환경영향평가 제15권 제1호(2006) pp.35~43

연구논문

퍼지이론을 이용한 호소의 부영양화등급 판정방법 개발

이용운* · 권병택**
전남대학교 건설지구환경공학부*, 풍림산업(주) 안전환경팀**
(2005년 10월 4일 접수, 2006년 1월 5일 승인)

Development of Fuzzy Method for Judging Lake Eutrophication Grades

Yong-Woon Lee* · Byong-Taek Kwon**
Dept. of Civil and Environmental Engineering, Chonnam National University*
Safety & Environment Team, Poong-Lim Industrial Co., Ltd.**
(Manuscript received 4 October 2005; accepted 5 January 2006)

Abstract

The eutrophication in lakes is caused by the inflow of excessive nitrogen and phosphorus, which are not only pollutants to reduce the value of water resource but also nutrients for algae growth that debases water quality. Several methods have been used to judge the eutrophication grades of lakes, but the judgment results can be different with one another even under same coditions because each method is different in judgment items and their standards.

A method for overcoming the problem with the judgment of eutrophication grades is, therefore, developed in this study with the application of fuzzy theory. This method allows decision makers to represent the uncertainties (differences) of results by the existing judgment methods and also incorporate associated uncertainties directly into the judgment process, so the judgment results can be made that are more realistic and consistent than those made without taking uncertainty in account.

Key words : Eutrophication Grade, Uncertainty, Fuzzy Number, Membership Degree, FTSI

I. 서 론

호소수는 예로부터 여러 가지 목적의 용수로 유용하게 이용되어 왔고, 근래에는 생활용수, 공업용수, 농업용수의 수요 증가로 많은 다목적 댐들이 건설되었다. 그러나, 이러한 호소들의 부영양화(Eutrophication)현상은 영양염류(질소와 인)의 과다유입에 기인하고 있으며, 근래에는 사회적인 문제로 크게 대두되고 있다.

Corresponding Author: Yong-Woon Lee, Dept. of Environmental Engineering, Chonnam National University, 300 Yongbong-Dong, Buk-Gu, Gwangju, 500-757, Korea Tel: 82-62-530-1861 Fax: 82-62-530-0678 E-mail: ywlee@jnu.ac.kr

평지 호소의 일반적 천이과정은 빈영양호(Oligotrophic lake), 중영양호(Mesotrophic lake), 부영양호(Eutrophic lake), 저층습원(Low-moor), 초원(Glassland), 산림(Forest)의 순서로 진행된다(박정규 등, 1998). 호소가 생성된 초기에는 영양염류의 농도가 낮고 수계내의 생산과 소비가 균형을 이루어 빈영양상태를 유지하나, 시간이 지남에 따라 영양염류의 농도가 점차로 증가하고 호소의 생산성이 높아짐에 따라 부영양화 과정을 겪게 된다.

호소는 부영양화가 진행됨에 따라 수질의 물리적, 화학적, 생물학적 특성이 변하고 식물플랑크톤의 과잉번식(종의 다양성은 줄고 우점 개체수만 증가), 투명도의 저하, 저층의 산소결핍, 이취미 유발, 수영이나 보트놀이의 방해, 물색깔 변화(미관 손상) 등이 발생하여 수자원으로서의 가치가 떨어지게 된다. 또한 부영양 호소수가 상수로 이용되는 경우에는 식물플랑크톤에 의해 상수처리장의 여과지나 스크린이 폐쇄될 수 있고, 응집 장애현상을 일으켜 많은 양의 응집제가 투여되어 처리비용의 상승을 초래할 수 있다(이용운 · 이학영, 2003). 이와 같이 부영양화된 호소수는 생활용수, 공업용수로 이용할 때 처리비용이 많이 들거나 이용자체가 곤란할 수 있고, 수산용수 또는 농업용수 등으로도 이용 가치가 떨어지게 된다.

현재 우리나라에서는 호소의 부영양화 정도를 판단하기 위하여 OECD, U.S. EPA, Carlson 지표, Forsberg & Ryding 등의 판정방법을 혼용하여 적용하고 있다(김좌관, 1994). 그러나 이러한 부영양화 판정방법들은 판정 적용항목 및 항목별 기준이 상이하여 판정방법에 따라 서로 다른 판정결과를 보이는 경우가 발생하고 있을 뿐만 아니라, 동일한 자료를 가지고도 판정방법에 따라 부영양화 판정결과가 서로 다르게 나타나고 있는 실정이다(한국수자원공사, 1998). 따라서, 본 연구의 목적은 기존 판정방법들에 의한 판정결과의 불확실성을 해석하고, 이것을 판정과정에 직접 반영하여 판정결과의 일관성을 유지할 수 있는 호소의 부영양화등급 판정방법을 개발하는 것이다.

II. 연구방법

1. 부영양화등급의 기존 평가방법 조사

현재 우리나라에서 사용하고 있는 호소의 부영양화등급 판정방법은 수집된 수질자료를 분석 및 해석하는 방법에 따라 단일항목에 의한 방법, 복수항목에 의한 방법, 부영양화 지수에 의한 방법으로 구분할 수 있다(김좌관, 1994).

단일 항목에 의한 판정방법(Table 1)은 하나의 수

Table 1. Estimates of trophic state by single item(김좌관, 1994)

Estimete item	Estimate methods	Ultra oligotrophic	Oligo-trophic	Meso-trophic	Eutrophic	Hyper-trophic
Transparency (m)	U.S. EPA		> 3.7	2.0~3.7	< 2.0	
	Carlson		> 4.0	2.0~4.0	< 2.0	
	Rast		> 4.6	2.7~4.6	< 2.7	
	Forsberg		> 4.0	2.5~4.0	< 2.5	
	OECD	≥ 12	≥ 6.0	6.0~3.0	3.0~1.5	1.5~0.7
T-P (mg/m^3)	U.S. EPA		≤ 10.0	10.0~20.0	>20.0~25.0>	
	Carlson		≤ 12.0	12.0~24.0	24.0	
	Rast		≤ 10.0	10.0~20.0	>20.0	
	Forsberg		≤ 15.0	15.0~25.0	25.0~100.0	≥ 100.0
	OECD	≤ 4.0	≤ 10.0	10.0~35.0	35.0~100.0	≥ 100.0
Chl-a (mg/m^3)	U.S. EPA		< 4.0	4.0~10.0	> 10.0	
	Rast	≤ 2.0	2.1~2.9	3.0~6.9	7.0~9.9	> 40.0
	Forsberg		< 3.0	3.0~7.0	7.0~40.0	≥ 40.0
	OECD	≤ 1.0	≤ 2.5	2.5~8.0	8.0~25.0	> 25.0

Table 2. Estimates of trophic state by multiple items(김좌관, 1994)

Estimete methods	Estimate item	Ultra oligotrophic	Oligo-trophic	Meso-trophic	Eutrophic	Hyper-trophic
U.S. EPA	Transparency (m)		> 3.7	2.0~3.7	< 2.0	
	T-P (mg/m^3)		≤ 10	10~20	> 20~25	
	Chl-a (mg/m^3)		< 4.0	4.0~10.0	> 10.0	
	Oxygen Saturation (%)		> 80	10~80	< 10	
OECD	Transparency (m)	≥ 12	≥ 6	6.0~3.0	3.0~1.5	1.5~0.7
	T-P (mg/m^3)	≤ 4	≤ 10	10~35	35~100	≥ 100
	Chl-a (mg/m^3)	≤ 1.0	≤ 2.5	2.5~8.0	2.5~8.0	> 25.0
Forsberg & Ryding	Transparency (m)		> 4.0	2.5~4.0	2.5~4.0	
	T-P (mg/m^3)		≤ 15	15~25	25~100	≥ 100
	Chl-a (mg/m^3)		< 3.0	3.0~7.0	7.0~40.0	≥ 40.0
	T-N (mg/m^3)		< 400	400~600	600~1500	> 1500

질 항목만을 측정하여 부영양화를 판정하므로 매우 간단하다는 장점은 있으나 수체가 갖고 있는 고유한 특성을 종합적으로 고려할 수 없으며, 다른 항목에 의해 판정할 경우 서로 다른 판정 결과를 보이는 단점이 있다.

복수 항목에 의한 부영양화 판정방법은 부영양화 현상과 밀접한 관계를 갖고 있는 여러 개의 수질 항목을 동시에 측정하여 판정하는 것이다(Table 2). 그러나 이러한 판정방법은 많은 종류의 수질항목들을 요구하며, 단일항목의 경우와 마찬가지로 판정 수질 항목 및 판정방법에 따라 서로 다른 판정결과가 나올 수 있다.

수정 Carlson 지수라 불리는 부영양화 지수 방법은 단일 항목에 의한 판정방법과 복수 항목에 의한 판정방법들과는 달리 부영양화의 발생 여부 및 진행 정도를 0에서부터 100 사이의 값으로 연속적인 수치로 다음과 같이 표시한다(한국수자원공사, 1998).

$$TSIM(Chl) = 10 \times \{2.46 + \ln(Chl)/\ln 2.5\} \quad (1)$$

$$TSIM(SD) = 10 \times \{2.46 + (3.69 - 1.53 \ln(SD))/\ln 2.5\} \quad (2)$$

$$TSIM(TP) = 10 \times \{2.46 + (6.71 + 1.15 \ln(TP))/\ln 2.5\} \quad (3)$$

여기서, chl의 단위는 mg/m^3, 투명도(SD)의 단위는 m, 총인(TP)의 단위는 mg/l이며, TSIM이 40 이하면 빈영양, 40~50이면 중영양, 그리고 50 이상이면 부영양으로 분류하고 있다.

한편, 수정 Calson 지수를 참조하여 우리나라의 담수호를 대상으로 부영양화 지수를 개발한 바 있는데, KTSI(Korean TSI)라 부르고 있다(전라남도, 1992). 그러나 부영양화 지수에 의한 방법은 평가적용 수질항목들(클로로필 a, SD, TP)에 따라 서로 다른 판정결과를 나타낼 수 있고, 이러한 경우에 이들을 종합하여 단일 결과로 표시하기가 곤란하다.

2. 퍼지이론의 응용

앞에서 설명한 바와 같이 호소의 부영양화등급을 판정하기 위한 방법들은 여러 가지가 있다. 그러나 이러한 판정방법들은 각 적용항목에 따른 기준의 범위가 서로 같지 않아 판정방법에 따라 동일한 조건에서도 판정결과가 서로 다를 수 있고, 평가방법이 같더라도 적용항목이 다르면 판정결과가 서로 다르게 나타날 수 있다. 이와 같이 동일조건에서 여러 판정방법들에 의해 평가된 판정결과의 차이(불확실성)가 크면 클수록 부영양화등급 판정에 관한 의사결정은 점점 어려워지고, 경우에 따라서는 판정결과를 활용하려는 기관들이 자신에게 유리한 판정결과가 도출될 수 있는 방법을 적용할 수도 있다. 따라서 현재 사용되고 있는 부영양화등급 판정방법의 차이에 기인하는 불확실성을 해석하고, 이를 의사결정(판정)과정에 반영하여 동일조건에서는 항상 동일한 결과가 나타나도록 할 필요성이 있다.

불확실성을 해석하는 방법에는 크게 확률이론과

퍼지이론이 있다(Klir and Folger, 1988). 1965년에 퍼지이론(Fuzzy theory)이 나오기 전까지는 불확실한 상황을 표현할 때 확률이론(Probability theory)을 보통 사용하였으나, 이것의 단점은 불확실성의 세계를 확률적으로 측정할 수 있을 때에만 적용이 가능하다는 것이다. 그러나 본 연구의 경우와 같이 퍼지이론은 그렇지 않은 경우에도 적용이 가능하다는 편리성이 있다. 따라서 본 연구에서는 여러 판정방법들에 의한 판정결과의 불확실성(차이)을 해석하고 이를 판정과정에 반영하는 수학모델을 개발하는데 퍼지이론을 다음과 같이 이용할 것이다.

1) 퍼지집합

퍼지이론은 1965년 Zadeh가 발표한 「퍼지집합(Fuzzy sets)」이란 논문에서 처음 소개되었으며(Zadeh, 1965), 일본에서는 애매이론이라 하고 중국에서는 애매모호의 모호를 따서 모호수학이라고 부르기도 하지만 애매나 모호라는 말 자체가 갖는 나쁜 이미지 때문에 많은 학회에서 그냥 퍼지이론이라 부르고 있다.

우리가 보편적으로 알고 있는 종래의 집합은 경계가 명확해서 퍼지집합과 구분하여 보통집합(Crisp sets)이라고 부른다. 보통집합의 예로서 "키가 175cm 이상인 사람의 집합"을 사용할 수 있다. 이러한 집합의 경계는 명확하여 어떤 수가 이 집합의 원소인지 아닌지는 "예" 또는 "아니오"로 정확하게 대답할 수 있다. 가령 키가 176cm인 사람이 이 집합의 원소냐는 물음에 우리는 "예"라고 명확히 말할 수 있다. 그러나 "키가 큰 사람의 집합"이 있을 때 키가 176cm인 사람은 이 집합의 원소라고 명확하게 말하기는 어렵다. 즉, 키가 큰 사람이 어느 정도 이상인지 경계가 명확하지 않기 때문이다. 이와 같이 집합의 경계가 불명확한 것을 퍼지집합이라고 부른다.

어떤 원소 x가 어느 정도로 퍼지집합 A에 소속되어 있느냐를 표현하는 것이 소속함수(Membership function) $\mu_A(x)$인데, 소속함수 값의 범위는 0과 1사이다(Klir and Folger, 1988). 원소 x가 집합 A에 포함되는 정도가 높을수록 소속함수의 값은 1에 가까워지고, 낮을수록 0에 접근하게 된다. 어떤 퍼지집합이 소속함수의 값으로서 0 또는 1만을 가질 때, 이러한 퍼지집합은 보통집합과 동일한 것이 된다. 보통집합에서는 집합의 경계가 명확하여 어떤 원소가 집합에 소속되면 소속함수의 값은 1(예)이고 그렇지 않으면 0(아니오)이 된다.

2) 퍼지숫자

목욕하기에 적합한 수온과 같이 명확하게 정의 할 수 없는 숫자를 퍼지집합의 소속함수를 활용하여 표현한 것을 퍼지숫자(Fuzzy number)라고 부른다(Lee *et al.*, 2001) 즉, 퍼지숫자란 소속함수의 어떤 값을 가지고 어느 집합에 속하는 정도를 표현하는 숫자이다. 예를 들어 어떤 퍼지숫자 T가 있고 이것의 소속함수[μ(T)]의 형태가 사다리꼴(Figure 1)이라고 하면, μ(T)는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\mu(\mathrm{T}) = \begin{cases} 1 & a \le T \le b \\ (T-A)/(a-A) & A \le T < a \\ (T-B)/(b-B) & b < T \le B \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad (4)$$

여기서 A와 B는 퍼지숫자 T의 최소값과 최대값을 각각 의미하고, a와 b는 퍼지숫자 T의 신뢰성이 가장 높은 구간의 최소값과 최대값을 나타낸다. 또한, (a − A)는 a로부터 왼쪽으로의 불확실성의 크기이고, (B − b)는 b로부터 오른쪽으로의 불확실성의 크기를 표현한다. 따라서, (a − A)와 (B − b)의 값이 크면 클수록 퍼지숫자 T에 대한 불확실성의 정도는 점

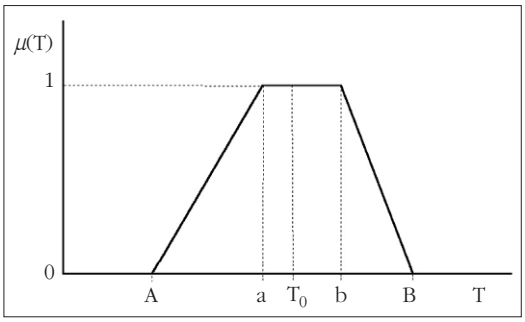


Figure 1. Membership function μ(T) of fuzzy number T

점 증가한다. 한편, (a − A)와 (B − b)의 값이 모두 0이고 a=b이면, T는 퍼지숫자가 아닌 하나의 명확한 숫자(Nonfuzzy number)라는 것을 의미한다.

3) 퍼지평균

어떤 수질의 실제 측정값의 산술평균은 측정값 각각의 가중치를 고려하지 않은 값인 반면, 퍼지평균은 각각의 측정값의 가중치를 고려한 값으로(Kandel and Langholz, 1993), Figure 1에서와 같이 어떤 퍼지숫자 T가 사다리꼴 형태의 소속함수를 가질 때 T의 소속함수에 대한 퍼지평균 T_0는 다음식에 의해 구해질 수 있다.

$$T_0 = \frac{\int T \cdot \mu(T)dt}{\int \mu(T)dt} = \frac{\int T \cdot \mu(T)dt}{S} = \frac{\int \frac{T(T-A)}{(a-A)}dt + \int Tdt + \int \frac{T(T-B)}{(b-B)}dt}{\int \frac{T(T-A)}{(a-A)}dt + \int dt + \int \frac{T(T-B)}{(b-B)}dt} \quad (5)$$

III. 연구결과 및 고찰

1. 부영양화등급 판정모델의 구성

본 연구에서 개발할 호소의 부영양화등급 퍼지판정 모델은 순서에 따라 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 등급판정에 적용되는 수질항목 측정(실제)값들을 동일한 단위를 갖는 표준값들로 전환하는 수식이고, 두 번째는 여러 판정방법들에 의해 나타나는 서로 다른 표준값들을 퍼지숫자화하여 퍼지평균을 구하는 수식이다.

2. 실제값의 표준값 전환방법

본 연구에서는 수계의 영양상태를 극빈영양단계, 빈영양단계, 중영양단계, 부영양단계, 과영양단계 등 5개의 영양단계로 구분한다. 그러나 투명도와 T-P 농도와 같이 영양등급 판정항목별 단위가 서로 다른 경우에 직접적인 연산이 어렵기 때문에 단위를 통일시키기 위하여 각 판정항목별 실제값은 무단위를 가지는 표준값(Standard index, SI)으로 전환되어야만 한다. 영양등급 판정항목별 실제값($Z_{i,v,s}$)을 표준값($SI_{i,v,s}$)으로 전환시키기 위한 계산식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

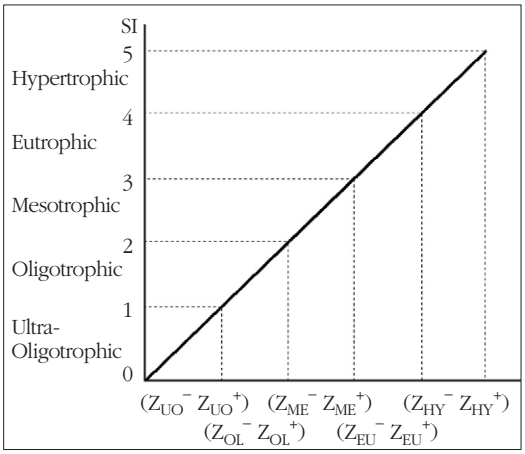
실제값이 클수록 영양정도가 높은 경우(Figure 2)

$$SI_{i,v,s} = \frac{Z_{i,v,s} - Z_{i,v,s}^{-}}{Z_{i,v,s}^{+} - Z_{i,v,s}^{-}} + k \quad (6)$$

실제값이 클수록 영양정도가 낮은 경우(Figure 3)

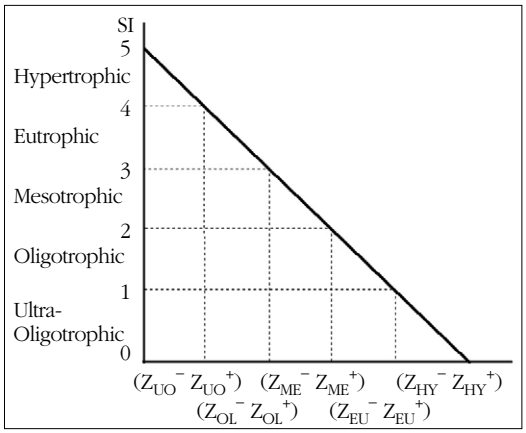
$$SI_{i,v,s} = \frac{Z_{i,v,s}^{+} - Z_{i,v,s}}{Z_{i,v,s}^{+} - Z_{i,v,s}^{-}} + k \quad (7)$$

여기서 $Z_{i,v,s}$ = 부영양화등급 판정항목별 실제값; i = 1, …, m이고 m은 실제값의 총 개수; v = 판정방법(U.S. EPA, Forsberg & Ryding, OECD, 수정 Carlson 지수, KTSI); s = 영영상태 판정방법별로 실제값이 소속되어 있는 영양단계; $Z_{i,v,s}^{-}$와 $Z_{i,v,s}^{+}$ = 판정항목별 영양단계 구간의 최소값과 최대값, 그리고



Note) Z_{UO}^{-} & Z_{UO}^{+} = Minimum and Maximum value of Ultra-Oligotrophic
Z_{OL}^{-} & Z_{OL}^{+} = Minimum and Maximum value of Oligotrophic
Z_{ME}^{-} & Z_{ME}^{+} = Minimum and Maximum value of Mesotrophic
Z_{EU}^{-} & Z_{EU}^{+} = Minimum and Maximum value of Eutrophic
Z_{HY}^{-} & Z_{HY}^{+} = Minimum and Maximum value of Hypertrophic

Figure 2. Estimate of SI for T-P, T-N and Chl-a



Note) Z_{UO}^- & Z_{UO}^+ = Minimum and Maximum value of Ultra-Oligotrophic

Z_{OL}^- & Z_{OL}^+ = Minimum and Maximum value of Oligotrophic

Z_{ME}^- & Z_{ME}^+ = Minimum and Maximum value of Mesotrophic

Z_{EU}^- & Z_{EU}^+ = Minimum and Maximum value of Eutrophic

Z_{HY}^- & Z_{HY}^+ = Minimum and Maximum value of Hypertrophic

Figure 3. Estimate of SI for Transparency and DO

k = s가 극빈영양단계, 빈영양단계, 중영양단계, 부영양단계, 과영양단계일 때 각각 0, 1, 2, 3, 4이다. 예를 들어 i번째 평가항목인 T-P 측정 농도의 실제값($Z_{i,v,s}$)이 12mg/m^{3}일 때 U.S. EPA 판정방법에 의하면 중영양상태이다. 이때 v = U.S. EPA, s = 중영양상태, $Z_{i,v,s}^-$ = 10, $Z_{i,v,s}^+$ = 20, 그리고 k = 2가 된다.

식 (6)과 식 (7)에 보여지듯이 SI 계산은 두 개의 식들 중에 어느 하나를 선택하여야 한다. 수질 측정 항목 중 총인(T-P), 총질소(T-N), 클로로필 a(Chl-a)와 같이 높은 값을 나타낼수록 부영양화 정도가 심한 경우에는 식 (6)을 선택하고, 투명도나 심수층의 포화산소농도와 같이 낮은 값을 나타낼수록 부영양화 정도가 심한 경우에는 식 (7)을 선택하여야 한다. 이러한 식들에 의해 계산된 SI의 지표값은 무단위를 가지는 수치로 통일되어 표현되기 때문에 서로 다른 판정항목이라도 비교 분석하기가 용이하고, 필요에 따라 서로 다른 판정항목들 간에 연산을 수행할 수 있다.

Tables 1~2에 보여진 것처럼 현재 사용되고 있는 단일 또는 복수항목 판정방법들은 극빈영양단계의 최소값이나 과영양단계의 최대값을 한정하지 않고 있다. 그러나 본 연구의 SI 계산식에서는 이러한 값들을 요구한다. 어느 판정항목이든지 최소값으로 0을 취해도 무리가 없으나, 최대값의 경우에는 상한치를 한정하기가 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 수정 Carlson 지표를 참고하여 만들어진 KTSI(전라남도, 1992)에 나타난 최대값(KTSI = 100)을 기초로 총인, 클로로필 a 및 투명도의 최대값을 각각 2,663mg/m^3, 1,001mg/m^3, 27.07m로 설정하였고, 심수층 포화산소 퍼센트는 100%로 하였다. 하지만 KTSI에서 고려하지 않은 총질소의 경우에는 총질소와 총인의 비율이 16 : 1을 초과할 경우 조류 번식에 대한 제한인자는 인(P)으로 볼 수 있음으로 총인 최대값의 16배(42,608mg/m^3)를 총질소의 과영양단계 최대값으로 설정하였다.

3. 퍼지평균에 의한 부영양화등급 종합판정

SI 값은 영양등급 판정항목뿐만 아니라 적용하는 판정방법에 따라 다르게 나타날 수 있기 때문에 이러한 불확실성, 즉 차이(Deviation)을 해석하기 위하여 SI 값들은 Figure 4와 같이 퍼지숫자 FSI(Fuzzy standard index)로 전환될 필요성이 있다. 식 (4)에

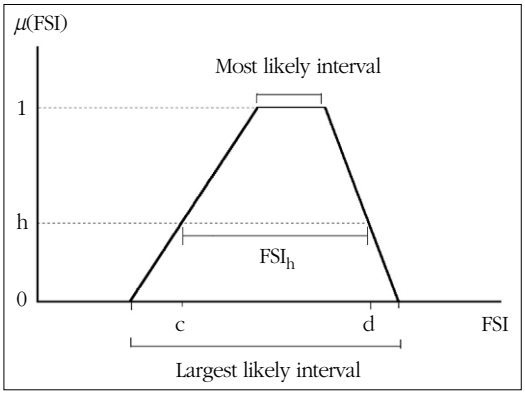


Figure 4. Membership function of Fuzzy Standard Index(FSI)

Table 3. Results of trophic state judgment

Estimate Methods	T-P = 11mg/m^3		클로로필 a = 8mg/m^3		Transparency = 2.5m	
	Trophic state	SI	Trophic state	SI	Trophic state	SI
OECD	Mesotrophic	2.04	Eutrophic	3.00	Eutrophic	3.33
U.S EPA	Mesotrophic	2.10	Mesotrophic	2.67	Mesotrophic	2.71
Forsberg & Ryding	Oligotrophic	1.73	Eutrophic	3.03	Eutrophic	3.00
TSI	Mesotrophic	2.12	Mesotrophic	2.73	Mesotrophic	2.96
KTSI	Oligotrophic	1.88	Mesotrophic	2.73	Mesotrophic	2.03

Table 4. Trophic state division by FTSI

Division	Ultra-Oligotrophic	Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic	Hypertrophic
FTSI	0.0 ~ 1.0	1.0 ~ 2.0	2.0 ~ 3.0	3.0 ~ 4.0	4.0 ~ 5.0

서 설명한 바와 같이 퍼지숫자(Fuzzy number)란 소속함수의 어떤 값(Membership degree)을 가지고 어느 집합에 속하는 숫자이다. 본 연구에서는 SI의 소속함수[μ(FSI)]를 정의하기 위하여 SI가 실제로 존재할 가능성이 있는 최대구간(Largest likely interval, LLI)과 존재할 가능성이 가장 높은 구간(Most likely interval, MLI)을 한정하여 Figure 4와 같이 사다리꼴 형태로 표현하였다.

예를 들어 전남 강진군에 있는 호소의 수질을 조사한 자료에 의하면, 총인(T-P)이 11mg/m^3, 클로로필 a가 8mg/m^3, 투명도가 2.5m였는데, 식 (6)과 식 (7)을 사용하여 영양등급 판정방법별로 각 평가항목의 SI 값을 계산한 결과는 Table 3에 보여진다. 이 표에 나타난 SI 값들은 총 15개이며, 이들 중에서 최소값과 최대값은 각각 1.73과 3.33이고, 산술평균값은 2.54이다. 이때 LLI는 1.73~3.33이고, MLI는 2.12~2.67(산술평균값에 가장 가까운 위와 아래 숫자)이 될 수 있다. 그러나 이러한 사다리꼴 형태는 MLI가 2.12~2.67이 아니라 2.54라는 하나의 점으로 한정되면 삼각형 형태로 변환된다. 또 다른 예로서 LLI의 범위가 2.54~2.54인 경우에는 불확실성이 전혀 없는 경우로서 Figure 4의 사다리꼴 형태의 소속함수는 수직선 형태로 줄어든다.

Figure 4의 소속함수에 의해 한정된 FSI 값은 어느 소속값(h)을 가지고 표현되는 구간값($c \le FSI_h \le d$)이다. 그러나 이러한 구간값이 최소한 2개의 영양단계 구간(예: 빈영양에서 중영양)에 걸쳐 있으면 어느 영양단계에 소속되어 있는지 판정하기 곤란하게 된다. 따라서 본 연구에서는 퍼지평균을 구하는 식 (5)를 이용하여 Figure 4로 표현된 소속함수의 퍼지평균을 계산함으로서 구간값이 아닌 하나의 점값(Point value)으로 나타나는 부영영양등급 판정값을 구하였다. 이 판정값(퍼지평균)을 퍼지 부영양상태 지수값(Fuzzy Trophic State Index, FTSI)이라 명명하였으며, 영양단계를 구별하는 FTSI 값은 Table 4에 보여진다.

FTSI 값은 선택된 판정항목별로 각 판정방법에 의해 계산된 SI 값들을 모두 고려함으로서 수계의 영양상태를 종합적으로 평가할 수 있고, 극빈영양단계에서 과영양단계까지 0부터 5까지의 연속적인 수치로 나타나므로 수계의 영양상태 변화정도를 연속선상에서 파악할 수 있다.

Table 3에 나타난 SI 값들의 퍼지평균을 Figure 4와 식 (5)에 의해 구하면, FTSI = 2.39가 되고, 이러한 값을 가지는 전남 강진군에 위치한 호소는 Table 4의 기준에 따라 중영양 상태라고 할 수 있다. 또 다른 예로서 전남 순천시에 위치한 호소의 경우에 총인(T-P)이 24mg/m^3, 클로로필 a가 2.4mg/m^3, 투명도가 3.7m로 나타났는데, OECD, U.S. EPA, Carlson 지

표, Forsberg & Ryding 등의 판정방법을 사용하면 적용 수질항목별로 빈영양부터 부영양까지 여러 개의 서로 다른 판정결과가 나타나며, 이때 이들을 종합하여 단일 결과로 표시하기는 곤란하다. 그러나 본 연구의 부영양화등급 판정모델을 사용하면 수질항목별로 서로 다른 여러 개의 판정결과가 아닌 한 개의 종합결과값인 FTSI는 2.29로 계산되고 Table 4의 기준에 따라 중영양 상태의 호소라고 판정할 수 있다.

4. User Interfaces의 개발

본 연구에서는 부영양화등급 지수값(FTSI)을 용이하게 구하기 위하여 FTSI 산출 모델식에 기초한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 즉, Microsoft사의 Visual Basic 6.0 프로그램을 이용하여 Window 95/98/NT 환경에서 구동이 가능한 User Interfaces를 개발하였고, 키보드와 마우스를 이용하여 사용이 가능하도록 하였다.

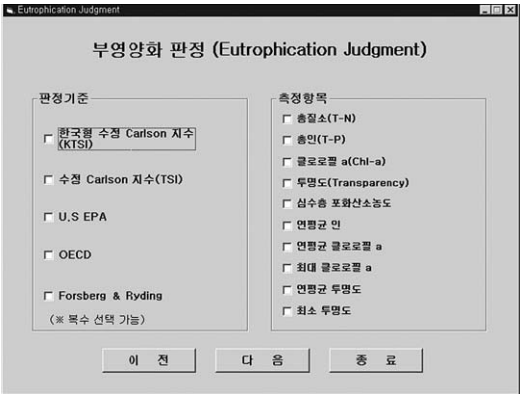


Figure 5. User Interface of Eutrophication Judgment

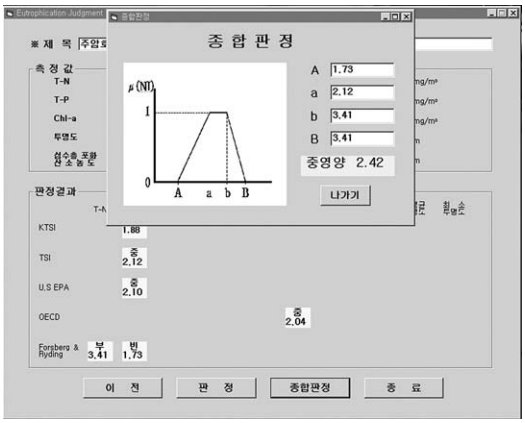


Figure 6. Results of Eutrophication Judgment

주요 User Interfaces를 살펴보면, Figure 5에서와 같이 원하는 판정기준(방법)을 단수 또는 복수선택하고 측정항목들 역시 단수 또는 복수로 선택하면, 선택된 측정항목들의 실제 자료값을 입력할 수 있는 화면이 나타나 자료입력이 완료되면, Figure 6과 같은 다음 화면이 나타나 최종 판정결과를 볼 수 있다.

IV. 결 론

- 기존의 부영양화등급 판정방법들은 적용 수질항목 및 항목별 기준이 상이하여 판정방법에 따라 서로 다른 판정결과를 보일 수 있고, 동일한 조건에서도 판정결과가 서로 다를 수 있다.
- 판정방법들별로 판정결과의 차이(불확실성)가 크면 클수록 부영양화등급 판정에 관한 의사결정은 점점 어려워지고, 경우에 따라서는 판정결과를 활용하려는 기관들이 자신에게 유리한 판정결과가 도출될 수 있는 방법을 적용할 수도 있다.
- 본 논문에서는 여러 판정방법들의 차이에서 기인하는 불확실성을 해석하고, 이를 의사결정(판정)과정에 종합적으로 반영할 수 있는 부영양화등급 판정방법을 퍼지이론을 이용하여 개발하였다.
- 부영양화등급 퍼지판정 방법은 단일항목 또는 복수항목을 사용하는 기존의 여러 판정방법들의 서로 다른 결과들을 모두 반영할 수 있기 때문에 호소의 부영양상태를 종합적으로 평가할 수 있고, 부영양화등급을 0(극빈영양단계)부터 5(과영양단계)까지의 연속적인 지표(FTSI)로 표현하고 있어 수계의 영양상태 변화정도를 연속선상에서 파악할 수 있다.
- 본 논문에서는 전문가가 아닌 일반인들도 기본적으로 제공되는 수질항목별 측정값을 가지고, 부

영양화등급 판정이 용이하도록 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며, 이는 앞으로 원격수질자동측정망과 연계하여 호소의 부영양화등급을 실시간으로 판정하는데 유용하게 활용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부지정 전남지역환경기술개발센터의 지원(03-1-80-81)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

김좌관, 1995, 수질오염개론, 동화기술, 193-220

박정규 등, 1998, 신 수질관리, 신광문화사, 314-316

이용운, 이학영, 2003, 주암호에서 수질과 식물플랑크톤 군집에 미치는 광 차단효과, 36(2), 150-160.

전라남도, 1992, 주암호 수질보전대책 수립 종합계획보고서, 전라남도.

한국수자원공사, 1998, 주암호 수질관리 전략개발에 관한 연구, 한국수자원공사

Kandel, A. and Langholz, G., 1993 “Fuzzy Control Systems”, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, U.S.A., 276-282.

Klir, G. J. and Folger, T. A., 1988, Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A. 138-192.

Lee, Y. W. *et al.*, 2001, Dose-response assessment by a fuzzy linear-regression method, Water Science and Technology, 43(2), 133-140.

Zadeh, L. A., 1965, Fuzzy Sets, Information and Control, 8(3), 338-353.

최종원고채택 06. 01. 26