

## 수질인자의 합성에 의한 하천 레크리에이션 지수 모델의 개발

서일원\* · 최수연\*\*

Seo, Il Won\*, Choi, Soo Yeon\*\*

### Development of River Recreation Index Model by Synthesis of Water Quality Parameters

#### ABSTRACT

In this research, a River Recreation Index Model (RRIM) was developed to provide sufficient information on the water quality of rivers to the public in order to secure safety of publics. River Recreation Index (RRI) is an integrated water quality information for recreation activities in rivers and expressed as the point from 0 to 100. The proposed RRIM consisted of two sub models: Fecal Coliform Model (FCM) and Water Quality Index Model (WQIM). FCM predicted Fecal Coliform Grade (FCG) using a logistic regression and WQIM synthesized water quality parameters of, DO, pH, turbidity and chlorophyll a into Water Quality Index (WQI). FCG and WQI were integrated into RRI by the integrating algorithm. The proposed model was applied to upstream of Gangeong Weir in Nakdong River, and compared with Real Time Water Quality Index (RTWQI) which is the existing water quality information system for recreation use. The results show that calculated RRI reflected change of integrated water quality parameters well. Especially chlorophyll a showed Pearson correlation coefficient -0.85 with RRI. Also, RRIM produced more conservative index than RTWQI because RRI was calculated considering uncertainty of water quality criteria. Further, RRI showed especially low values when fecal coliform was predicted as low grade.

**Key words :** River recreation index model, Fecal coliform, Water quality index, Logistic regression, Fuzzy synthetic evaluation, Nakdong river

#### 초 록

본 연구에서는 시민들이 하천에서 안전하고 쾌적하게 레크리에이션 활동을 할 수 있도록 종합 수질 정보를 제공하는 하천 레크리에이션 지수 산정 모델을 개발하였다. 하천 레크리에이션 지수 모델은 분변성 대장균 모델과 수질지수 모델을 통합하여 구성하였다. 분변성 대장균 모델에서는 로지스틱 회귀분석을 사용하여 분변성 대장균 등급을 예측하였고, 수질지수 모델에서는 DO, pH, 탁도, 클로로필 a를 퍼지 합성방법을 통해 종합화하여 수질 지수를 산정하였다. 최종 단계에서 분변성 대장균 등급과 수질 지수를 통합하여 하천 레크리에이션 지수를 산정할 수 있도록 모델을 개발하였다. 제안된 모델을 낙동강의 강정고령보 상류 지점에 적용한 결과, 하천 레크리에이션 지수는 개별 수질인자들의 변화를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 특히 하천 레크리에이션 지수와 클로로필 a의 상관계수가 -0.85로 나타나 클로로필 a가 하천 레크리에이션 지수에 가장 많은 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 본 모델에서 산정한 종합수질지수는 기존 수질 정보 제공 시스템인 실시간 수질지수보다 보수적인 결과를 보였는데, 이는 등급에 따라 현재의 수질 상태가 어떠한 상태에 속하는지를 계산하고 수질 기준의 불확실성을 적절하게 고려하기 때문인 것으로 판단되었다. 나아가서, 분변성 대장균 등급이 낮을 경우 하천 레크리에이션 지수가 분변성 대장균을 고려하지 않고 있는 실시간 수질지수보다 낮은 결과를 제시하는 것으로 나타났다.

**검색어 :** 하천 레크리에이션 지수 모델, 분변성 대장균, 수질지수, 로지스틱 회귀분석, 퍼지 합성방법, 낙동강

\* 정희원 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수 (Seoul National University · [seoilwon@snu.ac.kr](mailto:seoilwon@snu.ac.kr))

\*\* 교신저자 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 박사과정 (Corresponding Author · Seoul National University · [jjasa1103@snu.ac.kr](mailto:jjasa1103@snu.ac.kr))

Received March 3, 2014/ revised March 31, 2014/ accepted June 30, 2014

### 1. 서론

최근 한국에서는 소득 증가와 함께 여가 활동에 대한 관심이 상승하여 하천에서의 레크리에이션 활동이 급속히 확대되고 있다. 근년에 시행된 4대강 복원사업에 의해서 하천의 수변 공간이 재정비되면서 다양한 수상 레크리에이션 활동을 즐길 수 있는 장소가 확보되어 하천 레크리에이션이 더욱 각광을 받고 있다. 하천 레크리에이션 중 수영, 보트, 수상스키와 같이 수체와의 접촉을 유발하는 활동에 있어서 하천의 수질은 수위, 유속 등의 수리학적 인자와 더불어 가장 중요한 요소이다. 수질이 나쁜 경우, 하천 레크리에이션 활동 중 수체와 접촉하여 수인성 질병이 발발할 수 있으며, 소화기 장애, 눈과 피부의 질병 등이 발생할 수 있다. 이처럼 하천의 수질은 수상 활동에 있어서 매우 중요하기 때문에, 하천 관리 기관은 시민들이 안전하게 하천 레크리에이션을 즐길 수 있도록 수질에 대한 적절한 정보를 제공할 필요가 있다.

수상 레크리에이션이 발달한 국가에서는 레크리에이션에 필요한 수질 정보를 제공하는 예측·예보 시스템이 적극적으로 운영되고 있다(Table 1). 먼저 미국에서 대표적으로 Massachusetts주의

Flagging program, Ohio주의 Nowcasting beach advisories, Philadelphia주의 Philly Rivercast 등이 운영되고 있다. Table 1에 나타난 바와 같이 이 시스템들에서는 수영 혹은 보트와 같이 수체와 직접 혹은 간접접촉을 필요로 하는 활동에 대해 안전한 조건을 제시하고 있으며, 이 때 주요 예보 인자로서 수인성 질병과 상관관계가 높다고 알려진 대장균 농도를 제시하고 있다. 이들 시스템에서는 대장균 농도와 상관관계가 높은 다른 인자들과의 선형회귀분석을 통해 대장균 농도를 예측하고, 이에 따라 레크리에이션 활동의 가능 여부에 대한 정보를 시민들에게 알려주고 있다. 그러나 이러한 시스템은 대장균과 같은 단일 수질인자로 수준을 판단함으로써 인해 종합적인 수질 정보를 제공할 수 없다는 점에서 한계를 지니고 있다. 뉴질랜드도 이와 비슷한 방법으로 Wellington 지역에서 Suitability for Recreation Grade (SFRG) 시스템을 운영하고 있다. 그러나 이 시스템의 경우 본격적인 수상활동이 시작되는 여름에 연 1회 정보를 제공한다는 점에서 그 한계점을 가진다. 홍콩에서는 WATERMAN이라는 시스템을 운영하고 있는데 대장균 농도를 예측할 시 통계적인 방법을 사용하는 것에 더하여 물리기반 모델을 사용하여 대장균 농도를 산정한다. 이

Table 1. Water Quality Information System for Recreation in Domestic and Overseas Nations

System	Objectives	Update Period	Forecasting Parameter	Input Parameter	Website
Real Time Water Quality Index (RTWQI, Korea)	Indicate suitable water recreation condition (Not concrete definition)	Daily basis	Prediction of WQI by formulation consisting of the scope, frequency and amplitude of water quality guideline non-compliance	water temperature, pH, DO, EC, TOC, TN, TP	<a href="http://koreawqi.go.kr/">http://koreawqi.go.kr/</a>
Flagging Program (Massachusetts, USA)	Indicate suitable secondary contact (boating) conditions	Weekly basis	Prediction of E.coli concentration by linear regression	rainfall, intensity and duration of storm event, wind speed, discharge, radiation, etc.	<a href="http://www.crwa.org/fieldscience/water-quality-notification">www.crwa.org/fieldscience/water-quality-notification</a>
Nowcasting Beach Advisories (Ohio, USA)	Indicate suitable direct (swimming) and secondary (boating) contact conditions	Daily basis	Prediction of E.coli concentration by linear regression	turbidity, the # of birds, wave heights, water temperature, lake level	<a href="http://www.ohionowcast.info">http://www.ohionowcast.info</a>
Philly Rivercast (Philadelphia, USA)		Daily basis	Prediction of fecal coliform concentration by algorithm	precipitation, discharge, turbidity	<a href="http://schuylkillrivercast.org">http://schuylkillrivercast.org</a>
Suitability for Recreation Grade (SFRG) (Wellington, New Zealand)		Yearly basis	Prediction of fecal coliform concentration by algorithm	catchment area for sources of faecal contamination, the results of water sampling during the previous five summers	<a href="http://www.govt.nz/beachgrades/">http://www.govt.nz/beachgrades/</a>
WATERMAN (Hong Kong)		Daily basis	Prediction of E.coli concentration based on statistical methods, hydrodynamic modeling and data-driven hydro-informatics tools	rainfall, solar radiation, onshore wind, tide level	<a href="http://www.waterman.hku.hk">http://www.waterman.hku.hk</a>

시스템의 단점은 물리기반 모델이 포함된 과정을 거치기 때문에 시스템이 복잡하다는 점이다.

국내에서는 수질 관리 주체인 환경부가 최근에 운영하기 시작한 실시간 수질 정보시스템(www.koreawqi.go.kr)에서 실시간 수질 지수(Real Time Water Quality Index, RTWQI)를 제공하고 있다. 이 시스템의 경우, 친수 활동에 대한 정의를 구체적으로 제시하고 있지 않으며, 수체와 접촉을 요하는 활동에 집중되지 않고 일반적인 친수 활동에 대한 수질정보를 제공하고 있다. 그렇기 때문에, 외국의 시스템과 달리 종합수질지수의 형태로 수질정보를 제시하고 있다. 이 시스템에서는 DO, pH, 수온, 전기전도도, TN, TP, TOC의 7개 수질인자에 대한 친수 활동 허용 수질 기준을 Table 2와 같이 정하여 놓고 1시간 간격으로 측정된 개별 수질인자의 농도 값이 수질기준을 위반하는 정도를 Eq. (1)을 이용하여 RTWQI를 산정하여 제시하고 있다. 이는 우수, 양호, 보통, 주의, 불량과 같은 등급으로도 변환되어 제시되고 있다.

$$RTWQI = 100 - \sqrt{\frac{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}{3}} \quad (1)$$

여기서,  $F_1$ 은 12시간 동안 기준을 1회 이상 위반하는 수질인자 개수를 전체 측정하고 있는 수질 자료 개수(7개)로 나누어 산정한 분율,  $F_2$ 는 각 수질인자 별로 12시간 동안 수질 기준을 위반한 인자들의 총 위반 횟수를 총 측정횟수(84회)로 나누어 산정한 분율,  $F_3$ 는 각 수질인자 별로 기준을 위반한 정도를 분율화한 것을 총합한 것이다. 이러한 산정 방법 때문에  $F_1$ 이 지수 산정 시 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 이 시스템의 실시간 수질지수는 종합적인 수질 상태에 대한 정보를 제공한다는 측면에서 의미가 있지만 수상 활동 시 가장 고려되어야 할 대장균과 같은 수질인자를 포함하지 않고 있다. 또한, 수질인자에 대한 기준의 불확실성을 고려하지 않기 때문에 수질인자의 농도 값이 허용 수질 기준에 포함된다고 명확하게 말할 수 없다는 모호함을 표현하고 있지

Table 2. Water Quality Criteria of RTWQI

Parameter	Criteria
Temp.	Ave. Temp.-10°C ≤ Temp. ≤ Ave. Temp.+10°C
pH	6.5 ≤ pH ≤ 9.0
DO	0.8×DO <sub>s</sub> <sup>1)</sup> ≤ DO ≤ 1.3×DO <sub>s</sub>
EC	≤ 200 μS/cm
TOC	≤ 3 mg/L
TN	≤ 3 mg/L
TP	≤ 0.1 mg/L

<sup>1)</sup> DO<sub>s</sub> = DO saturation

못하는 점이 있다. 나아가서 RTWQI는 실시간 제공되는 지수로서 일 간격 자료(daily data)에 근거한 일 간격 예보(daily forecasting) 기능이 없기 때문에 시민들의 수상 활동에 필요한 예보 정보를 제공하지 못한다는 단점을 가지고 있다.

본 연구의 목적은 기존에 존재하는 수질 정보 제공 시스템의 문제점을 보완할 새로운 하천 레크리에이션 지수 모델(River Recreation Index Model, RRIM)을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 하천에서 레크리에이션 활동을 할 때에 가장 중요한 수질인자인 분변성 대장균을 예측하는 분변성 대장균 모델(Fecal Coliform Model, FCM)과 주요 수질인자들을 종합화하는 수질지수 모델(Water Quality Index Model, WQIM)을 개발하고 두 모형의 결과를 결합하여 하천 레크리에이션 지수를 산정하는 RRIM을 개발하였다.

## 2. 모델의 개발

### 2.1 모델 구성

본 연구에서는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 3단계를 거쳐 하천 레크리에이션 지수(River Recreation Index, RRI)와 하천 레크리에이션 등급(River Recreation Grade)를 산정하도록 RRIM을 개발하였다. 1단계는 FCM, 2단계는 WQIM이고 마지막 3단계에서는 1, 2단계의 결과를 통합하여 RRI를 산정하였다. 본 연구에서 FCM을 별도로 구성한 이유는 하천 레크리에이션에 있어서 가장 중요한 수질인자인 분변성 대장균에 대한 실시간 측정이 불가능하기 때문이다. 분변성 대장균과 같은 수질인자는 일반 수질측정소에서 주 혹은 월마다 직접 채수를 통해 측정되기 때문에 일 간격 자료가 존재하지 않는다. 이러한 대장균 측정의 한계로 인해 많은 연구자들은 유량, 강우량과 같은 수문 인자 및 탁도와 같은 수질인자와 대장균 농도와의 상관관계를 분석하고 이를 이용하여 대장균의 일 간격 자료를 생성하였다. Ferguson et al. (1996), Christensen et al. (2000), Clark and Norris (2000), Crowther et al. (2001), Eleria and Vogel (2005), Francy and Damer (2007)은 선형회귀분석을 이용하여 대장균을 예측하였고, 앞에 제시된 Philly Rivercast를 개발한 Maimone et al. (2007)은 과거 수질 자료를 분석하여 입력 수질인자의 범위에 따라 분변성 대장균의 범위를 예측하는 알고리즘을 개발한 바 있다. 최근에는 다양한 데이터마이닝 기법을 이용하여 미생물지표를 예측하였는데, He and He (2008)는 인공지능신경망(Artificial Neural Network, ANN)을 통해 대장균을 예측하였고 Kim et al. (2012)은 SVM (Support Vector Machine)을 이용하여 모델을 개발하였다.

본 연구에서는 FCM을 통해 분변성 대장균 일 간격 자료를 계산하여 이를 RRIM에 포함하였다. 본 연구에서는 분변성 대장균의 농도 범위에 따라 하천 레크리에이션 활동 시 수영, 수상스키와

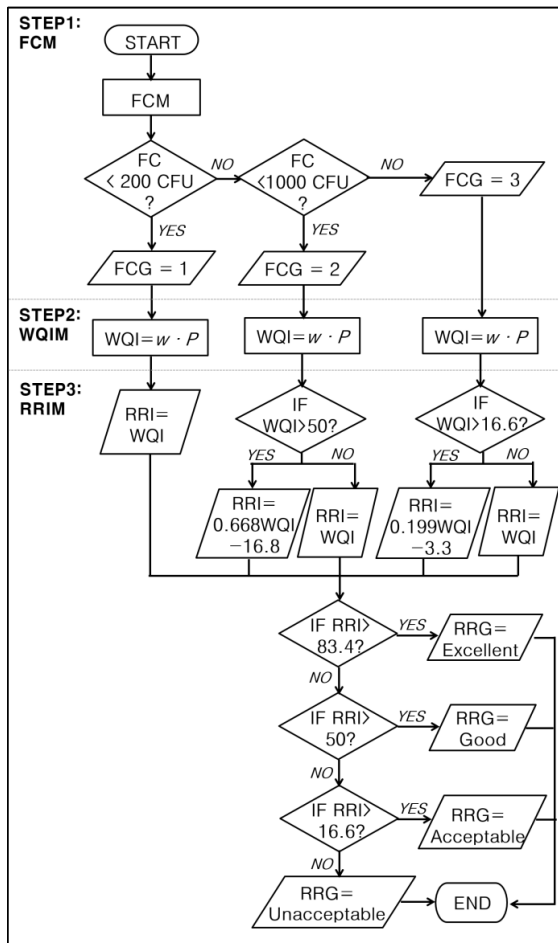


Fig. 1. Structure of RRI

같은 직접접촉 또는 낚시와 보트와 같은 간접접촉이 가능한지를 판단하도록 FCM을 개발하였다. 이 경우 분변성 대장균의 농도 값이 아닌 등급을 예측하는 것이 더욱 적합하고 효율적이라고 판단하여 Fig. 1에 도시한 바와 같이 분변성 대장균의 등급(Fecal Coliform Grade, FCG)을 예측하도록 개발하였다. 따라서 본 연구에서는 분변성 대장균과 수리, 수질인자 간의 상관관계 식을 유도하는 데 선형회귀분석 방법을 이용하지 않고 종속변수가 등급과 같은 범주형 변수일 때 사용되는 로지스틱 회귀분석(logistic regression)을 사용하여 모델을 개발하였다. FCG는 다음과 같은 세가지 등급으로 구성하였으며 여기서 제시되는 분변성 대장균의 수질 기준은 하천생활환경기준을 참고로 하여 결정하였다(water.nier.go.kr).

- 1) 1등급(직접접촉 활동이 가능): 분변성 대장균이 200 CFU/100mL 이하
- 2) 2등급(간접접촉 활동이 가능): 분변성 대장균이 200 CFU/100mL를 초과하고 1000 CFU/100mL 이하

- 3) 3등급(어떠한 접촉활동도 불가능): 분변성 대장균이 1000 CFU/100mL 초과

2단계의 WQIM에서는 분변성 대장균 외의 하천 레크리에이션에 있어 중요한 다른 수질인자들을 합성하여 종합수질지수(Water Quality Index, WQI)를 산정하였다. 종합수질지수에 대한 연구는 1970년대에 시작되었는데, Brown (1970), Prati et al. (1971), O'Connor et al. (1972), Walski and Parker (1974), Harkins (1974), Dunnette et al. (1979), Joung et al. (1979), House (1987), 그리고 Dinius (1987) 등은 익명의 전문가의 의견을 설문조사를 통해 수립하여 의사결정을 하는 델파이 기법을 이용하여 종합수질지수를 개발하였다. 우리나라에서는 Choi (1996)가 같은 기법을 이용해 종합수질지수를 개발한 바 있다. 그러나 1990년대 들어서는 많은 연구자들이 델파이 기법을 통해 정해진 수질 기준에 존재하는 불확실성과 모호함을 지수 산정에 반영하고자 퍼지 집합 이론을 적용하여 종합수질지수를 개발해 오고 있다. Lu (1999)와 Chang (2001)은 퍼지 집합 이론을 적용한 의사결정방법 중 하나인 퍼지합성방법(Fuzzy Synthetic Evaluation, FSE)을 적용하여 종합적인 수질을 평가하였다. 또한, Icaga (2007)와 Lermontov (2009)는 퍼지 규칙을 적용하여 종합수질지수를 산정하는 방법을 제시하였다. 본 연구의 WQIM에서도 수질 기준의 모호함과 불확실성을 고려하기 위해 퍼지 합성방법을 통해 수질인자를 종합하여 WQI를 산정하였다.

3단계에서는 FCM과 WQIM의 두 모델에서 각각 산정된 FCG와 WQI를 Fig. 1에 도시한 알고리즘과 같이 최종적으로 RRI로 종합하였으며 이를 RRG로도 분류하여 표현하였다. RRG는 가능한 활동의 타입에 따라 다음과 같이 네 가지 등급으로 구성하였다(Seo and Choi, 2014).

- 1) 우수(Excellent, I): 수체와의 직접접촉이 일어나는 활동을 할 때 매우 안전할 정도로 수질이 훌륭함.
- 2) 양호(Good, II): 수체와의 직접접촉이 일어나는 활동을 할 때 비교적 안전할 정도로 수질이 좋음.
- 3) 보통(Acceptable, III): 수체와의 간접접촉이 일어나는 활동을 할 때 안전할 정도로 수질이 보통 수준임.
- 4) 불량(Unacceptable, IV): 수체와의 직접, 간접접촉이 불가능할 정도로 수질이 불량함.

## 2.2 FCM의 개발

### 2.2.1 로지스틱 회귀분석

분변성 대장균은 여러 수질인자, 유량, 기상 인자들과 상관관계를 보인다고 알려져 있으므로 이러한 상관관계에 중점을 두고

로지스틱 회귀분석을 통해 FCG를 예측하도록 FCM을 개발하였다. 로지스틱 회귀분석은 일반적인 선형회귀분석과는 달리 종속변수가 0과 1, 혹은 좋음과 나쁨과 같은 형태의 범주형 변수일 때 사용되는 방법이다.

종속 변수가 범주형 변수인 경우, 일반선형회귀분석을 적용하게 되면 종속변수의 기대값의 범위가 0과 1을 벗어난다는 오류가 야기되므로 로지스틱 회귀분석에서는 비선형 함수형태의 회귀모형을 설정하여 종속변수의 기대값인 확률을 0과 1로 수렴하게 만든다. 독립변수들의 수준  $\mathbf{x}$ 에서 종속변수 순위가  $m$ 보다 작을 확률을 나타내는 로지스틱 반응함수는 Eq. (2)와 같다.

$$P(Y \leq m|\mathbf{x}) = \frac{\exp(\alpha_m + \mathbf{x}'\beta)}{1 + \exp(\alpha_m + \mathbf{x}'\beta)} \quad (2)$$

여기서,  $\alpha_m$ 은 절편이고  $\beta$ 은  $k$ 차 기울기 계수벡터이다. 이 때 유의할 점은 마지막 순위에 대한 확률은 누적확률로부터 다시 계산하지 않고 자동적으로 구할 수 있다는 것이다. 종속변수의 결과가 본 연구의 FCM에서 계산하고자 하는 FCG와 같이 세가지 순위로 측정될 때 각 순위에 대한 확률은 Eqs. (3)~(5)과 같다.

$$P_1(\mathbf{x}) = P(Y=1|\mathbf{x}) = \frac{\exp(\alpha_1 + \mathbf{x}'\beta)}{1 + \exp(\alpha_1 + \mathbf{x}'\beta)} \quad (3)$$

$$P_2(\mathbf{x}) = P(Y=2|\mathbf{x}) = \frac{\exp(\alpha_2 + \mathbf{x}'\beta)}{1 + \exp(\alpha_2 + \mathbf{x}'\beta)} - \frac{\exp(\alpha_1 + \mathbf{x}'\beta)}{1 + \exp(\alpha_1 + \mathbf{x}'\beta)} \quad (4)$$

$$P_3(\mathbf{x}) = P(Y=3|\mathbf{x}) = 1 - P_1(\mathbf{x}) - P_2(\mathbf{x}) \quad (5)$$

여기서  $P_1$ 은 종속변수가 1이 될 확률,  $P_2$ 은 종속변수가 2이 될 확률,  $P_3$ 은 종속변수가 3이 될 확률이다. 절편과 기울기 모수들은 최대우도법(Maximum Likelihood Estimation, MLE)으로 추정할 수 있다.

### 2.2.2 모델의 개발

본 연구에서는 낙동강의 대장균 모델을 개발하기 위하여 낙동강에 위치한 수질측정소와 유량측정소를 통해 대장균과 상관관계가 있다고 판단되는 수질 자료 및 유량 자료를 수집하였다. 자료를 수집한 지점은 구미보 상류 지점, 칠곡보 상류 지점, 칠곡보 하류 지점, 강정고령보 상류 지점, 달성보 상류 지점, 창녕함안보 상류 지점으로 각 지점의 위치는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 각 지점에서 자료를 수집한 일반수질측정소, 유량관측소와 수집된 자료의 기간은 Table 3과 같다. 일반수질측정소에서 분변성 대장균, 수온, DO, pH, TN, TP의 자료를 수집하였으며, 유량관측소에서는 유량의 일 자료를 수집하였다. 자료 수집의 대상이 되는 지점들에는 수질일반측정소와 유량관측소가 동시에 위치하고 있으며 그 지점

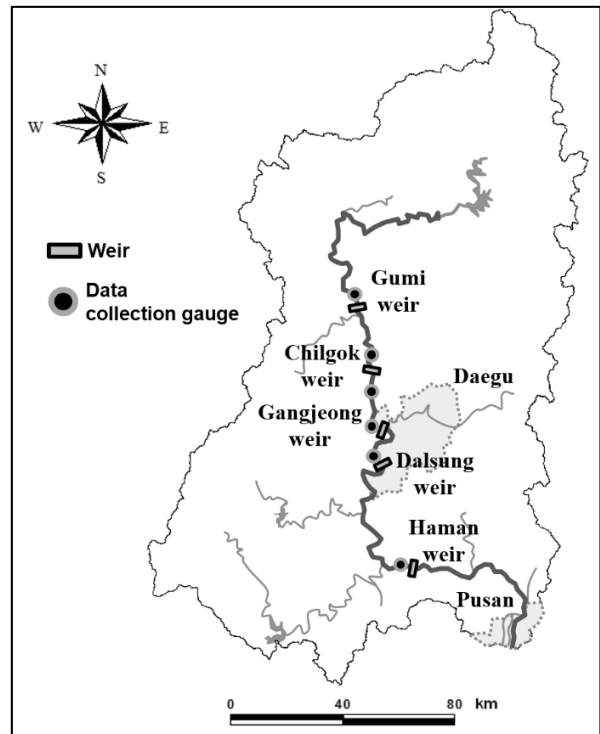


Fig. 2. Data Collection Sites for FCM in Nakdong River

Table 3. Monitoring Stations and Period of Collected Data

Site	Monitoring Station		Period	# of Data
	Water Quality Monitoring Station	Streamflow Gauging Station		
Upstream of Gumi Weir	Sangok	Isungyo	2006~2012	69
Upstream of Chilgok Weir	Gumi	Gumi	2006~2010	100
Downstream of Chilgok Weir	Waegwan	Waegwan	2006~2010	216
Upstream of Gangjeong Weir	Sungju	Sungju	2006~2012	69
Upstream of Dalsung Weir	Goryung	Goryunggyo	2006~2012	345
Upstream of Haman Weir	Namji	Jindong	2006~2011	309

들은 서로 일치하기 때문에 본 연구에서는 같은 시점에 같은 위치에서 측정된 수질과 유량 자료를 하나의 일 자료 세트로 간주하여 전처리 분석의 입력 자료로 이용하였다.

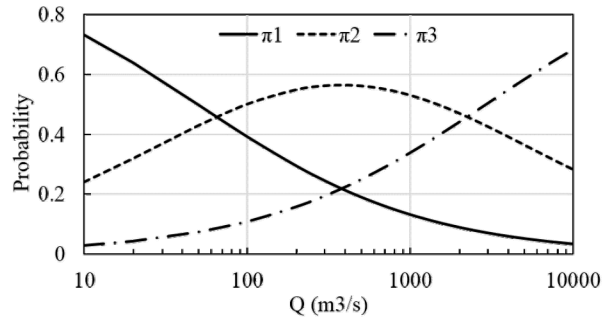
본 연구에서 자료의 전처리는 언더샘플링(undersampling)과 변수 선택 과정으로 구성되어 순차적으로 진행하였다. 우선 수집된 자료의 분포를 살펴본 결과, 총 1108개의 자료 세트에서 분변성 대장균의 농도가 FCG의 1등급, 2등급 그리고 3등급에 해당하는 자료 세트가 각각 790개, 299개, 19개로 1등급에 매우 편향된 분포를 보였다. 만약 모든 자료를 모형 개발에 사용한다면 수가 상대적으로 매우 적은 3등급을 과소평가하게 되고 1등급 혹은 2등급의 자료가 과다한 영향을 미치게 된다. 이러한 경우, King and Zeng (2001)은 많은 수의 자료 수를 적은 수의 자료 수의 1배 ~ 5배가 되도록 한다고 제안한 바 있다. 본 연구에서는 전체 자료에서 1등급에 해당하는 자료를 92개, 2등급에 해당하는 자료를 77개로 추출하여 전체 개수를 188개로 선정하였다. 이 때, 데이터는 아웃라이어 제거한 상태에서 분변성 대장균 농도 값의 크기대로 자료 세트를 정렬하고, undersampling으로 추출하여 추출된 데이터의 bias를 방지하였다.

FCM의 독립변수로서 총 13개를 검토하였는데 이들은 수온, DO, pH, TN, TP, 유량, 1일 전 유량, 2일 전 유량, 3일 전 유량, 유량의 로그 값, 1일 전 유량의 로그 값, 2일 전 유량의 로그 값, 3일전 유량의 로그 값이다. 본 연구에서는 이 중 유의한 독립변수를 선택하기 위하여 변수선택법 중 하나인 단계별선택법을 적용하였다. 일반적으로 변수선택법으로써 전진선택법, 후진소거법, 단계적선택법 등을 사용하는데, 전진선택법은 아무 변수도 포함하지 않은 상태의 모델에서 시작하여 변수를 순차적으로 더해가며 유의성 검정을 실시하여 모델에 유의한 변수를 찾는다. 이와 반대로 후진소거법은 모든 변수가 포함된 상태에서 변수를 순차적으로 제거해가며 유의한 변수를 찾는다. 그러나 이 두 방법은 순차적으로 변수들을 계속 더하거나 제거하면서 이미 더하거나 제거한 변수들의 유의성이 감소하는 경우가 생긴다는 점에서 한계를 갖는다. 이를 보완하기 위하여 개발된 단계적선택법은 이 두 가지 방법을 혼합하여 최적의 모델을 찾는 것으로 알려져 있다(Sung, 2001). 본 연구에서는 통계분석 소프트웨어인 SAS (Statistical Analysis System)을 사용하여 단계적선택법을 적용하였다. 적용 결과, 유의수준 0.05에서 분변성 대장균에 유의한 영향을 미치는 독립변수는 pH와 1일 전 유량의 로그 값으로 선택되었다. 두 변수 사이에 다중공선성이 없음을 확인하기 위하여 공차한계와 분산팽창계수를 계산한 결과(Allison, 2012), 공차한계는 0.99, 분산팽창계수는 1.01로 다중공선성이 없음을 확인하였다.

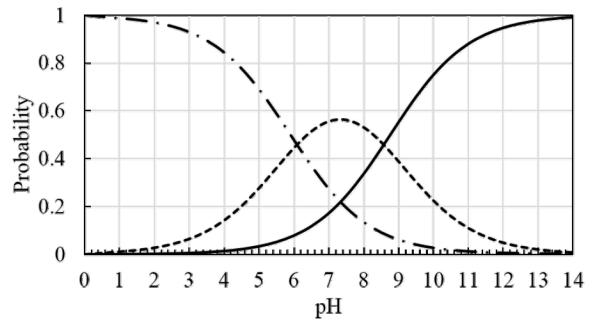
대장균 모델의 개발 및 검증을 위하여 전처리 단계를 거쳐 추출된 자료를 훈련집단과 검증집단으로 나누었다. 이 때 훈련집단과 검증

Table 4. Statistical Characteristics Derivation and Validation Data Set for Fecal Coliform Model

Grade	Derivation data set	Validation Data Set
Mean	333.7	332.1
Min	10	10
1 <sup>st</sup> quartile	82.5	85
Median	200	200
3 <sup>rd</sup> quartile	327.5	350
Max	1,800	1,800



(a) pH=7.5



(b) Q=300m³/s

Fig. 3. Behavior of Derived Logistic Regression Equations

집단의 비는 80대 20로 하여 각각 수를 150개와 38개로 하였다. 두 개 집단에서 분변성 대장균의 통계적 특성이 Table 4에 제시한 바와 같이 유사하게 유지되도록 자료를 분리하였다. 이 중 훈련집단에 속하는 150개의 자료 세트에 대해 로지스틱 회귀분석을 적용하여 분변성 대장균의 각 등급에 따른 로지스틱 반응함수를 Eqs. (6)~(8)과 같이 도출하였다.

$$\pi_1(\mathbf{x}) = \frac{\exp(-4.23 + 0.89PH - 1.44LOGQ_1)}{1 + \exp(-4.23 + 0.89PH - 1.44LOGQ_1)} \quad (6)$$

$$\pi_2(\mathbf{x}) = \frac{\exp(-1.68 + 0.89PH - 1.44LOGQ_1)}{1 + \exp(-1.68 + 0.89PH - 1.44LOGQ_1)} \quad (7)$$

$$\pi_3(\mathbf{x}) = 1 - \pi_1(\mathbf{x}) - \pi_2(\mathbf{x}) \quad (8)$$

여기서, 반응함수  $\pi_1, \pi_2, \pi_3$ 는 FCG가 각각 1, 2, 3등급으로 예측될 확률이다.  $PH$ 는 pH 농도 값,  $LOGQ_1$ 는 1일 전 유량의 로그 값이다.  $PH$ 와  $LOGQ_1$ 에 따라 도출한 반응함수에 의해 계산한 확률을 Fig. 3에 도시하였다. 이 그림에서 1일 전 유량이 커지고 pH가 낮아질수록 FCG가 3등급인 확률이 증가하고, 반대로 1일 전 유량이 작아지고 pH가 높아질수록 FCG가 1등급인 확률이 증가하는 것으로 나타났다. 유량은 분변성 대장균이 서로 양의 상관관계를 보였는데, 이는 강우 시, 분변성 대장균을 많이 포함하고 있는 주변의 축산업의 유출수 및 오폐수가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

도출된 로지스틱 반응함수의 검증을 위하여 검증집단에 대하여 검정을 실시하였다. 우선, 개별 회귀계수가 독립변수를 예측하는데 있어 유의한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 Wald검정을 실시하였다(Sung, 2009). 검정은 유의수준 0.05에서 실시하였으며 그 결과 pH와 유량의 로그 값의  $p$ -값은 각각 0.0033, 0.0002로 나타나 개별 회귀계수가 독립변수를 예측하는데 있어 유의한 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 나아가서 로지스틱 회귀모형이 완전정

보를 가진 모형과 비교하여 유의한 차이가 있는지 여부를 평가하고자 데비언스 검정을 실시하였다(Sung, 2009). 데비언스 검정통계량의  $p$ -값은 0.9475로 매우 높은 값을 보여 완전정보를 가진 모형과 비교하여 추정된 모형이 유의한 차이가 없다고 판단되었다. 마지막으로 모형의 적합도를 평가하기 위하여 도출된 반응함수를 검증집단에 적용하여 정분류율(correct classification rate, CCR)을 계산하였다. 적용 결과, 검증집단의 38개의 자료 중 24개의 자료를 정확하게 예측하고 있으며, CCR은 0.63으로 나타났다(Fig. 4).

### 2.3 WQIM의 개발

#### 2.3.1 퍼지 합성방법

종합적인 수질 상태를 평가하는 WQIM을 개발하기 위하여 퍼지 합성방법을 사용하였다. 퍼지 합성방법은 퍼지 집합 이론이 적용된 의사결정방법 중 하나이다. 퍼지 집합 이론은 1965년 Zadeh에 의해 처음 제안된 이론으로서 어떠한 개념을 정의할 시 명확한 기준이 없어 전통적인 수학 집합으로 나타내기 힘든 경우 이러한 불확실성을 적절하게 표현하기 위한 이론이다(Zadeh, 1965). 수질과 같은 환경적 요소는 명확한 기준이 없는 추상적인 표현이 사용되는 경우가 많으며 그 안에 과학적으로 검증된 기준이 존재하지

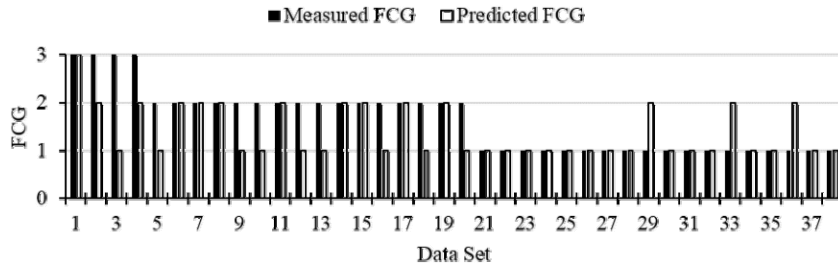


Fig. 4. Validation of FCM

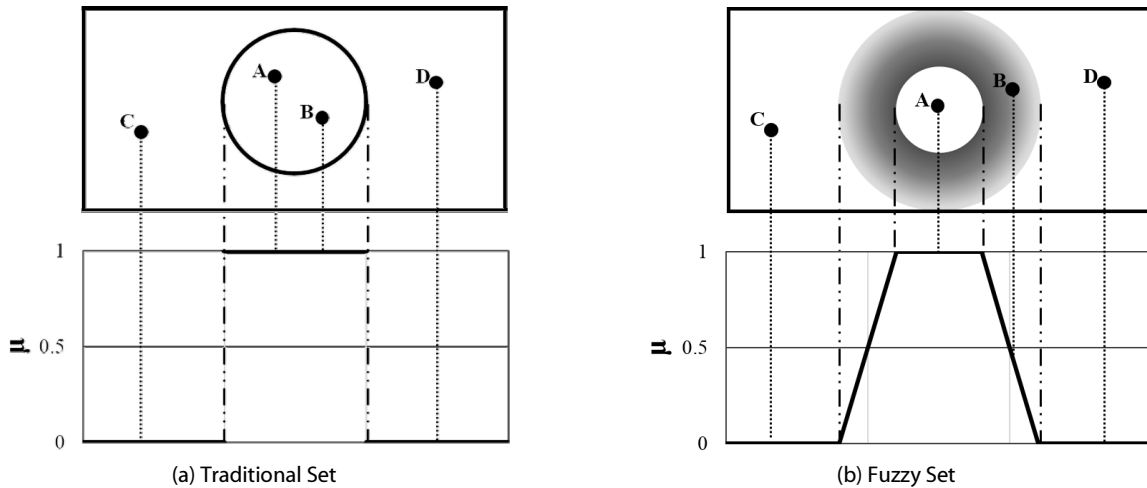


Fig. 5. Membership Function of Traditional Set and Fuzzy Set

않는 경우가 많다(Silvert, 2000). 그러므로 본 연구에서 하천 레크리에이션에 적절한 수질 기준을 정할 때 퍼지 집합 이론의 적용을 통해 모호한 수질 기준을 표현하는 것이 적절하다고 판단된다.

퍼지 집합이론에서는 0에서 1사이의 값을 가지는 소속도(membership value)를 이용하여 해당 집합에 어떤 원소가 속할 수 있는 자격이 어느 정도인지 표현한다. 소속도가 1일 경우, 그 원소는 해당 집합에 속할 수 있는 자격이 완전하며, 0일 경우, 자격이 아예 없다. 또한, 그 기준이 모호한 것들은 0과 1사이의 값의 소속도를 갖게 된다. 이러한 소속도는 소속함수(membership function)라 불리는 그래프로 표현할 수 있다. Fig. 5은 전통적으로 사용되는 수학적 집합, A와 퍼지 집합,  $\tilde{A}$ 를 소속함수로 도시한 것으로서 이들은 Eqs. (9) and (10)로 정의될 수 있다.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \in A \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$\tilde{A} = \{ [x, \mu_{\tilde{A}}(x)] : x \in U, 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) \leq 1 \} \quad (10)$$

여기서,  $\mu_A$ 는 집합 A의 소속도,  $\mu_{\tilde{A}}$ 는 집합  $\tilde{A}$ 의 소속도를 말한다. 퍼지 집합 이론에서 모든 정보는 소속도를 통해 나타나므로 소속함수를 적절하게 정의하는 것이 매우 중요하다. 소속 함수는 그 형태가 다양한데 대표적인 형태로는 가장 기본적인 형태인 삼각형형(triangular type)과 사다리꼴형(trapezoidal type), 가우스형(Gaussian type), 벨형(bell type) 그리고 S자형(s-shaped type) 등이 있다(Jang, 1997).

### 2.3.2 모델의 개발

본 연구에서는 다음의 네 단계를 거쳐서 WQIM을 개발하였다.

- 1) 1단계: 수질인자 중 하천 레크리에이션으로 합성될 수질인자의 선택
- 2) 2단계: RRG (우수, 양호, 보통, 불량)에 따른 수질인자의 수질 기준 선정
- 3) 3단계: 각 수질인자의 RRG별 소속함수 정의
- 4) 4단계: 소속함수에 의해 도출된 소속도를 WQI로 합성하는 종합화 방법 선정

WQIM의 첫 단계로 하천 레크리에이션에 중요한 수질인자를 선택하였다. 수질인자는 (1) 국내 수질자동측정망에서 측정되고 있어서 일 간격 자료를 수집할 수 있는 항목, (2) 하천에서의 레크리에이션 활동에 중요한 항목, 이렇게 두 가지 기준을 가지고 선정하였다. 기준 (1)을 만족하는 수질인자 중 사람이 하천수와 접촉할 시 그 위험성과 안전성을 잘 설명할 수 있는 수질인자 중 DO, pH, 탁도, 클로로필 a가 선택되었다. DO는 혐기성 상태에 의한 수체의 오염 수준을 나타낸다. DO가 감소하여 하천이 혐기성 상태가 되고 어류 폐사, 악취, 검은 물 등이 발생한다. pH는 수체의 산염기 평형상태를 나타내는 지표로서 대부분의 pH는 6.5와 8.5 사이에 속하나 pH가 11보다 높으면 피부 질환을 일으킬 수 있고, pH가 10에서 12.5 사이일 때 머리카락 섬유가 부풀며, pH가 4 이하에서 눈의 충혈 혹은 염증이 일어난다고 알려져 있다(World Health Organization, 1998). 탁도는 수체의 투명도를 나타내는 지표로서 하천의 미관적 가치와 연관되어 있다. 클로로필 a는 조류 발생과 관련된 지표로서, 조류는 미관도 저해하지만 독소를 발생하기도 한다. 국내 조류 정보는 클로로필 a와 남조류 세포수의 기준을 통해 정보 발령 여부가 결정되나 현재 국내에서 남조류 세포수를 모니터링하는 수질자동측정망은 구축되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 조류 발생 가능성을 나타내는 수질인자로 클로로필 a를 선정하였다.

선택된 수질인자에 대한 수질 기준을 RRG 등급, 우수, 양호, 보통, 불량에 따라 Table 5와 같이 선정하였다. 수질 기준은 국내 하천 및 호소 생활환경기준, 조류정보 기준(water.nier.go.kr)과 국외의 미국 전국 및 주별 수질 기준(www.epa.gov), WHO(World Health Organization)의 먹는 물 수질 기준(World Health Organization, 1998)과 레크리에이션 수질 기준(World Health Organization, 2003) 및 UN (United Nations) 조류 발생 수질 기준(United Nations, 1993) 등을 고려하여 선정하였다.

위에서 정해진 수질 기준의 모호함을 고려하기 위하여, 개별 수질인자의 농도 값이 해당 등급(우수, 양호, 보통, 불량)에 속하는 정도를 소속함수로 나타내었다. 본 연구에서는 가장 적절한 소속함수를 정의하기 위해 다섯 가지 조건을 정하고 이를 모두 만족하는 소속함수의 형태를 선택하였다. 다섯 가지 조건은 다음과 같다.

Table 5. Criteria for Water Quality Parameters for WQIM

Grade	DO (mg/L)	pH	Turbidity (NTU)	Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )
Excellent	7.5 ≤	7.0 ~ 8.0	≤ 10	≤ 10
Good	5.0 ~ 7.5	6.5 ~ 7.0, 8.0 ~ 8.5	10 ~ 25	10 ~ 15
Acceptable	3.0 ~ 5.0	6.0 ~ 6.5, 8.5 ~ 9.0	25 ~ 50	15 ~ 25
Unacceptable	≤ 3.0	≤ 6.0, 9.0 ≤	50 ≤	25 ≤



- (1) 각 등급(우수, 양호, 보통, 불량)의 중앙값에 해당하는 수질 인자의 농도 값은 소속도를 1로 갖는다.
- (2) 특정 수질 농도 값이 어떤 한 등급에서 소속도를 1로 가질 때, 그 등급의 양 옆에 위치한 등급은 소속도를 0으로 가진다.
- (3) 수질 기준의 한 쪽이 열린 상태인 우수와 불량의 경우, 소속도를 1로 가진 평평한 부분인 코어를 가진다.
- (4) 특정 수질인자의 농도 값에서 모든 등급의 소속도의 합은 1이다.
- (5) 수질 기준의 경계 값이 되는 농도 값에서 서로 이웃한 두 개의 소속함수가 만난다.

본 연구에서는 위의 다섯 가지 조건을 만족하는 소속함수의 형태로서 변형삼각형 형태를 선택하였다. 변형삼각형 형태란, 기존 삼각형 소속함수에 지수를 부여하여 직선이 아닌 곡선의 형태로 나타나게 하였으며, 이는 Eq. (11)과 같다. 삼각형형의 소속함수는 조건 (5)를 만족하지 못하고 가우스형 소속함수는 조건 (4)를 만족하지 못하는 단점 때문에 선택하지 않았다.

Curved Triangular Membership Function( $x : a, b, c, d, e$ )

$$\mu = \begin{cases} 0, & x < a \\ [(x-a)/(b-a)]^d, & a \leq x < b \\ [(c-x)/(c-b)]^e, & b \leq x < c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (11)$$

Eq. (11)을 이용하여 각 인자 별로 등급에 따른 소속함수를 유도하였으며 그 결과는 Fig. 6와 같다. Fig. 6에서 정의된 소속함수를 통해 네 개 수질인자의 특정 농도 값에 대해 각 등급별로 4개 씩 총 16개의 소속도를 구할 수 있다.

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{DO,1} & \mu_{DO,2} & \mu_{DO,3} & \mu_{DO,4} \\ \mu_{pH,1} & \mu_{pH,2} & \mu_{pH,3} & \mu_{pH,4} \\ \mu_{Tu,1} & \mu_{Tu,2} & \mu_{Tu,3} & \mu_{Tu,4} \\ \mu_{Ch,1} & \mu_{Ch,2} & \mu_{Ch,3} & \mu_{Ch,4} \end{bmatrix} \quad (12)$$

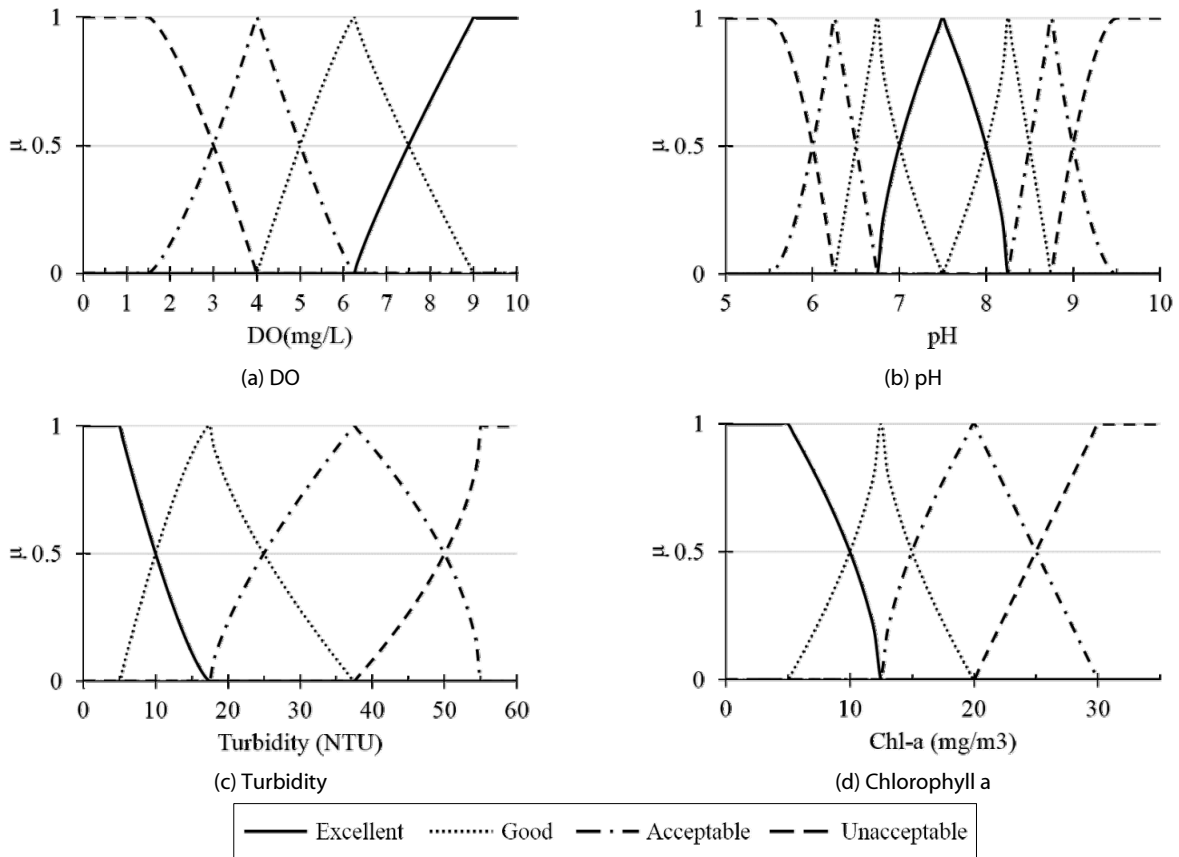


Fig. 6. Curved-Triangular Membership Function of Water Quality Parameter

여기서,  $\mu_{i,j}$ 는  $i$ 의 수질인자가  $j$ 번째 수질 등급에 속하는 소속도를 말한다.  $j$ 가 각각 1, 2, 3, 4일 때 수질 등급은 우수, 양호, 보통, 불량에 해당한다.

본 연구에서 소속함수에 의해 도출된 소속도를 WQI로 합성하기 위해 다음의 두 단계로 종합화 방법을 개발하였다. 첫 번째 단계로 각 수질인자가 가지는 네 개의 소속도를 Eq. (13)와 같이 합성하여 종합소속점수(Integrated Membership Point),  $P$ 를 계산하였다.

$$P = \begin{bmatrix} P_{DO} \\ P_{pH} \\ P_{Tu} \\ P_{Ch} \end{bmatrix} = \mu \cdot GV = \begin{bmatrix} \mu_{DO,1} & \mu_{DO,2} & \mu_{DO,3} & \mu_{DO,4} \\ \mu_{pH,1} & \mu_{pH,2} & \mu_{pH,3} & \mu_{pH,4} \\ \mu_{Tu,1} & \mu_{Tu,2} & \mu_{Tu,3} & \mu_{Tu,4} \\ \mu_{Ch,1} & \mu_{Ch,2} & \mu_{Ch,3} & \mu_{Ch,4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} GP_1 \\ GP_2 \\ GP_3 \\ GP_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서,  $GP_1$ 는 우수에 해당되는 소속도에 할당되는 등급점수(Grade Point)값을 말하며,  $GP_2$ 는 양호,  $GP_3$ 는 보통,  $GP_4$ 는 불량에 할당되는 값이다.  $P_{DO}$ 는 DO의 네 개의 소속도를 합성하여 나온 종합 점수,  $P_{pH}$ 는 pH,  $P_{Tu}$ 는 탁도,  $P_{Ch}$ 는 클로로필 a의 인자 종합 점수이다. 각 등급에 할당되는 적절한 등급 점수들을 구하기 위하여 각 인자 별로 수질지수 모델에서 우수 등급이 소속도를 1으로 가질 때의 인자 종합 점수가 100점, 불량 등급이 소속도를 1으로 가질 때의 인자 종합 점수가 0점을 갖게 하였다. 또한, 양호와 보통 등급의 경계값에서 인자 종합 점수가 50점이 되게 하였다. 이에 따라  $GP_1$ 는 100,  $GP_2$ 는 66.7,  $GP_3$ 는 33.3,  $GP_4$ 는 0로 정하였다. GP를 적용하여 등급 별로 인자 종합 점수를 다시 계산하여 보면, 각 수질인자의 우수 등급은 점수 83.4점 초과 100점 이하, 양호 등급은 점수 50점 초과 83.4점 이하, 보통 등급은 점수 16.6점 초과 50점 이하, 불량 등급은 점수 16.6점 이하인 점수임을 확인할 수 있었다.

다음 단계에서는 수질인자들의 하천 레크리에이션에서의 중요성에 따라 가중치를 정하고 Eq. (14)와 같이 각 인자 종합 점수를 가중합하여 종합 수질 점수, WQI를 구하였다.

$$WQI = w \cdot P = [w_{DO} \ w_{pH} \ w_{Tu} \ w_{Ch}] \begin{bmatrix} P_{DO} \\ P_{pH} \\ P_{Tu} \\ P_{Ch} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서,  $w_{DO}$ ,  $w_{pH}$ ,  $w_{Tu}$ ,  $w_{Ch}$ 는 각각 DO, pH, 탁도, 클로로필 a에 부여되는 가중치이다. 본 연구에서는 DO의 가중치,  $w_{DO}$ 는 0.26, pH의 가중치,  $w_{pH}$ 는 0.26, 탁도의 가중치,  $w_{Tu}$ 는 0.23 그리고 클로로필 a의 가중치,  $w_{Ch}$ 는 0.25로 정하였다.

## 2.4 RRI 산정 방법

본 연구에서 RRI를 산정하는 알고리즘은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. FCM에서 FCG가 1등급이 나온 경우, RRI는 WQIM에서 평가된 WQI와 동일하나, FCG가 2등급이나 3등급으로 나온 경우 이것이 제한 요소로 작용하여 RRI를 산정하도록 구성하였다. FCG가 2등급인 경우 WQI가 50점보다 초과하여 등급이 우수, 양호에 해당될 때 Eq. (15)를 사용하여 WQI를 하향 조정하여 RRI를 결정하였다. 이에 따라 RRG를 보통 등급으로 변환하였다. 반면, WQI가 50점 이하, 즉 보통과 불량 등급이 나오면 RRI는 WQI와 같다.

$$RRI = 0.668 WQI - 16.8 \quad (15)$$

FCG가 3등급으로 예측되는 경우에는 WQI가 16.6점보다 초과하여 등급이 우수, 양호, 보통에 해당되는 경우에 Eq. (16)을 사용하여 RRI를 산정하였으며 이에 따라 RRG를 불량으로 조정하였다. 반면, 16.6점 이하, 즉 불량 등급이 나오는 경우에는 RRI와 RRG는 WQIM의 결과와 같다.

$$RRI = 0.199 WQI - 3.3 \quad (16)$$

## 3. 모델의 적용

### 3.1 모델 대상 지역

낙동강은 그 유역에 부산, 대구 등 주요한 대도시가 위치하고 있어 레크리에이션 기능에 대한 요구가 많은 하천이다. 본 연구에서는 이러한 낙동강 유역을 대상으로 하여 모델을 개발하였다. 낙동강 유역에는 공업, 농업, 축산업 등의 다양한 산업이 분포하고 있어, 강으로 유입되는 오염물질 또한 다양하다. 오폐수의 현황을 살펴보면, 2009년 인구수는 2,576,137명, 산업계 오염원은 2,418개 업소, 사육두수는 958,406마리로 조사되었고, 이로부터 발생하는 오폐수 발생량은 생활계가 711,221.7 m<sup>3</sup>/day, 산업계가 283,754.8 m<sup>3</sup>/day, 축산계는 9,860.2 m<sup>3</sup>/day로 조사되어 이러한 오폐수에 포함된 질소, 인 등의 영양분, 기름, 유기물질, 중금속 및 병원균 등의 오염물질이 유입됨을 알 수 있다(MLTMA, 2009). 특히, 강 주변에 농축산업관련 토지 비율이 높는데, 이에 따라 강우 유출 시, 영양염류, 퇴적물, 동물에 의한 폐기물, 무기물, 그리고 농업에 사용되는 화학물질 등이 강으로 흘러 들어간다. 특히 동물에 의한 폐기물은 BOD, 질소, 인, 다른 영양분, 유기물, 염분 외에도 박테리아, 바이러스, 다른 미생물 등을 함유하고 있어, 하천 레크리에이션 활동을 고려할 시 주의해야 한다.

낙동강의 상류~중류 수질은 생활환경기준 등급 중 I에서 II

등급 수준이며 이는 수영용수로 사용할 수 있는 수질 등급에 해당한다. 중류-하류 수질은 I 에서 III 등급 수준이며, III 등급의 경우 수영용수로로는 사용할 수 없다(MLTMA, 2009). 보통 갈수기에 수질이 좋은 반면 풍수기에는 그렇지 않아 하천 레크리에이션 시 수질에 대한 정확한 정보가 필요하다.

### 3.2 적용결과

본 연구에서 RRIM을 낙동강의 강정고령보 상류지점에 적용하였다. 수질자료(DO, pH, 탁도, 클로로필 a)로서는 수질자동측정망인 다산 측정소에서 2013년 5월부터 6월까지 두 달 간에 해당하는 일 자료를 수집하였고(www.koreawqi.go.kr), 일 유량 자료는 국가

수자원관리종합정보시스템(WAMIS)을 통해 성주 유량관측소에서 측정한 자료를 수집하였다.

첫 번째 단계에서 FCM을 적용한 결과, Fig. 7와 같이 나타났다. FCG는 1등급이 34일, 2등급이 26일 그리고 3등급이 1일로 나타났다. 예측된 각 FCG에 대해 전 날의 유량의 평균을 계산한 결과, 1등급은 160.2 m<sup>3</sup>/s, 2등급은 380.7 m<sup>3</sup>/s, 3등급은 3,225.7 m<sup>3</sup>/s를 보여 유량이 증가할수록 분변성 대장균의 농도가 높아지는 것을 확인하였다. 또한, 1등급의 pH의 평균을 8.6, 2등급의 pH를 8.8, 3등급의 pH를 8.1과 같이 계산하였다. Fig. 3에서 제시된 반응함수 거동에 의하면 pH가 높을수록 등급이 낮아지나 적용 결과, 2등급의 pH가 1등급보다 더 큰 것으로 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한

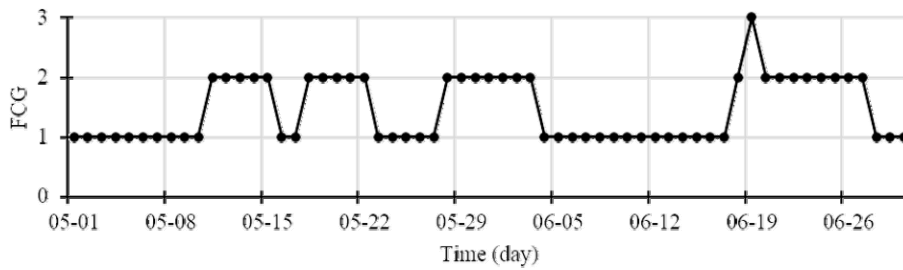
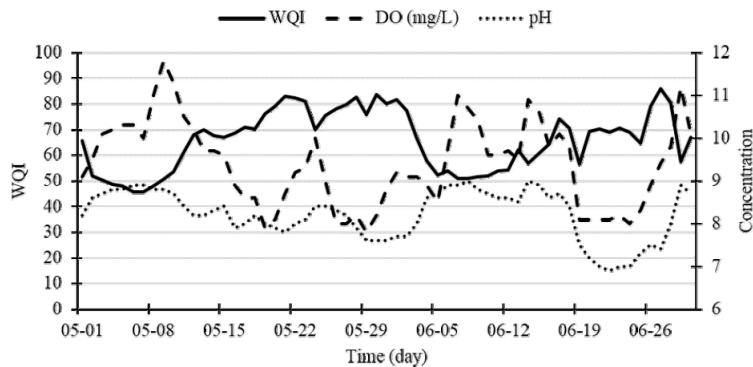
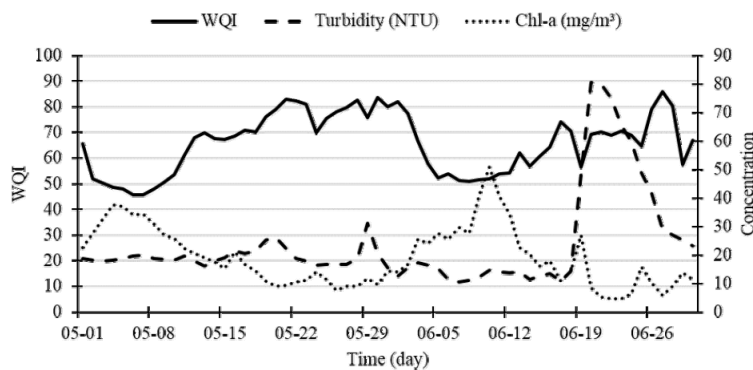


Fig. 7. Result of FCM



(a) DO & pH



(b) Turbidity & Chlorophyll a

Fig. 8. Comparison of Simulated WQI with Measured Values of Water Quality Parameters

점을 고려해 볼 때 FCG는 pH보다 전 날의 유량에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

다음 단계에서 WQIM을 적용하였는데 WQIM의 모의 결과 산정된 WQI와 네 개의 수질인자의 일 변동성을 Fig. 8에 도시하였다. 각 수질인자와 WQI의 상관관계를 알아보고자 피어슨 상관계수를 계산하였다. 그 결과, 클로로필 a와 WQI의 피어슨 상관계수가 -0.85로 나타나 네 개의 인자 중 클로로필 a가 WQI에 가장 큰 영향을 미쳐 클로로필 a가 높은 수치를 기록할 때, WQI가 감소함을 확인하였다. 또한, pH와 WQI의 피어슨 상관계수는 -0.67로 비교적 높은 상관관계가 있음을 확인하였다. pH는 하루만을 제외하고 모두 7이상의 값을 기록하였는데 이 때, pH가 높을수록 수질은 나쁜 것을 나타내 WQI가 감소하는 경우가 비교적 많음을 확인하였다. DO와 탁도의 경우 상관계수가 작게 나타났는데 그 이유는 DO의 경우 전체 61일의 자료가 모두 우수 등급에 해당하고 있어 WQI를 산정하는데 있어 많은 영향을 미치지 못하였고, 탁도의 경우 대부분의 기간에 변화의 정도가 크지 않고 또한 클로로필 a와 그 영향이 상쇄되었기 때문인 것으로 판단된다. 탁도가 5월 29일과 6월 19일, 20일에 급격하게 상승하였으나 동시에 클로로필

a가 감소하여 RRI가 크게 감소하지 않았음을 확인할 수 있었다.

WQI, RRI 그리고 같은 기간 동안의 RTWQI를 Fig. 9에 나타내었고 RTWQI, WQI 그리고 RRI의 차를 계산하여 Fig. 10과 같이 나타내어 비교하였다. Fig. 10에서  $\Delta I_1$ 은 WQI와 RRI의 차,  $\Delta I_2$ 는 RTWQI와 WQI의 차,  $\Delta I_3$ 는 RTWQI와 RRI의 차를 의미한다. 우선 RTWQI와 WQI를 살펴보았는데 두 지수는 각각 고려하는 수질인자의 변동에 따라 차이에 변화를 보였다. 5월 7~8일, 6월 4~5일, 6월 11~12일에 두 지수의 차이가 증가하였는데 이는 해당 시기에 RTWQI가 고려하는 수질인자들인 DO, pH, 수온, 전기전도도, TN, TP, TOC가 허용 수질 기준 안에 들 정도로 우수한 상태를 보이는 반면, WQI가 고려하는 클로로필 a가 불량 등급에 해당하기 때문인 것으로 판단된다. 5월 20일부터 23일, 5월 26일부터 28일, 5월 30일부터 6월 1일, 6월 21일부터 26일까지는 두 지수의 차이가 10점 이하로 감소함을 볼 수 있었다. 이는 TOC와 TN의 농도가 허용 수질 기준을 초과하여 RTWQI는 작게 산정된 반면, WQI는 클로로필 a와 pH가 대부분 우수 등급에 해당하여 비교적 높게 평가되었기 때문인 것으로 보인다.

전체적으로 WQI는 RTWQI보다 보수적인 결과를 보였는데

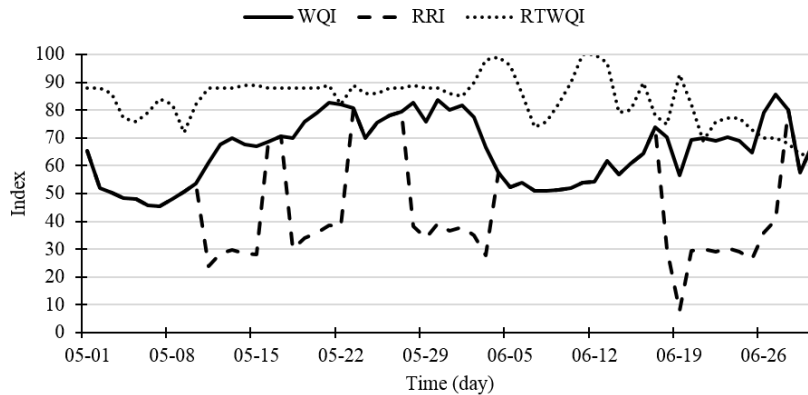


Fig. 9. Comparison of WQI, RRI and RTWQI

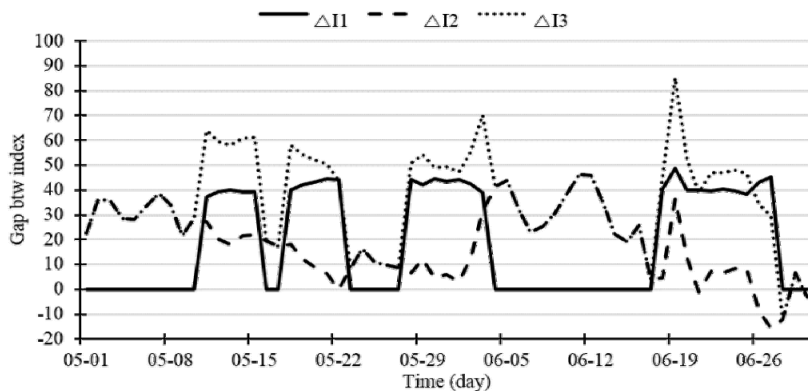


Fig. 10. Difference between WQI, RRI and RTWQI

이는 WQI가 RTWQI보다 큰 값으로 계산되었을 때와 RTWQI가 WQI보다 큰 값으로 계산되었을 때를 비교하여 알 수 있었다. WQI가 RTWQI보다 클 때 두 지수의 차는 평균 18.1점이었고 그 반대의 경우의 차는 평균 6.9점이었다. 이를 통해 RTWQI는 고려하는 수질인자가 낮게 측정되어도 허용 수질 초과치를 점수에 미약하게 반영함을 확인할 수 있었다. RTWQI를 산정하는 식에서  $F_3$ 는 각 수질인자 별로 기준을 위반한 정도를 의미하는데 이것이 식에 미치는 영향이 작아서 수질인자의 농도가 허용 농도 수질 기준을 많이 초과하여도 지수에 반영이 잘 되지 않는다. 반면, WQI는 네 개의 수질 등급 기준에 따라 그 범위를 정하여 현재의 수질 상태가 어떠한 상태에 속하는지를 계산하고 수질 기준의 불확실성을 적절하게 고려하기 때문에 RTWQI보다 수질 상태를 정확하게 반영하여 보수적인 값을 제시하는 것으로 판단된다. RRI와 WQI의 차이를 살펴본 결과, 총 61일 중 27일 동안 FCG가 2등급 혹은 3등급으로 예측되어 평균 18.4점의 차이가 발생하였다. 이는 RTWQI와 RRI의 차이에도 영향을 미쳤는데 RTWQI와 RRI 간의 차는 평균 36.5점으로 RTWQI와 WQI의 차보다 RRI와 WQI와의 차만큼 증가함을 확인할 수 있었다. FCG는 RRI와 RTWQI간의 중요한 차이를 만들며 레크리에이션에 중요한 항목인 분변성 대장균을 고려한다는 점에서 RRI가 더 의미 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 하천에서 수상 레크리에이션 활동을 즐기는 시민들에게 수질적인 안전과 쾌적함을 제공할 수 있는 하천 레크리에이션 지수를 산정하는 모델인 RRIM을 개발하였다. RRIM은 분변성 대장균 수치를 예측하는 대장균 예측 모델, FCM과 주요 수질인자를 종합하는 모델, WQIM로 구성되어 개발하였다. FCM은 로지스틱 회귀분석을 이용하여 개발하였으며 수체와의 접촉 가능 여부를 의미하는 FCG를 예측하였다. 낙동강 본류에 대해 유도된 FCM은 0.63의 정분류율을 보였다. WQIM은 DO, pH, 클로로필 a, 탁도를 WQI로 종합하는 모델로 개발하였으며, 수질 기준 상의 모호함과 불확실성을 고려할 수 있도록 퍼지 집합 이론을 적용하였다. 최종적으로 FCG와 WQI를 종합하여 RRI를 산정하는 알고리즘을 개발하였다.

RRIM을 낙동강의 강정고령보 상류 지점에 적용한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 2개월 동안 FCG는 1등급이 34일, 2등급이 26일 그리고 3등급이 1일로 나타났으며 FCG는 pH보다 전 날의 유량에 더 큰 영향을 받는 것으로 밝혀졌다.
- (2) WQIM은 수질인자의 변화를 잘 반영하여 WQI를 산정하고 있음을 확인하였다. 특히, WQI와 클로로필 a 및 pH의 상관계수는 각각 -0.85와 -0.67로 나타나고 있어서 이 두 개의 인자가 WQI에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다.
- (3) 해당 시기에 RTWQI의 경우 EC, TOC, TN이 많은 영향을 미치고 있는 반면, WQI의 경우 클로로필 a와 pH가 많은 영향을 미쳐 WQI와 RTWQI간에 평균 18.1점의 차이가 나타났다. 또한, RTWQI는 수질이 나쁜 경우, 지수 산정 시 초과치를 적절하게 반영하지 않아 WQI보다 높게 계산됨을 확인하였다.
- (4) 본 모델에서 산정한 RRI의 경우 분변성 대장균을 FCG를 통해 고려함에 따라 RTWQI보다 36.5점 낮은 점수를 보여 WQI와 RTWQI를 비교하였을 때보다 더욱 보수적인 결과를 보임을 확인하였다. 이러한 이유는 본 모델의 분변성 대장균이 중요한 역할을 하고 있기 때문이며, 따라서 본 모델이 하천 레크리에이션 지수 예보에 보다 적합한 것으로 판단된다.

#### References

- Allison, P. D. (2012). *Logistic regression using SAS: Theory and Application*, SAS Publishing, Cary, N.C.
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A. and Tozer, R. (1970). "A water quality index - Do we dare." *Water and Sewage Works*, Vol. 117, No. 10, pp. 339-343.
- Chang, N. B., Chen, H. W. and Ning, S. K. (2001). "Identification of river water quality using the fuzzy synthetic evaluation approach." *Journal of Environmental Management*, Vol. 63, No. 3, pp. 293-305.
- Choi, J. Y. (1996). *Development of water quality index*, Korea Environmental Technology Research Institute (in Korean).
- Christensen, V. G., Jian, X. and Ziegler, A. C. (2000). *Regression analysis and real-time water-quality monitoring to estimate constituent concentrations, loads, and yields in the Little Arkansas River, south-central Kansas, 1995-99*, Water Resources Investigations Report No. 00-4126, United States Geological Survey, Lawrence, Kansas.
- Clark, M. L. and Norris, J. R. (2000). *Occurrence of fecal coliform bacteria in selected streams in Wyoming, 1990-99*, USGS Water Resources Investigations Report No. 00-4198, United States Geological Survey, Cheyenne, Wyoming.
- Crowther, J., Kay, D. and Wyer, M. D. (2001). "Relationships between water quality and environmental conditions in coastal recreational waters: The Fylde Coast, UK." *Water Research*, Vol. 35, No. 17, pp. 4029-4038.
- Dinius, S. H. (1987). "Design of an index of water quality." *Water Resources Bulletin*, Vol. 23, No. 5, pp. 833-842.
- Dunnette, D. A. (1979). "A geographically variable water quality index used in Oregon." *Journal (Water Pollution Control Federation)*, Vol. 51, No. 1, pp. 53-61.
- Eleria, A. and Vogel, R. M. (2005). "Predicting fecal coliform bacteria

- levels in the Charles River, Massachusetts, USA.” *Journal of American Water Resources Association*, Vol. 41, No. 5, pp. 1195-1209.
- Ferguson, C. M., Coote, B. G., Ashbolt, N. J. and Stevenson, I. M. (1996). “Relationships between indicators, pathogens and water quality in an estuarine system.” *Water Resources*, Vol. 30, No. 9, pp. 2045-2054.
- Francy, D. S. and Darner, R. A. (2007). *Nowcasting beach advisories at Ohio Lake Erie beaches*, Geological Survey Open-File Report 2007-1427, United States Geological Survey.
- Harkins, R. D. (1974). “An objective water quality index.” *Journal (Water Pollutants Control Federation)*, Vol. 46, No. 3, pp. 588-591.
- He, L. M. L. and He, Z. L. (2008). “Water quality prediction of marine recreational beaches receiving watershed baseflow and stormwater runoff in Southern California, USA.” *Water research*, Vol. 42, No. 10-11, pp. 2563-2573.
- House, M. A. and Ellis, J. B. (1987). “The development of water quality Indices for operational management.” *Water Science and Technology*, Vol. 19, No. 9, pp. 145-154.
- Icaga, Y. (2007). “Fuzzy evaluation of water quality classification.” *Ecological Indicators*, Vol. 7, No. 3, pp. 710-718.
- Jang, J. S. R., Sun, C. T. and Mizutani, E. (1997). *Neuro-fuzzy and soft computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice-Hall, Saddle River, N.J.
- Joung, H. M., Miller, W. W., Mahannah, C. N. and Guitjens, J. C. (1979). “A generalized water quality index based on multivariate factor analysis.” *Journal of Environmental Quality*, Vol. 8, No. 1, pp. 95-100.
- Kim, K. B., Kim, J. H., Jeong, Y., Jeong, Y. S. and Chung, S. J. (2012). “Prediction of coastal fecal indicator bacteria concentrations using multivariate data analysis.” *Journal of Environmental Science and Engineering A*, Vol. 1, No. 4, pp. 440-447.
- King, G. and Zeng, L. (2001). “Logistic regression in rare events data.” *Political Analysis*, Vol. 9, No. 2, pp. 137-163.
- Lermontov, A., Yokoyama, L., Lermontov, M. and Machado, M. A. S. (2009). “River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil.” *Ecological Indicators*, Vol. 9, No. 6, pp. 1188-1197.
- Lu, R. S., Lo, S. L. and Hu, J. Y. (1999). “Analysis of reservoir water quality using fuzzy synthetic evaluation.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 13, No. 5, pp. 327-336.
- Maimone, M., Crockett, C. S. and Cesanek, W. E. (2007). “Philly River Cast: A Real-Time Bacteria Forecasting Model and Web Application for the Schuylkill River.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 133, No. 6, pp. 542-549.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2009). *Nakdong river master plan*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (in Korean).
- National Institute of Environmental Research (2013). *Criteria of water quality and hydroecology*, Available at: <http://water.nier.go.kr/front/waterEasy/policy01.jsp> (Accessed: August 8, 2013).
- National Institute of Environmental Research (2013). *Forecast system of algae*, Available at: <http://water.nier.go.kr/front/waterEasy/policy04.jsp> (Accessed: August 11, 2013).
- National Institute of Environmental Research (2013). *Real time water quality index*, Available at: [http://koreawqi.go.kr/index\\_web.jsp](http://koreawqi.go.kr/index_web.jsp) (Accessed: November 15, 2013).
- O’Connor, F. M. (1972). *The application of multi-attribute scaling procedures to the development of indices of value*, Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Prati, L., Pavanello, R. and Pesarin, F. (1971). “Assessment of surface water quality by a single index of pollution.” *Water Research*, Vol. 5, No. 9, pp. 741-751.
- Seo, I. W. and Choi, S. Y. (2014). “Development of recreation index model and its applications to Nakdong River, Korea.” *Proceeding of 7<sup>th</sup> International Conference on Environmental Hydraulics*, ISEH, Singapore, pp. 122-125.
- Silvert, W. (2000). “Fuzzy indices of environmental conditions.” *Ecological Modelling*, Vol. 130, No. 1, pp. 111-119.
- Sung, O. H. (2001). *Applied logistic regression analysis*, Tamjin (in Korean).
- Thomann, R. V. and Mueller, J. A. (1987). *Principle of surface water quality modeling and control*, Harper Collins, New York, N.Y.
- United Nations (1993). *Readings in international environment statistics*, United Nations, Washington, D.C.
- United States Environmental Protection Agency (1986). *Ambient water quality criteria for bacteria*, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- United States Environmental Protection Agency (2013). *Water: State, Tribal & Territorial Standards*, Available at: <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/wqslibrary/index.cfm> (Accessed: October, 10, 2013).
- Walski, T. M. and Parker, F. L. (1974). “Consumers water quality index.” *Journal of Environmental Engineering Division*, Vol. 100, No. 3, pp. 593-611.
- World Health Organization (1998). *Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed. Addendum to volume 2. Health criteria and other supporting information*, World Health Organization, Geneva.
- World Health Organization (2003). *Guidelines for safe recreational water environments, Volume 1: Coastal and Fresh Waters*, World Health Organization, Geneva.
- Zadeh, L. A. (1965). “Fuzzy sets.” *Information and Control*, Vol. 8, No. 3, pp. 338-353.