

Fuzzy Set 이론을 이용한 홍수조절효과 정량화 지표 개발

Development of Flood Control Effect Index by Using Fuzzy Set Theory

김주욱*, 최창원**, 이재웅***
Juuk Kim, Changwon Choi, Jaeung Yi

요 지

현재 국내에서 주로 사용되고 있는 홍수기 다목적 댐의 홍수조절효과에 대한 정량적인 평가지표로는 유량조절률, 저수지 방류율, 저수지 저류율, 저수지 이용률 등이 있다. 이러한 평가지표들은 유입량, 방류량, 저류량 등의 자료를 단순 비교하는 방법을 사용하고 있는데, 홍수조절효과 평가지표 산정식에 사용되는 자료들이 가지는 불확실성이 평가에 고려되지 못하고 있으며, 다목적댐에서 얻을 수 있는 자료만을 사용함으로써 댐 하류 지점에서의 홍수조절효과를 평가하지 못하고 있다. 또한 수자원 시스템의 설계에 있어서 허용 가능한 부분적인 실패를 고려하지 못하는 등의 문제점이 존재하므로, 홍수조절효과를 정량화 할 수 있는 새로운 지표의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 각종 변수들이 가지는 불확실성, 댐 하류지점에서의 홍수조절효과, 수자원 시스템에서 허용 가능한 부분적 실패를 고려하기 위하여 홍수조절효과 정량화 지표 개발에 퍼지집합 이론을 적용하였고, 충주댐 유역을 시험 유역으로 선정하여 연구를 수행하였다. 대상 홍수 사상으로는 2006년도 7월의 홍수사상을 적용하였으며 그에 따른 인자들을 퍼지화하고 시스템의 상태에서부터 허용 가능한 부분적인 실패 영역을 구분하였고, 통합 신뢰도-취약도 지수를 적용하여 홍수조절효과 정량화 지표를 개발하였다. 적용 결과, 본 연구를 통하여 개발된 통합 신뢰도-취약도 지수는 저수지의 홍수조절효과를 보다 구체적이고 객관화하여 나타낼 수 있었다.

핵심용어 : 홍수조절효과 정량화 지표, 퍼지 집합 이론, 허용 가능한 부분적 실패 영역, 통합 신뢰도-취약도 지수

1. 서론

홍수기 다목적댐의 홍수조절효과를 평가하기 위한 지표에는 유량 조절률, 저수지 방류율, 저수지 저류율, 저수지 이용률 등이 있다. 유량조절률은 홍수조절률이라고도 하며 침투홍수량에 대한 조절능력을 평가하는 지표로 사용하고, 저수지 방류율은 저수지에서의 홍수저류능력을 평가하는 지표로 사용한다.(한국수자원공사, 2008) 저수지 이용률은 홍수기에 저수지의 홍수조절용량을 얼마나 사용하였는지를 평가하는 지표로 사용한다.(한국수자원공사, 2004) 이들 홍수조절효과 평가지표를 살펴보면 각 평가지표의 산정에 사용되는 유입량, 방류량, 저류량 및 수위(저수량) 등의 변수가 가지는 불확실성이 홍수조절효과 평가에 고려되지 못하고, 홍수조절효과 평가 시에 다목적댐에서 얻을 수 있는 자료만을 평가지표 산정 자료로 사용함으로써 댐에서의 홍수조절효과는 평가하고 있으나 댐 하류 지점에서의 홍수조절효과는 평가하지 못하고 있다. 또한 수자원 시스템의 설계에 있어서 허용 가능한 부분적 실패를 고려하지 못하는 등의 문제점이 존재한다. 이러한 각종 변수들이 가지는 불확실성, 댐 하류 지점에서의 홍수조절효과, 수자원 시스템에서 허용 가능한 부분적 실패를 고려하기 위하여 본 연구에서는 퍼지 집합 이론을 홍수조절효과 정량화 지표 개발에 적용하였다.

* 정희원 · 아주대학교 건설교통공학과 석사과정 · E-mail : jjoowoog@ajou.ac.kr
** 정희원 · 아주대학교 건설교통공학과 박사과정 · E-mail : itsme99@ajou.ac.kr
*** 정희원 · 아주대학교 환경건설교통공학부 교수 · E-mail : jeyi@ajou.ac.kr

2. 퍼지 집합 이론

일반적인 집합 이론에서 대상은 집합에 속하거나 속하지 않는 경계가 명확하다. 퍼지 집합 이론의 기본 개념은 일반적인 집합 이론의 정의를 느슨히 하여 중간적인 개념을 집합에 허용하는 것이다. 일반 집합에서 원소 x 가 집합에 속할 때는 '1'을, 집합에 속하지 않을 때는 '0'을 부여한다고 하면, 퍼지 집합에서는 원소 x 가 집합에 속하는 정도를 나타내기 위하여 '0~1' 사이의 값을 부여한다. 일반 집합과 퍼지 집합의 정의를 특성 소속 함수(characteristic membership function) $\mu_{\tilde{A}}$ 를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\text{일반 집합 이론 : } \mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \in A \\ 0, & \text{if } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{퍼지 집합 이론 : } \tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X\} \quad (2)$$

이때 소속 함수(membership function)는 퍼지 집합의 주요 인자로 퍼지 집합과 관련된 모든 연산은 소속 함수를 통해 정의된다. 퍼지 집합은 영역 내의 요소들이 [0, 1]로 대응되는 특징을 가지며 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{A}: X \rightarrow [0, 1] \quad (3)$$

($\tilde{A} : X$ 공간 영역에서 정의되는 퍼지 함수임)

2.1 허용 가능한 부분적 실패

시스템의 '하중(load)', '저항(resistance)' 등에 불확실성이 존재하기 때문에 해당 시스템의 실패에 대한 정확한 정의가 어렵다. 일반적으로 실패는 하중이 저항보다 큰 경우를 말한다. 즉, margin of safety(M)이 '0'보다 작은 경우를 말한다. M 은 다음 식으로 정의된다.

$$\text{Margin of safety}(M) = [(\text{저항}) - (\text{하중})] < 0 \rightarrow \text{실패} \quad (4)$$

수자원 시스템에서는 하중 또는 저항이 변동하기 때문에 원래의 기능을 수행하는데 실패할 수 있다. 이때 수자원 시스템의 설계에서 부분적 실패를 허용할 수 있다. 이 부분적 실패는 위험도에 대한 의사결정자 개인의 인식 차에 따라 경계가 변화하므로 그 부분적 실패에 대한 정확한 경계를 결정 할수 없다. 이러한 부정확한 개념을 퍼지 이론을 이용하여 나타낼 수 있으므로 허용 가능한 부분적 실패를 퍼지 소속 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{Margin of safety}(M) : \tilde{M}(m) = \begin{cases} 0, & \text{if } m \leq m_1 \\ \phi(m), & \text{if } m \in [m_1, m_2] \\ 1, & \text{if } m \geq m_2 \end{cases} \quad (5)$$

여기서,

- \tilde{M} : margin of safety에 대한 퍼지 소속 함수
- $\phi(m)$: 허용 가능한 위험에 대한 주관적 관점을 나타내는 함수관계
- m_1, m_2 : 허용 가능한 부분적 실패 영역에 대한 하한 및 상한 경계

2.2 통합 신뢰도-취약도 지수

실패가 발생하였을 때 시스템의 실적과 발생한 실패의 크기를 설명하기 위해 신뢰도와 취약도의 개념을 도입하였다. 퍼지 형태로 허용 가능한 부분적 실패의 범위가 결정되면 실패가 발생하였을 때 예상되는 실패

정도뿐 아니라 실패 시 예측되는 시스템의 실적도 결정이 가능하다. 식 (5)에서 허용 가능한 부분적 실패 영역에 대한 하한 및 상한의 경계 값이 결정되어 허용 가능한 부분적 실패의 범위가 미리 정의되면, 예상되는 시스템의 실패는 특정 범위로 한정된다. 미리 정의된 허용 가능한 부분적 실패 범위에 호환성이 높은 시스템은 유사한 실적을 보인다.

수자원 시스템의 상태에 대한 퍼지 소속 함수와 미리 정의된 허용 가능한 부분적 실패 영역의 범위에 대한 소속 함수를 비교함으로써 수자원 시스템의 신뢰도와 취약도에 대한 정보를 얻을 수 있다. 신뢰도는 수자원 시스템의 상태가 미리 정의된 허용 가능한 실패의 범위에 근접한 정도에 의해 결정된다.

이때, 퍼지 집합 이론의 정의에서 원소 x 가 집합에 속하는 정도를 '0~1' 사이의 값을 부여하여 나타내므로 시스템 상태에 대한 소속 함수와 허용 가능한 부분적 실패 범위에 대한 소속 함수간의 중첩 영역이 발생할 때, 큰 소속 함수 값을 가지는 영역에서 중첩 영역이 보다 많이 발생하는 것이 바람직하다. 따라서 가중치 기법을 적용하여 통합 신뢰도-취약도 지수를 산정한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$CM_{S,L} = \frac{WOA_{S,L}}{WA_S} \quad (6)$$

여기서,

$CM_{S,L}$: 통합 신뢰도-취약도 지수

$WOA_{S,L}$: 시스템의 상태에 대한 퍼지 소속 함수와 허용 가능한 부분적 실패 범위에 대한 소속 함수간의 가중치가 적용된 중첩 면적

$WA_{S,L}$: 시스템의 상태에 대한 퍼지 소속 함수의 가중치가 적용된 면적

앞에서 언급한 바와 같이 통합 신뢰도-취약도 지수는 '0' 과 '1' 사이에서 변하며, '1' 에 근접 할수록 홍수 조절효과가 크다는 것을 나타낸다.

3. 대상 유역의 선정 및 적용

본 연구에서는 다음과 같은 기준으로 대상유역을 선정하였다.

- 댐 유입량이 기 조절된 유입량이 아닐 것
- 댐 조절에 의한 하류 하도에서의 평가가 용이할 것
- 하류 하도내의 평가지점이 여타 댐에 의해 영향을 받지 않을 것

상기 조건에 부합하는 대상유역으로 충주댐 유역을 선정하였으며, 대상 홍수 사상으로는 2006년도 7월의 홍수 사상을 적용하였다. 허용 가능한 부분적 실패를 정의하기 위하여 당시 홍수 사상을 HEC-5 모형으로 구축, 모의한 결과를 이용하였다. HEC-5 모의 결과 중 수위자료를 시스템의 상태를 나타내는 퍼지 함수로 변환하여 적용하였고, 충주댐의 저수 용량을 구분하는 각각의 수위를 허용 가능한 부분적 실패 범위를 나타내는 퍼지 함수로 변환하여 적용하였다.

충주댐 하류 지역인 여주 지점의 경우도 HEC-5 모의 결과 중 여주 지점에서의 최대 유량을 시스템의 상태를 나타내는 퍼지 함수로 변환하여 적용하였고, 여주 지점의 계획홍수량, 계획홍수량의 80%를 허용 가능한 부분적 실패 범위를 나타내는 퍼지 함수로 변환하여 적용하였다.

4. 대상 유역에의 적용 결과

4.1 충주댐

다음의 표 1, 표 2, 그림 1, 그림 2는 2006년 7월 강우시 충주댐의 실측 수위 자료와 해당 강우사상을 HEC-5 모형으로 모의한 결과를 사용하여 허용 가능한 부분적 실패 범위와 시스템 상태의 근접한 정도를 산정한 값이다. 실측 수위 자료에서 초기 수위는 최대 수위 발생 48시간 전의 수위를 사용하였으며 HEC-5 모

의 수위 자료에서 초기 수위는 충주댐의 홍수기 제한수위를 사용하였다.

표 1. 허용 가능한 부분적 실패 범위와 시스템 상태의 소속 함수 값

실측 수위 자료			HEC-5 모의 수위 자료		
허용 가능한 부분적 실패 범위			허용 가능한 부분적 실패 범위		
구분	수위(EL·m)	소속 함수 값	구분	수위(EL·m)	소속 함수 값
계획 홍수위	145	0	계획 홍수위	145	0
홍수기 제한수위	138	1	홍수기 제한수위	138	1
저수위	110	1	저수위	110	1
사수위	86	0	사수위	86	0
시스템 상태			시스템 상태		
구분	수위(EL·m)	소속 함수 값	구분	수위(EL·m)	소속 함수 값
시스템 상태 상한	144.3	0	시스템 상태 상한	142.59	0
실측 최대 수위	144	1	모의 최대 수위	142.37	1
실측 초기 수위	132	0	모의 초기 수위	138	0

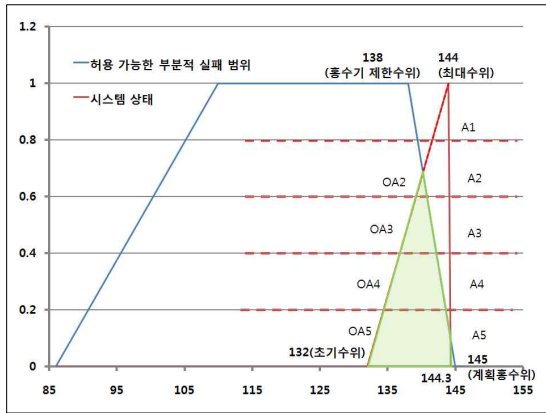


그림 1. 소속 함수 간의 중첩 영역(실측 수위 자료)

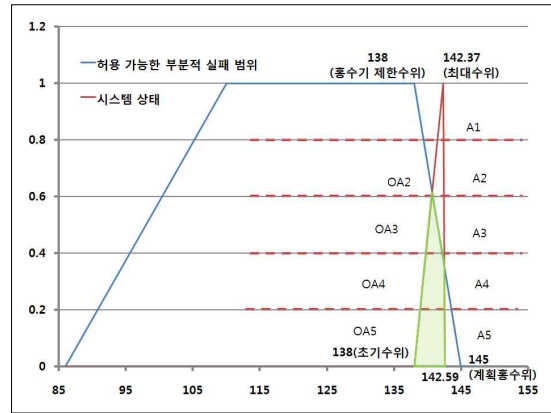


그림 2. 소속 함수 간의 중첩 영역(HEC-5 모의 수위 자료)

중첩 영역은 그림 2보다 그림 1에서 많이 발생하였으나 홍수조절효과는 HEC-5 모의 수위 자료를 사용하여 산정하였을 때 보다 큰 홍수조절효과가 나타났다. 이는 HEC-5 모의 수위 자료의 시스템 상태가 실측 수위 자료의 시스템 상태 보다 허용 가능한 부분적 실패 범위에 근접하기 때문이다.

표 2. 허용 가능한 부분적 실패 범위와 시스템 상태의 근접한 정도

실측 수위 자료			HEC-5 모의 수위 자료		
구분	A_i	OA_i	구분	A_i	OA_i
1	0.246	0	1	0.092	0
2	0.738	0.013	2	0.275	0.001
3	1.230	0.700	3	0.459	0.263
4	1.722	1.460	4	0.643	0.718
5	2.214	2.145	5	0.826	0.932
합계	6.150	4.318	합계	2.295	1.914

$$\Rightarrow C_{SL} = \frac{OA_{SL}}{A_S} = 0.702$$

$$\Rightarrow C_{SL} = \frac{OA_{SL}}{A_S} = 0.834$$

4.2 여주 지점

다음 표 3, 표 4, 그림 3, 그림 4, 그림 5는 2006년 7월 강우사상을 HEC-5 모형으로 모의한 결과를 사용하여 허용 가능한 부분적 실패 범위와 시스템 상태의 근접한 정도를 산정한 값이다. 여주지점의 경우 해당 강우사상의 1.0배, 1.5배, PMP 사상에 대해 모의한 결과값을 사용하여 근접한 정도를 산정하였다. 허용 가능한 부분적 실패 범위는 여주지점의 계획홍수량(15,600m³/s)의 소속 함수 값 '0', 계획홍수량의 80%(12,640m³/s)의 소속 함수 값 '1', 그 이하 유량의 소속 함수 값 '1'의 값을 공통으로 적용하였다.

표 3. 시스템 상태의 소속 함수 값

강우사상 1.0배 모의			강우사상 1.5배 모의			PMP 강우사상 모의		
구분	유량(m ³ /s)	소속 함수 값	구분	유량(m ³ /s)	소속 함수 값	구분	유량(m ³ /s)	소속 함수 값
최대유량	14,639.7	0	최대유량	19,859.6	0	최대유량	29,699.9	0
최대유량 75%	10,979.8	1	최대유량 75%	14,894.7	1	최대유량 75%	22,274.9	1
최대유량 50%	7,319.9	0	최대유량 50%	9,929.8	0	최대유량 50%	14,849.9	0

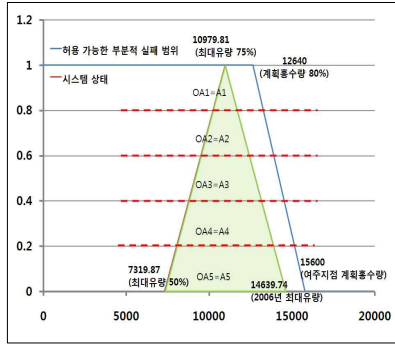


그림 3. 중첩 영역(강우사상 1.0배)

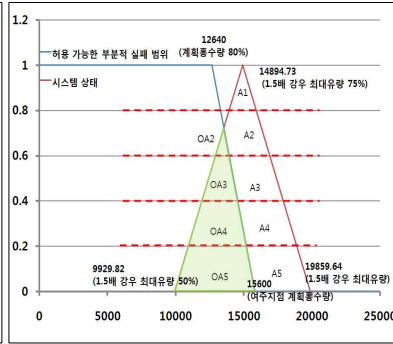


그림 4. 중첩 영역(강우사상 1.5배)

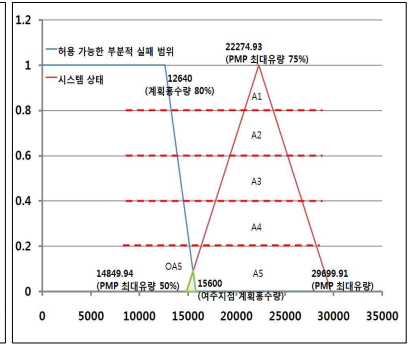


그림 5. 중첩 영역(PMP 강우사상)

산정 결과, 강우사상 1.0배시 최대 유량에 대한 여주 지점에서의 홍수조절효과는 매우 크며 강우사상 1.5 배시 홍수조절효과는 절반 이하로 감소되고 PMP 강우사상에서의 홍수조절효과는 매우 미미하다.

표 4. 허용 가능한 부분적 실패 범위와 시스템 상태의 근접한 정도

1.0배 모의	1.5배 모의		PMP 모의			
	구분	A _i	OA _i	구분	A _i	OA _i
$OA_{SL} = A_S$ $\Rightarrow C_{SL} = \frac{OA_{SL}}{A_S}$ $= 1.0$	1	198.6	-	1	297.0	-
	2	595.8	60.7	2	891.0	-
	3	993.0	361.6	3	1485.0	-
	4	1390.2	686.5	4	2079.0	-
	5	1787.4	1011.5	5	2673.0	42.6
	합계	4965.0	2120.3	합계	7425.0	42.6
	$\Rightarrow C_{SL} = \frac{OA_{SL}}{A_S}$ $= 0.427$		$\Rightarrow C_{SL} = \frac{OA_{SL}}{A_S}$ $= 0.006$			

5. 결론

퍼지 집합 이론을 이용하여 허용 가능한 부분적 실패 범위와 시스템 상태의 근접한 정도를 산정하였다. 산정한 값에 합리적으로 가중치를 부여하는 방안은 연구 중이다. 향후 본 연구를 통하여 개발한 홍수조절효과 정량화 지표는 수자원 시스템이 가지는 불확실성을 정량화하고, 허용 가능한 부분적 실패를 고려할 수 있으므로 보다 객관적으로 홍수조절효과를 평가할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 한국수자원공사(2004), 다목적댐운영 종합보고서.
2. 한국수자원공사(2008), 다목적댐운영 종합보고서.