO(t) |]$$

다음으로는 수문곡선, 저수량, 유입량을 조합하여 최적방류량을 계산하는 지식 base를 만든다. 지식 base 는 방류량을 시간적으로 1step 이전의 값과 비교하여 다음과 같은 IF-THEN 형식의 조작규칙으로 표현할 수

표4.1 퍼지공간의 분류

fuzzy space	small	more or less small	medium	more or big	big	very big
hydrograph	ordinary storm FH(4)		design flood FH(3)		big flood FH(2)	extremely big FH(1)
inflow discharge	5% of critical discharge	25% of critical discharge FD(5)	50% of critical discharge FD(4)	75% of critical discharge FD(3)	critical discharge level FD(2)	extremely big discharge FD(1)
reservoir storage volume	small space FS(4)		medium space FS(3)		big space FS(2)	almost empty FS(1)

있다. 수문곡선의 정보량 HY가 FH(i)이고, 유입량의 정보량 QI가 FD(j), 저류량 정보 S가 FS(k)일 때 방류량 QO는 다음 식으로 표현된다.

$$IF \ HY = FH(i), \ QI = FD(j), \ S = FS(k) \ THEN \ QO = QR(i,j,k) \tag{14}$$

이와 같은 조작규칙은 컴퓨터내에서 spread sheet 상에 기록, 저장하게 된다.

현재 관측된 수문곡선, 유입량, 저수량을 각각 h_t , q_t , s_t 라 할 때 각 요소에 대한 구성함수는 다음 식이 표현할 수 있다.

$$f_h(h_t) = (a_{hi} \cdot h_t - b_{hi}) / a_{hi} \tag{15}$$

$$f_q(q_t) = (a_{qi} - q_t \cdot b_{qi}) / a_{qi} \tag{16}$$

$$f_s(s_t) = (a_{sk} - s_t \cdot b_{sk}) / a_{sk} \tag{17}$$

$$DS(t,i) = \min_{t_i} \{ \max_{t_i} |q_t - FH(t,i)| / FH(t,i) \} \tag{18}$$

여기서 a 와 b 는 퍼지 구성함수의 매개변수이며, ϕ_i 는 분류된 수문곡선 i 의 발생확률, t_i 는 분류된 수문곡선과 현재까지 유입량 계열간을 중첩시켰을 때 오차가 가장 적은 시간간격을 의미한다. 퍼지 대표치 ijk 와 관측된 홍수의 유사도는 다음과 같은 相加平均法을 사용하였다.

$$W_{ijk} = \{ f_h(h_t) + f_q(q_t) + f_s(s_t) \} / 3 \tag{19}$$

또한 방류량의 구성함수는 다음과 같이 가정하였다.

$$f_r(q_0) = \{ a_{rjk} - q_0 \cdot b_{rjk} \} / a_{rjk} \tag{20}$$

여기서 a_{rjk} , b_{rjk} 는 지식 base에 의한 최적방류량 계열중 적당하게 U 개를 표본으로 선택하여 재배열하였을

때 구해진 매개변수이다. 과거의 홍수자료중 유사하지 않은 특수한 홍수사상의 발생확률을 고려하기 위해 방류량의 퍼지 변수값들을 다음과 같이 수정하였다.

$$QR(i,j,k) = (1 + DS(t,i)) \cdot QR(i,j,k) \tag{21}$$

$$DS(t,i) = (\text{sign}) \min \{ \max |q_t - FH(t,i)| / FH(t,i) \} \tag{22}$$

여기서 (sign)은 퍼지 대표치를 수문곡선상에 외삽할 때 시간축상의 거리가 소가 될 수 있기 때문에 나타낸 기호이다.

방류량의 구성함수값은 다음과 같은 Mamdani의 max-min 합성에 의해 구할 수 있다.

$$f_r(q_0) = \max \{ W_{ijk}, f_{ijk}(q_0) \} \tag{23}$$

윗 식에 의해 해진 방류량의 구성함수를 사용하여 최적의 방류량을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$QO = \frac{\int f_r(q_0) \cdot q_0 \cdot dq_0}{\int f_r(q_0) \cdot dq_0} \tag{24}$$

5. 맺음말

본 기고는 수문학에서 적용될 수 있는 퍼지제어기법에 대해 요약한 것으로 4장의 저수지 실시간 제어에 대해 실유역에 적용한 결과는 여러가지 변동요소가 많고, 복잡하고 주관적인 요소가 많아 생략하였다. 전편의 기고와 함께 많은 양의 내용을 간략하게 정리하였기 때문에 독자들께서 이해가 안 가는 부분이 많으실 것으로 생각한다. 관심이 있으신 분들께서는 개인적으로 연락해 주시기 바라며, 차후에는 본 기고에서 발표

된 수공학의 여러 분야에 걸쳐 좀더 심도있는 연구를 하여 자세한 논문 및 강좌를 발표할 것을 약속드리며 이 글을 맺는다.

6. 참고문헌

1. 水本雅晴, ファジィ理論とその應用, サイエンス社, 1988.
2. 天笠美知夫, システム構成論-ファジィ理論を基礎として, 森山書店, 1987.
3. 西田俊夫, おはなしファジィ-あいまいさを科學する, 日本規格協會, 1991.
4. 向殿政男, 本多中二, ファジィ-あいまいの科學, 岩波書店, 1990.
5. 寺野壽郎, 淺居喜代治, 菅野道夫, ファジィシステム入門, オーム社, 1989.
6. 坂和正敏, ファジィ理論の基礎と應用, 森北出版株式會社, 1990.
7. 藤田睦博, "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, 1987.
8. 小尻利治 外 2名, "ファジィ制御によるダム貯水池の實時間操作に關する研究", pp. 323~339, 京大大學防災研究所年報, 第30號 B-2, 1987.
9. 日野幹雄 外 2名, "エキスペクトシステムによるダム制御", 日本土木學會 4回 年次學術講演會講演概要集, II, pp. 162~163, 1989.
10. Bart Kosko, Neural Networks and Fuzzy Systems, Prentice Hall, 1992.
11. Constantin V. Negoita and Dan Ralescu, Simulation, Knowledge-Based Computing, and Fuzzy Statistics, Van Nostrand Reinhold Company, 1987.
12. George J. Klir and Tina A. Folger, Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information, Prentice Hall, 1988.
13. H. -J. Zimmermann, Fuzzy Set Theory - and Its Applications, Kluwer-Nijhoff Publishing, 1985.