

발 간 등 록 번 호

11-1543000-000293-01

<http://rri.ekr.or.kr>

인공지능기법을 이용한 농업용저수지 수질지표 및 관리모델 개발(최종)

Development of water quality index and management model
for agricultural reservoir using artificial intelligence technique(final)

2013. 12.



농림축산식품부
Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs



한국농어촌공사
ISO 9001 / ISO 14001 인증

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “인공지능기법을 이용한 농업용저수지 수질지표
및 관리모델 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2013 년 12 월 31 일

주관연구기관명 : 한국농어촌공사
농어촌연구원

연구책임자 : 엄한용

연구원 : 함종화

김형중

김동환

유선아

위촉연구원 : Timothy Hong

요 약 문

1. 연구과제명 : 인공지능기법을 이용한 농업용저수지
수질지표 및 관리모델 개발(최종)

2. 연구기간 : 2011년 3월 ~ 2013년 12월 (3년 중 3차년)

3. 연구개요

3.1 연구배경 및 필요성

- 농림축산식품부는 농업용수 수질관리 및 정책수립의 기초자료를 확보할 목적으로 주요 농업용저수지에 대해 수질측정망으로 지정하여 운영하고 있음.
- 측정망 조사 자료는 농업용저수지의 수질오염 현황과 오염변화 추이를 파악하는데 주로 사용되고 있으나, 장기간 수집된 수질측정망 조사 자료를 가공하여 측정망 자료의 활용성을 더욱 높일 수 있는 저수지 관리 도구의 개발이 필요함.
- 농업용수 수질개선사업이나 신규 저수지 개발 사업의 검토단계에서 간단한 모델을 이용하여 사업 완료 후 예상되는 저수지 수질을 개략적으로 예측하여 사업의 타당성을 검토하고, 본 사업의 계획 수립 단계에서 현장조사를 통해 충분한 자료를 확보한 후 복잡한 수질예측모델을 적용하여 정확한 수질을 예측하는 것이 바람직함.
- 전국 농업용저수지에 수질개선을 위한 종합 계획 수립과 같은 정책 결정 지원을 위해 쉽고 빠르게 수질영향을 분석할 수 있는 모델이 필요하며, 이러한 모델을 통해 다양한 수질개선대책들이 개발·적용 될 수 있음.
- 본 연구에서는 장기간 수집된 농업용저수지 수질측정망자료를 인공지능기법을 활용하여 저수지의 수질을 효율적으로 관리할 수 있는 농업용저수지 수질지수 추정기법 및 수질지수 추정모델을 개발하여 수질관리 담당 실무자들에게 제공함으로써 농업용저수지 수질관리 및 수질개선 사업에 적극 활용할 수 있도록 함.

3.2 목 적

- 농업용저수지 측정망자료 DB 구축 및 자료분석시스템 개발
- 농업용저수지 수질지수 추정기법 연구
- 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발 및 활용방안 연구

3.3 연구범위 및 내용

1) 농업용저수지 유역 및 수질특성 분석

- 유역 내 오염원별 발생 및 배출 특성 분석
- 저수지와 유입하천의 유량 및 수질조사
- 저수지 제원 및 부하량과 저수지 수질과의 상관관계 분석

2) 수질측정망 자료 DB갱신 및 자료분석시스템 보완 개발

- 2012년 농업용저수지 수질측정망 자료를 추가하여 DB갱신
- 적용성 분석을 통한 수질측정망 자료분석시스템 문제점 보완

3) 인공지능기법을 이용한 수질지수 추정기법 개발

- 농업용저수지 수질지수로 활용 가능한 지수분석 및 보완 개발
- 측정망 자료 중 저수지 수질에 영향을 미치는 인자 도출
- 여러 인공지능기법을 이용한 농업용저수지 추정기법 연구
- 인공지능기법별 수질지수 추정결과 분석
- 농업용저수지 수질지수 추정을 위한 최적의 인공지능기법 선정

4) 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발 및 활용방안 연구

- 인공지능기법을 이용한 수질지수 추정 함수 개발
- 개발된 함수를 이용한 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발
- 활용성을 높이기 위한 세부 기능 개발
- 개발된 농업용저수지 수질지수 추정모델 활용방안 연구

3.4 연구 진행 방법

- 농업용저수지 수질측정망을 운영하면서 수집된 수질측정망자료와 기

존의 방법에 의해 수질로부터 산정된 지수 사이의 관계를 인공지능 기법 학습을 통해 도출한 후 측정망 자료로부터 수질지수를 추정함.

- 수질지수 추정기법은 기존의 수질지수와 호환 가능한 형태로 개발하며, 유역제원 및 오염원자료로부터 저수지 수질이 추정되도록 함.



3.5 기대효과 및 실용화 계획

1) 기대성과

- 수질측정망 자료의 DB구축을 통한 빠르고, 다양한 통계분석 가능
- 구축된 DB를 이용해 인터넷기반의 수질측정망 자료분석시스템 개발
- 농업용저수지 수질관리를 위한 간단한 수질지수 추정기법 및 모델 제공
- 농업용수 수질개선계획수립업무의 효율성 제고

2) 실용화계획

- 실무부서에 제공하여 농업용저수지 신규조성 및 관리를 위한 수질예측에 활용
- 전국 농업용저수지 수질 관리정책 수립을 위한 보조자료 제공
- 수질개선사업 수립 및 설계를 위한 시나리오분석에 활용
- 실무자를 대상으로 한 교육 및 매뉴얼 배포를 통한 실용화

4. 연구결과

□ 농업용저수지 유역과 저수지 수질 특성 분석

- 대상저수지 선정 및 조사방법

- 목적 : ‘유역특성, 저수지제원’ vs ‘유입하천 유량 및 수질’ vs ‘저수지 수질’ 사이의 상관관계 분석 및 저수지 수질에 영향을 미치는 인자 도출
- 대상저수지 선정 : 경기도내 농업용저수지 측정망 대상저수지(55개소) 중 접근이 용이한 31개소 선정
- 조사방법 : 유입하천과 저수지의 수질 조사 실시 후 하천과 저수지 수질의 상관관계와 측정망 자료의 유역과 저수지 상관관계 분석

- 유역, 하천, 저수지의 상관관계 분석

- 하천과 저수지 수질의 상관관계 : 저수지의 COD는 유입하천의 COD, TOC, T-N, T-P, Chl-a와 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, 저수지의 Chl-a는 유입하천의 COD, TOC, T-P와 높은 상관관계를 나타내어 대체로 저수지와 유입하천의 상관성이 높은 것으로 나타냄.
- 하지만 저수지의 T-N은 유입하천의 모든 수질항목과 상관관계가 없는 것으로 나타났으며, 유입하천의 유량은 저수지의 Cl⁻를 제외한 모든 항목과 상관관계가 없는 것으로 나타남.

		유입하천							
		유량	COD	TOC	SS	Chl-a	T-N	T-P	Cl ⁻
저수지	COD	-0.02	0.54**	0.59**	0.26	0.29	0.51**	0.70**	0.39*
	TOC	-0.08	0.40**	0.51**	-0.01	0.07	0.56**	0.34	0.27
	SS	0.29	0.23	0.18	0.69**	0.67**	0.08	0.16	0.43*
	Chl-a	0.00	0.54**	0.56**	0.28	0.30	0.38	0.87**	0.36
	T-N	0.30	-0.31	-0.25	0.17	0.17	0.12	-0.21	-0.15
	T-P	-0.06	0.66**	0.71**	0.43*	0.48*	0.29	0.82**	0.31
	Cl ⁻	0.65**	0.38	0.42*	0.38	0.33	0.22	0.29	0.89**
	수질등급	0.03	0.48**	0.48*	0.35	0.34	0.45**	0.40*	0.43*

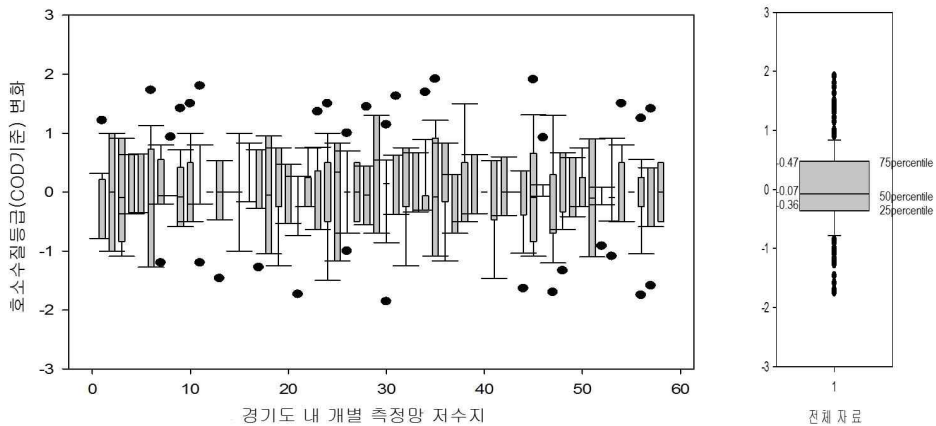
- 유역 및 저수지 제원과 저수지 수질의 상관관계 : 상관분석 한 결과 1% 유의수준에서 저수지의 유효수심은 저수지의 COD, TOC, Chl-a, T-P, 수질등급과 음의 상관관계가 있는 것으로 나타남. 즉, 유효수심이 깊을수록 COD, TOC, Chl-a, T-P 농도가 낮게 나타남.

- 발생부하량(BOD, T-N, T-P)은 저수지 수질과 유의한 관련성이 있는 것으로 나타났으나, 이들 사이의 상관계수는 매우 낮은 것으로 나타나 저수지 수질과 유역 및 저수지 제원 인자의 각각의 항목에 대한 1:1 비교로는 상관성 파악이 어려운 것으로 판단됨

측정망자료		유역 측정망자료				저수지 측정망자료		
		유역 면적	발생부하량			저수량	만수 면적	유효 수심
			BOD	T-N	T-P			
저수지 측정망자료	COD	0.00	0.06	0.06	0.06	-0.01	0.04	-0.30**
	TOC	0.01	0.09	0.07	0.08	-0.01	0.03	-0.29**
	Chl-a	0.00	0.09	0.09	0.09	0.00	0.05*	-0.24**
	T-N	0.00	0.24**	0.22**	0.23**	0.05	0.02	-0.10**
	T-P	-0.01	0.11	0.10	0.10	0.00	0.03	-0.18**
	수질등급	0.01	0.07	0.06	0.07	0.01	0.04	-0.32**

- 경기도 내 수질측정망자료 분석(2001~2011년)

- 경기도 내 55개소 수질측정망 저수지를 대상으로 2001년부터 2011년까지 각 저수지의 연도별 수질등급을 분석한 결과 11년 동안 평균 수질등급을 0으로 했을 때 연중 수질등급의 변화가 -0.36 ~ 0.47(25 ~ 75 %tile)로 나타났으며, 최소와 최대값의 차이는 최대 4등급까지 나는 것으로 나타나 해마다 저수지의 수질변화가 크게 나타나고 있음.



□ 농업용저수지 수질측정망 자료 수집 및 DB 구축

- 시설제원 및 조사지점 자료

- 수질측정망 조사지점의 GPS자료(825개소) : 각 측정망 저수지의 조사지점 위도, 경도 좌표
- 시설제원 : 통계코드, 시설명, 관리자(공사, 시군), 유역면적, 만수면적, 총저수량, 유효저수량
- 기타 : 표준코드, 시설구분, 수원공구분, 관리구분, 지구명, 주소코드, 주소, 착공일자, 준공일자, 재원내역, 수혜면적, 한발빈도, 인가면적, 제당(구조, 높이, 길이), 여수토연장, 방수로연장, 홍수/갈수량

- 유역오염원 조사자료(연 1회 조사)

- 연도별 오염원수 : 인구수, 축산두수(한우, 젓소, 돼지), 산업(유량), 양식(면적), 토지이용면적(논, 밭, 임야, 기타)
- 연도별 BOD, T-N, T-P 발생부하량 : 생활계, 축산계(한우, 젓소, 돼지), 산업계, 양식계, 토지계(논, 밭, 임야, 기타), 총 발생부하량
- 기타 : 연도별 주요오염원, 통계코드, 주소코드, 시도

- 저수지 수질조사자료(연 4회 실시)

- 수질측정자료 : 조사일자(년월일), 수온, pH, EC, DO, BOD, COD, T-N, T-P, SS, Cl, Chl-a, TOC(2010년부터), 중금속(Cu, Pb, Cd, As, Hg; 연 1회 조사), 수질등급, 영양상태

- 기타 관련자료

- 일별 저수율자료, 수질측정망저수지 GIS자료(대상저수지위치(point), 저수지 수면자료(polygon), 유역경계자료(polygon), 하천자료(line))

- MS-Access 및 MySQL을 이용한 DB 구축

- 수집된 저수지제원, 유역오염원자료, 저수지 수질조사자료를 MS-Access를 이용해 DB화함.
- 웹기반의 농업용저수지 수질측정망 자료분석시스템을 개발하기 위해 별도로 MySQL을 이용해 web DB를 구축함.

□ 농업용저수지 수질측정망 자료분석시스템 개발

- 개발 개요

- DB업데이트 및 시스템 유지보수가 용이하도록 인터넷기반의 시스템개발
- 사용하기 쉽고, 대부분의 컴퓨터에서 구동이 가능할 것
- 추가 프로그램설치가 불필요할 것
→ 이상의 조건을 만족하도록 Adobe Flash를 이용해 시스템 개발.

- 인터넷상의 화면 구성 및 개발

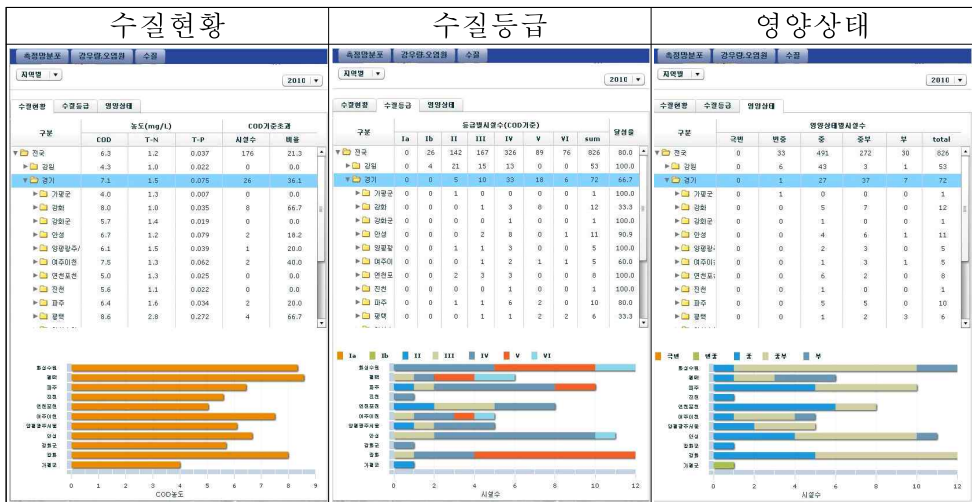
- 저수지별 조사된 측정망자료를 지사별, 지역본부별 및 전국 평균 및 합계를 tree구조로 제공하여 사용자가 원하는 저수지, 지사, 지역본부별 통계값을 쉽게 탐색할 수 있도록 함.
- 지역별옵션 선택 시 연도별로 측정망자료를 tree구조로 제공함.
- 연도별옵션 선택 시 지역별 측정자료를 연도순으로 제공함
- tree구조로 제공되는 자료를 선택할 경우 하단에 다양한 형태의 그래프가 제공됨. 지역본부별, 지사별, 저수지별 다양한 통계값을 시각적으로 쉽게 파악할 수 있음.
- 강원지역본부-영북지사 선택 시 영북지사에서 관리하는 4개 저수지의 평균 수질이 그래프로 제공되어, 영북지사 수질관리자는 관리하고 있는 저수지의 평균 수질농도의 높고 낮음을 직관적으로 파악할 수 있음.
- 수질등급 메뉴에서 경기지역본부를 선택할 경우 경기지역본부 산하 지사별 관리하고 있는 저수지의 수질등급별 개소수를 누적그래프로 제공하여 어느 지사의 수질이 심각한지 쉽게 파악이 가능함. 강화지사에서 관리하고 있는 12개 저수지 중 8개 저수지가 수질등급 5등급을 유지하고 있음을 알 수 있음.

- 개발된 농업용저수지 자료분석시스템

- 농업용수 수질측정망자료 분석이 잘 되어 있는 ‘농업용수 수질측정망 조사 보고서’를 이용하여 제공되는 분석자료를 유형별로 분류하여 다음과 같이 수질측정망 자료분석시스템의 메뉴를 구성함.
- 측정망분포(지역별, 연도별)
 - 측정망별 : 저수지측정망 및 호소측정망 개소수 및 시설수
 - 규모별 : 저수지 규모별 시설수

(<500, <1,000, <5,000, <10,000, <50,000, >50,000 천m³)

- 수계별 : 수계별 농업용저수지 및 담수호 시설수
- 강수량, 오염원 (지역별, 연도별)
 - 강수량 : 월간 누적 강수량
 - 주오염원 : 주오염원 종류별 시설수 (생활, 축산, 토지, 산업, 양식)
 - 수처리시설 : 종류별(하수종말, 분뇨, 산업폐수, 마을하수) 시설수 및 용량
- 수질현황 (지역별, 연도별)
 - 수질현황 : COD, T-N, T-P농도, COD기준초과 시설수 및 비율
 - 수질등급 : 수질등급별 시설수 (COD기준, Ia~VI), 수질기준 달성율
 - 영양상태 : 영양상태별 시설수 (극빈, 빈중, 중, 중부, 부)



□ 농업용저수지 수질지수 추정기법 연구

- 수질지수 형태 검토 및 적용성 평가

- 기존 수질지수 검토 : 본 연구에서 사용하고자 하는 수질지수는 기존에 개발된 수질관련 지표 및 지수 중 국내에서 많이 사용되고 수질관리에 유용한 지수 위주로 수질관련 지수를 검토함.
- COD기준 호소수질등급은 농업용저수지 수질관리에 많이 이용되는 지수이지만, COD농도만을 고려한 지수로 저수지의 수질상태를 종합적으로 반영하지 못함.

관리지수형태	산정법	장점	단점
①COD기준 호소수질등급	7단계(Ia~VI)	가장 흔하게 사용하는 수질등급으로 수질 상태 비교 용이	COD만 고려됨
②TOC기준 호소수질등급	7단계(Ia~VI)	유기물 총량 지표에 가까운 TOC 활용	TOD만 고려됨 수질기준으로 적용된 지 얼마 되지 않아 축적된 수질자료가 부족
③4항목평균 호소수질등급	COD, T-N, T-P, Chl-a 수질등급 산술평균	COD뿐만 아니라 다른 항목 고려 가능	방법의 이론적 근거 부족
④ Vollenweider 영양상태	T-N, T-P 5단계(극빈영양~부영양)	흔히 사용되는 지수 영양물질인 T-N, T-P	대부분 부영양상태로 편중됨
⑤LQI	COD, T-P, Chl-a의 회귀식 도출 후 가중치 적용	우리나라 호소 대상 COD, T-P, Chl-a 실측값을 적용한 지수 다른 수질항목도 추가 적용 가능	범위 넓음(0.0~100.0) 고농도, 저농도에서 범위 초과 높은 점수가 나쁜수질
⑥rLQIar	COD, T-P, Chl-a의 회귀식 도출 후 가중치 적용	농업용저수지에 적합하도록 LQI를 보완하여 개발	범위 넓음(0.0~100.0)
⑦LEHAw	COD, T-P, Chl-a의 로지스틱함수식 도출 후 가중치 적용	COD, T-P, Chl-a 고려 우리나라 호소 대상 실측값을 적용한 지수 0~100까지 고르게 분포	범위 넓음(0.0~100.0) 개발 진행 중
⑧COD농도 정수값 (CODI)	COD농도의 정수값 (0~30)	COD농도 기준에 익숙한 사용자에게 해석 용이 지수가 아닌 COD 농도가 출력	COD만 고려됨 COD농도 범위에 대한 사전 지식이 부족한 사용자에게 불편

- TOC기준의 호소수질등급이 COD기준 호소수질등급과 같이 TOC농도만을 고려해 저수지의 수질상태를 종합적으로 반영하지 못하는 문제점을 갖고 있으며, 최근에 호소수질등급에 추가되어 축적된 TOC농도가 적은 문제점 있음.
- COD기준 호소수질등급이 COD농도만을 이용했다는 문제점을 극복하기 위해 COD, T-N, T-P, Chl-a 수질등급의 산술평균값을 수질지수로 활용이 가능하지만, 사용되지 않는 방법으로 이론적 근거가 미흡함.
- 우리나라 호소에 적합하도록 개발된 LQI는 다양한 수질항목을 고려

하여 개발되었고 장기간의 연구를 통해 이론적 근거가 명확하지만, 수질등급이 0.0~100.0까지 매우 많아 본 연구에 도입하여 적용하기에는 한계가 있음. 그러나 기존의 LQI지수를 11단계(0~100)로 간략화할 경우 활용성이 높음.

- 최근 우리나라 호소에 적합하도록 개발된 LEHAW지수는 LQI지수와 달리 높은 값이 좋은 수질을 의미하며, 고농도에서는 100으로 저농도에서는 0으로 수렴함. LQI와 같이 수질등급이 0~100까지 매우 넓어 본 연구에 도입하기에 어려움이 있기는 하지만, 11단계로(0~100)로 줄일 경우 충분히 사용가능함.
- Vollenweider 영양상태지수는 농업용저수지에서 많이 이용되고 있지만, 약 90%가 중영양과 중부영양으로 분류되어 변별력이 없는 문제가 있으며, LQI지수를 이용한 LQI영양상태지수는 Vollenweider영양상태지수와 같이 대부분 중영양과 부영양으로 분류되는 문제와 국내 사용빈도가 적은 문제가 있음.
- CODI는 COD농도의 정수값을 이용한 지수로 본 연구에서 새로 도입한 지수임. COD기준 호소수질등급과 달리 여러 등급으로 구분되어 세밀한 수질변화를 지수에 반영할 수 있음. COD농도에 익숙한 수질관리 담당자에게 매우 유용하기는 하지만 COD농도만을 고려하여 농업용저수지의 다른 수질항목이 고려되지 않은 문제가 있음.
- LQI지수 보완 : LQI지수가 COD, T-P, Chl-a의 수질이 모두 고려되어 저수지의 수질상태를 종합적으로 나타낼 수 있는 좋은 지수이기는 하지만, 농업용저수지의 수질은 매우 낮은 저농도와 매우 높은 고농도의 수질이 모두 나타나는 특징이 있어 농업용저수지에 그대로 적용할 경우 저농도와 고농도에서 범위(0~100)을 벗어나는 문제가 발생함.
- 농업용저수지의 실측수질을 이용해 LQI 산정을 위한 부지수함수를 다시 도출함. 도출된 식을 이용할 경우 실측된 수질 중 최고농도와 최저농도에서 각각 100과 0의 값을 나타냈으며, 이렇게 산정된 지수를 기존의 LQI와 구분할 수 있도록 LQI_{ar} 로 하였음.

$$LQI_{ar} = 0.5 * LQI_{ar}(\text{COD}) + 0.25 * LQI_{ar}(\text{T-P}) + 0.25 LQI_{ar}(\text{Chl-a})$$

$$LQI_{ar}(\text{COD}) = 0.3769 + 69.096 \log(\text{COD})$$

$$LQI_{ar}(\text{T-P}) = 100.39 + 33.413 \log(\text{T-P})$$

$$LQI_{ar}(\text{Chl-a}) = 14.319 + 35.769 \log(\text{Chl-a})$$

- 또한 높은 값일수록 좋은 수질을 의미할 수 있도록 100에서 LQI_{ar} 값을 뺀 새로운 $rLQI_{ar}$ 지수를 추가로 도입하였음. 참고로 호소수질기준 중 농업용수에 해당하는 IV등급은 $rLQI_{ar}$ 지수로 34~45에 해당됨.

$$rLQI_{ar} = 100 - LQI_{ar}$$

- 이렇게 보완 개발된 $rLQI_{ar}$ 지수를 농업용저수지에 적용한 결과 농업용저수지의 수질농도 분포를 잘 반영하여 지수가 산정됨.
- $rLQI_{ar}$ 는 0부터 100사이의 값을 갖는 지수로 범위가 매우 넓어 일단위에서 반올림하여 재분류 하였으며($LQI_{ar}10$), 추가로 A, B, C, ~, F 또는 매우 좋음, 좋음 ~, 매우나쁨 등으로 재분류가 가능함.
- 본 연구에서는 위에서 검토한 수질관련 지수 중 COD기준 호소수질등급, TOC기준 호소수질등급, 4항목평균 호소수질등급, Vollenweider영양상태, LQI, $rLQI_{ar}$, LEHAW 및 CODI를 선정하여, 인공지능기법을 이용해 제원 및 부하량자료로부터 각각의 지수를 추정하는 연구를 수행함.

- 수질지수 추정에 사용할 저수지 인자 검토

- 저수지 수질 영향인자 검토 : 저수지 제원관련 수질측정망 자료 중 저수지 수질에 영향을 미치는 인자로 유역면적, 만수면적, 유효저수량, 유효수심(유효저수량/만수면적), 수혜면적을 선정하였으며, 부하량자료로는 BOD, T-N, T-P의 생활계, 축산계, 산업계, 양식계, 토지계, 점원(생활계+축산계+산업계), 기타(산업계+양식계+토지계) 및 전체(점원+토지계) 발생부하량을 선정함.
- 농업용저수지 수질에 영향을 미치는 또 다른 인자로 개별 저수지 관할측후소의 총 강수량과 30년 평균 총 강수량과의 비(강수비=총 강수량/30년 평균 총 강수량)를 선정하여 수질지수 추정연구에 이용함.
- 실측한 연평균 COD, T-N, T-P, Chl-a농도를 이용해 위에서 선정한 8가지 수질지수(COD기준 호소수질등급, TOC기준 호소수질등급, 4항목 평균 호소수질등급, Vollenweider영양상태, LQI10, $rLQI_{ar}10$, CODI)를 산정함.

- 저수지 수질에 영향을 미치는 저수지 제원(유역면적, 만수면적, 유효저수량, 유효수심, 수해면적), 연도별 BOD, T-N, T-P의 발생부하량(생활계, 축산계, 산업계, 양시계, 토지계, 점원, 기타, 전체) 및 연도별 총 강수량과 30년 평균 대비 비율, 연도별 실측한 연평균 COD, T-N, T-P, Chl-a농도 및 산정한 8가지 수질지수를 DB로 구축함.(6797개의 data set).
- 수질지수와 상관분석을 통한 적합한 인자 선정 : 저수지 수질에 영향을 미치는 인자와 각각의 수질지수와의 상관관계를 분석한 결과 유효수심이 가장 높은 상관관계를 나타냈으며, 총 강수량, 강우비, 유역면적, 만수면적, 유효저수량이 수질지수와 약간의 상관관계를 나타냈음.
- COD, T-N, T-P의 발생부하량은 수질지수와의 상관관계가 낮은 것으로 나타남. 이를 보완하기 위해 발생부하량 대신 발생부하량을 유역면적으로 나눈 발생부하비(g/ha/day)를 이용해 상관분석을 실시한 결과 소폭 상승한 결과값을 나타냄.
- BOD, T-N, T-P의 발생부하량은 원단위를 적용하여 산정하므로 각 항목별로 일정한 비율을 갖고 있기 때문에, 이중 대표성을 갖는 BOD 발생부하량의 생활계, 축산계 등 오염원 별 8가지 항목을 선정하여 수질지수 추정연구를 수행함.

- 수질지수 추정기법 개발 및 적용

- 수질지수 추정기법 연구 : 기존의 수질관련 지수는 농업용저수지에서 실측된 수질만을 이용해 수질상태를 4~7등급의 지표 또는 지수로 개발된 반면에, 본 연구에서 개발 한 수질지수 추정기법은 저수지 수질에 영향을 미치는 인자를 이용해 지수를 추정함.
- 저수지 수질에 미치는 인자만을 이용해 수질지수를 추정할 경우 유역의 오염부하량, 토지이용 등 유역환경변화에 따른 수질변화 분석이 가능하여 약간의 수질모의 기능이 가능함.
- 과거 10년 동안 농업용저수지 수질측정망을 운영하면서 수집된 수질측정망자료와 기존의 방법에 의해 수질로부터 산정된 수질지수 사이의 관계를 인공지능기법을 이용해 학습시킨 후 저수지 수질을 제외한 측정망자료로부터 직접 수질지수를 추정하고자함.
- 추정된 수질지수는 기존의 수질지수와 동일한 형태를 유지하지만, 산정방법은 수질이 아닌 유역제원 및 오염원자료로부터 산정되도록 함.

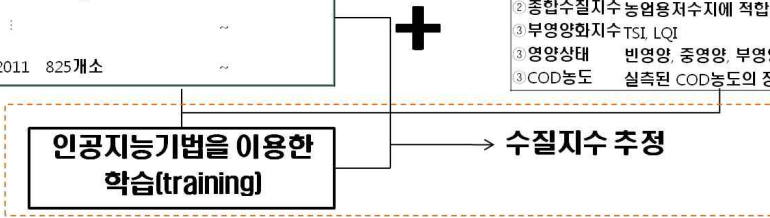
○수질지수추정을 위한 부지수함수를 인공지능기법을 이용해 도출함.

측정망자료

연도	저수지명	유역 및 저수지특성, 오염부하량
2001	492개소	~
⋮		~
2011	825개소	~

수질로부터 산정된 기존 수질지수

연도	산정법
①수질등급	기존의 COD기준 수질등급
②종합수질지수	농업용저수지에 적합한 종합수질지수
③부영양화지수	TSI, LQI
③영양상태	빈영양, 중영양, 부영양...
③COD농도	실측된 COD농도의 정수 값



○수질지수 추정을 위한 인공지능기법 선정 : 수질지수 추정에 사용할 수 있는 인공지능기법으로는 인공신경망(ANN), 패턴인식기법중의 하나인 의사결정트리(decision tree), 유전자프로그래밍(genetic programming)이 있음

수질지수추정기법	장점	단점
①인공신경망(ANN)	높은 정확도의 수질지수 추정 가능	수질지수 모델을 만들기 다소 어려움
②의사결정트리 (decision tree)	분류기준(fuzzy rule)이 도출되어 도출된 fuzzy rule을 이용할 경우 쉽게 지수 추정가능	등급의 수가 너무 많을 경우 분류 정확도 저하
③유전자프로그래밍 (GP)	학습과정을 통해 식이 도출되어 도출된 식을 통해 쉽게 지수 추정 가능 회귀분석보다 좋은 결과 도출가능	도출된 식이 다소 복잡함 자료부족시 정확도 저하 많은 인자 고려불가 시간이 많이 소요됨

○인공신경망기법은 높은 정확도의 수질지수 추정이 가능한 반면, 수질지수 추정모델을 개발하는데는 어려움이 있으며, 유전자프로그래밍기법은 학습과정을 통해 수질지수를 추정할 수 있는 식이 도출되어 쉽게 수질지수 추정모델을 만들 수 있지만, 정확도가 인공신경망보다 낮다는 단점이 있음.

○의사결정트리 기법은 높은 정확도를 얻을 수 있으면서도 추후 수질지수 추정모델 개발을 할 수 있는 fuzzy rule이 도출됨

○인공지능기법을 이용한 수질지수 추정 : 앞에서 검토한 인공지능기법

중 의사결정트리와 유전자프로그래밍기법을 이용해 구축한 수질측정망 DB와 산정된 수질지수(8가지)를 이용해 학습(training)시킨 후 기존의 수질지수를 추정하였으며, 동일한 방법으로 선형회귀분석도 실시함.

- 3가지 기법을 이용해 8개의 수질지수를 추정한 결과를 각 기법별 지수별 실제값과 추정값의 오차별 비율과 r^2 값을 계산한 결과는 다음 표와 같음.
- 표에서 전체적으로 의사결정트리기법을 이용한 결과가 오차가 적고, r^2 값이 높게 나타남. 수질지수 추정모델 개발을 위한 기법으로 의사결정트리기법 선정함.

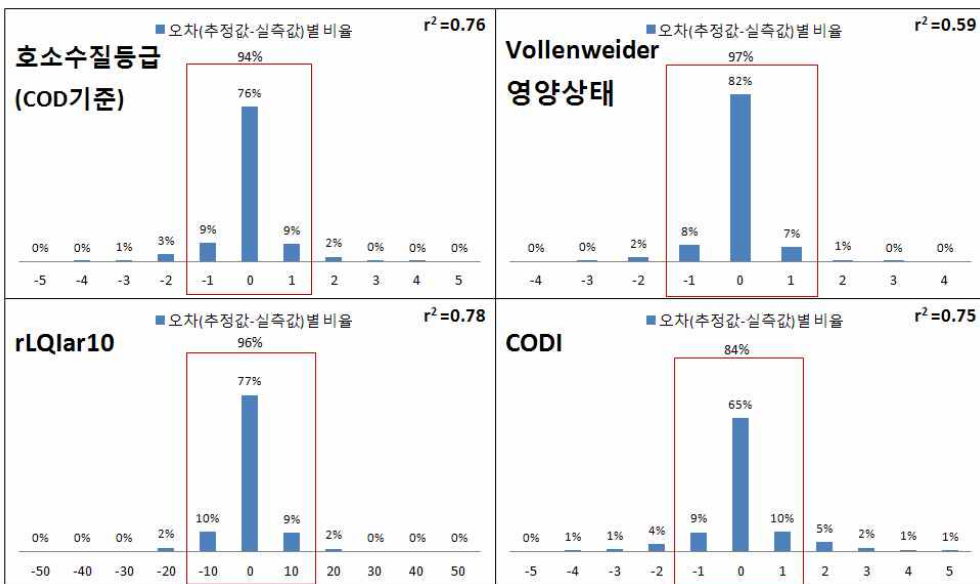
수질지수	의사결정트리		유전자프로그래밍		다중회귀분석	
	error	r^2	error	r^2	error	r^2
①CODI	31%	0.77	73%	0.4	80%	0.33
②수질등급 (COD기준)	23%	0.78	62%	0.47	66%	0.43
③수질등급(TOC기준)	36%	0.65	70%	0.39	73%	0.32
④수질등급(평균)	25%	0.74	67%	0.43	72%	0.36
⑤Vollenweider영양상태	23%	0.52	49%	0.27	44%	0.24
⑥LQI10	24%	0.76	57%	0.41	60%	0.39
⑦rLQI _{ar} 10	25%	0.75	59%	0.4	59%	0.39
⑧LEHAW10	33%	0.81	71%	0.54	79%	0.4

- 의사결정트리 기법을 이용한 수질관리 지수 추정 결과 분석

- 전체 6797개의 데이터 중 76%인 5143개가 저수지 수질농도를 이용해 산정한 값과 인공지능기법을 이용해 유역제원 및 부하량자료로부터 추정한 값이 일치하는 것으로 나타났으며, 9%는 실제보다 1등급 높게 9%는 실제보다 1등급 낮게 추정됨. 동일한 저수지도 매년 약간의 수질등급이 변하는 것을 고려해 1등급 차이나는 부분까지 추정이 잘된 것으로 가정할 경우 전체 94%가 기존의 방법으로 산정된 지수와 유사하게 추정됨.
- LQI10과 rLQI_{ar}10지수는 호소수질등급보다 등급수가 더 많음에도 불구하고 저수지 수질로부터 산정한 등급별 LQI10지수와 저수지 제원 및 부하량자료로부터 추정한 LQI10지수 사이의 오차가 2% 포인트 이내로 매우 정확하게 추정되었으며, 전체의76%가 실측된 LQI10과 추정된

LQI10지수가 정확하게 일치하는 것으로 나타남.

- Vollenweider 영양상태는 등급의 수가 5개로 적고, 약 86%가 중영양과 중부영양으로 집중되어 있어 다른 지수보다 상대적으로 정확히 추정된 비율이 82%로 매우 높게 나타난 반면, r2값은 0.59로 낮게 나타남. Vollenweider 영양상태는 대부분 중영양과 중부영양에 집중되어 농업용저수지의 수질상태를 나타내는데 변별력이 낮은 단점이 있음.
- COD농도 정수값 지수(CODI)는 다른 지수보다 등급수가 2~3배 이상 많음에도 불구하고 등급별 오차는 1% 포인트 이내로 적게 나타남. 전체적으로 기존방법과 인공지능방법의 차이는 정확하게 추정된 것이 69%로 다른 지수보다 적게 나타남. 기존방법과 1등급 차이 나는 것까지 모두 고려할 경우 전체의 84%가 기존방법과 유사하게 모의되었음.

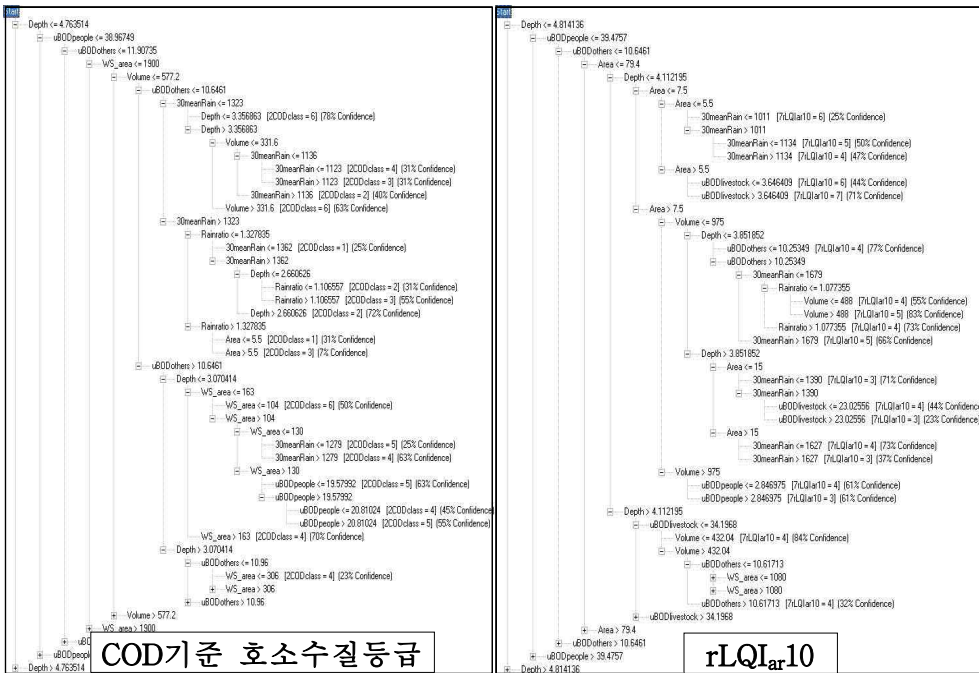


- 수질지수 추정모델 개발을 위한 fuzzy rule 도출

- 수질지수 추정기법으로 의사결정트리기법을 선정하였으며, 수질지수 추정모델을 개발하기 위해 각 지수별로 수질지수를 추정할 수 있는 fuzzy rule을 도출함.
- 도출된 fuzzy rule을 이용해 수질지수를 추정하기 위해서는 다음과 같은 총 9개 인자의 값이 필요함. 30년 평균 총 강수량, 강우비(총 강수량/30년 평균 총 강수량), 유역면적, 만수면적, 유효저수량, 유효수심

(유효저수량/만수면적), BOD생활계 발생부하량, BOD축산계 발생부하량, BOD 산업계+양식계+토지계 발생부하량.

- 대부분 수질측정망을 통해 매년 수집되고 있는 자료로 측정망대상저수지는 쉽게 해당값을 얻을 수 있음.



□ 수질지수 추정모델 개발 및 활용방안

- 수질지수 추정모델의 개발 개요

- 의사결정트리 알고리즘을 이용해 각 수질지수별로 도출된 fuzzy rule을 이용해 수질지수를 추정할 수 있는 모델을 개발함.
- 추정할 수질지수는 ①COD정수값(CODI), 호소수질등급(②COD기준, ③TOC기준, ④4항목평균)⑤Vollenweider영양상태, ⑥LQI, ⑦rLQIar, ⑧LEHaw임.
- 도출된 fuzzy rule을 이용해 8개의 수질지수를 추정하기 위해서는 입력자료로 관할관측소, 유역면적(ha), 만수면적(ha), 유효저수량(천m3), BOD생활계 발생부하량(kg/day), BOD축산계 발생부하량(kg/day), BOD 산업계+양식계+토지계 발생부하량(kg/day)이 필요함.

- 도출된 fuzzy rule을 이용해 수질지수를 추정하기 위해 필요한 9개의 입력인자 중 유역면적, 만수면적, 유효저수량은 입력된 자료를 사용하며, 30년 평균 총 강수량과 강우비는 입력된 관할관측소를 이용해 기상DB로부터 해당정보를 검색해 사용하며, 유효수심은 모델 자체적으로 입력된 유효저수량을 만수면적으로 나뉘어 사용함. 생활계, 축산계, 산업계+양식계+토지계의 BOD 발생부하비(g/ha/day)는 모델 자체적으로 입력된 각각의 부하량을 유역면적으로 나뉘어 사용함.
- 최대한 직접 입력하는 방법을 피하고, 구축된 DB로부터 필요한 자료를 호출해 자동 입력되는 방법을 선택함.
- 개발한 수질지수 추정모델의 배포, 업데이트 등의 관리가 용이하고, 사용자가 쉽게 접근할 수 있도록 인터넷 기반으로 수질지수 추정모델을 개발함.

- 개발된 수질지수 추정모델의 특징

- 적은 입력자료 요구** : 저수지 제원 관련 4개(관할관측소, 유역면적, 만수면적, 유효저수량)와 BOD발생부하량 3개(생활계, 축산계, 산업계+양식계+토지계)의 자료만 요구함.
- 입력값 자동입력기능** : 해당 저수지가 수질측정망 대상저수지일 경우 저수지와 해당연도를 선택하면 7개의 입력값이 DB로부터 자동입력됨.
- 쉽고 빠른 모델 실행** : ‘수질지수 추정결과’탭을 클릭하면 모델이 실행되고 그 결과가 화면에 바로 나타남.
- 기존 수질지수 제공** : 추정된 수질지수의 정확도 평가를 위해 실측된 수질로부터 8개의 수질지수를 자동으로 계산한 후 결과를 중앙값(median)과 범위로 화면에 나타냄.
- 불확실성 분석을 통한 추정치 통계값 제공** : 모델의 불확실성 및 미래 조건의 불확실성을 고려하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용해 모델을 2000번 실행한 후 그 결과를 통계분석해 평균값과 범위값으로 화면에 나타냄. 불확실성을 고려할 경우 수질등급을 소수점 첫 자리까지 표현할 수 있어 유역환경변화에 따른 미세한 수질변화를 지수로 표현할 수 있음.
- 유역환경 변화 분석기능** : 유역의 강수량변화, 부하량변화에 따른 저수지 수질영향을 분석하기 위한 다양한 입력옵션을 제공함. 조건변

화 전후의 결과를 한 화면에 동시에 나타내 수질지수 변화를 쉽게 분석할 수 있도록 함.

- **인터넷기반의 모델** : 모델 배포, 업데이트 등의 관리를 쉽게 할 수 있고, 사용자가 언제 어디서나 인터넷을 통해 쉽게 접근할 수 있도록 인터넷 기반으로 수질지수 추정모델을 개발함.



- 수질지수 추정모델 활용방안

- 저수지의 잠재적인 수질오염 파악 및 수질관리목표로 활용 : 저수지 제원 및 발생부하량 자료를 이용해 저수지의 잠재적인 오염 가능성을 파악할 수 있어 저수지가 오염되기 전에 대책을 수립할 수 있음.
- 저수지의 형상, 제원 및 오염부하량 조건에 따라 저수지마다 도달 가능한 수질이 서로 다를 수 있음. 본 모델을 통해 저수지마다 도달 가능한 수질지수를 제시하고, 제시된 수질지수를 유지하도록 저수지를 관리하는데 활용함.
- 유역 오염부하량 관리 특성 분석에 활용 : 유역 제원 및 발생부하량이 비슷하더라도 유역의 발생부하량을 어떻게 관리하느냐에 따라 배출부하량이 크게 달라져 저수지의 수질이 다르게 나타날 수 있음.
- 유역의 제원 및 발생부하량 자료를 이용해 수질지수 추정모델을 실행시켜 얻은 추정된 수질지수와 실측된 수질지수를 비교함으로써 유역 오염부하량 관리상태를 쉽게 파악할 수 있음.
- 추정된 수질지수가 실측된 수질지수보다 낮은 경우는 유역의 특성 및 발생부하량 규모가 비슷한 저수지들과 비교해 유역의 발생부하량

이 잘 관리되지 않고 배출되는 저수지임. 이러한 저수지는 유역의 발생부하량을 삭감시키기 위한 오염부하량 저감시설 설치를 통한 유역 수질관리가 필요함.

- 추정된 수질지수가 실측된 수질지수보다 높은 경우는 유역의 특성 및 발생부하량 규모가 비슷한 저수지들과 비교해 유역의 발생부하량이 잘 관리되고 있는 저수지로 이러한 저수지는 수질을 개선시키기 위해 추가로 저감시설을 설치하는 것 보다는 현 상태를 유지하거나, 오염원 자체를 제거하는 방안을 검토하는 것이 더 유리함.
- 오염원 조사자료가 없는 신규 조성 예정 저수지 수질 추정 : 저수지를 새로 조성하기 전 여러 개의 예비 대상 조성지의 개략적으로 예상되는 수질을 예측하는데 이용할 수 있음.
- 후보지 선정단계에서는 대부분 저수지 제원만 존재하고 오염부하량 조사는 이루어지지 않은 상태이기 때문에 기존 방법으로는 예상되는 수질을 예측할 수 없음.
- 해당 지역의 부하량 조사자료가 없는 경우에도 수질을 추정할 수 있도록 측정망 전체의 부하량 조사자료를 이용해 유역의 발생부하량을 유역면적으로 나눈 BOD부하비를 통계분석하여 저수지 개발정도에 따라 7단계로 구분하여, 해당 유역의 개발정도를 선택하면 BOD부하비가 자동으로 입력되도록 함.
- 본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델은 이와 같이 저수지 제원과 유역의 개발정도에 관한 정보만으로도 개략적인 예상되는 저수지의 수질지수를 추정할 수 있음.
- 오염원 조사자료를 보유한 신규 조성 예정 저수지 수질 추정 : 일반적으로 조성 예정 신규저수지의 환경영향평가를 위해 수질을 예측함. 수질을 예측하기 위해서는 자료수집, 부하량산정, 하천수질조사, 유역모델 구축 및 보정, 저수지모델 구축 후 예상되는 수질을 예측하는 과정을 수행하는데 약 1달 이상의 시간이 소요됨.
- 다른 과제에서 2개 신규 조성 예정지의 수질을 기존 모델을 이용해 예측한 결과와 본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델을 통해 예측한 결과를 비교한 결과 정확하게 일치하지는 않지만 저수지 제원 및 유역부하량 만으로 쉽고 빠르게 개략적인 수질지수 추정이 가능하였음.

○본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델은 본격적인 수질예측 전 보조적인 수단으로 충분히 사용할 수 있을 것으로 판단됨.

대관령 지구		항목	값	대관령		대동 지구		항목	값	부여	
		관할특후소						관할특후소			
		유역면적(ha)	1530					유역면적(ha)	420		
		만수면적(ha)	21.8					만수면적(ha)	15		
		유요지수량(천㎡)	2846					유요지수량(천㎡)	1457		
		생활계	0					생활계	2.5		
		BOD부하량(kg/d)	161					BOD부하량(kg/d)	11.6		
		축산계	161					축산계	11.6		
		기타	22.1					기타	4.6		
종류	추정된 수질지수		수질모델 결과	종류	추정된 수질지수		수질모델 결과				
	평균값	범위			평균값	범위					
CODI	3.7	3~5	4.1	CODI	3.9	3~5	3.2				
수질등급(COD)	II (2.8)	Ib~III	III	수질등급(COD)	III(3.6)	II~IV	II				
수질등급(TOC)	Ib (1.7)	Ia~III	-	수질등급(TOC)	Ib(1.9)	Ia~III	-				
수질등급(평균)	III (3.5)	III~III	II	수질등급(평균)	III(3.2)	II~III	II				
VW영양상태	빈중 (2.6)	빈중~빈중	중	VW영양상태	빈중	빈중~중	중				
LQI	48	50~50	42	LQI	43	40~50	44				
rLQIar	61	60~60	59	rLQIar	59	50~60	57				
LEHaw	61	50~90	67	LEHaw	62	30~90	64				

- 유역의 신규오염원 영향 검토 : 공사가 관리하고 있는 저수지 유역에 공장과 같은 신규 오염원이 생길 경우 예상되는 저수지 수질영향을 검토하는데 활용할 수 있음.
- 개발된 수질지수 추정모델의 ‘조건변화분석’ 기능을 이용해 신규 오염원의 발생부하량값을 입력하면, 신규오염원 전·후의 수질지수 추정 결과가 동시에 제공되어 신규오염원에 의한 저수지 수질영향을 쉽게 분석할 수 있음.
- 개발된 수질지수 추정모델을 통해 지사 및 지역본부에서도 쉽게 신규 오염원의 개략적인 영향 분석이 가능함. 본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델은 보조적인 모델일 뿐 시간과 비용이 충분한 경우 자세한 현장조사 후 기존 모델링을 통해 정확한 수질영향을 모의하는 것이 바람직함.

(a) 입력화면

입력자료 수질지수 추정 결과

경기 화성수원 마천 2012

반목 관할특우소 수원

유역면적(ha) 380

만수면적(ha) 25.4

유호저수량(천³m) 893.7

생장계 25.2

BOD부하량(kg/d) 11.6

속산계 기타 4.6

'2012년 '마천저수지' 정보가 입력되었습니다.

(b) 조건변화 전 결과화면

입력자료 수질지수 추정 결과

종류	추정된 수질지수		실측된 수질지수	
	평균값	범위	중값값	범위
CODI	6.9	5~9	8	6~19
수질등급(COD)	IV (4.9)	IV~V	V	IV~VI
수질등급(TOC)	II (2.8)	Ia~IV	III	III~III
수질등급(평균)	V (5.4)	IV~VI	V	IV~VI
VW영양상태	중 (3.7)	중~중부	중	중~중부
LQI	61	50~70	67	61~87
rLQIar	38	30~50	35	15~40
LEHAw	26	10~40	20	3~28

* 1995 ~ 2012 data

(c) 조건변화 입력화면

변화조건 수질지수 추정 결과

반목 변경조건 값

관할특우소 동일 선택

유역면적(ha) 동일

만수면적(ha) 동일

유호저수량(천³m) 동일

생장계 동일

BOD부하량(kg/d) 속산계 동일

기타 증감 +10

(d) 조건변화 후 결과화면

변화조건 수질지수 추정 결과

종류	수정된 수질지수	
	평균값	범위
CODI	8.3	7~9
수질등급(COD)	V (5.2)	IV~V
수질등급(TOC)	V (5.1)	V~V
수질등급(평균)	V (5.3)	IV~VI
VW영양상태	중 (3.6)	중~중
LQI	64	60~70
rLQIar	35	30~40
LEHAw	17	10~30

- 유역 오염부하량 변화 영향 분석 : 저수지의 수질을 개선시킬 목적으로 유역의 오염부하량을 저감시킬 경우 예상되는 저수지의 수질영향 분석에 활용할 수 있음.
- ‘조건변화분석’기능에 삭감되는 오염부하량을 입력한 후 모델을 실행하면 오염부하량 삭감 전·후의 수정된 수질지수가 화면에 같이 나타나, 오염부하량 삭감에 의한 저수지 수질영향을 쉽게 분석할 수 있음.
- 만수저수지에 대해 현재(2012년)의 발생부하량을 2001년 수준으로 감소시킬 경우 예상되는 수질지수를 추정하는데 본 모델을 적용한 결과 COD기준 호소수질등급, Vollenweider영양상태, rLQIar, CODI 지수가 V(6.2), 중부영양, 29, 12.5에서 V(5.8), 중부영양, 31, 11.2로 수질이 소폭 개선되는 것으로 나타남. 실제 2001년 실측된 수질로부터 계산한 수질지수는 각각 VI, 부영양, 27, 10으로 차이가 나기는 하지만 비슷한 범위 내에 있음을 알 수 있음.
- 이와 같이 본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델을 이용할 경우 짧은 시간 내에 개략적인 수질영향을 분석할 수 있음. 그러나 본 연구에서 개발된 수질지수 추정모델은 수질개선대책 수립 전 개략적인 검토단계에서 활용 가능한 모델로, 본격적인 수질개선대책은 현장조사 후 기존의 수질모델을 이용해 저수지 수질영향을 모의하는 것이 적합함.

(a) 만수저수지 2012년 입력화면

입력자료 수질지수 추정 결과

경기 안성 만수(안성) 2012

항목 값

관할특후소 천안

유역면적(ha) 375

만수면적(ha) 22.3

유효저수량(천³m) 614

생량계 41.2

BOD부하량(kg/d) 2661.1

축산계 기타 4.9

'2012년 '만수(안성)저수지' 정보가 입력되었습니다.

(b) 부하량 삭감 전 수질지수 추정결과

입력자료 수질지수 추정 결과

종류	추정된 수질지수		실측된 수질지수	
	평균값	범위	중앙값	범위
CODI	12.5	10~15	12	10~21
수질등급(COD)	VI (6.2)	V~VI	VI	VI~VI
수질등급(TOC)	IV (4.7)	II~VI	V	V~VI
수질등급(평균)	V (5.5)	IV~VI	VI	V~VI
VW영양상태	중부 (4.1)	중~중부	중부	중~중부
LQI	73	60~90	77	73~92
rt.QIar	29	20~30	25	11~29
LEHaw	10	0~20	8	2~11

*2000 ~ 2012 data

(c) 삭감부하량 입력화면

변화조건 수질지수 추정 결과

항목 변경조건 값

관할특후소 동일 선택

유역면적(ha) 동일

만수면적(ha) 동일

유효저수량(천³m) 동일

생량계 증감 -18.0

BOD부하량(kg/d) 축산계 증감 -2176.9

기타 동일

(d) 부하량 삭감 후 수질지수 추정결과

변화조건 수질지수 추정 결과

종류	추정된 수질지수	
	평균값	범위
CODI	11.2	8~15
수질등급(COD)	V (5.8)	IV~VI
수질등급(TOC)	III (3.3)	II~IV
수질등급(평균)	V (5.5)	IV~VI
VW영양상태	중부 (4.2)	중~중부
LQI	70	40~80
rt.QIar	31	20~50
LEHaw	15	0~20

○ 인터넷 기반의 기존 시스템과 연계 : 본 연구에서 개발한 수질지수 추정모형을 RIMS 등과 같은 기존의 인터넷 기반 시스템에 삽입하여 기존에 자료 검색기능에 수질모의 기능이 추가되어 종합적인 저수지 수질관리가 가능하게 됨.

농업용저수지 측정망 수질관리 시스템

수질지수모의

지도전체보기 2012년 평균 Layer선택 지도

재원 유역도 오염원 수질 사진 수질지수

입력 자료 re-import		추정된 수질지수 re-run		실측된 수질지수		
항목	값	종류	평균값	범위	중앙값	범위
관할특후소	천안	CODI	5.5	3~7	6	5~8
유역면적(ha)	490	수질등급(COD)	III(3.8)	II~V	IV	III~V
만수면적(ha)	14.1	수질등급(TOC)	I b(1.7)	I a~III	I a	I a~I b
유효저수량(천 ³ m)	768	수질등급(평균)	IV(4.6)	III~V	IV	III~IV
BOD 생량계	5.8	VW영양상태	빈중	빈중~중	중	중~중
부하량 축산계	17.1	LQI	55	50~60	52	51~59
기타	5.5	rt.QIar	56	50~60	50	41~50
		LEHaw	47	40~80	46	31~49

*2012년 BOD 발생부하량 자료
*축산분뇨 고형물부하량 포함
*2009 ~ 2012 data

□ 종합결론

- 농업용저수지 유역과 저수지 수질특성 분석

- ‘유역의 발생부하량 및 제원’, ‘유입하천 유량 및 수질’과 ‘저수지 수질’과의 상관관계를 분석하기 위해 경기도내 측정망대상저수지(55개소) 중 접근이 용이한 31개소에 대해 유입하천의 유량 및 수질, 저수지 수질을 현장조사 함.
- 유입하천의 유량 및 수질과 저수지 수질과는 매우 높은 상관관계를 나타낸 반면, ‘유역의 발생부하량 및 제원’과 ‘유입하천 유량 및 수질’, ‘유역의 발생부하량 및 제원’과 ‘저수지 수질’사이에는 상관관계가 없는 것으로 나타남.
- 기존의 방법으로는 ‘유역의 발생부하량 및 제원’과 ‘저수지 수질’ 사이에 상관관계가 낮아 ‘유역의 발생부하량 및 제원’로부터 수질 추정이 어려워 여러 영향인자들을 검토하여 종합적인 평가를 해야 함.

- 수질측정망 자료 DB 구축 및 수질분석시스템 개발

- 시설제원 및 조사지점 자료, 유역오염원 조사자료, 저수지 수질조사 자료 및 기타 관련 자료를 수집한 후 MS-Access를 이용해 DB를 구축하였으며, 동일한 자료를 MySQL을 이용해 web-DB도 구축함.
- 쉽게 수질측정망결과를 관리조직별(지역본부, 지사, 개별저수지), 연도별로 여러 형태의 분석자료 및 통계값을 제공하기 위해 Adobe Flash를 이용해 수질측정망자료 분석시스템을 개발함.

- 농업용저수지 수질지수 추정기법 연구

- 농업용저수지 수질상태를 잘 표현할 수 있는 수질지수 8개를 선정함. 이중 LQI지수가 일부 고농도 및 저농도에서 범위를 벗어나는 값을 나타내고, 좋은 수질이 낮은 값으로 표현되는 문제를 보완한 rLQI_{ar}지수를 개발함.
- 저수지 수질에 영향을 미치는 인자로 유역면적, 만수면적, 유효저수량, 유효수심(유효저수량/만수면적), 연도별 BOD의 생활계, 축산계, 산업계+양식계+토지계 발생부하량, 연도별 총 강수량 및 30년 평균 총 강수량을 선정함.

- 선정된 저수지 수질에 영향을 미치는 인자로부터 저수지 수질지수를 추정할 수 있는 인공지능기법으로 의사결정트리기법과 유전자 프로그래밍기법을 선정하였고 그 결과를 다중선형 회귀분석 결과와 비교한 결과 의사결정트리기법의 결과가 가장 우수한 것으로 나타남.
- 의사결정트리 기법을 이용해 각 수질지수별로 수질지수를 추정할 수 있는 fuzzy rule을 도출함.

- 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발 및 활용방안

- 도출된 fuzzy rule을 이용해 배포, 업데이트 등의 관리가 용이하고 사용자가 쉽게 접근할 수 있도록 인터넷 기반의 수질지수 추정모델을 개발함.
- 개발된 수질지수 추정모델은 다음과 같은 특징이 있음. 적은 수의 입력자료(7개)를 요구, 입력 값 자동입력기능, 쉽고 빠른 모델 실행, 기존 수질지수 제공, 불확실성 분석을 통한 추정치 통계값 제공, 유역환경 변화 분석기능.
- 개발된 수질지수 추정모델은 저수지의 잠재적인 수질오염 파악 및 수질관리목표 제시, 유역 오염부하량 관리 특성 분석, 신규 조성 예정 저수지의 수질 추정, 유역의 신규 오염원 영향 검토, 유역 오염부하량 변화 영향 분석 및 기존의 인터넷 기반 저수지 관리시스템과 연계 적용 등에 활용할 수 있음.

SUMMARY

1. Title : Development of water quality index and management model for agricultural reservoir using artificial intelligence technique(final)

2. Research period : Mar. 2011 ~ Dec. 2013

3. Necessity and objectives

3.1 Background and necessity

- Water quality model is used for predicting reservoir water quality and estimating construction cost in planing stage of agricultural reservoir water quality improvement project.
- Developed popular water quality models are very difficult for hands-on workers who have a little knowledge and experience of water quality model because they require much parameters for model setup and are very complicated.
- Reliable simple water quality model is needed for hands-on workers for agricultural reservoir water quality management.
- Water quality model can be developed from monitoring data of water quality monitoring program using artificial intelligence technique for agricultural reservoir water quality management.

3.2 Objectives

- Development of water quality monitoring DB and monitoring data analysis system for agricultural reservoir
- Development of water quality index estimation techniques from factors influencing reservoir water quality using artificial intelligence technique
- Development of water quality index estimation model for agricultural reservoir and utilization plan.

4. Scopes and results

4.1 contents and scopes

1) Analysis of watershed and water quality characteristics for agricultural reservoir

- Agricultural reservoirs were selected for analysis of watershed and reservoir water quality characteristics
- Flow rate and water quality of selected agricultural reservoirs was investigated
- Analysis of watershed and reservoir characteristics of selected agricultural reservoir using monitoring data from water quality monitoring program
- A correlation analysis among watershed, stream, and reservoir using monitoring data from water quality monitoring program and field survey

2) Development of water quality monitoring DB and monitoring data analysis system for agricultural reservoir

- Collecting monitoring data related with water quality monitoring program of agricultural reservoir (facility data, pollutant loading, water quality data etc.)
- Analysis of collected monitoring data
- Development of monitoring DB using MS-Access and MySQL
- Development of web-based monitoring data analysis system to search and analyze the developed monitoring DB

3) Development of water quality index estimation technique using artificial intelligence technique

- Case study of water quality indices and modify water quality index
- Derivation of the major factors influencing reservoir water quality among monitoring parameters
- Development of agricultural reservoir water quality index estimation

technique using artificial intelligence techniques

- Analysis of water quality indices estimation result by artificial intelligence techniques
- Selecting optimal artificial intelligence technique for water quality index estimation

4) Development of water quality index estimation model and utilization plan

- Development of water quality index estimation function using artificial intelligence technique
- Development of water quality index estimation model using developed water quality index estimation function
- Development of several functions for the end user
- Study of utilization plan for developed water quality index estimation model

4.2 Results

1) Analysis of watershed and water quality characteristics for agricultural reservoir

- Stream and reservoir water quality was investigated in the selected 32 agricultural reservoir among 55 agricultural reservoir located in Gyeonggi province to analyze correlation among 'pollutant loading and reservoir characteristics', 'stream flow rate and water quality', and 'reservoir water quality'.
- There is close correlation between 'stream flow rate and water quality' and 'reservoir water quality', whereas there are weak correlation between 'watershed and reservoir characteristics' and 'reservoir water quality'.
- There are close correlation only between pollutant loading and reservoir T-N concentration, and between reservoir effective water depth and COD, TOC, Chl-a, T-P, Cl⁻ concentration of reservoir.

- Although discharge pollutant loading is better than generating pollutant loading for estimating reservoir water quality, generating pollutant loading was used for correlation analysis because there is no discharge pollutant loading data in agricultural reservoir monitoring data.

2) Development of water quality monitoring DB and monitoring data analysis system for agricultural reservoir

- Collecting monitoring data related with water quality monitoring program of agricultural reservoir (facility data, pollutant loading, water quality data etc.) from scattered information systems and various source.
- Analysis of collected monitoring data and development of monitoring DB using MS-Access and MySQL.
- Analysis system of water quality monitoring data was developed using Adobe Flash to provide various analyzed data and statistics values in each management units and year.

3) Development of water quality index estimation technique using artificial intelligence technique

- In this study we developed water quality indices estimation technique from factors influencing reservoir water quality using artificial intelligence techniques.
- Eight types of water quality indices (Korean reservoir water quality standard for COD, TOC, and mean of 4 parameters(COD, T-N, T-P, Chl-a), Vollenweider eutrophication state, LQI, $rLQI_{ar}$, $LEHAW$, CODI) were selected as agricultural reservoir water quality index. $rLQI_{ar}$ was developed by same method with LQI using 7313 agricultural reservoir monitoring data set because LQI value is over the limited range (0~100) in low and high concentration.
- The major factors which is affected to reservoir water quality among monitoring parameters were reservoir characteristics (watershed area, surface reservoir area, reservoir volume, depth, irrigation area), COD, T-N, T-P generated pollutant loading of each year (population,

livestock, point source, total), yearly precipitation, and ratio of average yearly precipitation for 30 years.

- Decision tree algorithm and Genetic programming were selected as artificial intelligence techniques to estimate agricultural reservoir water quality indices from factors influencing reservoir water quality.
- Agricultural reservoir water quality indices were estimated using decision tree algorithm, Genetic programming, and multi linear regression analysis, and the results were compared. Estimated water quality indices using decision tree algorithm was close to calculated water quality indices using monitoring water quality data.
- Estimation errors of Korean water quality standard of COD, Vollenweider eutrophic state, rLQIar, and CODI was 24%, 18%, 23%, 35%, and r^2 was 0.76, 0.59, 0.78, 0.75.

4) Development of agricultural reservoir water quality management model derivation technique using artificial intelligence technique

- Fuzzy rules which can estimate agricultural reservoir management index were inducted after training decision tree algorithm using reservoir characteristic data, pollutant loading data, precipitation data, and calculated water quality index.
- Estimation functions of agricultural reservoir water quality index were developed using inducted fuzzy rules by decision tree algorithm
- Agricultural reservoir water quality index estimation model was developed using developed estimation function of water quality index, and several user friendly functions were also developed for the end-user.
- Developed agricultural reservoir water quality index estimation model has several characteristics. few input data (seven input data) request, automatic input function from developed database by selecting existing reservoir and year, easy and quick model run, providing calculated water quality indices from monitoring data, providing statistics of

estimated water quality indices by uncertainty analysis, analysis function of reservoir water quality change caused by reservoir watershed condition change.

- Developed agricultural reservoir water quality index estimation model can be used for understanding potential reservoir water quality pollution by estimated water quality index, suggesting targets of agricultural reservoir water quality management, characteristics analysis of watershed pollutant loading management, water quality estimation of newly constructed agricultural reservoir before construction, effects analysis of newly introduced pollutant source facility, effects analysis of watershed pollutant loading change, and linking with existing web-based reservoir management systems.

5. Expectation and utilization of the results

5.1 Expectation

- Agricultural reservoir water quality management using developed water quality index estimation model
- Development of agricultural reservoir water quality improvement technology
- Agricultural reservoir water quality improvement

5.2 Utilization plan

- Utilization for agricultural reservoir water quality management tool
- Plan and design of agricultural reservoir water quality improvement project
- Determination of optimal water quality improvement measures
- Advertisement of developed water quality index estimation model by publishing research results

목 차

1장 서론	3
1절 연구배경 및 필요성	3
2절 연구범위 및 내용	4
3절 연구 진행방법	5
4절 기대효과 및 실용화 계획	8
2장 농업용저수지의 수질특성 분석	11
1절 유역, 하천, 저수지 상관관계 분석	11
1. 저수지 수질에 영향을 미치는 인자 사전 연구	11
2. 대상 저수지 선정 및 수질조사	13
3. 유역, 하천, 저수지 상관관계 분석	22
4. 경기도 내 수질측정망자료 분석	25
2절 시기별 저수지 수질변화 분석	26
1. 개요	26
2. 대상 저수지 선정 및 수질조사	26
3. 저수지별 유입하천 및 저수지 수질조사 결과	29
3장 수질측정망자료 DB구축 및 자료분석시스템 개발	39
1절 농업용저수지 수질측정망자료 수집	39
1. 한국농어촌공사 내 수질측정망 관련 자료 현황	39
2. 수질측정망자료 수집 및 분석	41
3. 수질측정망자료 DB화	47
2절 수질측정망 자료분석시스템 개발	52
1. 자료분석시스템 개발 방향 및 구성	52
2. 웹상의 화면 구성 및 개발	55
3. 개발된 농업용저수지 수질측정망 자료분석시스템	58

4장 농업용저수지 수질지수 개발	81
1절 국내외 수질지수 연구 사례	81
1. 수질지수의 정의 및 분류(최지용, 1996)	81
2. 국내 수질지표 개발 사례	85
3. 국외 수질지표 개발 사례(최지용, 1996; 2007)	98
2절 농업용저수지 수질지수 개발	113
1. 농업용저수지 수질지수 형태 검토	113
2. 수질지수 개발방법 검토 및 적용가능성 분석	115
3. 농업용저수지 수질지수 개발	123
5장 농업용저수지 수질지수 추정기법 연구	131
1절 수질지수 추정기법 연구 방향	131
1. 기존 수질지수 산정법과 차이점	131
2. 인공지능기법을 이용한 수질지수 추정기법 개발 방향	132
2절 수질지수 추정을 위한 인공지능기법 연구	133
1. 서론	133
2. 인공신경망(ANN; Artificial Neural Network)	134
3. 유전자 프로그래밍(GP; Genetic Programming)	139
4. 의사결정트리(decision tree)	144
5. 진화 군집분류 알고리즘(ECM)	152
6. 수질지수 추정을 위한 인공지능기법 선정	161
3절 인공지능기법을 이용한 수질지수 추정	162
1. 수질지수 추정을 위한 영향인자 검토 및 DB구축	162
2. 인공지능 기법을 이용한 농업용저수지 수질지수 추정	165
3. 의사결정트리 기법을 이용한 농업용저수지 수질지수 추정	166
6장 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발 및 활용방안 ·	175
1절 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발	175
1. 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발 방향	175

2. 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발	176
2절 농업용저수지 수질지수 추정모델 활용방안	184
1. 저수지 수질관리를 위한 기준으로 활용	184
2. 신규 조성 예정 저수지의 수질 예측	187
3. 신규 오염원 영향 검토	194
4. 수질개선대책 수립 대상지의 부하량 삭감 영향 검토	196
5. 기존의 인터넷 기반 시스템 연계	199
6. 기타 활용방안	200
7장 요약 및 결론	205
부록 수질지수 추정모델 매뉴얼	221

표 목 차

(표 2-1) 현장조사 대상저수지 유역 및 저수지 제원	15
(표 2-2) 수질조사 대상저수지의 유역특성	16
(표 2-3) 수질조사 대상저수지의 저수지특성	16
(표 2-4) 유입하천 현장조사 결과	20
(표 2-5) 저수지 현장조사 결과	21
(표 2-6) 유입하천과 저수지 수질의 상관관계분석 결과	23
(표 2-7) 유역 및 저수지 제원과 수질의 상관관계분석 (실측 31개 자료 이용)	24
(표 2-8) 유역 및 저수지 제원과 수질의 상관관계분석 (측정망 815개 자료 이용)	24
(표 2-9) 저수지 유형별 선정된 대상 농업용저수지	27
(표 3-1) RIMS 자료구축현황	39
(표 3-2) RAWRIS 자료구축현황	40
(표 3-3) 저수지 제원 DB의 필드이름, 데이터형식, 필드크기	47
(표 3-4) 수질측정망 대상저수지의 수질조사 결과	48
(표 3-5) 수질측정망 대상저수지의 오염원조사 결과	49
(표 3-6) 수질측정망 대상저수지의 처리시설 현황자료	50
(표 3-7) 수질측정망 대상저수지의 처리시설 현황자료	51
(표 3-8) 수질측정망 대상저수지의 시설위치 및 수질조사지점	51
(표 3-9) 수질측정망 자료분석시스템 메뉴구성	53
(표 4-1) 수질지표의 분류	82
(표 4-2) K-WQI에서의 수질지표 배점구분	87
(표 4-3) 부착조류 수질평가 4등급(안)	90
(표 4-4) 저서성 대형무척추동물을 이용한 하천수질평가기준안	90
(표 4-5) 4등급에 의거한 생물학적 수질평가기준(안) 및 생태 지표종	91
(표 4-6) 서식지 평가등급(안)	91

(표 4-7) 한국 호수의 LQI 분포도	93
(표 4-8) 어류 메트릭 평가 점수 기준	96
(표 4-9) 수생식물 메트릭 평가 점수 기준	97
(표 4-10) 산정된 NSFQI에 의한 오염도 평가기준	99
(표 4-11) 노스캐롤라이나 Mecklenburg County 종합수질지표값과 수질 상태 판정	100
(표 4-12) CCMEWQI값에 따른 수질 판정과 상태	103
(표 4-13) 등급별 점수범위	107
(표 4-14) 부지수의 범위에 대한 설명	109
(표 4-15) 말레이시아의 WQI 구간별 수질용도	110
(표 4-16) 오염정도별 인자분석 결과	111
(표 4-17) WQI의 분류 제안범위	112
(표 4-18) 국내 적용 중인 수질지수	113
(표 4-19) Vollenweider의 영양상태 분류	114
(표 4-20) 종합수질지수 산정방법 분석	115
(표 4-21) K-CWQI 부지수합수	120
(표 4-22) K-CWQI 항목별 평균 가중치	121
(표 4-23) K-CWQI 점수 구간별 특성 및 용도	122
(표 4-24) 수질항목별 25th percentile과 75th percentile 농도	123
(표 4-25) 확률분포별 LQI, LQIar 및 rLQIar	125
(표 4-26) 호소수질등급별 농업용저수지 수질지수	126
(표 4-27) rLQIar 재분류 및 2011년 측정망대상저수지 분포 비율 ·	127
(표 5-1) 신경회로망의 종류	137
(표 5-2) 세 종류의 모델 기법의 예측 성능 비교	142
(표 5-3) 사용한 파라미터와 사용 가능한 함수	143
(표 5-4) 의사결정트리 알고리즘 분류	145
(표 5-5) 기상 데이터 예	147
(표 5-6) 온도데이터 예	148
(표 5-7) 온도 속성 정렬 순서	149
(표 5-8) 의사결정트리를 이용해 도출한 fuzzy rule	152

(표 5-9) ECM 적용과정 설명	156
(표 5-10) 2가지 케이스에 대한 ECMc 매개변수 및 결과	160
(표 5-11) 인공지능기법별 비교	161
(표 5-12) 농업용저수지 수질지수 추정에 사용된 지수	164
(표 5-13) 인공지능기법별 수질지수 추정 결과	165
(표 5-14) 수질지수별 인공지능기법에 의한 추정기법 적용성 평가	172
(표 6-1) 대관령지구 및 대룡지구의 제원 및 오염부하량	189
(표 6-2) 대관령지구 및 대룡지구 모델링 결과	191
(표 6-3) 기존 모델링 기법으로 산정한 수질지수 및 추정한 수질지수	192
(표 6-4) 대룡지구의 부하량 자료가 없는 경우 수질지수 추정 결과	194

그 립 목 차

<그림 1-1> 연구추진체계	7
<그림 2-1> 수질조사 대상지구 위치	14
<그림 2-2> 유입하천 및 저수지 수질조사 지점(예)	17
<그림 2-3> SPSS를 이용한 상관관계분석	22
<그림 2-4> 경기도 내 측정망저수지 연평균 COD 분포	25
<그림 2-5> 선정된 대상 농업용저수지 유역도	28
<그림 2-6> 미산저수지 유입하천 및 저수지 수질변화	31
<그림 2-7> 용덕저수지 유입하천 및 저수지 수질변화	33
<그림 2-8> 칠곡저수지 유입하천 및 저수지 수질변화	34
<그림 2-9> 만수저수지 유입하천 및 저수지 수질변화	36
<그림 3-1> 농업용저수지 수질측정망 대상저수지 지점 GIS자료 ..	44
<그림 3-2> 농업용저수지 수질측정망 대상저수지 유역경계 및 동리경계 GIS자료	44
<그림 3-3> 농업용저수지 수질측정망 대상저수지 하천도 및 수표면 경계 GIS자료	44
<그림 3-4> 배출부하량 산정과정	45
<그림 3-5> 배출부하량 산정시 오류	46
<그림 3-6> Adobe flash를 이용한 자료분석시스템 개발	55
<그림 3-7> 수질측정망 자료분석시스템의 tree구조	56
<그림 3-8> 지역별옵션 선택 시 관심연도 선택화면	56
<그림 3-9> 연도별옵션 선택 시 관심지역 선택화면	56
<그림 3-10> 수질현황 표와 그래프	57
<그림 3-11> 수질등급현황 표와 그래프	57
<그림 3-12> 측정망종류별 측정망 분포 현황(지역별옵션)	59
<그림 3-13> 측정망종류별 측정망 분포 현황(연도별옵션)	60
<그림 3-14> 농업용저수지 규모별 분포 현황(지역별옵션)	61
<그림 3-15> 농업용저수지 규모별 분포 현황(연도별옵션)	62

<그림 3-16> 측정망 대상저수지 수계별 분포 현황(지역별옵션)	63
<그림 3-17> 측정망 대상저수지 수계별 분포 현황(연도별옵션)	64
<그림 3-18> 측정망 대상지역 월간 누적강수량 분포 현황 (지역별옵션)	65
<그림 3-19> 측정망 대상지역 월간 누적강수량 분포 현황 (연도별옵션)	66
<그림 3-20> 농업용저수지 주오염원 분포 현황(지역별옵션)	68
<그림 3-21> 농업용저수지 주오염원 분포 현황(연도별옵션)	68
<그림 3-22> 농업용저수지 수처리시설 분포 현황(지역별옵션)	70
<그림 3-23> 농업용저수지 수처리시설 분포 현황(연도별옵션)	71
<그림 3-24> 농업용저수지 수질 분포 현황(지역별옵션)	72
<그림 3-25> 농업용저수지 수질현황(연도별옵션)	73
<그림 3-26> 농업용저수지 수질등급 분포 현황(지역별옵션)	75
<그림 3-27> 농업용저수지 수질등급 분포 현황(연도별옵션)	76
<그림 3-28> 농업용저수지 영양상태 분포 현황(지역별옵션)	77
<그림 3-29> 농업용저수지 영양상태 분포 현황(연도별옵션)	78
<그림 4-1> LQI 및 LQIar 분포	126
<그림 5-1> 농업용저수지 수질지수 추정 개념도	131
<그림 5-2> 농업용저수지 수질지수 추정 과정	132
<그림 5-3> 인공신경망의 처리 요소	138
<그림 5-4> 전형적인 3층 구조의 인공신경망	138
<그림 5-5> 유전자 프로그래밍의 유전자형	139
<그림 5-6> 교차 연산의 원리	140
<그림 5-7> 돌연변이 연산의 원리	140
<그림 5-8> 복제 연산의 원리	140
<그림 5-9> 유전자 프로그래밍을 이용한 SS 및 MLSS농도 예측 결과	141
<그림 5-10> 유전자 프로그래밍 기법을 위해 사용한 프로그램	142
<그림 5-11> 의사결정트리를 이용한 수질등급 추정결과 검증	150
<그림 5-12> 의사결정트리를 이용해 찾아낸 분류 규칙	151

<그림 5-13> 의사결정트리를 이용해 도출한 fuzzy rule	151
<그림 5-15> ECM을 이용한 간단한 군집분류 과정	156
<그림 5-16> 2가지 나선문제 : ECMc의 학습용 데이터와 결정 영역	160
<그림 5-17> COD기준 호소수질등급의 실측값 및 추정값	166
<그림 5-18> TOC기준 호소수질등급의 실측값 및 추정값	167
<그림 5-19> 4항목 평균 호소수질등급의 실측값 및 추정값	167
<그림 5-20> Vollenweider 영양상태의 실측값 및 추정값	168
<그림 5-21> LQI10의 실측값 및 추정값	168
<그림 5-22> rLQIar10의 실측값 및 추정값	169
<그림 5-23> LEHAw10의 실측값 및 추정값	170
<그림 5-24> CODI의 실측값 및 추정값	170
<그림 6-1> 수질지수 추정모델 개발 흐름도	175
<그림 6-2> 의사결정트리기법에 의해 도출된 fuzzy rule	176
<그림 6-3> 수질지수 추정모델 소스코드 작업 화면	177
<그림 6-4> 개발된 수질지수 추정모델의 화면 구성	178
<그림 6-5> 저수지 제원 자동입력 기능	179
<그림 6-6> 부하량 자동입력 기능	179
<그림 6-7> 입력자료 직접 입력 화면	180
<그림 6-8> 기본 부하비 자동입력 기능	180
<그림 6-9> 불확실성 고려 전·후 결과 화면	181
<그림 6-10> 결과화면의 실측된 수질지수	182
<그림 6-11> 조건 변화 입력화면 및 결과화면	183
<그림 6-12> 농암저수지와 칠곡저수지 수질지수 추정 결과	185
<그림 6-13> 수질관리를 위한 목표 수질지수 설정	186
<그림 6-14> 신규저수지 수질예측 과정	188
<그림 6-15> 대관령지구 및 대룡지구 유역 및 소유역 분할도	189
<그림 6-16> 대관령지구 및 대룡지구 HSPF모식도	189
<그림 6-17> 대관령지구 및 대룡지구 HSPF모델 보정	190
<그림 6-18> 대관령지구 및 대룡지구 CE-QUAL-W2 모식도	191

<그림 6-19> 대관령지구 및 대룡지구 수질지수 추정 결과	192
<그림 6-20> 대룡지구의 부하량 자료가 없는 경우 수질지수 추정	194
<그림 6-21> 신규 오염원 영향 분석 화면	195
<그림 6-22> 부하량 삭감 영향 분석 화면	197
<그림 6-23> 목표수질 달성을 위한 삭감부하량 산정	198
<그림 6-24> 인터넷 기반 시스템과 연계	200

1장 서론

1장 서론

1절 연구배경 및 필요성

1. 연구의 배경

농업용저수지 수질에 대한 관심이 높아지면서 농림축산식품부는 1990년 대부터 농업용수 수질관리 및 정책수립의 기초자료를 확보할 목적으로 주요 농업용저수지에 대해 수질측정망을 지정하여 운영하고 있다. 수집된 수질측정망 조사 자료는 농업용저수지의 수질오염 현황과 오염변화 추이를 파악하는데 주로 사용되고 있으나, 측정망 자료의 활용성을 더욱 높이고 저수지의 수질을 종합적으로 관리할 수 있도록 장기간 수집된 수질 측정망자료를 가공하여 저수지 수질관리에 활용할 수 있는 도구의 개발이 필요하다.

농업용저수지는 단순한 용수공급 기능을 넘어 지역사회의 친수 공간 제공 및 친환경농산물 생산을 위한 청청용수 공급 등의 기능도 추가로 요구됨에 따라 농업용저수지의 수질관리 및 개선대책 수립 관련 업무가 증가하고 있다. 일반적으로 효율적인 저수지의 수질관리를 위해 수질예측모델이 많이 활용되고 있다. 그러나 기존의 수질예측모델은 입력변수가 다양하고 많기 때문에 전문적 지식을 충분히 갖추고 있지 않은 일선 실무자들은 모델 구동에 어려움이 있다. 또한 비록 복잡한 수질예측모델에 대한 지식 및 경험이 있더라도 모델의 입력 자료를 생성하기 위한 실측자료가 부족한 것이 현실이다.

그러므로 농업용수 수질개선사업이나 신규 저수지 개발 사업의 검토단계에서부터 시간, 비용 및 노력이 많이 소요되는 복잡한 수질예측모델을 적용하는 것보다는, 검토단계에서는 간단한 모델을 이용하여 사업 완료 후 예상되는 저수지 수질을 개략적으로 예측하여 사업의 타당성을 검토하고, 본사업의 계획 수립 단계에서 현장조사를 통해 충분한 자료를 확보한 후 복잡한 수질예측모델을 적용하여 정확한 수질을 예측하는 것이 바람직하다. 또한 전국 농업용저수지의 수질개선을 위한 전체적인 마스터플랜 수립과 같은 정책결정을 위해 쉽고 빠르게 수질예측이 가능한 정책결정 지원용 수질예측모델이 필요하다. 이러한 모델을 통해 전국단위의 합리적인 수질개선정책 수립이 가능하고 수질개선을 위한 다양한 기법들이 모델을 통해 합리적으로 평가되어 다양한 수질개선대책들이 개발·적용 될 수 있다.

본 연구에서는 장기간 수집된 농업용저수지 수질측정망자료를 인공지능기법을 활용하여 저수지의 수질을 효율적으로 관리할 수 있는 농업용저수지 수질지수 추정모델을 개발하여 수질관리 담당 실무자들에게 제공함으로써 농업용저수지 수질관리 및 사업 계획 수립 시에 적극 활용할 수 있도록 하고자 한다.

2. 연구의 목적

- 농업용저수지 수질측정망자료 DB구축 및 자료분석시스템 개발
- 인공지능기법을 이용한 농업용저수지 수질지수 추정기법 연구
- 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발 및 활용방안 연구

2절 연구범위 및 내용

1. 농업용저수지 유역 및 수질특성 분석

- 유역 내 오염원별 발생 및 배출 특성 분석
- 저수지와 유입하천의 유량 및 수질조사
- 저수지 제원 및 부하량과 저수지 수질과의 상관관계 분석

2. 수질측정망 자료 DB갱신 및 자료분석시스템 보완 개발

- 2012년 농업용저수지 수질측정망 자료를 추가하여 DB갱신
- 적용성 분석을 통한 수질측정망 자료분석시스템 문제점 보완

3. 인공지능기법을 이용한 수질지수 추정기법 개발

- 농업용저수지 수질지수로 활용 가능한 지수분석 및 보완 개발
- 측정망 자료 중 저수지 수질에 영향을 미치는 인자 도출
- 여러 인공지능기법을 이용한 농업용저수지 추정기법 연구
- 인공지능기법별 수질지수 추정결과 분석
- 농업용저수지 수질지수 추정을 위한 최적의 인공지능기법 선정

4. 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발 및 활용방안 연구

- 인공지능기법을 이용한 수질지수 추정 함수 개발
- 개발된 함수를 이용한 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발
- 활용성을 높이기 위한 세부 기능 개발
- 개발된 농업용저수지 수질지수 추정모델 활용방안 연구

3절 연구 진행방법

1. 기본 추진 방향

- 농업용저수지 수질측정망을 운영하면서 수집된 수질측정망자료와 기존의 방법에 의해 수질로부터 산정된 지수 사이의 관계를 인공지능 기법 학습을 통해 도출한 후 저수지 수질을 제외한 측정망자료로부터 수질지수를 추정함.
- 수질지수 추정기법은 기존의 수질지수와 유사한 형태를 유지하지만, 방법은 수질이 아닌 유역제원 및 오염원자료로부터 추정되도록 함.

2. 농업용저수지 유역 및 수질특성 분석을 위한 유역 및 수질 조사

- 현장조사 대상 저수지 선정
 - 접근이 용이한 경기도내 농업용저수지 수질측정망 대상 저수지 중 31개소를 선정
- 유역 부하량의 발생 및 배출특성 분석
 - 측정망 보고서 상의 부하량과 대상 저수지의 부하량 비교 검토
 - 발생부하량과 배출부하량의 특성 분석
- 유입하천 및 저수지 유량 및 수질조사
 - 대상 저수지의 모든 유입하천의 유량 및 수질, 저수지 수질조사
 - 실측된 유입하천 및 저수지의 실측자료 분석

- 유역 vs 유입하천 vs 저수지의 상관관계 분석
 - 실측된 유입하천의 수질과 저수지 수질과의 상관관계 분석
 - 유역의 측정망자료와 실측된 하천 수질과의 상관관계 분석
 - 유역 및 저수지 제원과 실측된 저수지 수질과의 상관관계 분석
 - 유역 및 저수지 제원과 저수지 측정망 수질과의 상관관계 분석
 - 저수지 수질에 영향을 미치는 인자 도출

3. 농업용저수지 수질측정망 자료분석시스템 개발

- 수질측정망 DB 구축
 - 농업용저수지 측정망자료, 제원 등을 포함한 다양한 자료 수집
 - 수집된 자료 분석 후 MS Access를 이용해 DB구축 및 오류 확인
- 수질측정망 자료분석시스템 개발
 - 농업용저수지 관리자 및 현장 실무자에게 필요한 측정망자료를 쉽게 검색 및 통계값을 제공할 수 있는 분석시스템 구축
 - 시스템의 유지관리, DB 업데이트를 쉽게 할 수 있도록 인터넷기반으로 시스템 개발
 - MS-Access를 이용해 구축된 DB 중 일부 DB를 MySQL로 변환
 - 농업용저수지 관리자 및 현장 실무자에게 필요한 측정망자료를 쉽게 검색 및 통계값을 제공할 수 있도록 직관적 프로그램 개발이 가능한 Adobe Flash를 이용해 시스템 개발
 - 실무자의 의견을 반영될 수 있도록 임시 웹서버를 설치하여 실무자를 상대로 임시 서비스 실시

4. 수질지수 추정기법 연구 및 수질지수 추정모델 개발

- 농업용저수지 수질지수 추정기법 개발
 - 저수지 수질에 영향을 미치는 인자 도출 및 분포 분석
 - 저수지 수질에 영향을 미치는 유역인자 도출

- 여러 인공지능기법을 이용한 수질지수 추정기법 연구
- 인공지능기법별 결과 분석 및 최적 기법 선정
- 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발
 - 의사결정트리기법을 이용한 수질지수 추정 fuzzy rule 도출
 - 도출된 fuzzy rule을 이용한 수질지수 추정모델 개발
 - 개발된 모델의 활용성을 높이기 위한 다양한 분석기능 개발



<그림 1-1> 연구추진체계

4절 기대효과 및 실용화 계획

1. 기대성과

- 수질측정망 자료의 DB구축을 통한 빠르고, 다양한 통계분석 가능
- 구축된 DB를 이용해 인터넷기반의 수질측정망 자료분석시스템 개발
- 농업용저수지 수질관리를 위한 간단한 수질예측기법 및 모델 제공
- 농업용수 수질개선계획수립업무의 효율성 제고

2. 실용화계획

가. 정책(또는 사업) 반영내역 및 계획

- 농업용저수지 신규조성 및 관리를 위한 수질예측에 보조적인 수단으로 활용
- 전국 농업용저수지 수질관리 정책수립을 위한 보조자료 제공
- 수질개선사업 수립 및 설계를 위한 시나리오분석에 활용

나. 사업부서 교육 및 기술지원 내역 및 계획 등 기타활용 방안

- 실무자를 대상으로 한 교육 및 매뉴얼 배포를 통한 실용화
- 연구결과의 전문학술지 게재 및 학술발표를 통한 홍보

2장 농업용저수지의 수질특성 분석

2장 농업용저수지의 수질 특성 분석

1절 유역, 하천, 저수지 상관관계 분석

1. 저수지 수질에 영향을 미치는 인자 사전 연구

가. 저수지 수질

우리나라에 있는 18,000여개의 저수지는 주로 농업용수로 사용되고 있으며, 그 외 전력공급, 홍수 조절, 산업용수 등의 다양한 목적으로도 사용되고 있다(Kim *et al.*, 2001; Hwang *et al.*, 2003). 우리나라의 연간 강수량은 1,200 mm로 세계 평균 강수량에 해당하나, 강수량의 절반 이상이 6~8월의 여름철에 집중되는 특성을 보인다(Hwang *et al.*, 2003). 이러한 강수량의 계절적 변이는 여름철 집중된 강우를 저장하여 강수가 부족한 시기에 사용할 수 있도록 하는 저수지의 기능을 더욱 강화하였다. 그러나 최근 농업용저수지에서는 강우 시 토사 유입에 의한 저수량 감소 및 농업용수 수질기준 초과 저수지가 증가함에 따라 이에 대한 대책이 필요한 실정이다(농림축산식품부, 2010).

우리나라 대부분의 저수지는 여름철 부영양화로 인해 녹조현상이 빈번하게 일어나고 있다(농림부, 2010). Rawson(1995)에 따르면 호소의 깊이가 얕을수록 부영양화가 쉽게 발생하는데, 우리나라 저수지의 대부분이 수심이 얕고 노후화 되어있다(Hwang *et al.*, 2003). 이는 우리나라 저수지가 수심이 얕아 부영양화가 쉽게 되며, 저수지의 노후화로 인해 침전물로부터 영양염류의 용출 가능성이 증가하게 되어 부영양화의 가능성이 높아지는 것을 의미한다.

Harper(1992)에 따르면 저수지 내 제한 영양염인 인의 유입 증가는 저수지 부영양화를 발생시킨다. 저수지의 부영양화는 저수지 내 식물플랑크톤을 증가시켜 저수지 투명도를 감소시키고, 저층의 식물플랑크톤 부패로 용존산소가 감소하는 등의 수질 변화를 초래한다(신 등, 2002). 또한 저수지의 부영양화는 저수지 내 투명도, 총인 농도, Chl-a 농도와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이들 환경 인자는 저수지의 영양상태를 분류하는 기준으로 사용된다(Carlson, 1977). 특히 Chl-a 농도가 저수지 영양 상태를 나타내는 데 있어 가장 중요한 역할을 한다(Lu, 1999).

농업용저수지의 수질을 관리하기 위해서는 모니터링을 통한 개개의 저수지 특성을 파악하고, 그 특성에 따른 저수지의 관리가 필요하다. 그러나

우리나라에 있는 모든 저수지를 효율적으로 모니터링하고 관리하기란 현실적으로 매우 어려운 일이다. 따라서 이들 저수지들의 이화학적, 수리수문학적 특성을 분석하고, 그 특성에 따른 농업용저수지의 수질 예측 및 관리가 필요하다. 이 등(2007)은 농업용 저수지 내에서 수질변이의 특성을 파악하기 위해 영양염류와 식물플랑크톤 생산력의 관계를 분석하였으며, 전 등(2002)은 우리나라 농업용 저수지에서 물리적 인자의 영향에 대한 연구를 하였다.

나. 토지이용과 저수지 수질

저수지에서는 완공 후 시간이 경과할수록 유입되는 토사나 오염물질이 증가하기 때문에 저수지의 부영양화를 유발할 가능성이 높아진다. 저수지의 수질은 지역적인 기후, 유역 내 오염원, 지형, 그리고 호수 규모와 같은 형태적인 차이와 유입수량, 수체의 흐름, 물의 순환 등 수리수문학적 체계에 영향을 받을 수 있다(김과 황, 2004, 윤 등, 2007). 유역내의 토지이용 형태가 저수지의 수질변화에 크게 영향을 미친다는 많은 보고가 있다(Gburek and Folmar, 1999). 수질이 유역 내의 토지이용의 유형에 영향을 받는 것은 경우에 의한 표면 유출이 하천과 저수지로 영양염류를 포함하는 오염물질을 이동시키기 때문에 발생한다. Lenat and Crawford(1994)과 Fisher *et al.*(2000)은 농경지역의 토지이용이 질소와 인 등의 영양물질의 농도에 영향을 주는 것으로 보고 하였으며, Tong and Chen(2002)은 주거지역과 상업지역, 그리고 농업지역의 토지이용이 질소와 인의 농도와 상관성이 있다고 하였으며, Brainwood *et al.*(2004)은 PO_4 와 주거지역, NO_3-N 와 초지의 토지이용이 높은 상관성을 보인다고 하였다. 국내에서 김과 황(2004)은 농업용저수지를 대상으로 유역 내 토지이용 중 논과 밭의 농경지 비율과 질소와 인의 상관성을 보인다고 보고하였다.

한편 윤 등(2007)은 농업용저수지 유역의 토지이용과 수질항목 간의 상관관계 분석에 대한 연구를 통하여 다음과 같이 보고하였다. 연구 대상 저수지로 유입되는 유역 내의 토지이용은 산림과 농경지가 대부분인 전형적인 농촌유역 특징을 갖고 있으며, 토지이용과 수질 간의 상관관계를 분석한 결과 밭에서는 모두 양의 상관관계를 나타내고 있으며, 모두 유의 수준 1% 이내의 높은 상관성을 나타내었다. 한편 주거지역은 수질과 양의 상관성을 갖는 것으로 나타나서 저수지 수질에 악영향을 미치는 것으로 평가하였다. 밭의 경우는 건기, 우기에서 모두 유의수준 1% 이내의 양의 상관관계를 나타

내고 있어 수질에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 평가하였다. 밭에서는 강우시 많은 양의 토사가 유출되는데, 그 자체가 오염물질이고, 토사에 흡착된 오염물질들이 강우로 인해 이동하게 된다. 또한 밭에서는 여러 가지 작물을 연중 재배하기 때문에 많은 시비로 공급된 질소성분이 강우와 함께 유출, 침투되어 수질오염을 야기하는 것으로 판단하였다. 산지의 경우는 건기와 우기에서 모두 음의 상관관계를 나타내며, 모두 유의 수준 1 %에서 음의 상관성을 갖는 것으로 평가하였다. 따라서 저수지로 유입되는 유역에서 산림의 비중이 높은 지역은 다른 지역에 비해서 저수지 수질을 관리하는데 유리하며, 산림은 오염물질을 배출하는 오염원이기 보다는 수질개선에 도움을 주는 토지이용으로 평가하였다. 한편 논외의 경우도 저수지의 수질에 좋지 않은 영향을 주는 것으로 평가되었는데, 대상 농업용저수지가 위치 특성상 대부분 관개를 목적으로 유역의 상류에 조성되어 있기 때문에 상대적으로 깨끗한 수질에 적은 발생 부하량에도 민감하게 양의 상관관계를 나타낸 것으로 판단하였다(윤 등, 2007).

한편 EPA(1996)는 농경활동에 의한 비점오염원이 하천 수질악화의 72 %, 호수 수질악화의 56 %, 그리고 강어귀에서의 수질악화의 43 %를 기여하므로 농업활동이 지류와 호수에서 오염물질의 가장 큰 원인이 되고 있다고 하였다.

2. 대상 저수지 선정 및 수질조사

가. 개요

농림축산식품부에서는 전국 주요 농업용 호소를 수질측정망으로 지정하고, 오염현황 및 추이를 종합적으로 파악하여 향후 농업용수 수질관리 정책수립 및 수질개선사업 추진을 위한 기초자료를 확보하고 있다. 2013년 현재 전국 18,000여개 농업용저수지 중 유효저수량과 수혜면적이 일정 기준 이상이거나 수질변화 추이의 파악이 필요한 시설 825개 농업용저수지를 선정하여 그 중 25개 저수지는 농업용 호소 측정망으로 지정하여 월1회 환경부에서 수질조사를 실시하고 있으며, 800개소는 농업용수 수질측정망으로 지정하여 연4회 수질조사를 실시하고 있다. 수질측정망 대상 시설 825개소 중 10개소는 담수호이며, 815개소는 저수지이다.

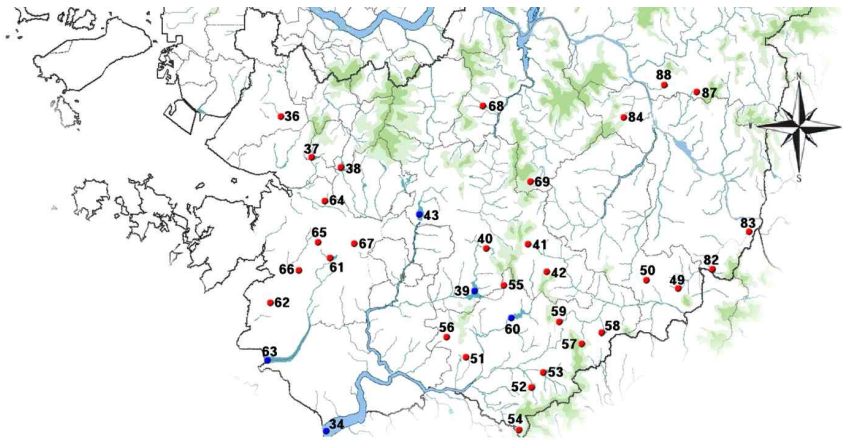
농업용저수지 수질측정망 조사는 저수지 수질조사 외에 연1회 저수지

시설제원, 유역의 오염원과 환경기초시설 등을 조사하여 계별 오염원수 및 발생부하량을 산정하여 제시하고 있다. 하지만, 유입하천에 대해 유량 및 수질조사를 실시하지 않아 유역, 하천, 저수지의 상관관계를 분석하는데 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 유입하천 수질, 농업용저수지의 제원(저수량, 만수면적, 유효수심) 및 유역인자(유역면적, 토지이용 등)와 저수지 수질 간에 어떤 상관관계가 있는지 분석하기 위해 수질측정망 자료를 수집하였고, 측정망 저수지 중 경기도 지역의 일부 저수지를 선정하여 유입하천의 유량과 수질, 저수지의 수질을 현장 조사하였다.

나. 대상 저수지 선정

825개소 농업용저수지 중 경기도에 위치하는 55개 저수지 중 경기도 남부 지역에 존재하는 저수지 31개를 대상저수지로 선정하였다. 선정된 저수지의 유역 및 저수지 제원은 (표 2-1)과 같으며, 위치는 <그림 2-1>과 같다. 선정된 저수지의 COD기준 수질등급은 2013년 측정망 수질 기준 2등급인 저수지는 3곳, 3등급인 저수지는 5곳, 5등급인 저수지는 2곳, 6등급인 저수지는 5곳이며, 그 외 16개 저수지는 4등급이다. 조사 대상 저수지는 4등급을 나타내는 곳이 가장 많았으며, 그 외에는 1등급을 제외하고 고르게 분포하고 있다.



<그림 2-1> 수질조사 대상지구 위치

(표 2-1) 현장조사 대상저수지 유역 및 저수지 제원

저수지	유역면적 (ha)	만수면적 (ha)	저수량 (천m ³)	유효수심 (m)	발생부하량(g/day)			저수지농도(mg/L)		
					BOD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P
대평	696	13.6	641	4.7	23	19	1.5	4.7	1.51	0.023
성호	526	34.7	858	2.5	197	93	13.7	13.2	2.96	0.103
삼합	170	4.8	145	3.0	4	5	0.3	5.3	1.04	0.034
도척	980	14.4	701	4.9	79	57	4.5	4.2	2.26	0.040
고삼	7,100	229.9	15,217	6.6	1,850	924	153.9	6.0	2.51	0.080
덕산	485	32.0	1,859	5.8	43	32	3.1	5.2	1.58	0.028
향리	360	15.5	488	3.1	23	18	1.4	6.4	1.12	0.055
원부	630	15.4	576	3.7	13	17	1.2	4.0	1.64	0.022
장계	225	12.0	878	7.3	3	4	0.3	5.7	0.99	0.025
용설	790	53.8	3,064	5.7	51	38	3.0	5.5	1.43	0.030
용풍	500	24.7	715	2.9	420	212	40.3	10.8	3.42	0.138
이동	9,624	305.4	20,906	6.8	1,732	840	97.4	6.7	1.86	0.064
미산	442	20.4	1698	8.3	27	21	1.5	3.8	2.39	0.021
용덕	1,250	21.6	943	4.4	101	62	6.2	3.6	2.35	0.032
홍중	710	14.5	483	3.3	314	101	10.5	6.2	2.27	0.065
기천	755	39.3	2,164	5.5	119	71	7.4	5.0	1.22	0.029
반월	1,220	36.6	1,166	3.2	429	152	15.1	5.5	2.22	0.047
동방	628	55.9	1,014	1.8	529	270	40.0	12.3	1.62	0.112
왕송	1,555	83.6	2,077	2.5	1,679	508	56.2	9.3	4.18	0.123
보통	716	36.2	1,071	3.0	143	62	6.0	7.7	1.72	0.052
덕우	2,270	82.7	3,547	4.3	489	241	27.9	8.0	1.47	0.061
홍부	1,320	50.3	1,840	3.7	366	150	14.8	9.5	3.42	0.124
먹우	830	49.4	600	1.2	256	156	22.2	11.7	2.64	0.099
용담	770	37.7	1,023	2.7	98	60	6.0	6.6	1.78	0.061
칠곡	391	15.8	544	3.4	73	39	3.4	6.0	1.83	0.052
두창	287	18.4	1,223	6.6	21	16	1.6	5.9	1.72	0.037
어천	380	25.4	894	3.5	46	26	2.8	7.4	2.14	0.063
만수	375	22.3	614	2.8	774	404	67.9	13.9	2.82	0.201
금광	4,830	138.4	12,047	8.7	237	203	17.3	6.7	1.84	0.035
청용	730	40.5	3,486	8.6	15	19	1.3	5.0	1.39	0.025
금사	794	16.6	1,594	9.6	17	22	1.5	4.2	1.38	0.020

* 2013년 수질측정망 조사결과

선정된 31개 저수지의 유역면적은 최소 170 ha(삼합), 최대 9,624 ha(이동)이며 평균 1,366 ha로 저수지별 매우 큰 차이를 나타내었다. 조사대상저수지의 BOD 발생부하량은 최소 3 kg/day(장계), 최대 1,850 kg/day(고삼)이며, 평균 328 kg/day로 나타났다. 최대 BOD 발생부하량은 유역이 가장 큰 고삼지와 이동지에서 높게 나타났으며, 왕송지는 유역면적이 1,555 ha로 31개 저수지와 비교하여 평균에 가까웠으나 BOD 부하량이 1,679 kg/day로 매우 높게 나타났다. 오염발생부하량은 왕송지를 제외하고는 유역면적이 클수록 발생부하량에 높게 나타나 전체적으로 유역면적과 매우 높은 상관관계 ($R^2 > 0.8$)를 나타내었다. 왕송지의 경우 유역이 도심화되고, 인근 도시의 하수가 모여 처리장을 거쳐 배출되지만 그 농도가 매우 높아 전체 유입 부하량에 큰 영향을 미치고 있다. 또한 금광지는 이동지와 고삼지 다음으로 큰 유역면적을 갖고 있으나 BOD 배출부하량이 이동지의 8분에 1 수준인 것으로 나타났으며, 이를 제외하고 대체로 유역면적과 배출부하량이 비례관계를 보였다.

2013년 수질측정망 결과 대상저수지 31개 저수지의 COD는 평균 7.0 mg/L이며, 만수지가 13.9 mg/L로 가장 높은 농도를 나타냈으며, 다음으로 성호지와 동방지 순으로 높게 나타났다. COD가 가장 낮은 저수지는 용덕지와 미산지로 각각 3.6 mg/L와 3.8 mg/L로 수질등급 II등급을 나타내었다.

(표 2-2) 수질조사 대상저수지의 유역특성

	유역면적 (ha)	발생부하량(kg/day)		
		BOD	T-N	T-P
min	170	3	4	0.3
median	716	101	62	6.0
max	9,624	1,850	924	153.9
mean	1,366	328	156	20.3

(표 2-3) 수질조사 대상저수지의 저수지특성

	저수량 (천 m ³)	만수 면적 (ha)	유효 수심 (m)	'13 평균수질(mg/L)			수질 등급
				COD	T-N	T-P	
min	145	4.8	1.2	3.6	0.99	0.020	2
median	1,023	32.0	3.7	6.0	1.83	0.052	4
max	20,906	305.4	9.6	13.9	4.18	0.201	6
mean	2,712	50.4	4.6	7.0	2.02	0.061	4

다. 수질조사 방법

선정된 31개 저수지에 대해 개별 저수지로 유입되는 유입하천의 평균 유량 및 농도, 저수지의 수질조사를 실시하였다. 저수지별 현장조사 시기별 영향을 최소화하기 위해 강우영향이 거의 없는 시기(5월)에 단기간(5일 이내)에 대상저수지에 대한 현장조사를 마쳤다. 저수지의 수질조사는 수질측정망 조사지점 인근에서 시료를 채취하여 조사를 하였으며, 수질 분석은 농업용저수지 수질측정망 수질분석 담당 기관인 농어촌연구원 환경시험분석센터에서 수질오염공정시험방법에 의해 진행되었다.



<그림 2-2> 유입하천 및 저수지 수질조사 지점(예)

유입하천의 경우 유역면적에 따라 적게는 1개부터 많게는 8개까지 존재하는데, 저수지로 유입되는 전체 부하량을 고려하기 위해 <그림 2-2>와 같이 저수지로 유입되는 유입하천 모두에 대해 유량 및 수질을 조사하였다. 조사 결과를 바탕으로 저수지로 유입되는 유입하천의 유량은 (식2-1)과 같이 모든 유입하천의 유량을 더하여 구하였으며, 유입하천의 농도는 (식2-2)와

같이 각 유입하천의 유량과 농도의 곱을 합한 값을 유량 합으로 나눠 산정하였다.

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (\text{식2-1})$$

$$C = \frac{C_1 \times Q_1 + C_2 \times Q_2 + \dots + C_n \times Q_n}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n} \quad (\text{식2-2})$$

라. 수질조사 결과

선정된 31개 농업용저수지에 대해 유입하천 및 저수지의 유량 및 수질을 조사한 결과는 (표 2-4)와 (표 2-5)와 같다. 유입하천의 현장조사결과에서 유입하천 유량은 성호지에서 0.002 m³/s로 가장 낮게 나타났는데, 성호지는 유역면적과 저수지 크기에 비해 유입유량이 매우 작아 평수기에 물이 부족한 특이한 경우의 저수지이다. 성호지 다음으로 유입 유량이 작은 저수지는 유역면적(170 ha)이 가장 작았던 삼합저수지에서 하천의 유량이 0.003 m³/s로 나타났다. 유입유량이 큰 저수지는 이동지와 떡우지로 각각 유량이 가장 작았던 저수지에 비해 100배 이상 큰 0.477 m³/s과 0.429 m³/s로 나타났다. 이동지는 유역면적이 가장 크지만 떡우지(830 ha)의 경우 31개 저수지의 평균(1,366 ha) 이하를 나타내고 있어 유역면적에 비해 유량이 컸다. 조사 당시 떡우지는 조사 대상지 중 SS가 가장 높게 나타나 일시적인 탁수의 유입 유량이 매우 컸던 것으로 판단된다. 유입하천 유량의 평균은 0.111 m³/s로 평균 저수량(2,712 천m³)과 비교하면 전체 저수지 체적의 0.35 %가 하루에 유입되는 것으로 조사되었다. 이를 일 년 내내 같은 유량으로 유입된다고 가정하면 31개 저수지의 평균 체류시간은 283일이 된다. 조사 시기는 일 년 중 유량이 작은 시기로 홍수기를 포함하면 실제 체류시간은 훨씬 작아질 것이다.

유입하천 조사결과 COD는 장계지와 용담지에서 1.8 mg/L로 가장 낮았으며, 물왕지와 만수지가 13.6 mg/L과 13.5 mg/L로 가장 높았다. 장계지는 유역면적이 가장 작고, 유역에 오염원이 거의 없는 저수지로 저수지의 COD가 4.8 mg/L로 매우 낮은 수준을 나타내고 있었다. 물왕지는 유역에 도심지가 크게 분포하여 생활하수가 유입되고, 축산폐수도 많은 양이 유입되고 있으며, 만수지는 유역의 주요오염원이 축산폐수로 COD뿐 아니라 TOC, T-N, T-P가 가장 높은 수준으로 유입되고 있었다. TOC는 COD와 같은 유기물 측정

지표로 COD가 가장 높고, 낮은 곳에서 TOC도 비슷한 경향으로 조사되었다. SS는 유역이 대부분 산림으로 이루어진 두창지와 미산지에서 1.8 mg/L, 2.2 mg/L로 가장 낮았으며, 화성에 위치한 떡우지와 어천지가 65.3 mg/L, 52.3 mg/L으로 가장 높게 나타났다. 유입하천의 T-N, T-P는 매우 유사한 경향을 나타내었는데, 원부지에서 T-N과 T-P가 각각 0.99 mg/L, 0.015 mg/L로 농도가 낮았으며, 동방지와 물왕지에서 T-N은 9.0 mg/L 이상, T-P는 0.7 mg/L 내외로 매우 높은 농도를 나타내었다. 유입하천에서 T-N, T-P가 높은 동방지와 물왕지에서는 저수지 내 COD, T-P, Chl-a가 가장 높은 수준을 나타내고 있어 유입하천이 저수지 수질에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

저수지 조사결과 COD는 동방지, 떡우지, 금사지에서 16.9 mg/L로 가장 높게 나타났는데, 동방지와 떡우지는 유역에 오염원이 많고, 유입하천의 수질 또한 SS, T-N, T-P 등이 매우 높은 수준을 나타내었다. 금사지의 경우는 유입하천의 수질은 양호한 편이었으나 저수지의 COD와 SS가 높게 나타났는데, 유역의 행위규제를 받는 지역으로 오염원은 없으나 저수지 독농이기 사업이 준공되면서 일시적으로 안정되지 않은 토사가 영향을 미친 것으로 보인다. 다음으로 성호지의 COD가 15.3 mg/L로 매우 높은 농도를 나타내었는데, 유량은 가장 작았으나 그로인해 체류시간이 길어지고, 유입하천의 높은 T-N, T-P의 영향을 받은 것으로 보인다. SS는 덕산지, 이동지, 미산지에서 2 mg/L 이하로 매우 낮게 나타났으며, 동방지, 금사지에서 20 mg/L 이상으로 매우 높게 나타났는데, 이는 COD와 Chl-a와 매우 유사한 경향으로 식물플랑크톤의 성장으로 유기물과 SS의 증가가 함께 나타난 것으로 판단된다. 이러한 저수지의 수질은 유입하천 조사결과에서 나타난 T-N, T-P 등 영양염류의 농도 수준과 매우 유사한 경향을 나타내었다. 유입하천과 저수지 간 유사한 경향을 벗어나는 경우로는 미산지와 같이 유입하천의 T-P가 0.269 mg/L로 높은 수준이었으나 저수지의 Chl-a가 2.3 mg/L로 가장 낮게 나타났는데, 미산지의 수심이 깊어 다량의 T-P를 포함한 유입수가 심층으로 유입되어 식물플랑크톤 성장이 제한된 것으로 추측된다.

조사 결과 저수지와 유입하천 간 수질은 대체로 상관관계가 높은 것으로 판단되며, 특이한 유역 및 저수지 특성을 갖는 곳에서는 저수지와 유입하천의 수질 인자만으로 해석이 어렵다고 판단된다. 물론 유입하천 조사는 한번의 조사가 빈약하다고 판단되며, 저수지 수질 예측을 위하여 장기적인 유입하천 모니터링이 필요하다. 다음 절에서 저수지와 유입하천 수질 뿐 아니

라 저수지 제원과 유역 인자를 모두 포함한 상관관계 분석을 통해 저수지 수질에 영향을 미치는 요소를 파악해 보겠다.

(표 2-4) 유입하천 현장조사 결과

유입하천	유량 (m ³ /s)	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
대평	0.073	2.9	0.8	7.5	3.95	0.058
성호	0.002	10.8	7.4	7.9	5.76	0.443
삼합	0.003	3.0	2.1	3.0	1.18	0.039
도척	0.068	2.5	1.4	2.6	2.06	0.032
고삼	0.190	5.4	2.7	18.0	3.24	0.117
덕산	0.022	3.7	2.1	7.4	2.10	0.053
향리	0.010	3.8	2.5	4.0	1.91	0.080
원부	0.018	2.4	1.4	2.4	0.99	0.015
장계	0.017	1.8	1.0	2.4	1.45	0.014
용설	0.016	5.9	3.0	38.1	2.22	0.146
용풍	0.008	9.0	6.2	7.4	7.10	0.160
이동	0.477	6.5	3.4	20.0	2.24	0.079
미산	0.037	3.9	2.2	2.2	4.68	0.269
용덕	0.193	3.2	1.6	3.0	2.54	0.060
홍중	0.096	4.8	2.1	41.0	3.95	0.256
기천	0.414	4.8	3.0	4.6	3.50	0.122
반월	0.408	7.4	4.8	13.6	4.22	0.356
동방	0.040	10.7	7.3	11.8	9.49	0.654
왕송	0.191	7.4	4.9	4.3	7.74	0.121
보통	0.031	8.2	5.0	5.6	2.48	0.139
덕우	0.085	4.6	3.0	6.3	1.98	0.061
물왕	0.183	13.6	7.1	16.9	9.14	0.785
먹우	0.429	9.8	4.5	65.3	5.14	0.096
용담	0.018	1.8	1.0	2.8	2.11	0.036
칠곡	0.025	4.4	2.9	7.8	2.33	0.135
두창	0.018	2.0	1.0	1.8	2.28	0.019
어천	0.034	3.4	1.4	52.3	2.37	0.041
만수	0.025	13.5	7.7	18.5	8.77	0.339
금광	0.103	3.4	2.1	3.2	1.97	0.057
청용	0.091	2.4	1.2	2.3	1.50	0.030
금사	0.116	1.9	1.2	4.1	1.36	0.017
평균	0.111	5.5	3.1	12.5	3.61	0.156

(표 2-5) 저수지 현장조사 결과

저수지	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)	수질 등급
대평	4.2	2.36	3.6	1.63	0.017	7.9	3
성호	15.3	8.69	12.0	3.09	0.108	53.1	6
삼합	4.6	2.94	4.6	0.79	0.024	9.5	4
도척	3.6	2.08	6.9	1.96	0.025	7.1	3
고삼	5.4	2.97	1.8	2.68	0.032	3.9	4
덕산	3.6	2.36	1.5	1.83	0.014	2.8	4
향리	6.4	4.24	6.4	0.51	0.041	19.1	4
원부	3.4	2.01	6.0	1.40	0.018	4.2	2
장계	4.8	3.12	3.6	0.95	0.018	9.3	4
용설	5.2	3.65	6.5	1.69	0.031	8.3	4
용풍	10.4	6.99	11.7	4.33	0.086	56.6	6
이동	4.2	2.36	1.6	1.62	0.015	2.9	4
미산	4.0	2.40	1.4	2.17	0.016	2.3	2
용덕	3.8	1.86	2.8	2.20	0.018	3.8	2
홍중	8.0	4.64	15.6	1.73	0.053	18.1	4
기천	5.2	3.22	5.8	1.25	0.025	24.6	3
반월	4.6	2.98	4.6	1.96	0.022	7.4	4
동방	16.9	8.89	22.8	0.92	0.093	112.4	6
왕송	10.2	6.18	13.3	3.85	0.055	39.8	5
보통	7.8	4.44	8.5	2.04	0.034	13.9	4
덕우	9.4	5.98	9.8	1.63	0.070	54.5	4
물왕	10.2	5.92	16.8	3.66	0.116	77.2	5
먹우	16.9	7.56	19.0	2.66	0.064	95.9	6
용담	7.0	4.46	9.4	1.57	0.056	38.7	4
칠곡	5.8	3.78	3.1	1.93	0.027	6.6	4
두창	5.4	3.76	6.9	1.64	0.030	11.4	4
어천	7.8	4.81	11.2	2.26	0.057	34.2	4
만수	13.3	8.22	11.0	1.96	0.095	52.6	6
금광	4.2	2.65	8.5	1.77	0.030	9.9	4
청용	5.0	3.00	4.7	1.21	0.016	9.8	3
금사	16.9	6.32	24.5	1.51	0.065	61.4	3
평균	7.5	4.3	8.6	1.9	0.044	27.7	4
측정망 (13)	6.9	3.8	2.02	0.061	10.7	27.8	4

3. 유역, 하천, 저수지 상관관계 분석

가. 상관관계 분석방법

농업용저수지의 유역, 유입하천, 저수지와 상관관계를 분석하기 위해 2011년부터 2013년까지 조사한 경기도 내 저수지의 유입하천의 유량 및 수질, 저수지 수질과 같은 기간 측정망 자료의 유역 및 저수지 제원, 저수지 수질자료를 SPSS를 이용해 상관분석을 실시하였다. 측정망자료와 실측자료를 <그림 2-3>과 같이 SPSS에 입력한 후 상관관계분석을 하였으며, 그 결과를 바탕으로 어떤 인자가 하천 및 저수지의 수질에 영향을 미치는지 분석하였다.

SPSS 입력자료										SPSS 실행결과										
1	영동	360.00	5442.00	16.00	3.10	26.60	31.20	10.70												
2	풍도	716.00	1692.00	15.00	3.20	254.70	262.90	69.60												
3	도적	980.00	983.00	14.00	5.90	58.90	70.30	22.30												
4	원부(총)	630.00	1621.00	15.00	3.80	5.50	12.50	1.50												
5	풍원(총)	500.00	28692.00	25.00	2.90	375.60	382.10	169.10												
6	삼양	170.00	5318.00	5.00	2.90	5.70	7.60	1.50												
7	보림(상)	616.00	1039.00	35.00	2.50	228.30	235.10	103.20												
8	율도	770.00	1262.00	39.00	2.70	54.50	64.10	14.70												
9	두상	287.00	4976.00	18.00	6.80	35.40	39.70	14.90												
10	덕산(안)	485.00	4612.00	32.00	5.80	33.30	39.30	14.00												
11	홍남	790.00	1090.00	54.00	5.70	78.30	87.80	37.50												
12	장계(안)	225.00	4022.00	12.00	7.30	1.00	5.20	30												
13	고남	7100.00	206.00	230.00	6.60	1559.70	1637.70	758.50												
14	천문	730.00	3968.00	17.00	9.40	7.20	14.80	1.90												
15	금양	4830.00	259.00	138.00	8.70	50.80	104.40	22.20												
16	마포	1240.00	1153.00	41.00	8.50	49.90	63.60	21.80												
17	이동	9300.00	63.00	365.00	6.90	1946.00	1951.10	622.40												
18	만월	1220.00	689.00	37.00	3.20	216.40	232.90	79.70												
19	이천	380.00	4595.00	25.00	3.60	48.30	52.90	16.60												
20	기천	755.00	725.00	39.00	5.50	67.60	76.50	28.70												
21	보문	716.00	1228.00	36.00	3.00	133.50	143.00	39.60												
22	황송	1555.00	471.00	84.00	2.50	5281.60	6221.70	1499.30												
23	역수	830.00	1092.00	49.00	1.20	272.50	284.90	125.70												
24	덕당	2370.00	484.00	69.00	4.30	392.50	411.00	129.00												
25	홍부(북)	1320.00	194.00	50.00	3.70	170.90	187.10	60.20												
26	동양	628.00	1315.00	56.00	1.80	198.80	206.90	81.50												

<그림 2-3> SPSS를 이용한 상관관계분석

나. 유입하천 수질 vs. 저수지 수질

2011년에서 2013년 3년간 경기도 내 31개 저수지를 조사한 결과를 이용하여 저수지와 유입하천의 상관관계를 분석하였다. 유입하천의 유량 및 수질과 저수지의 수질을 상관관계 분석한 결과는 (표 2-6)과 같다. 전체적으로 하천의 수질과 저수지 수질사이에 높은 상관관계를 나타내며, 유입하천의 수질이 저수지의 수질에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 호소수질등급 분류에 많이 이용되는 저수지의 COD농도에 영향을 미치는 유입하천의 수질항목으로는 T-P가 0.70으로 가장 높았으며, 다음으로 TOC, COD, T-N, Cl, 순으로 크게 나타났다. 또한 저수지 SS는 유입하천 SS와 0.69의 상관관계를 보였으며, 저수지의 Chl-a는 유입하천의 T-P, COD, TOC와 상관관계가 높았고,

특히 T-P와의 상관관계가 0.87로 매우 높게 나타나 저수지의 식물플랑크톤 성장이 유입하천의 인으로부터 공급받는다고 판단할 수 있다. 이 외에 유입하천과 저수지의 Cl⁻의 상관관계가 0.89로 모든 항목 중 가장 높게 나타나 어떤 반응이나 방해 요인 없이 보존되는 것으로 판단되며, 저수지 내 Cl⁻의 농도분포를 이용하여 유입수의 영향 및 이동을 파악하는데 유리할 것으로 보인다. 저수지의 T-N은 다른 항목과 다르게 유입하천의 수질과 음의 관계를 보이거나 상관관계가 없는 것으로 조사되었다.

(표 2-6) 유입하천과 저수지 수질의 상관관계분석 결과

구 분		유 입 하 천						
		유량	COD	TOC	SS	T-N	T-P	Cl ⁻
저수지	COD	-0.02	0.54**	0.59**	0.26	0.51**	0.70**	0.39*
	TOC	-0.08	0.40**	0.51**	-0.01	0.56**	0.34	0.27
	SS	0.29	0.23	0.18	0.69**	0.08	0.16	0.43*
	Chl-a	0.00	0.54**	0.56**	0.28	0.38	0.87**	0.36
	T-N	0.30	-0.31	-0.25	0.17	0.12	-0.21	-0.15
	T-P	-0.06	0.66**	0.71**	0.43*	0.29	0.82**	0.31
	Cl ⁻	0.65**	0.38	0.42*	0.38	0.22	0.29	0.89**
	수질등급	0.03	0.48**	0.48*	0.35	0.45**	0.40*	0.43*

다. 유역 및 저수지 제원 vs. 저수지 수질

유역제원(유역면적, 오염 발생부하량), 저수지 제원(저수량, 만수면적, 유효수심)과 저수지 수질 간의 상관관계를 분석해 보았다. 먼저 31개 저수지를 3년간 실측한 저수지 수질과의 상관관계를 분석한 결과는 (표 2-7)과 같다. 대체로 오염 발생부하량은 저수지 수질과 양의 관계를 나타내고는 있었으나 저수지 T-N과 0.3 이상의 상관관계를 나타낸 것을 제외하고 상관성이 미비하였다. 이는 T-N을 제외하고 유역의 오염물질 발생부하량이 저수지 수질에 영향을 미치지 않는 것을 의미한다. 실제 유역에서 발생된 오염물질은 처리시설을 거쳐 삭감된 후 배출되므로, 발생부하량 대신 배출부하량과 저수지의 수질과의 상관관계를 분석할 경우 발생부하량을 이용했을 때 보다는 높은 상관관계가 나타날 것으로 생각된다.

저수지 제원 중 저수지의 유효수심은 저수지 수질 중 T-N을 제외하고 뚜렷한 음의 상관관계를 나타내었다. 이는 저수지의 수심이 깊을수록 수질이 양호하게 나타남을 의미한다.

(표 2-7) 유역 및 저수지 제원과 수질의 상관관계분석(실측 31개 자료 이용)

구 분		유역 측정망자료				저수지 측정망자료		
		유역 면적	BOD 발생부 하량	T-N 발생부 하량	T-P 발생부 하량	저수량	만수 면적	유효 수심
실 측 수 질 자 료	COD	-0.21	0.05	0.05	0.11	-0.25	-0.13	-0.53**
	TOC	-0.21	0.06	0.06	0.12	-0.24	-0.13	-0.55**
	SS	-0.01	0.09	0.08	0.07	-0.06	0.06	-0.42**
	Chl-a	-0.17	0.03	0.05	0.10	-0.20	-0.09	-0.45**
	T-N	0.16	0.39**	0.34**	0.32*	0.12	0.14	0.02
	T-P	-0.11	0.09	0.09	0.12	-0.13	-0.03	-0.41**
	CI	-0.08	0.15	0.14	0.16	-0.14	0.01	-0.50**
	수질등급	-0.19	0.11	0.08	0.11	-0.24	-0.10	-0.61**

다음으로 실측수질이 아닌 측정망 수질을 이용하여 유역 및 저수지 제원 간의 상관관계를 분석하였다. 이용한 자료로는 825개 측정망 호소 중 담수호를 제외한 815개 저수지를 대상으로 2001년부터 2012년까지의 12년간 총 7,373개 자료 set를 이용하여 분석하였으며, 그 결과는 (표 2-8)에 나타내었다. 825개 측정망 대상 저수지에 대해 상관분석 한 결과 1% 유의수준에서 BOD, T-N, T-P의 발생부하량, 유효수심과 저수지 수질사이에 유의한 관련성이 있는 것으로 나타났으나, 이들 사이의 상관계수는 매우 낮은 것으로 나타났다. 따라서 저수지 수질과 유역 및 저수지 제원 인자 하나씩의 1:1 비교로는 상관성 파악이 어려운 것으로 판단된다.

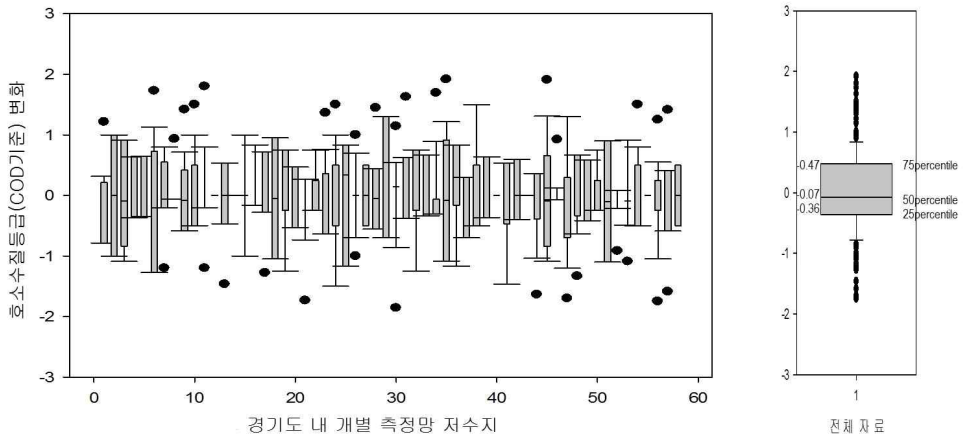
(표 2-8) 유역 및 저수지 제원과 수질의 상관관계분석(측정망 815개 자료 이용)

측정망 (815개소)		유역 측정망자료				저수지 측정망자료		
		유역 면적	BOD 발생부 하량	T-N 발생부 하량	T-P 발생부 하량	저수량	만수 면적	유효 수심
측 정 망 수 질 자 료	COD	0.00	0.06**	0.06*	0.06*	-0.01	0.04	-0.30**
	TOC	0.01	0.09**	0.07**	0.08**	-0.01	0.03	-0.29**
	Chl-a	0.00	0.09**	0.09**	0.09**	0.00	0.05*	-0.24**
	T-N	0.00	0.24**	0.22**	0.23**	0.05	0.02	-0.10**
	T-P	-0.01	0.11**	0.10**	0.10**	0.00	0.03	-0.18**
	수질등급	0.01	0.07**	0.06*	0.07**	0.01	0.04	-0.32**

4. 경기도 내 수질측정망자료 분석

경기도 내 55개소 수질측정망 저수지를 대상으로 2001년부터 2012년까지 각 저수지 별로 COD기준 연평균 데이터를 이용해 수질등급을 구한 후 연중 분포를 비교해보았다. 그 결과 각 저수지 별로 12년 동안 평균 수질등급을 0으로 했을 때 연중 수질등급의 변화가 $-0.36 \sim 0.47$ (25th ~ 75th %tile)로 나타났는데, 이는 같은 저수지에서 해마다 같은 수질등급을 나타내는 것이 아니라 수질변화에 의해 다소 수질등급이 변화하였다는 것을 알 수 있다.

전체자료에서 수질등급 분포는 최대값이 2, 최소값이 -2에 가까운데, 이는 같은 저수지에서 12년간 평균 수질등급 보다 최대 2등급이 더 높은 경우도 있으며, 2등급이 더 낮은 해도 있다는 것으로 연중 COD의 차이가 크다는 것을 보여주는 것이다. 25th ~ 75th %tile의 데이터를 보면 최대, 최소 등급의 차이가 1등급 안으로 차이가 나타나 이 범위를 벗어나는 경우에서 편차가 매우 크게 나타나는 것으로 나타났다.



<그림 2-4> 경기도 내 측정망저수지 연평균 COD 분포

2절 시기별 저수지 수질변화 분석

1. 개요

측정망 자료에는 저수지의 수질, 유역의 오염원 및 토지이용, 저수지의 제원 등을 매년 조사하여 축적하는데, 유역과 저수지 제원은 변동이 크지 않아 연 1회 조사로 충분하지만 저수지 수질은 유입수의 변화, 기상 변화에 의해 연간 변동이 급격하게 변할 수 있으므로 저수지 상태 변화를 알기 위해서는 더욱 빈번한 조사가 필요하다. 또한 저수지의 수질은 유입하천의 수질에 의해 영향을 크게 받기 때문에 저수지 수질 예측을 위해서 유입하천 수질 및 유량의 조사가 필요하다.

따라서 시기별 저수지와 유입하천의 수질변화를 분석하기 위하여 월 1회 수질조사를 실시하였으며, 조사는 2011년부터 2013년까지 3년간 수질 변화가 활발하게 일어나는 4월부터 10월까지 조사를 실시하였다. 조사 대상 저수지는 농업용저수지를 오염도에 따라 오염 정도별로 3개로 분류한 후 각 오염 정도별 대표저수지 4개를 선정하였다.

2. 대상 저수지 선정 및 수질조사

가. 대상 저수지 선정

이전 연구(농어촌연구원, 2010)에서 SOM을 이용해 농업용저수지 수질측정망 대상 저수지 중 농업용수로 사용되는 474개에 대해 측정된 수질을 기준으로 저수지를 3개의 유형으로 분류하였다. 또한 이전 연구(김, 2004)에서 COD와 ST/WS(저수량/만수면적)비를 이용해 농업용저수지를 4개로 분류하였다. 위의 2가지 농업용저수지 유형분류 방법을 이용해 수질측정망 대상저수지의 유형을 분류한 후 각 오염정도별 1~2개의 저수지를 선정하였다. 지역별 차이는 없는 것으로 가정하였으며, 되도록 접근성이 좋은 저수지를 대상저수지로 선정하였다. 선정된 저수지의 제원 및 유역도는 (표 2-9) 및 <그림 2-5>와 같다.

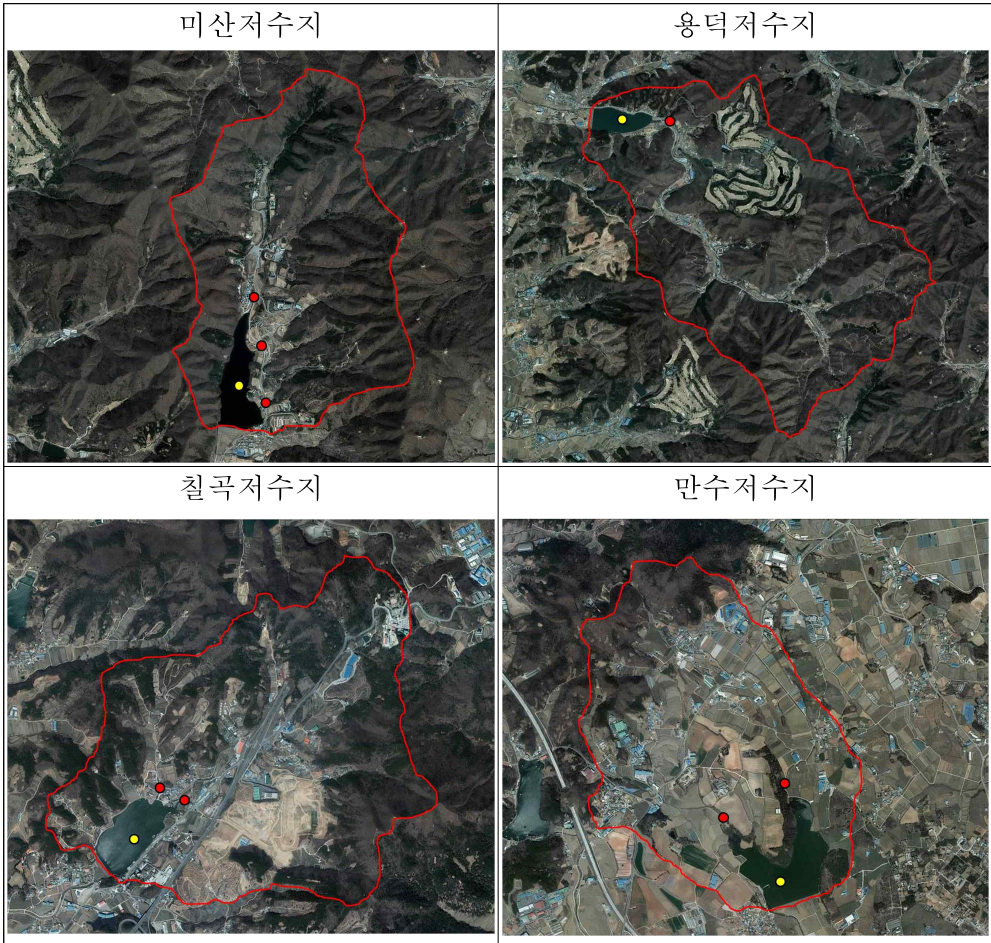
선정된 저수지는 총 4개로 수질이 좋음 유형에 포함되는 저수지로 경기도 안성시에 있는 미산저수지와 경기도 용인시에 있는 용덕저수지가 선정하였으며, 중간 정도의 수질을 나타내는 유형으로 경기도 안성시에 있는 칠곡저수지를 선정하였다. 상대적으로 수질이 나쁜 저수지 유형으로는 경기도 안성시의 만수저수지가 선정하였다.

2008년 기준으로 미산, 용덕, 칠곡지는 COD 수질등급이 각각 2, 3, 4 등급으로 농업용수 수질기준(4등급 이하)을 만족하는 저수지이며, 만수저수지는 수질등급이 6으로 수질기준을 초과하는 저수지로 향후 수질개선대책이 필요한 저수지이다. T-P와 Chl-a는 미산지에서 가장 낮았으며, 용덕과 칠곡은 각각 다소 높으나 비슷한 수준을 나타내고 있다. 만수지에서 T-P는 다른 저수지에 비해 3~6배 높으며, Chl-a는 10배 이상으로 큰 차이를 보이고 있다.

미산지와 용덕지는 유역이 대부분 산림으로 되어 있어 오염원이 적으며, 미산지의 경우 유역면적은 작은 편이나 저수량이 크고 수심이 깊은 것이 특징이며, 용덕지의 유역면적은 다른 저수지에 비해 3배 정도 크다. 만수지는 유역에 축산 시설이 많이 분포하고 있어 축산계 오염원에 의한 저수지 수질 악화가 빈번하며, 유역면적과 저수량이 칠곡지와 비슷하며, 미산지와 용덕지보다 작은 특징을 가지고 있다.

(표 2-9) 저수지 유형별 선정된 대상 농업용저수지

비교		미산	용덕	칠곡	만수
위치		경기도 안성시	경기도 용인시	경기도 안성시	경기도 안성시
준공일자		1985	1959	1958	1945
유역면적(ha)		442	1,250	391	375
만수면적(ha)		20.4	21.6	15.8	22.3
유효저수량(천 m ³)		1,698	943	544	614
ST/WS		9.0	3.9	3.4	2.8
저수지 유형	COD vs ST/WS	C-4	C-4	C-2	C-1
	SOM (오염정도)	1(좋음)	1(좋음)	2(중간)	3(나쁨)
'08년 수질	COD	3.7	4.3	6.0	10.6
	T-N	1.32	1.77	1.14	1.26
	T-P	0.011	0.022	0.024	0.074
	Chl-a	4.2	6.3	6.5	66.9



<그림 2-5> 선정된 대상 농업용저수지 유역도

나. 수질 및 유량조사 방법

선정된 각 저수지별 모든 유입하천에 대해 2011년부터 2013년까지 3년간 4월에서 10월까지 월 1회 유량조사 및 수질조사를 실시하였으며, 유입하천 조사일과 같은 날에 각 저수지별 저수지 중앙부의 수질을 조사하였다. 미산저수지는 3개의 유입하천에 대해 조사가 이루어졌으며, 칠곡, 만수저수지는 2개, 용덕저수지는 1개의 유입하천에 대해 수질조사가 이루어졌다.

유입하천의 저수지 유입 말단부에서 저수지가 역류하지 않는 지점을 선정하여 물 흐름의 횡방향으로 수심, 폭, 유속을 측정하여 유량을 산정하였으며, 유입하천 및 저수지의 현장수질로는 수온, DO, EC, pH를 종합수질측정기

(Hydrolab사, Quanta)를 사용하여 측정하였고, COD, Chl-a, T-N, NO₃-N, NO₂-N, NH₃-N, T-P, PO₄-P, TOC는 시료채취 후 분석실에서 수질오염공정시험방법에 따라 분석하였다.

3. 저수지별 유입하천 및 저수지 수질조사 결과

가. 미산저수지

미산저수지는 유역면적 442 ha, 만수면적 20.4 ha, 저수량 1,698 천m³ 규모의 저수지로 저수량이 크고, 수심이 깊으며, 수질이 연중 좋은 상태를 유지하는 저수지이다. 조사결과 시기에 따른 유입하천 및 저수지의 수질변화는 <그림 2-6>에 나타내었다.

<그림 2-6>에서 S1, S2, S3는 유입하천 지점별 농도를 의미하고, Stream은 유입하천의 지점별 농도를 유량에 대해 가중평균한 전체 유입하천의 평균 농도를 의미하여, Reservoir는 저수지 중앙부에서 채수한 시료의 농도를 나타낸다. 실제 저수지 모델에 있어서 유입하천의 수질자료는 유량가중 평균 값을 입력자료로 이용하였다.

미산지의 COD는 저수지에서 연도별 평균이 2011년부터 2013년까지 각각 3.7 mg/L, 5.1 mg/L, 4.2 mg/L로 큰 차이 없이 거의 일정한 값을 나타내었다. 2012년에 다소 높았으며, 2012년 8월에 7.6 mg/L로 가장 높은 값을 나타내어 3년 동안 COD기준 수질등급이 농업용수 수질기준 이하를 유지하고 있었다. 미산지의 유입하천은 세 개의 하천이 유입되는데 연도별 유입 유량은 2011년에 0.135 m³/s, 2012년 0.046 m³/s, 2013년 0.079 m³/s이며, 전체 유량 평균은 0.091 m³/s이다. 세 개의 유입하천 중 S1의 3년간 유량 평균이 0.071 m³/s로 전체 유량의 78 %를 차지하고 있어 S1의 수질이 미산지 유입수 수질을 결정한다. 유입하천의 COD는 3년 평균 3.5 mg/L로 저수지보다 다소 낮았으나, 조사 시기 별로 유입하천의 COD는 다소 편차가 크게 나타나 가장 높은 시기에는 8.1 mg/L로 나타났으며, 가장 낮을 때는 1.5 mg/L로 조사되었고, 저수지 COD와 비교하여 높고 낮음을 반복하였다.

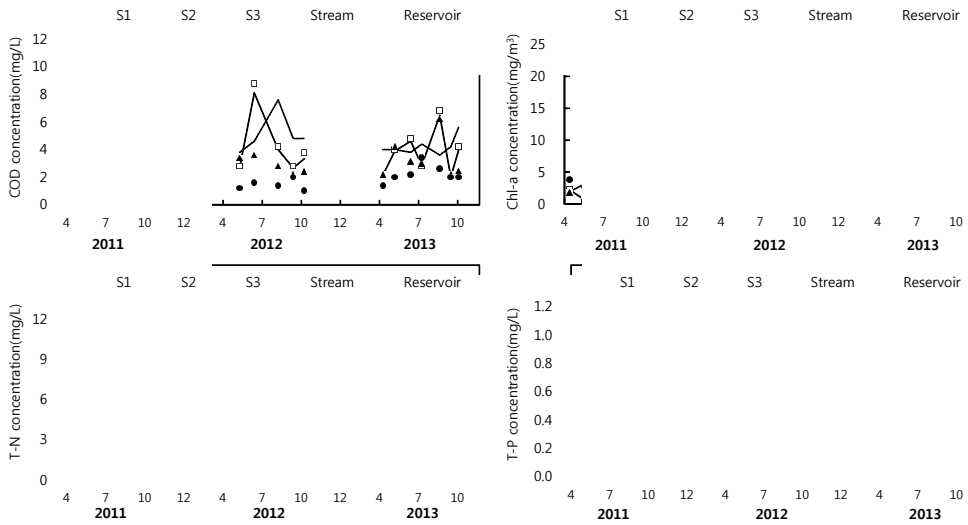
Chl-a는 3년간 평균이 7.9 mg/m³이며, 2011년 5.7 mg/m³, 2012년 10.1 mg/m³, 2013년 8.4 mg/m³로 조사되어 연도별로는 2012년에 가장 높았으며, 그 중 8월에 20.2 mg/m³로 가장 높았다. 2011년과 2012년에는 여름 강우시기에 Chl-a가 높은 경향을 나타내었으나 2013년에는 반대로 봄과 가을에 높은

값을 나타내었다. 유입하천의 Chl-a는 2011년 8월 S2에서 15.7 mg/m^3 로 높게 나타난 것을 제외하고 5 mg/m^3 이하를 유지하고 있었으며, 저수지 보다 낮은 농도를 나타냈다.

저수지에서 T-N은 연도별로 2011년에서 2013년 각각 2.86 mg/L , 2.33 mg/L , 2.46 mg/L 이었으며, 조사시기 별로 큰 변동을 보이지 않았다. 유입하천의 T-N은 3년간 평균 4.75 mg/L 였으며, 연도별 평균은 차이가 거의 없었으나 월별로는 2011년에 여름철에 낮고 봄과 가을에 높게 나타났으며, 2012년 6월에 9.76 mg/L 으로 조사시기 중 가장 높았다. 저수지의 3년간 평균 T-N은 2.57 mg/L 로 모든 시기에서 하천의 T-N이 저수지 보다 높게 나타났다. 비교적 깊은 수심을 가지고 있는 미산지에서 유입하천으로부터 들어온 질소가 심층으로 유입되거나 침강에 의해 저수지에서 다소 낮게 나타난 것으로 판단된다. 유입하천 별로는 유입하천 유량의 대부분을 차지하고 있는 S1의 T-N과 전체 하천 평균이 매우 유사한 경향을 나타내었다. 저수지 질소는 존재형태별로 비교하면 NO_3 가 82%, NH_3 가 6%를 차지하고 있었다. 유입하천의 질소는 NO_3 가 65%, NH_3 가 21%를 차지하고 있었다.

T-P는 전체적으로 T-N과 거의 같은 경향으로 조사되었는데, 저수지의 3년간 평균 T-P는 저수지에서 0.048 mg/L 였으며, 2011년 0.088 mg/L , 2012년 0.024 mg/L , 2013년 0.024 mg/L 로 2011년에 다른 해에 비해 3배 이상 높게 나타났다. 월별로는 T-P 변동이 뚜렷한 경향이 없었으나 T-N과 같은 경향의 수질을 나타내었다. 3년간 평균 총인 중 용존성 무기인인 PO_4 가 차지하는 비율은 14%로 무기상태보다 유기상태의 인이 차지하는 비율이 더 큰 것으로 조사되었다. 유입하천의 T-P는 2011년 평균 0.251 mg/L , 2012년 0.345 mg/L , 2013년 0.173 mg/L 였으며, 3년 평균이 0.247 mg/L 로 조사되었다. 연도별로는 2012년에 가장 높았으며, 특히 T-N에서도 가장 높은 값을 나타내었던 2012년 6월에 T-P가 0.949 mg/L 로 가장 높았다. 유입하천에서 인의 존재 형태는 총인 중 PO_4 가 66%를 차지하고 있어 저수지에서 14%를 차지했던 것과 비교하면 매우 높은 비율을 보이고 있었다.

미산지에서는 유입하천 S1으로부터 높은 농도의 T-N과 T-P가 유입되는 것으로 조사되었으나 그에 비해 저수지에서 낮은 농도를 나타내었는데, 이는 하천에서 저수지로 유입되면서 침강이나 분해에 의해 감소한 것으로 판단되며, 그로인해 저수지의 COD와 Chl-a도 낮게 나타나는 것으로 보인다.



<그림 2-6> 미산저수지 유입하천 및 저수지 수질변화

나. 용덕저수지

경기도 용인시에 위치한 용덕저수지는 유역면적 1,250 ha, 만수면적 21.6 ha, 저수량은 943 천³m 규모의 저수지로 네 개 저수지 중 유역면적이 가장 크다. 유입하천은 상류에 2개의 하천이 하나로 합류하여 S1 지점을 거쳐 저수지로 유입되고 있으며, 수질이 비교적 좋은 저수지이다. 유입하천 및 저수지의 지점별 수질변화는 <그림 2-7>과 같다.

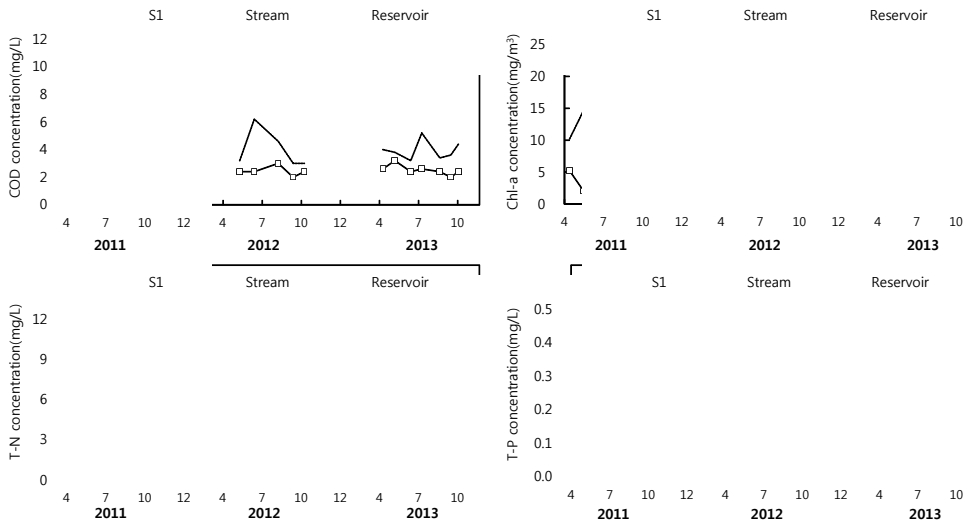
용덕저수지의 COD는 3년간 평균 3.9 mg/L이며, 조사시기 중 2012년 6월에 6.2 mg/L로 높았던 것을 제외하고 모두 5 mg/L이하의 일정한 수준을 나타내고 있었다. 유입하천의 COD는 3년간 평균이 2.5 mg/L이며, 2011년부터 2013년까지 각각 3.4 mg/L, 2.4 mg/L, 2.5 mg/L로 나타나 2011년에 다소 높았던 것으로 조사되었다. 조사시기 중에는 평균이 가장 높은 2011년의 5월에 8.4 mg/L로 가장 높았다. 유입하천의 유량은 3년 평균 0.300 m³/s로 미산지의 유량과 비교하여 3배 이상 큰 것으로 나타났다. 연도별로는 2011년에 유입유량이 0.455 m³/s로 가장 컸으며, 2012년에 0.129 m³/s로 가장 낮고, 2013년에 0.266 m³/s로 조사되었다. 조사시기 중 강우의 영향으로 유량이 매우 큰 시기가 많았으며, 유역면적이 큰 만큼 강우에 의한 영향이 오래 지속되었다. 2011년에는 7월과 8월에 각각 초당 1톤 이상의 큰 유량을 나타내었으며, 2012년 9월과 2013년 7월, 9월 조사시기에 0.4톤 이상의 유량을 나타내었다.

저수지의 Chl-a는 3년간 평균 8.3 mg/m³, 2011년 8.4 mg/m³, 2012년 6.1 mg/m³, 2013년 9.9 mg/m³ 로 조사되어 연도별 차이는 크게 나타나지 않았으며, 2013년 7월에 24.0 mg/m³ 을 나타낸 것을 제외하고 조사시기 동안 15.0 mg/m³ 이하의 수준을 나타내었다. Chl-a는 저수지의 COD와 비교하여 최소, 최대치를 나타내는 시기가 일치하지는 않지만 같은 경향으로 농도가 높거나 낮게 나타났다.

T-N은 저수지에서 3년 평균 2.45 mg/L였으며, 2011년에 2.74 mg/L로 다른 해에 비해 다소 높게 나타났다. 저수지 질소의 존재형태는 질산염인 NO₃가 총질소 중 83%로 대부분을 차지하고 있었다. 유입하천의 T-N은 3년간 평균 3.17 mg/L이었으며, 저수지에서와 마찬가지로 2011년에 4.00 mg/L으로 가장 높았다. T-N은 하천의 유량과 비교하여 유량이 가장 작았던 2011년 4, 5월에 질소농도가 5.0 mg/L 이상으로 가장 높게 나타났다. 유입하천에서 질소의 존재형태는 85%가 질산염이며, 아질산염과 암모니아가 1% 이하인 것으로 조사되어 유역에 질소 중 암모니아의 공급원인 축산계오염원이 없음을 추측할 수 있고, 저수지 유입 직전까지 도달하면서 최종 분해단계인 질산염의 형태로 존재하고 있는 것으로 판단된다.

T-P는 저수지에서 3년 평균 0.053 mg/L이며, 2012년과 2013년은 각각 0.030 mg/L와 0.031 mg/L도 유사하나 2011년에 0.091 mg/L로 높게 나타났다. 2011년에는 5월과 9월에 각각 0.138 mg/L과 0.115 mg/L로 매우 높았으며, 연중 변동이 다소 크게 나타났다. 저수지의 인 존재형태는 총인 중 인산염 인이 3년 평균 0.006 mg/L으로 11%를 차지하고 있어 대부분 무기형태가 아닌 유기성 인의 형태로 존재하고 있었다. 유입하천의 T-P는 3년 평균 0.082 mg/L이며, 저수지에서와 마찬가지로 2011년에 평균 0.134 mg/L로 가장 높았으며, 5월과 9월에 가장 높게 측정되었다. 유입하천에서의 인 존재형태는 총인중 25%가 인산염인으로 존재하고 있어 저수지와 큰 차이를 나타내지 않았고, T-N과 같이 유입하천에서 용존성 형태의 비율이 낮았다. 유입수에 존재하는 영양염류가 용존성 형태로 다량 존재할 경우 저수지에서 식물플랑크톤의 먹이로 쉽게 이용되므로 농도 자체도 낮으며, 그 비율이 낮다면 녹조 가능성도 그만큼 낮게 나타난다.

용덕저수지는 유입하천의 유량이 매우 크고 비교적 깨끗한 수질이 유입되어 저수지 수질이 가장 양호한 상태를 나타내고 있었다.



<그림 2-7> 용덕저수지 유입하천 및 저수지 수질변화

다. 칠곡저수지

경기도 안성시에 위치한 칠곡저수지로, 유역면적 391 ha, 만수면적 15.8 ha, 저수량은 544 천^m 규모의 저수지이며, 네 개 저수지 중 만수면적과 저수량이 가장 작다. 유입하천 및 저수지의 지점별 수질변화는 <그림 2-8>과 같다. 칠곡저수지로 유입되는 하천은 2개 존재하며, S1의 유량은 0.045 m³/s이며, S2는 0.007 m³/s로 전체 유입유량의 87%를 S1이 차지하고 있다.

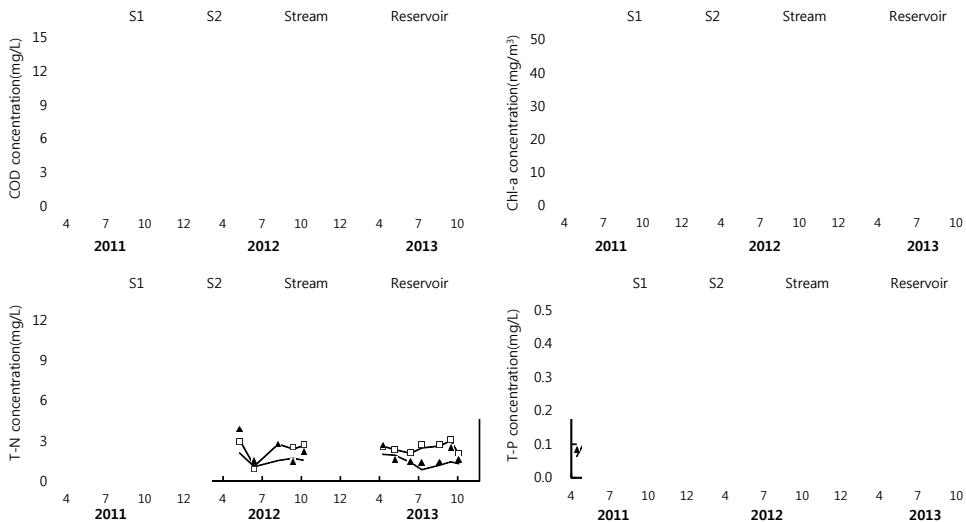
칠곡저수지의 COD는 3년간 평균 6.2 mg/L이며, 2011년 5.6 mg/L, 2012년 7.0 mg/L, 2013년 6.3 mg/L로 조사되었으며, 2012년 6월에 11.2 mg/L, 2013년 8월에 9.6 mg/L로 높게 나타난 것을 제외하고 연중 4등급의 수질을 유지하고 있었다. 유입하천의 COD는 3년 평균 4.4 mg/L, 2011년에서 2013년 각 평균 4.4 mg/L, 5.0 mg/L, 4.0 mg/L로 나타났으며, 대체로 저수지보다 유입하천에서 농도가 낮게 나타났다. 이는 강우 시에 많은 양의 유기물이 유입되거나 내부에서 생성된 유기물에 의해 COD가 저수지에서 높게 나타난 것으로 판단된다.

Chl-a는 저수지에서 3년간 평균 13.6 mg/m³ 였으며, 2011년 10.3 mg/m³, 2012년 19.4 mg/m³, 2013년 12.7 mg/m³ 로 나타났다. 연도별로는 2012년에 가장 높았으며, 조사시기 중 2012년과 2013년의 8월에 각각 47.3 mg/m³, 33.5 mg/m³ 로 매우 높은 농도를 나타내었다. 칠곡지에서는 연중 Chl-a의 변동이 미산지와 용덕지와 비교하여 다소 큰 편이었으며, Chl-a가 높은 시기에 대체

로 COD도 증가하는 경향을 나타내었다.

T-N은 저수지에서 3년간 평균 1.80 mg/L이며, 2011년부터 2013년까지 각 연도별 평균이 2.33 mg/L, 1.58 mg/L, 1.44 mg/L로 2011년이 질소농도가 매우 높았다. 유입하천의 T-N은 3년 평균 2.75 mg/L, 연도별로 각 3.31 mg/L, 2.39 mg/L, 2.45 mg/L로 저수지의 T-N과 매우 유사한 경향을 나타내었다. 조사시기 동안 저수지의 질소가 유입하천보다 낮게 나타나 유입된 질소가 저수지에서 침강에 의해 농도가 낮아진 것으로 판단된다. 질소의 존재형태는 총질소 중 질산염이 저수지와 유입하천에서 각각 58%와 80%를 나타내었으며, 암모니아가 각각 10%와 5%를 차지하고 있었다. 질산염이 유입하천 보다 저수지에서 더 낮은 것은 입자성 질소의 비율이 높다는 것으로 식물플랑크톤의 질소 섭취에 의한 것으로 추측된다.

T-P는 저수지에서 3년간 평균 0.067 mg/L, 연도별 평균이 각 0.101 mg/L, 0.046 mg/L, 0.047 mg/L로 2011년에 높게 나타났으며, 유입하천에서는 3년간 평균이 0.134 mg/L, 각 연도별로 0.168 mg/L, 0.139 mg/L, 0.098 mg/L로 조사되었다. 유입하천의 T-P는 해마다 낮아지는 경향을 나타내었으며, 다른 저수지와 마찬가지로 저수지보다 유입하천에서 총인 농도가 낮게 나타났다. 인의 존재형태는 저수지에서 총인 중 인산염의 비율이 7%를 나타내었으며, 유입하천에서 53%를 나타내었다. 질소와 마찬가지로 식물플랑크톤의 이용에 의해 입자성이 증가한 것으로 보인다.



<그림 2-8> 칠곡저수지 유입하천 및 저수지 수질변화

라. 만수저수지

경기도 안성시에 위치한 만수저수지로, 유역면적 375 ha, 만수면적 22.3 ha, 저수량은 614 천 m^3 규모의 저수지이며, 유입하천 및 저수지의 지점별 수질변화는 <그림 2-9>와 같다. 칠곡저수지로 유입되는 두 개의 하천 중 S1의 유량은 0.019 m^3/s 이며, S2는 0.011 m^3/s 로 S1의 유량이 전체유량의 64%를 차지하고 있다.

COD는 저수지에서 3년간 평균 18.4 mg/L, 2011년에서 2013년의 연도별 평균이 각각 15.5 mg/L, 21.6 mg/L, 19.1 mg/L를 나타내어 비교적 2011년이 낮은 것으로 조사되었으며, 2012년과 2013년 6월에 각각 49.2 mg/L, 41.8 mg/L로 매우 높은 농도를 나타내었다. 유입하천의 COD는 3년 평균 11.6 mg/L, 연도별 평균이 각각 9.3 mg/L, 16.2 mg/L, 10.6 mg/L로 나타났으며, 2012년 6월에 가장 높은 45.8 mg/L을 나타내었다. 이 시기는 조사시기 중 유량이 가장 작았으며, T-P가 가장 높은 농도로 유입되었다.

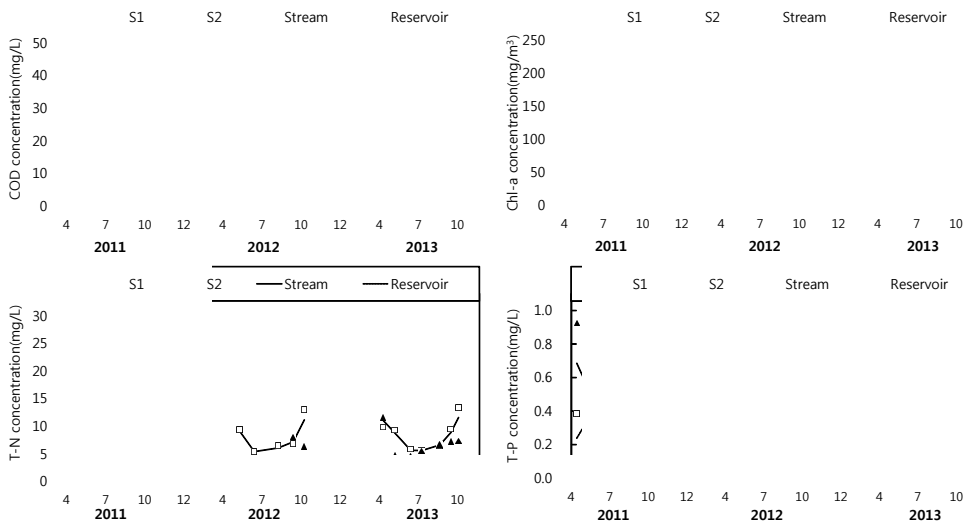
만수저수지의 Chl-a는 3년간 평균이 126.2 mg/m^3 이며, 각 연도별 평균이 130.7 mg/m^3 , 120.5 mg/m^3 , 125.9 mg/m^3 로 비슷하였으나 월별 편차가 매우 크게 나타났으며, Chl-a가 200 mg/m^3 을 초과하는 경우도 2011년 4월과 2013년 6월 두 번이나 있었다. 각 연도의 월별로 농도가 높거나 낮은 경향은 나타나고 있지 않았으며, Chl-a가 높은 시기에 그 영향으로 COD도 높게 나타났다.

T-N은 저수지에서 3년 평균 2.62 mg/L, 2011년부터 2013년 까지 각각 평균이 3.07 mg/L, 2.42 mg/L, 2.31 mg/L로 SS나 COD와는 반대로 2011년에 가장 높게 나타났다. 유입하천의 T-N은 2011년에 11.79 mg/L, 2012년에 7.76 mg/L, 2013년에 8.30 mg/L으로 저수지에서와 같이 2011년에 가장 높은 농도를 보였으며, 조사시기 동안 T-N은 평균 9.45 mg/L이며, 가장 낮은 때에도 5 mg/L 이상으로 유입되어 다른 저수지에 비해 매우 높은 농도를 나타내었다. 질소의 존재형태는 유입하천에서 질산염이 67%, 암모니아가 22%를 차지하여 다른 저수지 유입하천과 비교하여 암모니아의 비율이 매우 높았다. 만수지는 유역으로부터 축산계 오염원이 많이 유입되는 저수지로 축산계 오염원의 영향으로 암모니아의 농도가 높아 전체 질소 농도도 증가시키는 것으로 판단된다. 저수지에서의 질소 비율은 질산염이 36%, 암모니아가 7%로 나머지는 입자성이 가장 많은 비중을 차지하는 것으로 조사되었다.

T-P는 저수지에서 3년 평균이 0.290 mg/L, 연도별 평균이 각 0.381 mg/L,

0.255 mg/L, 0.225 mg/L로 T-N과 같이 2011년에 가장 농도가 높았다. 유입하천의 T-P는 2011년에 0.393 mg/L, 2012년에 0.441 mg/L, 2013년에 0.304 mg/L로 조사되었으며, 3년 평균이 0.373 mg/L로 T-N과 마찬가지로 조사 대상지 중 가장 높은 농도를 나타내었다. 인의 존재형태는 유입하천에서 총인 중 인산염의 비율이 66%로 높은 비율을 나타냈으나 저수지에서 14%를 나타내어 대부분 식물플랑크톤이 흡수하여 입자성의 형태를 띠는 것으로 판단된다.

만수저수지는 다른 저수지들과 비교하여 유량은 매우 작은 편이나 질소와 인의 농도가 훨씬 높아 고농도의 유입수가 저수지로 유입되어 장시간 머무르면서 부영양화 되기 가장 좋은 조건을 가지고 있는 것으로 판단된다.



<그림 2-9> 만수저수지 유입하천 및 저수지 수질변화

전체적으로 저수지의 수질은 오염정도가 심한 곳에서 농도의 편차가 크게 나타나 조사 횟수와 시기에 따라 수질평가가 매우 다르게 일어날 가능성이 있는 것으로 판단된다. 또한 미산지와 같이 유입하천의 수질이 만수지의 유입하천과 비슷한 수준으로 오염되었으나 저수지 수질은 양호한 경우 유입수 수질 외에 저수량이 크고, 수심이 깊은 저수지 특성의 영향을 받은 것으로 수질 뿐 아니라 다양한 영향인자가 저수지 수질에 영향을 미칠 것으로 판단되었다. 따라서 유역과 저수지 특성 등 여러 영향 인자를 검토하여 종합적으로 저수지의 상태를 평가해야 한다.

3장 수질측정망자료 DB구축 및 자료분석시스템 개발

3장 수질측정망자료 DB구축 및 자료분석시스템 개발

1절 농업용저수지 수질측정망자료 수집

1. 한국농어촌공사 내 수질측정망 관련 자료 현황

가. 시스템 내 구축된 DB 검토

한국농어촌공사에서 관리하는 농업기반시설(저수지, 양수장, 양배수장, 배수장, 취입보, 집수암거, 관정, 집수정, 방조제, 용수간선, 용수지선, 용수지거, 배수간선, 배수지선, 배수지거 등)의 시설제원을 포함한 유지관리 종합정보를 구축할 목적으로 RIMS(농업기반시설관리시스템)가 개발되어 운영 중에 있다. RIMS에 구축된 자료현황은 (표 3-1)과 같다.

(표 3-1) RIMS 자료구축현황

업무 분류	구축항목	자료구축현황
시설 일반제원	농업기반시설 인허가, 등록현황 및 관리규정 등 450 여개 항목	공사 관할 농업기반시설
	분기별 일상점검 및 긴급, 정기점검 등 50여개 항목	'04이후 점검 결과
정밀 안전진단	공종별 안전진단현황, 주요결함유형, 보수보강방안 등 290여개 항목	'95이후 진단 결과 구축·정비 중
개보수이력	공사기간, 담당자, 공종별개보수내역, 사진 등 150여개 항목	'00 이후 준공지구('00이전 준공지구 정비 중)
농업용수 저수량	3,300여개 공사 관할 저수지 전체 저수위, 저수율	'91 이후 저수량
농업용수 수질정보	COD, T-N 등 14개 항목 수질정보	'00이후 수질측정망, 일제조사, GAP항목분석 등 조사결과
공사관리지역 수해면적	필지별 수해면적, 주재배작물, 용수이용자 등	'09기준 필지별 수해면적 구축 중(약53만ha)
목적외사용 승인	승인신청서, 구비서류, 검토의견서, 신청결과	'05이후 승인신청결과
한수해관리	한수해정보, 긴급복구동원업체 정보	'04이후 한/수해 정보, 700여 긴급복구동원업체 정보
재해복구	공사기간, 담당자, 자원, 진도관리 등 100여개 항목	'00 이후 준공지구
통계연보	공사 및 시군 통계연보 기초자료	'05 이후 통계 기초자료

또한 한국농어촌공사에서 관리하는 수리시설물, 수문/기상, 용수이용현황, 수질현황자료를 국민들에게 제공할 목적으로 RAWRIS(농촌용수종합정보시스템)가 개발되어 운영 중에 있다.

(표 3-2) RAWRIS 자료구축현황

구분	컨텐츠명	컨텐츠 목적	컨텐츠 내용
수리 시설물 현황	일반현황	수리시설물 자료에 대한 질의 검색 기능	수리시설물 일반현황 정 보제공
	개보수이력	농업기반시설관리시스템과 연계한 정보 이력 제공	수리시설물 일상 및 정 밀진단 현황정보 제공
	안전점검	농업기반시설관리시스템과 연계한 정보 제공	수리시설물 일상 및 정 밀진단 현황정보 제공
용수 이용 현황	인문 사회현황	일반국민을 위한 농촌기본 정보 제공	인구, 농가, 작물, 축산, 토지, 농공단지 현황정보
	용수 구역현황	농촌용수 조사 및 분석의 단위가 되는 권역에 대한 기본 정보 제공	용수구역현황 정보 제공
	주요 저수지	지역주민과 함께하는 하천 문화 및 공간창출	테마별 저수지, 지역별 저수지 정보 제공
수질 현황	농업수질	농업용수와 관련된 기초자 료 확보	수질측정망, 일제조사 정 보 제공
수문/ 기상	기상자료	가물, 홍수 관리를 위한 기 초자료를 온라인 유통	기상자료 정보제공
	수문자료	물관리 공동활용 대상 정 보에 대한 온라인 유통	수문자료 정보 제공

나. 시스템 내 구축되지 않은 측정망 자료

농업용저수지 수질측정망과 관련하여 자료가 수집되고 있으나, 시스템 내 DB로 구축되어 서비스되지 않고 있는 자료도 다수 존재한다. 저수지별 유역 내 오염원(주거지역, 우사, 돈사)의 위치 및 상대적인 규모, 수질측정지점, 유역경계, 유입하천이 표시된 유역개황도가 매년 수집·작성되고 있으나,

시설보고서 내 그림의 형태로만 제공될 뿐 DB로 구축되지는 않았다.

생활계, 축산계(한우, 전소, 돼지), 산업계의 오염원수 및 각각의 BOD, T-N, T-P발생부하량과 토지이용면적(전, 답, 임야, 기타) 및 토지이용별 BOD, T-N, T-P발생부하량 정보가 매년 조사 및 산정되고 있으나 DB로 구축되어 서비스되고 있지 않다.

또한 각 저수지별 유역 내 처리시설(하수종말처리장, 분뇨처리장, 산업폐수, 마을하수도)의 용량, 사업비, 처리공법, 사업기간 등의 정보가 매년 조사되어 농업용수 수질측정망조사보고서 내 부록에 수록되고 있다.

수질측정망 대상저수지별 수질조사지점의 위경도 및 세계측지계 좌표 값과 조사지점에 대한 설명 자료가 excel로 정리되어 있으며, 또한 한국농어촌공사에서 관리하는 3,300여개 농업용저수지의 위경도 좌표가 정리된 excel 자료도 존재한다.

2. 수질측정망자료 수집 및 분석

가. 저수지 제원

수질측정망자료 DB를 구축하기 위해 RIMS와 RAWRIS에 구축된 저수지 제원과 관련된 전체 자료를 다 이용할 필요는 없고, 이중 수질지수 산정 및 수질지수 추정모델 개발에 필요한 저수지 특징과 관련된 제원자료만 필요로 한다. RIMS와 RAWRIS에 구축된 DB외에 별도 excel로 정리된 저수지 통계 연보자료를 활용하여 필요한 저수지 제원 자료를 수집하였다.

RIMS, RAWRIS 및 저수지 통계연보자료를 분석한 결과 수질측정망자료 DB구축을 위한 저수지제원자료로 활용 가능한 항목은 통계코드, 시설명, 관리자(공사, 시군), 유역면적, 만수면적, 총저수량, 유효저수량, 제당(구조, 높이, 길이), 수혜면적, 주소, 준공일자 등이 있으며, 기타자료로는 표준코드, 시설구분, 수원공구분, 관리구분, 지구명, 주소코드, 착공일자, 재원내역, 한발빈도, 인가면적, 여수토연장, 상수로연장, 홍수/갈수량이 있다.

또한 시설보고서에 기록된 각 저수지별 관할측후소명 및 측후소코드도 저수지 제원자료로 활용하였다. 이는 각 저수지별 강수량자료를 분석할 경우 기상자료DB의 측후소코드와 연결되어 검색할 수 있도록 하기 위해서이다.

나. 수질측정망 조사지점 위치

Excel에 정리된 수질조사지점의 좌표와 저수지의 대표지점 좌표를 검토한 결과 수질측정망자료를 관리하기 위한 DB구축에서 2가지 좌표를 모두 정리하는 것이 좋을 것으로 판단되어, 저수지 대표지점에 대한 위경도 및 세계측지계 좌표와 저수지 수질조사지점에 대한 위경도 좌표, 세계측지계 좌표 및 수질조사지점에 대한 설명을 정리하였다.

다. 수질측정망 수질조사자료

RIMS, RAWRIS에 구축된 동일한 자료를 측정망자료 관리 실무자로부터 excel형태로 제공받아 자료를 검토 및 정리하였다. 조사연도별로 대상저수지, 연간 조사 횟수 및 조사항목이 서로 다르다. Excel에 정리된 자료는 저수지명, 조사일자(년월일), 수온, pH, EC, DO, BOD, COD, T-N, T-P, SS, Cl, Chl-a, TOC(2010년부터), 중금속(Cu, Pb, Cd, As, Hg; 연1회 조사), 수질 등급, 부영양화단계가 정리되어 있다. 저수지별 수질비교를 위해 연 1~4회 조사한 값을 연 평균하여 별도로 정리하였다.

라. 수질측정망 오염원수 및 발생부하량자료

저수지별 유역 내 오염원수 및 발생부하량자료를 수질측정망자료 관리 실무자로부터 excel형태로 제공받아 자료를 검토 및 정리하였다. 조사연도별 인구수, 한우두수, 젓소두수, 돼지두수, 산업계유량, 양식면적, 논면적, 밭면적, 임야면적, 기타면적과 같은 오염원수 자료와 각각의 오염원수에 발생부하량원단위를 곱하여 산정된 발생부하량이 정리되어 있다. 또한 발생부하량을 생활계, 축산계(한우, 젓소, 돼지), 산업계, 양식계, 토지계(논, 밭, 임야, 기타)로 구분하여 재정리하였으며, 계별 발생부하량을 합한 총 발생부하량이 정리되어 있다. 또한 연도별로 생활계, 축산계, 산업계, 양식계, 토지계 중 발생부하량이 제일 많은 것을 주요오염원으로 지정하여 저수지별 주요오염원이 어떤 계인지 정리되었다.

마. 처리시설 현황자료

농업용수 수질측정망조사보고서 내 부록에 수록된 자료를 바탕으로 농업용저수지 유역 내 처리시설 현황자료를 정리하였다. 각 농업용저수지 유역 내 존재하는 처리시설의 종류(하수종말처리장, 분뇨처리장, 산업폐수처리장, 마을하수도 등), 처리장명, 시·군, 용량, 사업비, 처리공법, 사업기간, 비교(가동여부)를 정리하였다.

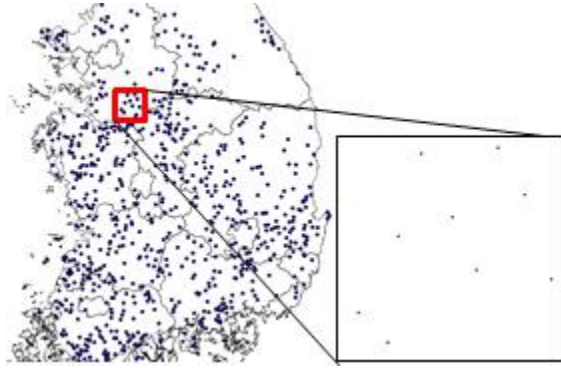
바. 기상자료

각 저수지별 기상자료와 연계하여 수질을 검토하기 위해 기상자료가 필요하다. 기상자료로는 한국농어촌공사에서 HOMWRS 구동을 위해 매년 구축해 놓은 기상자료를 활용하였다. 구축된 기상자료는 기상관측소별로 강우, 증발, 기온, 습도, 일조, 풍속자료가 일별로 정리되어 있다. 저수지별 기상자료를 비교하기 위해 기상항목별로 월 값을 계산하여 별도의 excel에 정리하였다.

사. GIS자료

한국농어촌공사에서 전국 농업용저수지의 유역경계 GIS자료를 구축하였으며, 본 연구에서는 구축된 유역경계 GIS자료로부터 농업용저수지 수질측정망 대상 저수지의 유역경계만을 추출하였다. 그 결과 825개소 중 600개소의 유역경계 자료를 확보할 수 있었으며, 확보된 유역경계 자료를 검토한 결과 약 17%에 해당되는 100여개소의 유역경계에 오류가 있는 것으로 나타나 최종적으로 500여개소에 대해 유역경계 자료를 구축하였다.

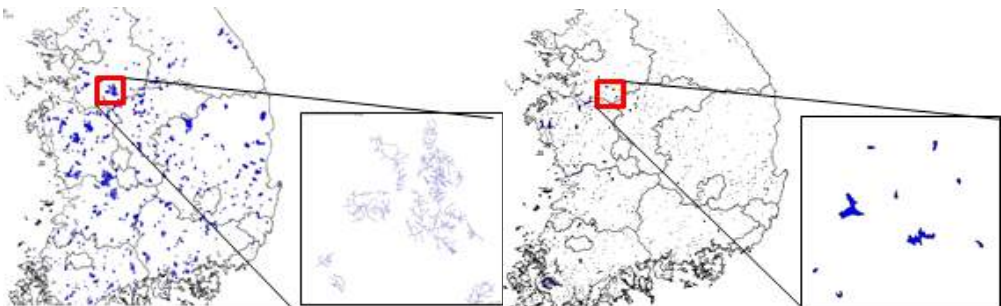
농업용저수지 유역의 오염원 분석을 위해 유역 내 동리경계가 필요한 경우가 많은데 이를 위해 앞에서 구축한 유역경계와 2008년도 전국 동리경계 GIS자료로부터 농업용저수지 유역 내 동리경계 자료를 구축하였다. 전국 하천도GIS자료와 유역경계 GIS자료를 이용해 농업용저수지 유역 내 하천도 GIS자료를 추출하여 구축하였다. 또한 측정망 대상 저수지의 수표면 GIS자료를 구축하였고, 수질측정망 대상저수지의 대표 지점 좌표정보를 활용해 농업용저수지 수질측정망 대상저수지의 지점 위치 GIS자료를 구축하였다.



<그림 3-1> 농업용저수지 수질측정망 대상저수지 지점 GIS자료



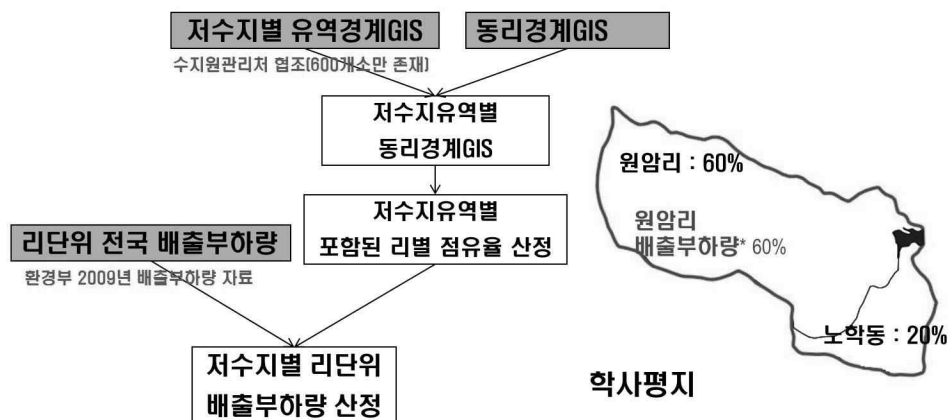
<그림 3-2> 농업용저수지 수질측정망 대상저수지 유역경계 및 동리경계 GIS자료



<그림 3-3> 농업용저수지 수질측정망 대상저수지 하천도 및 수표면 경계 GIS자료

아. 배출부하량 산정

일반적으로 저수지의 수질은 발생부하량보다는 배출부하량과 더 높은 상관관계가 있기 때문에 본 연구에서는 <그림 3-4>의 방법으로 농업용저수지 수질측정망 대상저수지의 배출부하량을 산정하였다.



<그림 3-4> 배출부하량 산정과정

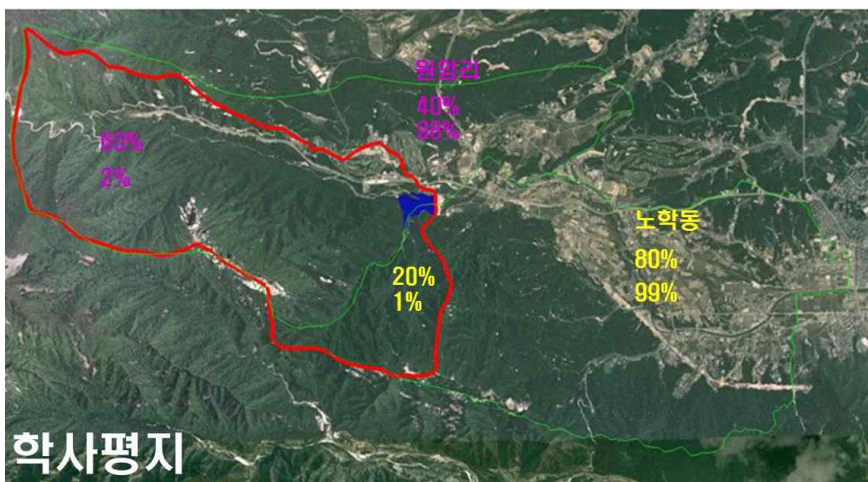
GIS기법을 이용한 배출부하량 산정방법은 대규모 유역에서 많이 사용되는 방법으로 특정 리에서 오염원은 리전체에 대해 균일하게 분포한다고 가정한다. 즉, 해당 리의 면적비는 배출부하량비와 동일하다는 가정을 하여, 농업용저수지 유역에 포함되는 리의 면적비를 구한 후 이를 해당 리의 배출부하량과 곱하여 저수지 유역에 포함되는 리의 부하량을 산정하는 방법이다. 이러한 방법은 리에서 오염원분포가 균일하지 않을 경우 산정된 배출부하량은 오류가 포함될 가능성이 높다.

GIS기법을 이용해 배출부하량을 산정하기 위해서는 저수지별 유역경계 GIS자료, 전국동리경계GIS자료 및 리별배출부하량 산정자료가 필요하다. 측정망 대상저수지의 유역경계자료는 수자원관리처에서 전국 농업용저수지에 대해 구축한 GIS자료를 이용하였는데, 총 825개 대상 저수지 중 600개 저수지만 유역경계가 존재하고 그중 17%가 오류가 있어 총 500개 저수지에 대해 구축된 유역경계자료를 활용하였다. 동리경계자료는 2008년 당시 전국 동리경계GIS자료를 이용하였으며, 리별 배출부하량자료는 2009년 자료를 이용하였다.

이상의 자료를 이용하여 <그림 3-4>의 방법으로 500개 농업용저수지의 배출부하량을 산정하였다. 배출부하량이 잘 산정되었는지 확인하기 위해 본 연구에서 산정한 저수지별 2009년 배출부하량자료와 2009년 농업용저수지 수질측정망조사를 통해 산정한 저수지별 발생부하량자료의 비(배출부하량/발생부하량)를 산정한 후 분석하였다. 그 결과 발생부하량과 배출부하량이 일정한 범위의 비율을 가질 것이라는 예상과 달리 매우 넓은 범위의 값을 나타내었고 1이상의 값(배출부하량>발생부하량)을 갖는 경우도 많이 있었다. 이는 저수지에 포함된 리에서 저수지 하류에 도시가 있어 저수지 상류지역보다는 하류지역에 오염원이 밀집되어 배출부하량/발생부하량의 비가 1보다 큰 값을 나타냈다.

<그림 3-5>에서 원암리 면적의 60%, 노학동의 20%가 학사평지 유역에 포함되어, GIS방법에 의해 배출부하량을 산정할 경우 원암리와 노학동의 배출부하량에 각각 0.6과 0.2를 곱하여 학사평지 유역의 배출부하량을 산정한다. 그러나 실제 학사평지 유역의 부하량은 원암리와 노학동 부하량의 각각 2%와 1%가 존재하여 GIS방법에 의해 산정된 배출부하량에 오류가 발생하였다.

그러므로 본 연구에서는 비록 저수지 유역의 발생부하량보다 배출부하량이 저수지의 수질과 더 높은 상관관계를 갖더라도, 수질지수 추정 및 수질지수 추정모델 개발에 배출부하량 대신 발생부하량을 이용하기로 하였다.



<그림 3-5> 배출부하량 산정시 오류

3. 수질측정망자료 DB화

가. 저수지 제원

825개 저수지에 대해 excel을 이용해 정리한 자료를 MS-Access를 이용해 (표 3-3)과 같이 26개 항목을 입력하였다. 입력된 항목의 필드크기는 향후 조정하여 최적의 크기로 필드크기를 감소시킬 계획이다.

(표 3-3) 저수지 제원 DB의 필드이름, 데이터형식, 필드크기

필드이름	데이터형식	필드크기 및 소수자릿수	필드이름	데이터형식	필드크기 및 소수자릿수
도상번호	실수	0	수계_수계	텍스트	255
통계코드	실수	0	수계_중권역	텍스트	255
주소코드	실수	0	위도	실수	4
표준코드	실수	0	경도	실수	4
지역본부	텍스트	255	수해면적(ha)	실수	0
시도	텍스트	255	유역면적(ha)	실수	0
시설명	텍스트	255	유효저수량(천톤)	실수	0
시설구분	텍스트	255	만수면적(ha)	실수	0
관리자	텍스트	255	제당높이(m)	실수	0
도	텍스트	255	제당길이(m)	실수	0
시군	텍스트	255	준공년도	실수	0
구면읍동	텍스트	255	관리주체	텍스트	255
동리	텍스트	255	관할측후소명	텍스트	255
수계_권역	텍스트	255			

나. 수질측정망 수질자료

수질측정망 대상 저수지별 조사된 수질자료를 (표 3-4)와 같이 MS-Access를 이용하여 입력하였다. 각 table과 연계될 수 있도록 시설 명 외 에 통계코드를 입력하였다. 연도별로 실측된 수질항목이 다르기 때문에 조사되지 않은 수질항목은 빈칸으로 남겨 놓았으며, 농도가 낮아 불검출로 나타난 항목을 농도의 산술적 계산을 위해 MS-Access에 0으로 입력하였다.

(표 3-4) 수질측정망 대상저수지의 수질조사 결과

필드이름	데이터형식	필드크기 및 소수자릿수	필드이름	데이터형식	필드크기 및 소수자릿수
통계코드	실수		BOD	실수	1
시설명	텍스트	255	COD	실수	1
시설구분	텍스트	255	TN	실수	3
시설관리	텍스트	255	TP	실수	3
시도	텍스트	255	SS	실수	1
년	실수		Cl	실수	1
월	정수		Chla	실수	1
일	정수		Cu	실수	3
시설-연도코드	텍스트	255	Pb	실수	3
조사코드	텍스트	255	Cd	실수	3
조사구분	텍스트	255	As	실수	3
년월	텍스트	255	Hg	실수	3
수온	실수	1	수질등급	텍스트	255
pH	실수	1	TOC	실수	
EC	실수	0	영양상태	텍스트	255
DO	실수	1	저수율	실수	

다. 수질측정망 오염원자료

농업용저수지 수질측정망 대상저수지별 연 1회 조사한 결과를 MS-Access를 이용해 DB화하였다. 오염원수만을 이용해 DB를 입력하고 각각의 오염원별 발생부하량을 오염원수에 오염원단위를 곱하여 산정할 수 있으나, 본 연구에서는 계산된 값을 그대로 DB화 하였다. 하지만, 향후 오염원수만을 입력하여 DB를 간단하게 조정할 계획이다. 또한 환경부에서 배출부하량자료를 제공받게 되면 추가로 농업용저수지별 배출부하량을 정리하여 입력할 계획이다. 다른 DB와 연계될 수 있도록 시설 명 외에 통계코드를 추가하였다.

(표 3-5) 수질측정망 대상저수지의 오염원조사 결과

필드이름	데이터형식	필드크기 및 소수자릿수	필드이름	데이터형식	필드크기 및 소수자릿수
조사년도	실수		논BOD	실수	
통계코드	실수		임야BOD	실수	
주소코드	실수		기타BOD	실수	
시도	텍스트	255	총BOD	실수	
시설명	텍스트	255	생활계TN	실수	
구분	텍스트	255	한우TN	실수	
유역면적	실수		젓소TN	실수	
주오염원	텍스트	255	돼지TN	실수	
인구수	실수		산업계TN	실수	
한우두수	실수		양식계TN	실수	
젓소두수	실수		밭TN	실수	
돼지두수	실수		논TN	실수	
산업유량	실수		임야TN	실수	
양식면적	실수		기타TN	실수	
총면적	실수		총TN	실수	
밭면적	실수		생활계TP	실수	
논면적	실수		한우TP	실수	
임야면적	실수		젓소TP	실수	
기타면적	실수		돼지TP	실수	
생활계BOD	실수		산업계TP	실수	
한우BOD	실수		양식계TP	실수	
젓소BOD	실수		밭TP	실수	
돼지BOD	실수		논TP	실수	
산업계BOD	실수		임야TP	실수	
양식계BOD	실수		기타TP	실수	
밭BOD	실수		총TP	실수	

라. 처리시설 현황자료

농업용저수지 유역 내 처리시설 현황자료를 (표 3-6)과 같이 MS-Access에 입력하였다. 특정 연도별 유역 내 가동 중인 처리시설을 검색할 수 있도록 각 처리시설의 가동시작연도와 가동중단연도를 입력하였으며, 현재 가동 중인 처리시설은 가동중단연도를 빈칸으로 남겨 놓았다. 또한, 처리시설을 증설하여 처리시설 정보가 변한 경우 증설전 처리시설은 가동중단연도에 증설완료직후의 연도를 입력하고, 증설 후의 처리시설 정보는 별도의 레코드에 정보를 입력하였다.

(표 3-6) 수질측정망 대상저수지의 처리시설 현황자료

필드이름	데이터형식	필드크기 및 소수자릿수	필드이름	데이터형식	필드크기 및 소수자릿수
통계코드	실수		사업비	실수	
시설명	텍스트	50	처리공법	텍스트	50
시.도	텍스트	50	시업기간	텍스트	50
시.군	텍스트	50	비고	텍스트	50
처리시설종류	텍스트	50	가동시작연도	실수	
처리장명	텍스트	50	가동중단연도	실수	
용량	실수				

마. 기상자료

기상자료DB는 한국농어촌공사에서 HOMWRS에 사용할 목적으로 매년 갱신하여 입력한 DB를 그대로 이용하였다. 구축된 DB는 (표 3-7)과 같이 연도, 월, 일, 강우, 증발, 기온, 습도, 일조, 풍속이 입력되어 있으며, 각 기상관측소별 별도의 table에 입력되어있다. 또한 저수지별 기상자료를 비교할 수 있도록 일별기상자료를 이용해 월별 기상자료를 계산하여 별도의 MS-Access파일을 생성하였으며, 일별자료와 달리 record수가 많지 않아 모든 기상관측소의 월별 기상자료는 하나의 table에 입력하였다.

(표 3-7) 수질측정망 대상저수지의 처리시설 현황자료

필드이름	데이터형식	필드크기 및 소수자릿수	필드이름	데이터형식	필드크기 및 소수자릿수
연도	정수		기온	실수	
월	정수		습도	실수	
일	정수		일조	실수	
강우	실수		풍속	실수	
증발	실수				

바. 수질조사지점

농업용저수지 수질측정망 대상 저수지의 시설위치와 조사지점을 세계 측지계 좌표로 입력하였으며, 정확한 수질조사 지점을 특정 시설물 기준으로 어느 정도 거리에 떨어진 지점에서 조사를 실시하였는지에 관한 정보도 입력하였다.

(표 3-8) 수질측정망 대상저수지의 시설위치 및 수질조사지점

필드이름	데이터형식	필드크기 및 소수자릿수	필드이름	데이터형식	필드크기 및 소수자릿수
시설명	텍스트	20	조사위치_위도	실수	
통계코드	실수		조사위치_경도	실수	
주소코드	실수		조사위치_세계x	실수	
주소	텍스트	100	조사위치_세계y	실수	
시설위치_위도	실수		조사위치_지점	텍스트	50
시설위치_경도	실수		조사위치_거리	텍스트	50
시설위치_세계x	실수		조사위치_기준	텍스트	50
시설위치_세계y	실수				

2절 수질측정망 자료분석시스템 개발

1. 자료분석시스템 개발 방향 및 구성

가. 개발방향

자료분석시스템을 개발할 경우 매년 DB를 업데이트해야 하는데, 윈도우 기반의 시스템을 개발할 경우 매년 전체 사용자를 대상으로 업데이트된 DB를 갱신하여야 하는데, 이 과정이 쉽지 않다. 그러므로 본 연구에서 개발하고자 하는 수질측정망 자료분석시스템은 DB업데이트가 용이하고 시스템 유지보수가 용이하도록 웹기반으로 시스템을 개발하였다. 웹기반으로 시스템을 개발할 경우 서버에 구축된 DB만을 업데이트할 경우 시스템 사용자는 언제나 최신의 DB를 이용해 수질측정망 자료를 분석할 수 있다. 또한 시스템을 개발하면 오류와 일부 시스템 변경 등 다양한 형태로 유지보수가 필요하다. 이 경우에도 윈도우기반으로 시스템을 개발할 경우 모든 사용자에게 수정된 프로그램을 제공해야 하지만, web 기반의 시스템을 개발할 경우 개발자가 서버에 있는 시스템을 쉽게 수정하여 제공할 수 있는 장점이 있다.

또한 개발된 시스템이 일반사용자가 쉽게 사용할 수 있고, 모든 컴퓨터에서 문제없이 구동될 수 있도록 하였다. 또한 별도의 프로그램 추가 설치 없이 구동될 수 있도록 시스템을 개발하였다. 위의 조건을 만족시키기 위해 Adobe Flash를 이용해 시스템을 개발하였으며, 개발된 시스템은 인터넷을 통해 접속이 가능하다.

자료분석시스템을 개발하기 위해 ① 시스템 설계 및 구성, ② 웹상의 화면 구성 및 개발, ③ DB와 시스템 연계 순으로 작업을 진행하였다. 시스템 설계 및 구성은 자료분석시스템에 어떤 자료를 어떤 형태로 제공할지를 연구하는 단계이며, 웹상의 화면 구성 및 개발은 앞 단계에서 설계한 내용을 웹상에서 어떻게 구현할지 결정한 후 본격적으로 시스템을 개발하는 단계이며, DB와 시스템 연계 단계는 실제 데이터가 입력된 DB와 웹상의 시스템을 서로 연계하는 단계이다.

나. 자료분석시스템 구성

‘농업용수 수질측정망조사 보고서’는 장기간 수집된 수질측정망자료에 대해 실무자가 필요로 하는 내용에 대해 효과적인 표와 그래프를 제공하고 있다. 그러므로 본 연구에서 개발한 자료분석시스템에 어떤 자료를 제공할

지는 ‘농업용수 수질측정망조사 보고서’를 참조하였다. ‘농업용수 수질측정망조사 보고서’에서 제공하는 표와 그래프를 카테고리별로 분류하여 자료분석시스템에서 제공할 자료의 메뉴를 (표 3-9)와 같이 구성하였다.

(표 3-9) 수질측정망 자료분석시스템 메뉴구성

주메뉴	부메뉴	설명
측정망분포	측정망별	저수지측정망 및 호소측정망 개소수 및 시설수
	규모별	저수지규모별 시설수 (<500, <1000, <5000, <10,000, <50,000, >50,000)
	수계별	수계별 농업용저수지 및 담수호 시설수
강수량, 오염원	강수량	월간 누적 강수량
	주오염원	주오염원 종류별 시설수 (생활, 축산, 토지, 산업, 양식)
	수처리시설	종류별(하수종말, 분뇨, 산업폐수, 마을하수) 시설수 및 용량
수질현황	수질현황	COD, T-N, T-P농도, COD기준초과 시설수 및 비율
	수질등급	수질등급별시설수 (COD기준, Ia~VI), 수질기준달성율
	영양상태	영양상태별시설수 (극빈, 빈중, 중, 중부, 부)

(1) 측정망분포

농업용수 수질측정망 대상저수지는 연도별로 일부 추가되어 2013년 현재 825개 저수지를 조사하고 있다. 농업용수 수질측정망은 저수지측정망과 호소측정망으로 나뉘지는데, 저수지측정망은 한국농어촌공사에서 운영하고, 호소측정망은 환경부에서 운영하고 있다. 또한 저수지측정망은 연4회 수질을 조사하는 반면, 호소측정망은 매달 수질을 조사하고 있다. 특정연도에 지역본부 및 지사별로 저수지측정망과 호소측정망이 얼마나 되는지 표와 그래프로 제공되며, 또한 연도별 저수지측정망과 호소측정망의 수가 어떻게 변했는지도 제공된다.

또한 특정연도에 측정망 대상 저수지가 본부 및 지사별로 저수지 규모별 시설수가 얼마나 되는지와 연도별 저수지규모별 시설수가 어떻게 변했는지에 대한 자료도 제공된다. 저수지 규모는 유효저수량을 기준으로 <500 천 m^3 , <1,000 천 m^3 , <5,000 천 m^3 , <10,000 천 m^3 , <50,000 천 m^3 , >50,000 천 m^3 과 같이 6단계로 구분하여 제공된다. 또한 농업용수 수질측정망 대상 저수지 및 담수호의 시설수를 수계별로 정리하여 제공된다.

(2) 강수량, 오염원

지역본부 및 지사별 월간 누적강수량 자료가 제공된다. 일반적으로 강수량과 저수지 수질 사이에 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 지역본부 또는 지사별로 관리하는 저수지에 내린 강수량을 파악하여 저수지 수질관리에 이용할 수 있다. 월간 누적강수량 자료는 선택된 지역본부 또는 지사에 대해 연도별로 제공된다.

강수량 외에 저수지별 주요오염원의 종류별(생활계, 축산계, 토지계, 산업계, 양식계) 시설수를 제공하여 선택된 지역본부에서 관리하는 저수지들의 주요오염원의 분포가 어떻게 되는지 확인할 수 있다. 이를 통해 주요오염원의 종류에 따라 서로 다른 수질관리정책을 수립하여 저수지 수질을 관리할 수 있다.

저수지내 존재하는 수처리시설 종류별(하수종말처리장, 분뇨처리장, 산업폐수처리장, 마을하수도) 시설수 및 시설용량을 지사단위 또는 지역본부단위로 집계되어 제공된다.

(3) 수질현황

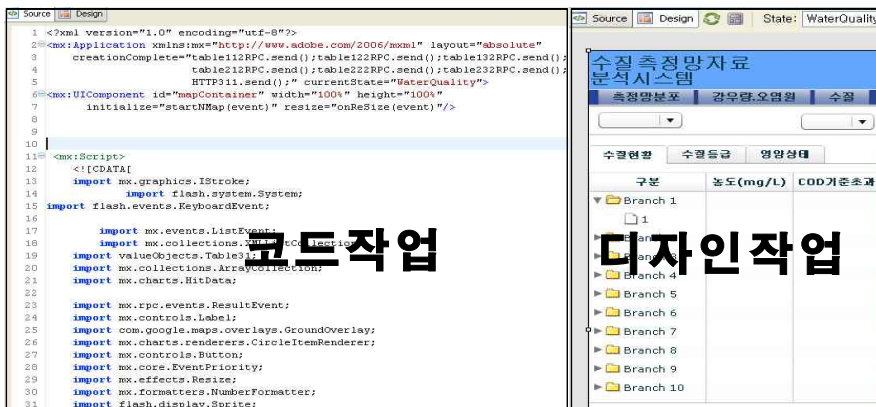
특정연도의 수질측정망 수질자료를 지사단위 및 지역본부단위로 평균 COD, T-N, T-P의 농도와 COD기준초과 시설수 및 비율 등의 형태로 제공된다. 또한 특정 저수지, 지사, 지역본부에 대한 연도별 COD, T-N, T-P농도와 COD기준 초과 시설수 및 비율 변화자료도 제공된다.

특정연도에 대한 지사와 지역본부에 대한 COD기준 수질등급별 시설수와 수질기준 달성율 자료를 제공하여 특정연도에 관리조직별 수질등급분포와 수질기준 달성율을 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 또한 동일한 자료를 특정 저수지, 지사 또는 지역본부에 대해 연도별로 수질등급과 수질기준 달성율 자료를 제공한다.

특정연도의 지사와 지역본부에 대한 영양상태별(극빈영양, 빈중영양, 중영양, 중부영양, 부영양) 시설수 자료를 제공하여, 특정연도에 관리조직별 영양상태별 시설수를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 동일한 자료를 특정 저수지, 지사, 지역본부에 대한 연도별로 영양상태별 시설수 자료가 제공된다.

2. 웹상의 화면 구성 및 개발

<그림 3-6>과 같이 Adobe flash를 이용해 수질측정망 자료분석시스템을 개발하였다. 왼쪽 창에서 코드작업 화면이며, 오른쪽 창은 디자인작업 화면이다.



<그림 3-6> Adobe flash를 이용한 자료분석시스템 개발

전체적으로 수질측정망 자료분석시스템은 저수지별 조사된 측정망자료를 지사별, 지역본부별 및 전국 평균 및 합계를 <그림 3-7>과 같이 tree구조로 제공하여 사용자가 원하는 저수지, 지사, 지역본부별 통계값을 쉽게 탐색할 수 있도록 하였다.

구분	농도(mg/L)			COD기준초과	
	COD	T-N	T-P	시정수	비율
▼ 전국	6.3	1.2	0.037	176	21.3
▶ 강원	4.3	1.0	0.022	0	0.0
▶ 경기	7.1	1.5	0.075	26	36.1
▶ 가평군	4.0	1.3	0.007	0	0.0
▶ 강화	8.0	1.0	0.035	8	66.7
▶ 강화군	5.7	1.4	0.019	0	0.0
▶ 안성	6.7	1.2	0.079	2	18.2
▶ 덕산	5.3	1.1	0.034	0	0.0
▶ 고삼	4.3	2.8	0.442	0	0.0
▶ 두왕	8.0	1.0	0.072	1	100.0
▶ 마준	6.6	0.9	0.029	0	0.0

<그림 3-7> 수질측정망 자료분석시스템의 tree구조

지역별옵션을 선택할 경우 <그림 3-8>과 같이 관심 있는 연도를 선택하면 선택한 연도에 대한 지역본부, 지사, 저수지별 통계값이 tree구조로 제공된다.

지역별		연도		지역별		연도					
수질현황	수질등급	영양상태	농도(mg/L)	COD	수질현황	수질등급	영양상태				
구분	COD	T-N	T-P	시정수	구분	COD	T-N	T-P	시정수	비율	
▶ 전국	5.8	1.3	0.034	122	1.9	▶ 전국	6.3	1.2	0.037	164	19.9
▶ 강원	4.4	1.3	0.016	1	1.9	▶ 강원	4.3	1.0	0.022	0	0.0
▶ 경기	6.6	1.9	0.043	15	22.1	▶ 경기	7.0	1.5	0.069	23	33.6
▶ 경남	4.7	0.9	0.020	3	3.1	▶ 경남	5.2	0.7	0.028	7	7.2
▶ 경북	7.1	1.1	0.024	49	28.3	▶ 경북	7.4	0.7	0.031	47	31.1
▶ 전남	4.9	1.1	0.029	15	8.6	▶ 전남	5.3	1.4	0.032	21	12.1
▶ 전북	5.6	1.5	0.043	7	7.1	▶ 전북	6.1	1.8	0.045	16	16.3
▶ 충남	7.4	1.7	0.070	32	29.4	▶ 충남	8.3	1.2	0.045	42	38.5
▶ 충북	5.5	1.5	0.023	6	8.2	▶ 충북	6.1	1.0	0.027	8	11.0

<그림 3-8> 지역별옵션 선택 시 관심연도 선택화면

연도별옵션을 선택할 경우 <그림 3-9>와 같이 관심 있는 지역본부, 지사, 저수지를 선택하면 선택한 지역에 대한 연도별 통계값이 제공된다.

연도별		지역		연도별		지역					
수질현황	수질등급	영양상태	농도(mg/L)	COD	수질현황	수질등급	영양상태				
구분	COD	T-N	T-P	시정수	비율	구분	COD	T-N	T-P	시정수	비율
▶ 전국	6.1	1.4	0.049	1,400	80.1	▶ 강원	4.0	1.0	0.022	10	97.8
▶ 2010	5.8	1.3	0.034	122	85.2	▶ 2010	4.4	1.3	0.016	1	98.1
▶ 2009	6.3	1.2	0.037	164	80.1	▶ 2009	4.3	1.0	0.022	0	100.0
▶ 2008	6.3	1.4	0.038	111	78.8	▶ 2008	4.0	1.2	0.015	0	100.0
▶ 2007	6.0	1.5	0.034	98	80.0	▶ 2007	4.0	1.1	0.007	0	100.0
▶ 2006	5.7	1.4	0.043	80	83.6	▶ 2006	3.5	0.8	0.016	0	100.0
▶ 2005	5.4	1.4	0.042	78	84.0	▶ 2005	3.0	1.4	0.012	0	100.0
▶ 2004	5.5	1.3	0.038	77	84.3	▶ 2004	3.4	0.8	0.011	1	97.0
▶ 2003	5.4	1.7	0.060	75	84.7	▶ 2003	3.2	1.0	0.029	0	100.0
▶ 2002	6.2	1.5	0.071	112	77.1	▶ 2002	4.4	1.1	0.029	3	96.9
▶ 2001	5.9	1.5	0.055	83	83.0	▶ 2001	4.0	1.1	0.024	0	100.0
▶ 2000	5.9	1.5	0.053	85	80.1	▶ 2000	4.2	1.2	0.028	1	96.0

<그림 3-9> 연도별옵션 선택 시 관심지역 선택화면

Tree구조로 제공되는 자료를 선택할 경우 하단에 다양한 형태의 그래프를 추가하여 지역본부별, 지사별, 저수지별 다양한 통계값을 시각적으로 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 예를 들어 <그림 3-10>과 같이 강원지역본부-영북지사를 선택할 경우 영북지사에서 관리하는 4개 저수지의 평균 수질이 그래프로 제공되어, 영북지사의 수질관리자는 관리하고 있는 저수지들의 평균 수질농도의 높고 낮음을 직관적으로 파악할 수 있는 장점이 있다.



<그림 3-10> 수질현황 표와 그래프

수질등급메뉴에서 경기지역본부를 선택할 경우 <그림 3-11>과 같이 경기지역본부 산하 지사별 관리하고 있는 저수지들의 수질등급별 개소수를 누적그래프로 제공하여 어느 지사의 수질이 심각한지 쉽게 파악이 가능하다. <그림 3-11>에서 강화지사에서 관리하고 있는 12개 저수지 중 8개가 수질등급 5등급을 유지하고 있음을 쉽게 파악할 수 있다.



<그림 3-11> 수질등급현황 표와 그래프

3. 개발된 농업용저수지 수질측정망 자료분석시스템

가. 측정망분포

측정망분포 메뉴는 수질측정망 대상 저수지의 저수지측정망과 호소측정망별 분포, 규모별 분포 및 수계별 분포를 표와 그래프로 제공하는 메뉴로 3개의 부메뉴(측정망별, 규모별, 수계별)를 갖고 있다. 각각의 부메뉴에 의해 제공되는 자료는 다음과 같다.

(1) 측정망별

농업용저수지 중 일부는 농업용수 수질측정망으로 지정되어 농림축산식품부-한국농어촌공사에서 연 4회 수질 및 오염원조사를 하고 있으며, 일부는 농업용호소 수질측정망으로 지정되어 환경부에서 월1회 수질을 조사하고 있다. 측정망별 부메뉴에서는 농업용수 수질측정망의 개소수와 지점수, 농업용호소 수질측정망 개소수와 지점수, 그리고 총 측정망 개소수와 지점수를 표와 그래프로 제공한다.

지점별 옵션을 선택할 경우 <그림 3-12>와 같이 지역본부별, 지사별, 저수지별 농업용수 수질측정망의 개소수와 지점수 및 농업용호소 수질측정망 개소수와 지점수가 표와 그래프로 나타난다. <그림 3-12>의 좌측 그림에서 전국을 클릭할 경우 각 지역본부별 측정망종류별 개소수와 지점수가 나타난다. 2010년 전국 측정망 대상저수지의 개소수와 지점수는 각각 825개소와 867개 지점으로, 이중 농업용수 수질측정망 개소수와 지점수는 각각 800개소와 805개 지점이고, 농업용호소 수질측정망 개소수와 지점수는 각각 25개소와 62개 지점으로 나타났다. 지역별로는 전남지역본부의 2010년 측정망 대상저수지가 174개소, 185개 지점으로 가장 많은 것으로 나타났으며, 강원지역본부가 개소수와 지점수가 모두 53개로 가장 적은 것으로 나타났다. 하단의 그래프를 통해 쉽게 지역본부별 측정망 대상저수지의 개소수의 대소를 쉽게 파악할 수 있으며, 마우스를 해당 그래프에 올려놓으면, 그림과 같이 정확한 값과 비율을 알 수 있다. 제일 측정망 대상저수지 개소수가 많은 전남지역의 경우 총 174개소 중 95.4 %인 166개소가 농업용수 수질측정망으로 운영되고 있으며, 4.6 %인 8개소가 농업용호소 수질측정망으로 운영되고 있음을 알 수 있다.

<그림 3-12>의 중앙 그림에서 경기지역본부를 클릭할 경우 경기지역본

부 관할 지역 내 지사 또는 시군에서 관리하는 저수지의 농업용수 수질측정망 개소수와 지점수 및 농업용호소 수질측정망 개소수와 지점수가 표와 그래프로 제공된다. 그림을 보면 강화지사가 2010년 측정망 대상저수지의 개소수가 12개로 제일 많은 것으로 나타났으며, 안성지사가 11개소로 다음으로 많은 것으로 나타났다. 반면에 강화군, 가평군은 각각 1개소가 수질측정망으로 지정되어 운영되고 있음을 알 수 있다. 특히, 평택지사의 경우 총 5개소의 저수지 중 3개소가 농업용호소 측정망으로 지정되어 제일 많은 농업용호소 측정망을 보유하고 있는 것으로 나타났다.

<그림 3-12>의 우측 그림에서 안성지사를 클릭할 경우 안성지사에서 관리하는 저수지의 농업용수 수질측정망 개소수와 지점수 및 농업용호소 수질측정망 개소수와 지점수를 표와 그래프로 제공된다. 고삼저수지를 제외하고 모두 농업용수 수질측정망으로 지정되어 운영되고 있으며, 고삼저수지는 농업용호소 수질측정망으로 지정되었으며, 3개 지점에 대해 월1회 수질조사가 이루어지고 있다.



<그림 3-12> 측정망종류별 측정망 분포 현황(지역별읍선)

연도별읍선을 선택할 경우 <그림 3-13>과 같이 선택한 지역본부 및 지사에 대해 연도별 농업용수 수질측정망 개소수와 지점수 및 농업용호소 수질측정망 개소수와 지점수의 변화를 쉽게 파악할 수 있다. 2001년부터 2008년까지 농업용수 수질측정망은 485개소와 487개 지점이었으며, 농업용호소 수질측정망은 7개소와 13개 지점이었으나, 2009년에 약 2배 증가하여 2010년

에 농업용수 수질측정망은 800개소와 805개 지점이었으며, 농업용호소 수질 측정망은 25개소와 62개 지점이었다.



<그림 3-13> 측정망종류별 측정망 분포 현황(연도별 옵션)

이상에서와 같이 측정망별 부메뉴에서는 농업용저수지 관리주체별, 연도별 농업용수 수질측정망과 농업용호소 수질측정망 개소수 및 지점수를 쉽게 파악 할 수 있는 자료를 표와 그래프 형태로 제공된다.

(2) 규모별

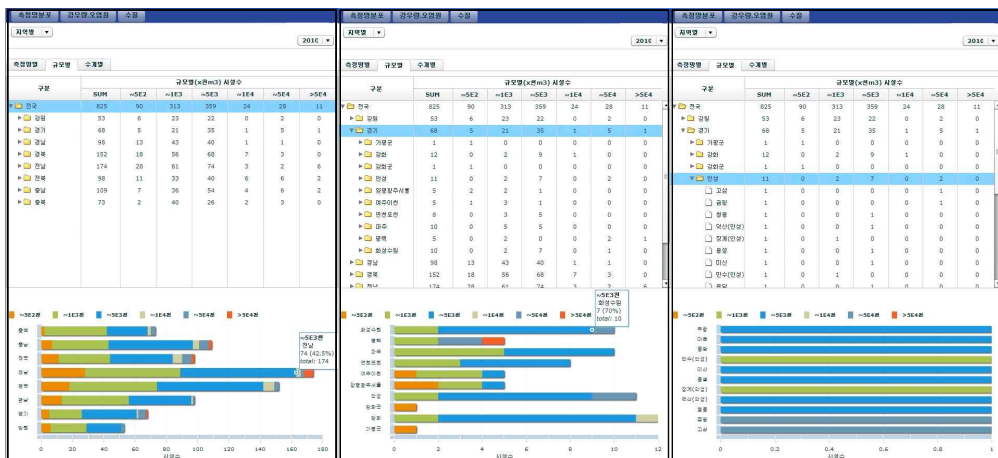
농업용저수지 중 수질측정망으로 지정되어 운영 중인 저수지의 규모별 분포 현황을 지역별(지역본부, 지사, 시군)과 연도별로 표와 그래프 형태로 제공된다. 규모는 500 천³이하, 500 천³ ~ 1,000 천³, 1,000 천³ ~ 5,000 천³, 5,000 천³ ~ 10,000 천³, 10,000 천³ ~ 50,000 천³, 50,000 천³ 초과와 같이 6단계로 구분하였다.

지점별 옵션을 선택할 경우 <그림 3-14>와 같이 지역본부별, 지사별, 저수지별로 규모별 시설수가 표와 그래프로 나타난다. <그림 3-14>의 좌측 그림에서 전국을 클릭할 경우 각 지역본부별 수질측정망 대상저수지의 규모별 시설수가 나타난다. 전국적으로 500 천³ ~ 1,000 천³와 1,000 천³ ~ 5,000 천³ 규모의 농업용저수지 수가 각각 313개소와 359개소로 전체의 약 81 %를 차지하는 것으로 나타났다. 2010년 전체 지역본부 중 전남지역본부에서 관리하는 농업용저수지 시설수가 174개소로 제일 많으며, 이중 1,000 천³ ~

5,000 천m³ 규모의 농업용저수지가 74개소(42.5%), 500 천m³ ~ 1000 천m³ 규모의 농업용저수지가 61개소(35.1%)로 높은 비율을 차지하였으며, 50,000 천m³를 초과하는 저수지도 6개소(3.4%)인 것으로 나타났다.

<그림 3-14>의 중앙 그림에서 경기지역본부 클릭할 경우 경기지역본부 관할 지역 내 지사 또는 시군에서 관리하는 농업용저수지 수질측정망 대상저수지의 규모별 분포가 나타난다. 강화군과 가평군에서 관리하는 수질측정망 대상저수지는 규모가 500 천m³ 이하의 소규모 저수지인 것으로 나타났다. 평택지사는 다른 지사와 달리 50,000 천m³ 이상의 큰 규모의 농업용저수지를 관리하고 있는 것을 알 수 있다.

<그림 3-14>의 우측 그림에서 안성지사를 클릭할 경우 안성지사에서 관리하는 측정망 대상저수지의 규모가 표와 그래프로 나타난다. 고삼저수지와 금광저수지가 10,000 천m³ ~ 50,000 천m³ 규모의 저수지이고, 만수저수지와 장계저수지는 500 천m³ ~ 1,000 천m³ 규모의 저수지이며, 나머지 저수지는 모두 1,000 천m³ ~ 5,000 천m³ 규모의 저수지임을 쉽게 알 수 있다.



<그림 3-14> 농업용저수지 규모별 분포 현황(지역별옵션)

연도별옵션을 선택할 경우 <그림 3-15>와 같이 선택한 지역본부 및 지사에 대해 연도별 농업용수 수질측정망 대상저수지의 규모별 분포변화를 쉽게 파악할 수 있다. 2008년까지 농업용저수지 수질측정망 대상 저수지수가 492개소를 유지하다가 2009년에 크게 증가하여 826개소가 운영되었는데, <그

림 3-15>를 보면 대부분 500 천m³이하와 500 천m³ ~ 1,000 천m³ 규모의 소규모 농업용저수지가 추가되었음을 알 수 있다.



<그림 3-15> 농업용저수지 규모별 분포 현황(연도별 옵션)

이상에서와 같이 규모별 부메뉴에서는 농업용저수지 수질측정망으로 지정된 저수지의 규모별 분포를 관리주체(지역본부, 지사 및 시군) 및 연도별 쉽게 파악 할 수 있는 자료를 표와 그래프 형태로 제공해 준다.

(3) 권역 및 수계별

농업용저수지 수질측정망으로 지정되어 운영 중인 저수지의 권역 및 수계별 분포 현황을 표와 그래프 형태로 제공된다. 농업용저수지 수질측정망 대상저수지를 5개의 권역(한강, 영산강, 섬진강, 낙동강, 금강)으로 분류하고 각각의 권역별 수계로 분류한 후 다시 중권역으로 분류하였다.

지역별 옵션을 선택할 경우 <그림 3-16>과 같이 대권역, 수계, 중권역별 개소수를 농업용저수지와 담수호로 구분하여 표와 그래프로 제공된다. <그림 3-16> 좌측 그림에서 전국을 클릭할 경우 각 대권역별 농업용저수지와 담수호의 개소수가 나타난다. 전국적으로 농업용저수지 수질측정망으로 지정되어 운영 중인 농업용저수지는 814개소, 담수호는 11개소 인 것으로 나타났다. 총 시설수는 낙동강권역이 247개소로 제일 많은 것으로 나타났으며, 다음으로 금강(193개소), 한강(170개소) 순으로 나타났다. 담수호는 금강권역이 5개소로 제일 많으며, 영산강(4개소), 한강(2개소) 순으로 나타났다.

<그림 3-16>의 중앙 그림에서 한강권역을 클릭할 경우 한강권역에 포함되는 수계별 농업용저수지와 담수호 개소수가 표와 그래프로 나타난다. 한강수계에 포함된 저수지가 110개소로 제일 많은 것으로 나타났으며, 한강동해수계가 16개소로 제일 적은 것으로 나타났다.

<그림 3-16>의 우측 그림에서 한강수계를 클릭할 경우 한강수계에 포함된 중권역별 저수지 수가 나타난다. 달천 중권역이 25개소로 제일 많은 것으로 나타났고, 다음으로 한강하류(18개소), 한탄강(17개소) 순으로 나타났다.



<그림 3-16> 측정망 대상저수지 수계별 분포 현황(지역별옵션)

연도별옵션을 선택할 경우 <그림 3-17>과 같이 연도별 농업용수 수질측정망 대상저수지의 수계별 분포변화를 쉽게 파악할 수 있다. 2007년까지 농업용저수지 수질측정망 대상 저수지가 492개소를 유지하다가 2009년에 크게 증가하여 826개소가 운영되었다. <그림 3-17>을 보면 2008년부터 낙동강수계 247개소, 금강수계 193개소, 한강수계 170개소, 섬진강수계 110개소, 영산강수계 105개소인 것을 확인할 수 있다.

이상에서와 같이 수계별 부메뉴에서는 농업용저수지 수질측정망으로 지정된 저수지의 수계별 분포를 쉽게 파악 할 수 있는 자료를 표와 그래프 형태로 제공한다.



<그림 3-17> 측정항 대상저수지 수계별 분포 현황(연도별읍선)

나. 강수량·오염원

강수량·오염원 메뉴는 수질측정항 대상 저수지의 강수량, 주요오염원 및 처리시설을 관리기관별, 연도별로 표와 그래프로 제공되는 메뉴로 3개의 부메뉴(강수량, 주요오염원, 처리시설)를 갖고 있다. 각각의 부메뉴에 의해 제공되는 자료는 다음과 같다.

(1) 강수량

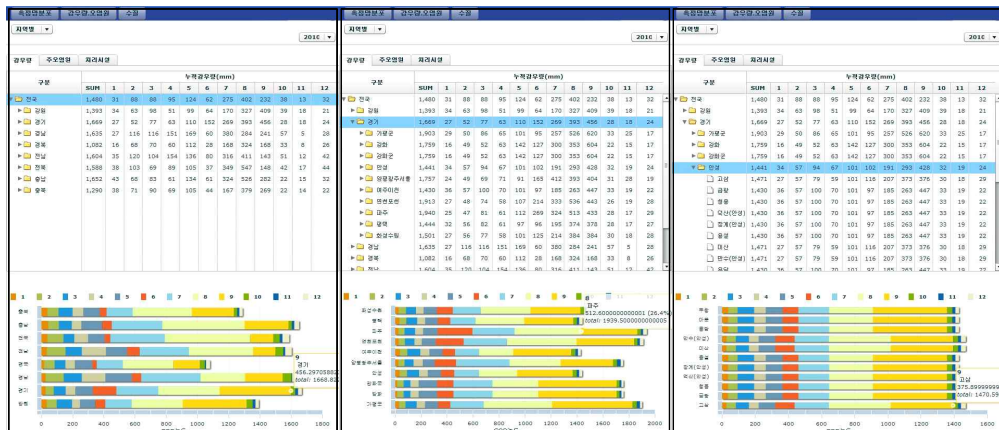
농업용저수지 수질측정항 대상저수지의 관할관측소 및 측후소의 정보를 이용해 각 농업용저수지에 내린 월별 강수량자료를 저수지별, 지사별, 지역본부별 평균값의 형태로 제공된다. 이때 제공되는 지사별, 지역본부별 평균 월간 누적 강수량은 기상청의 전국 또는 시·도별 평균값과 다를 수 있다. 그 이유는 기상청에서는 특정지역에 포함된 관측소의 정보를 평균하여 특정지역의 평균 강수량으로 제공하지만, 본 자료분석시스템에서는 농업용저수지에 내린 강수량을 평균하기 때문에 해당지역본부의 평균값이 농업용저수지가 많이 분포하는 지역의 평균값을 많이 반영하기 때문이다. 일반적으로 강수량과 저수지의 수질은 매우 밀접한 관계를 갖고 있으므로, 저수지의 수질을 관리하는데 저수지별, 지사별, 지역본부별 강수량은 매우 중요한 자료로 활용될 수 있다.

지점별 읍선을 선택할 경우 <그림 3-18>과 같이 지역본부별, 지사별, 저수지별 평균 월간 누적강수량 자료가 표와 그래프로 나타난다. 전국을 클릭할

경우 <그림 3-18>의 좌측 그림과 같이 각 지역본부별 평균 월간 누적강수량 자료가 나타난다. 농업용저수지에 내린 전국 평균 강수량은 1,480 mm이었으며, 경기지역본부가 관리하는 수질측정망 대상저수지에 내린 강수량이 1,669 mm로 제일 많았으며, 경북지역본부가 1,082 mm로 제일 적게 나타났다. 2010년 경기지역본부가 관리하는 수질측정망 대상저수지에 내린 강수량은 7월(269 mm), 8월(393 mm), 9월(456 mm)에 내린 강수량이 1년 동안 내린 총 강수량(1,669 mm)의 67 %를 차지하였다. 특히 경기지역본부와 강원지역본부의 경우 다른 지역본부와 달리 9월에 제일 많은 비가 내린 것으로 나타났다.

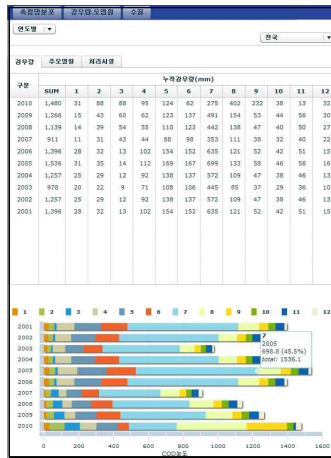
<그림 3-18>의 중앙 그림에서 한강권역을 클릭할 경우 경기지역본부 산하 지사 및 시·군에서 관리하는 농업용저수지에 내린 강수량자료가 표와 그래프로 나타난다. 경기지역본부 산하 지사 및 시·군 중 파주시에서 관리하는 수질측정망 대상저수지에 1,940 mm로 제일 많이 비가 내렸으며, 그 다음으로 연천포천(1,913 mm), 가평군(1,903 mm) 순으로 나타났다. 반면에 여주이천지사가 1,430 mm로 제일 적은 비가 내렸으며, 다음으로 안성지사(1,441 mm), 평택지사(1,444 mm) 순으로 나타났다.

안성지사를 클릭할 경우 <그림 3-18>의 우측 그림과 같이 안성지사에서 관리하는 농업용저수지별 강수량 자료가 표와 그래프로 나타난다. 만수, 미산, 고삼저수지가 1,471 mm로 제일 많은 비가 내린 것으로 나타났는데, 3개 저수지의 관할측후소는 모두 수원이다. 나머지 저수지들은 관할측후소가 이천으로 2010년에 모두 1,430 mm의 비가 내린 것으로 나타났다.



<그림 3-18> 측정망 대상지역 월간 누적강수량 분포 현황(지역별읍선)

연도별 옵션을 선택할 경우 <그림 3-19>와 같이 선택한 지역본부 및 지사에 대해 연도별 강수량변화를 쉽게 파악할 수 있다. 전국적으로 2005년에 1,536 mm로 제일 많은 비가 내렸으며, 그 다음으로 2010년(1,408 mm), 2006년(1,396 mm), 2001년(1,396 mm) 순으로 많은 비가 내린 것으로 나타났다. 반면에 2007년은 911 mm로 제일 적은 비가 내린 것으로 나타났다.



<그림 3-19> 측정망 대상지역 월간 누적강수량 분포 현황(연도별 옵션)

이상에서와 같이 강수량 부메뉴에서는 농업용저수지 수질측정망으로 지정된 저수지에 내린 강수량을 저수지별, 지사 및 시군별, 지역본부별로 쉽게 파악할 수 있도록 표와 그래프 형태로 제공해 농업용저수지 수질을 관리하는데 유용하다.

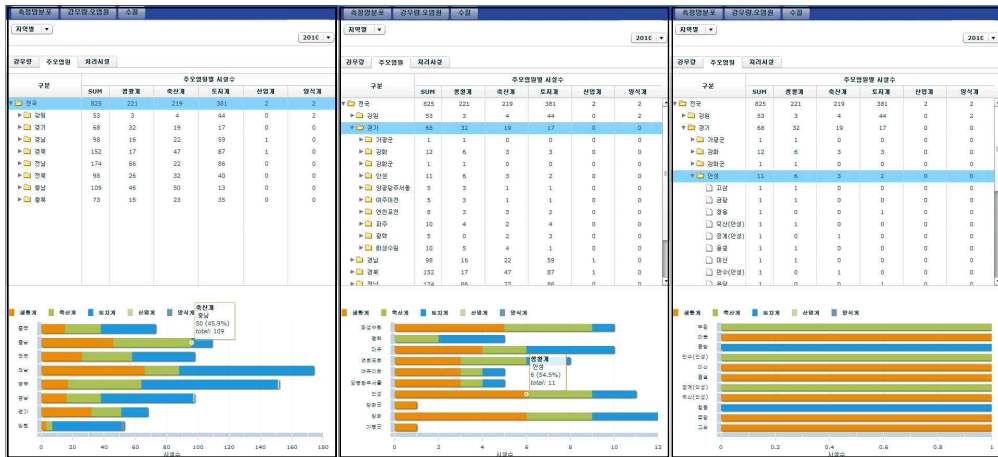
(2) 주요염원

농업용저수지 중 수질측정망으로 지정되어 운영 중인 저수지의 주요염원 현황을 지역별(지역본부, 지사, 시군)과 연도별로 표와 그래프 형태로 제공된다. 주요염원은 개별 저수지의 계별(생활계, 축산계, 토지계, 산업계, 양식계) 발생부하량 중 가장 많은 양을 차지하는 계를 해당 저수지의 주요염원으로 하였다. 일반적으로 외부 오염원이 적어 저수지의 수질이 좋은 경우에는 주로 토지계가 주요염원이고, 외부 부하가 많아 저수지 수질이 나쁜 경우에는 대부분 생활계 또는 축산계가 주요염원이다.

지점별 옵션을 선택할 경우 <그림 3-20>과 같이 지역본부별, 지사별, 저수지별로 규모별 시설수를 표와 그래프로 나타낸다. 전국적으로는 토지계가 주요오염원인 저수지의 개소수가 381개소로 제일 많으며, 그 다음으로 생활계(221개소), 축산계(219개소) 순으로 많은 것으로 나타났다. 전국을 클릭할 경우 <그림 3-20>의 좌측 그림과 같이 각 지역본부별 수질측정망 대상저수지의 주요오염원이 나타난다. 제일 오염도가 낮은 강원지역본부에서 관리하는 저수지의 경우 83%(44개소)가 토지계가 주요오염원인 것으로 나타난 반면, 오염도가 심한 경기 및 충남지역본부의 경우 토지계가 주요오염원인 저수지의 비율은 각각 11.9%(13개소), 25%(17개소)로 나타났다. 저수지의 오염도가 제일 심한 충남지역본부의 경우 축산계가 45.9%(50개소)로 제일 높게 나타났으며, 다음으로 생활계가 42.2%(46개소)로 높게 나타났다.

경기지역본부를 클릭할 경우 <그림 3-20>의 중앙 그림과 같이 경기지역본부 관할 지역 내 지사 또는 시군에서 관리하는 저수지의 주요오염원 분포가 나타난다. 안성지사가 생활계 주요오염원의 비율이 54.5%(6개소)로 제일 높게 나타났으며, 다음으로 화성수원지사(5개소), 강화지사(6개소)가 모두 50%로 높게 나타났다. 특히 화성수원지사의 경우 총 10개의 농업용저수지 중 1개소를 제외하고는 모두 생활계 또는 축산계가 주요오염원인 것으로 나타나 생활계와 축산계의 오염부하량을 감소시켜야 할 필요성이 있는 것으로 나타났다. 또한 강화군과 가평군에서 관리하는 저수지는 각각 1개소로 모두 생활계가 주요오염원인 것으로 나타났다.

안성지사를 클릭할 경우 <그림 3-20>의 우측 그림과 같이 안성지사에서 관리하는 측정망 대상저수지의 주요오염원이 표와 그래프로 나타난다. 안성지사에서 관리하는 11개소의 농업용저수지 중 생활계 주요오염원이 6개소, 축산계 주요오염원이 3개소, 토지계 주요오염원이 2개소로 나타났다. 특히 저수용량이 제일 많은 고삼저수지(15,217 천m³)는 주요오염원이 생활계이며, 2010년 COD농도가 16.2 mg/L로 제일 높은 농도를 나타냈던 만수저수지의 경우 주요오염원이 축산계인 것으로 나타났다. 안성지사의 경우 유역개발이 많이 이루어져 용담과 청용저수지를 제외하고는 모두 생활계 또는 축산계가 주요오염원인 것으로 나타났다.



<그림 3-20> 농업용저수지 주요염원 분포 현황(지역별읍선)

연도별읍선을 선택할 경우 <그림 3-21>과 같이 선택한 지역본부 및 지사에 대해 연도별 주요염원변화를 쉽게 파악할 수 있다. 전국적으로 2001년부터 생활계의 비율은 감소하는 반면, 축산계의 비율이 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 2009년과 2010년을 비교하면, 축산계는 24.7%에서 26.5%로 증가한 반면, 생활계와 토지계는 각각 28%→26.8%, 47%→46.2%로 소폭 감소한 것으로 나타났다.



<그림 3-21> 농업용저수지 주요염원 분포 현황(연도별읍선)

이상에서와 같이 주요염원 부메뉴에서는 농업용저수지 수질측정망으로 지정된 저수지의 주요염원 정보를 저수지별, 지사 및 시군별, 지역본부별로 쉽게 파악 할 수 있는 자료를 표와 그래프 형태로 제공해 농업용저수지 수질을 관리하는데 유용하게 이용될 수 있다.

(3) 수처리시설

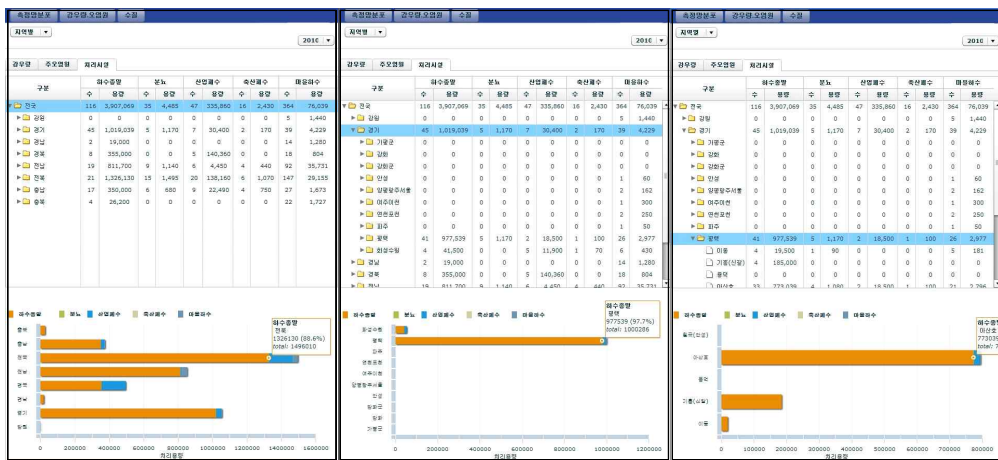
농업용저수지 중 수질측정망으로 지정되어 운영 중인 저수지의 처리시설 종류별 시설수 및 처리용량 현황을 지역별(지역본부, 지사, 시군)과 연도별로 표와 그래프 형태로 제공된다. 처리시설은 하수종말처리장, 분뇨처리장, 산업폐수처리장, 축산폐수처리장, 마을하수도로 구분하여 각 저수지별 시설수와 용량 자료를 제공한다.

지점별 옵션을 선택할 경우 <그림 3-22>와 같이 지역본부별, 지사별, 저수지별로 규모별 시설수를 표와 그래프로 나타낸다. 전국적으로는 하수종말처리장 116개소, 분뇨처리장 35개소, 산업폐수처리장 47개소, 축산폐수처리장 16개소, 마을하수도 364개소로 나타났으며, 처리용량은 하수종말처리장이 3,907,069 m³/일로 제일 많은 것으로 나타났으며, 산업폐수처리장(335,860 m³/일), 마을하수도(76,039 m³/일), 분뇨처리장(4,485 m³/일), 축산폐수처리장(2,430 m³/일)순으로 많은 것으로 나타났다. 전국을 클릭할 경우 <그림 3-22>의 좌측 그림과 같이 각 지역본부별 수질측정망 대상저수지의 처리시설 종류별 시설수와 처리용량이 나타낸다. 전북지역본부의 하수종말처리용량이 1,326,130 m³/일로 제일 많은 것으로 나타났으며, 다음으로 경기지역본부가 1,019,039 m³/일로 많은 것으로 나타났다. 하수종말처리장의 처리용량 비율이 약 80 % 이상으로 대부분의 오염물질을 하수종말처리장을 이용해 저감하고 있는 것으로 나타났다. 반면에 강원지역본부의 경우 마을하수도 5개소를 제외하고는 처리장이 없는 것으로 나타났다. 이는 앞서 강원지역본부가 생활계와 축산계의 주요염원의 비율이 13.2 %로 제일 낮았기 때문에 상대적으로 생활계와 축산계 부하량을 저감시키기 위한 처리시설이 제일 적었던 것으로 판단된다.

경기지역본부를 클릭할 경우 <그림 3-22>의 중앙 그림과 같이 경기지역본부 관할 지역 내 지사 또는 시군에서 관리하는 저수지의 처리시설 분포가 나타낸다. 평택과 화성수원지사를 제외하고는 모두 오염부하량을 저감시키

기 위해 마을하수도만을 적용하고 있는 것을 알 수 가 있다.

평택지사의 하수종말처리장 처리용량이 매우 높은 것으로 나타났는데, 평택지사를 클릭할 경우 <그림 3-22>의 우측 그림과 같이 평택지사에서 관리하는 측정망 대상저수지의 처리시설 자료가 표와 그래프로 나타난다. 아산호의 유역 내 33개의 하수종말처리장이 운영되고 있어 평택지사에서 관리하는 저수지에서 처리되는 오염물질의 용량 중 약 77%가 아산호 상류에 존재하는 하수종말처리장에서 처리하고 있다. 기흥저수지의 경우 인근에 아파트단지가 많이 조성되어 상대적으로 유역면적대비 처리되고 있는 용량이 매우 많은 것으로 나타났다.



<그림 3-22> 농업용저수지 수처리시설 분포 현황(지역별읍선)

연도별읍선을 선택할 경우 <그림 3-23>과 같이 선택한 지역본부 및 지사에 대해 연도별 수처리시설 변화를 쉽게 파악할 수 있다. 전국적으로 2001년부터 하수종말처리장의 처리용량이 지속적으로 증가하면서 2001년 하수종말처리장의 처리용량이 2,476,482 m³/일이던 것이 2010년에는 3,907,069 m³/일로 약 57.8% 증가하였다.

이상에서와 같이 처리시설 부메뉴에서는 농업용저수지 수질측정망으로 지정된 저수지의 수처리시설 정보를 저수지별, 지사 및 시군별, 지역본부별로 쉽게 파악 할 수 있는 자료를 표와 그래프 형태로 제공해 농업용저수지 수질을 관리하는데 유용하게 이용될 수 있다.



<그림 3-23> 농업용저수지 수처리시설 분포 현황(연도별읍선)

다. 수질현황

수질 메뉴는 농업용저수지 수질측정망 대상저수지에 대해 연 4회 실측한 수질자료를 이용해 저수지별, 지사별, 지역본부별 수질농도, 수질등급 및 영양상태를 제공하는 메뉴로 3개의 부메뉴(수질현황, 수질등급, 영양상태)를 갖고 있다. 각각의 부메뉴에 의해 제공되는 자료는 다음과 같다.

(1) 수질현황

농업용저수지 수질측정망 대상저수지에 대해 연 4회 실측한 수질자료를 이용해 저수지별, 지사별, 지역본부별 COD, T-N, T-P농도와 COD기준초과 시설수 및 비율을 표와 그래프 형태로 제공된다. 이때 제공되는 수질자료는 연 4회 실측한 수질자료를 연 평균한 값이다.

지점별 읍선을 선택할 경우 <그림 3-24>와 같이 선택한 연도에 대해 지역본부별, 지사별, 저수지별 연평균 COD, T-N, T-P농도와 COD기준초과 시설수 및 비율이 표와 그래프로 나타난다. 2010년 전국 수질측정망 대상저수지의 평균 COD, T-N, T-P의 농도는 각각 5.8 mg/L, 1.3 mg/L, 0.034 mg/L이고, COD기준초과 시설수는 122개소로 전체 수질측정망 대상저수지의 14.8 %에 해당된다.

전국을 클릭할 경우 <그림 3-24>의 좌측 그림과 같이 각 지역본부별 평균 수질 및 COD기준초과 시설수 및 비율이 나타난다. 2010년 지역본부별 연

평균 COD농도는 충남이 7.4 mg/L로 제일 높게 나타났으며, 경북(7.1 mg/L), 경기(6.6 mg/L) 순으로 높게 나타난 반면, 강원은 4.4 mg/L로 제일 낮은 COD 농도를 나타냈다. COD기준초과 비율 역시 충남이 29.4 %(32개소)로 제일 높게 나타났으며, 경북(28.3 %), 경기(22.1 %) 순으로 높게 나타났다. 반면 강원은 COD기준초과 비율이 1.9 %(1개소)로 제일 적게 나타났으며, 경남(3.1 %), 전북(7.1 %) 순으로 적게 나타났다.

경기지역본부를 클릭할 경우 <그림 3-24>의 중앙 그림과 같이 경기지역 본부 관할 지역 내 지사 또는 시군에서 관리하는 저수지의 연평균 COD, T-N, T-P농도와 COD기준초과 시설수 및 비율이 나타난다. 경기지역본부 내 지사 또는 시군 중에서 화성수원지사의 연평균 COD농도가 8.7 mg/L로 제일 높게 나타났으며, 여주이천지사(7.6 mg/L), 강화지사(7.4 mg/L) 순으로 높게 나타났다. COD기준초과비율 역시 화성수원지사(60 %), 여주이천지사(40 %), 강화지사(33.3 %)가 높게 나타났다. 경기지역본부에서는 위의 3개 지사가 관리하는 저수지에 대해 집중 수질관리를 실시해야 할 것으로 판단된다.



<그림 3-24> 농업용저수지 수질 분포 현황(지역별읍선)

안성지사를 클릭할 경우 <그림 3-24>의 우측 그림과 같이 안성지사에서 관리하는 측정망 대상저수지의 연평균 수질 및 COD기준초과 시설수가 나타난다. 안성지사에서 관리하는 11개의 수질측정망 대상저수지 중 만수저수지가 2010년 연평균 COD농도가 16.2 mg/L로 제일 높게 나타나 안성지사에서

제일 집중적으로 수질을 관리해야 하는 대상 저수지로 나타났다. 만수저수지를 제외하고는 안성지사에서 관리하는 수질측정망 대상저수지 모두 4등급을 만족하는 것으로 나타났다.

연도별 옵션을 선택할 경우 <그림 3-25>와 같이 선택한 지역본부 및 지사에 대해 연도별 수질농도 변화를 쉽게 파악할 수 있다. 본격적으로 수질측정망을 지정하여 운영한 2001년부터 연도별 수질변화를 살펴보면 2003년과 2005년이 COD농도 5.4 mg/L로 낮은 농도를 유지하다가 2009년까지 지속적으로 증가한 후 2010년에 큰 폭으로 감소하였다. 수질은 다른 항목에 비해 연도별 변화폭이 크게 나타났다. 연도별 경기지역본부에서 관리하는 수질측정망 대상저수지의 수질변화는 <그림 3-25>의 중앙 그림과 같다. 전국적인 경향과 비슷하게 2003년에 제일 낮은 농도를 나타내다가 2009년까지 조금씩 증가한 후 2010년에 큰 폭으로 감소하였다. 특히 2007년에 일시적으로 COD농도가 큰 폭으로 증가하였는데, 이는 2007년의 연평균 강수량이 최근 10년 중 제일 적었던 것과 상관이 있을 것으로 판단된다. 안성지사에서 관리하는 11개 저수지의 연평균 수질변화를 살펴보면 2003년 COD농도가 제일 낮았던 것을 제외하고는 2010년까지 지속적으로 농도가 증가하였다. 특히, 다른 지역에서는 2010년에 큰 폭으로 농도가 감소한 반면, 안성지사의 경우 오히려 2010년에 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 안성지사에서 관리하는 저수지 중 오염도가 제일 심한 만수저수지의 경우 2008년에 COD농도가 제일 낮게 나타났으며, 2010년에 높게 나타났다.



<그림 3-25> 농업용저수지 수질현황(연도별옵션)

이상에서와 같이 수질현황 부메뉴에서는 농업용저수지 수질측정망으로 지정된 저수지의 수질자료를 관리주체별(저수지별, 지사별, 지역본부별), 연도별로 쉽게 파악 할 수 있는 자료를 표와 그래프 형태로 제공해 농업용저수지 수질을 관리하는데 유용하게 이용될 수 있다.

(2) 수질등급

농업용저수지 수질측정망 대상저수지에 대해 연 4회 실측한 수질자료를 이용해 저수지별, 지사별, 지역본부별 COD기준 수질등급별 시설수와 수질기준 달성율을 표와 그래프 형태로 제공된다. 이때 제공되는 수질등급은 연평균 COD농도를 기준으로 분류한 수질등급이다.

지점별 옵션을 선택할 경우 <그림 3-26>과 같이 선택한 연도에 대해 지역본부별, 지사별, 저수지별 COD기준 수질등급별 시설수와 수질기준 달성율이 나타난다. 전국적으로 IV등급(310개소, 38 %)이 제일 많은 것으로 나타났으며, III등급(169개소, 21 %), II등급(162개소, 20 %) 순으로 많은 것으로 나타났다. 또한 수질기준 달성율은 85.2 %로 나타났다.

전국을 클릭할 경우 <그림 3-26>의 좌측 그림과 같이 각 지역본부별로 수질등급별 시설수 및 달성율이 나타난다. 수질기준 달성율(농업용수기준)이 제일 낮은 충남지역본부의 경우 IV등급(44개소, 40 %)이 제일 많은 것으로 나타났으며, VI등급(24개소, 22 %), III등급(22개소, 20.2 %) 순으로 많은 것으로 나타났다. 강원지역본부의 경우 1개소만 V등급으로 분류되었으며, 그 외 모든 수질측정망 대상저수지가 IV등급 이하로 나타났다.

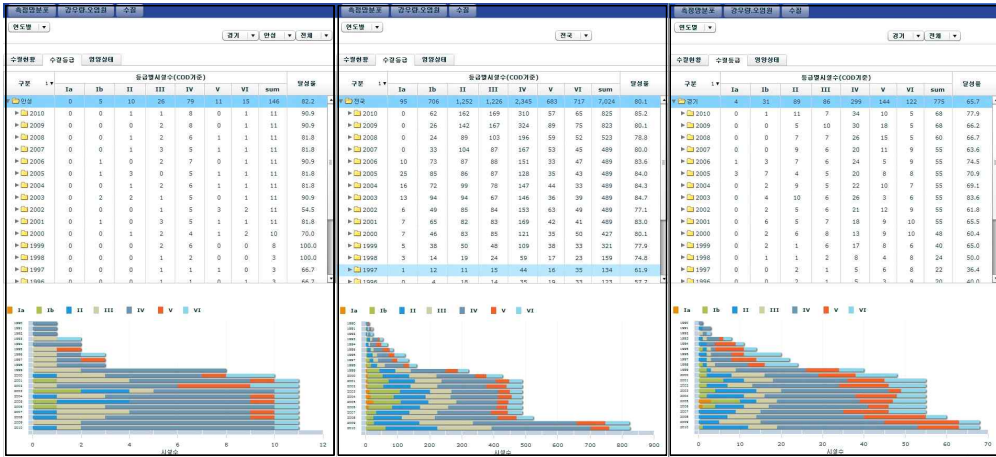
경기지역본부를 클릭할 경우 <그림 3-26>의 중앙 그림과 같이 경기지역본부 관할 지역 내 지사 또는 시군에서 관리하는 저수지의 COD기준 수질등급별 시설수와 달성율이 나타난다. 수질기준 달성율이 제일 낮은 화성수원지사의 경우 IV등급(4개소, 40 %), V등급(4개소, 40 %), VI등급(2개소, 20 %)로 나타났다. 특히 여주이천지사가 6개의 농업용저수지 중 2개의 저수지가 VI등급으로 분류되어 VI등급 비율이 40 %로 제일 높게 나타났다.

안성지사를 클릭할 경우 <그림 3-26>의 우측 그림과 같이 안성지사에서 관리하는 측정망 대상저수지의 COD기준 수질등급이 나타난다. 안성지사에서 관리하는 11개의 수질측정망 대상저수지 중 만수저수지가 VI등급으로 제일 높게 나타났고, 미산저수지가 II등급, 청용저수지가 III등급으로 나타났으며, 나머지 8개 저수지는 모두 IV등급으로 나타났다.



<그림 3-26> 농업용저수지 수질등급 분포 현황(지역별읍선)

연도별읍선을 선택할 경우 <그림 3-27>과 같이 선택한 지역본부 및 지사에 대해 연도별 수질등급 변화를 쉽게 파악할 수 있다. 본격적으로 수질측정망을 지정하여 운영한 2001년부터 연도별 수질등급변화를 살펴보면 Ib등급의 시설수가 지속적으로 감소하는 반면, IV등급의 시설수는 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 측정망 대상저수지 시설수가 비슷한 2009년과 2010년을 비교하면, Ib등급 시설수가 26개소에서 62개소로 크게 증가한 반면, V등급 시설수는 89개소에서 57개소로, VI등급 시설수는 75개소에서 65개소로 감소하였다. 연도별 경기지역본부에서 관리하는 수질측정망 대상저수지의 수질등급별 시설수는 <그림 3-27>의 중앙 그림과 같다. 2009년에 비해 2010년에는 II등급 시설수가 5개소에서 11개소로 크게 증가하였으며, V등급 시설수가 18개소에서 10개소로 큰 폭으로 감소하였다. 안성지사에서 관리하는 저수지 수질측정망 대상저수지는 2001년부터 2010년까지 11개의 시설이 수질측정망대상저수지로 지정되어 운영되어오고 있으며, 2002년에 V등급과 VI등급이 각각 3개소(27.3 %)와 2개소(18.2 %)로 수질기준 달성율이 제일 낮게 나타난 반면, 2003, 2006, 2009, 2010년에는 90.9 %로 높게 나타났다. 특히 시간이 경과하면서 III등급 이하의 시설수가 감소하는 반면, IV등급 시설수는 크게 증가하였다. 안성지사에서 관리하는 저수지 중 만수저수지는 2000년부터 계속 VI등급을 유지한 반면, 고삼저수지는 1995, 2005, 2007년에 V등급, 2008, 2009년에 III등급, 그 외에는 모두 VI등급을 유지하였다.



<그림 3-27> 농업용저수지 수질등급 분포 현황(연도별옵션)

이상에서와 같이 수질등급 부메뉴에서는 농업용저수지 수질측정망으로 지정된 저수지의 수질등급별 시설수를 관리주체별(저수지별, 지사별, 지역본부별), 연도별로 쉽게 파악 할 수 있는 자료를 표와 그래프 형태로 제공한다.

(3) 영양상태

농업용저수지 수질측정망 대상저수지에 대해 연 4회 실측한 수질자료를 이용해 저수지별, 지사별, 지역본부별 영양상태를 극빈영양, 빈중영양, 중영양, 중부영양, 부영양으로 분류하여 표와 그래프 형태로 제공된다. 이때 제공되는 영양상태는 연평균 수질농도를 기준으로 분류한 영양상태이다.

지점별 옵션을 선택할 경우 <그림 3-28>과 같이 선택한 연도에 대해 지역본부별, 지사별, 저수지별 영양상태별 시설수가 나타난다. 전국적으로 중영양이 479개소(58%)로 제일 많은 것으로 나타났으며, 중부영양(224개소) 빈중영양(81개소)순으로 많은 것으로 나타났다.

전국을 클릭할 경우 <그림 3-28>의 좌측 그림과 같이 각 지역본부별로 영양상태별 시설수가 나타난다. COD농도가 제일 높게 나타난 충남지역본부의 경우 중부영양과 부영양이 차지하는 비율이 전체의 각각 68%로 제일 높게 나타났으며, 강원지역본부가 중부영양 이상인 저수지 비율이 3.8%로 제일 낮은 것으로 나타났다.

경기지역본부를 클릭할 경우 <그림 3-28>의 중앙 그림과 같이 경기지역

본부 관할 지역 내 지사 또는 시군에서 관리하는 저수지의 영양상태별 시설 수가 나타난다. 중부영양과 부영양인 저수지의 비율이 80 %로 제일 높게 나타났다으며, 파주시사(6개소, 60 %), 양평광주서울지사(3개소, 60 %)로 높게 나타났다.

안성지사를 클릭할 경우 <그림 3-28>의 우측 그림과 같이 안성지사에서 관리하는 측정망 대상저수지의 영양상태별 시설수가 나타난다. 안성지사에서 관리하는 11개의 수질측정망 대상저수지 중 만수저수지와 고삼저수지가 부영양으로 나타나고, 용담저수지가 중부영양, 그리고 나머지 8개 저수지가 중영양인 것으로 나타났다.

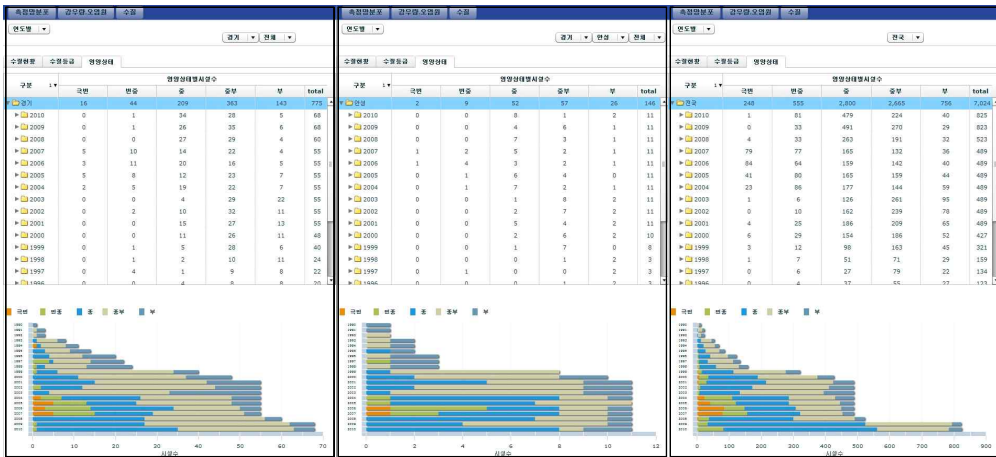


<그림 3-28> 농업용저수지 영양상태 분포 현황(지역별옵션)

연도별옵션을 선택할 경우 <그림 3-29>와 같이 선택한 지역본부 및 지사에 대해 연도별 영양상태 변화를 쉽게 파악할 수 있다. 본격적으로 수질측정망을 지정하여 운영한 2001년부터 연도별 영양상태변화를 살펴보면 중부영양 및 부영양상태의 저수지 시설수가 점차 감소하는 것으로 나타났다. 측정망 대상저수지 시설수가 비슷한 2009년과 2010년을 비교하면, 빈중영양상태는 4 %에서 9.8 %로 증가한 반면, 중부영양은 32.8 %에서 27.2 %로 감소하였다.

연도별 경기지역본부에서 관리하는 수질측정망 대상저수지의 영양상태별 시설수는 <그림 3-29>의 중앙 그림과 같다. 2003년에 중부영양과 부영양

상태인 저수지 비율이 경기지역본부에서 관리하는 측정망 대상저수지의 92.7 %인 것으로 나타났으나, 시간이 경과하면서 중부영양과 부영양상태의 저수지 비율이 크게 감소하였다. 2009년과 비교하여 2010년에는 중부영양비율이 51.5 %에서 41.2 %로 크게 감소하였다. 안성지사에서 관리하는 저수지 수질측정망 대상저수지는 2001년부터 2010년까지 11개의 시설이 수질측정망 대상저수지로 지정되어 운영되어오고 있으며, 2003년에 중부영양 및 부영양상태의 시설수가 10개소(91 %)로 제일 높은 비율을 차지하였다. 반면에 2010년에는 수질이 많이 개선되어 중부영양 및 부영양상태의 저수지 비율이 27.3 %로 크게 감소하였다.



<그림 3-29> 농업용저수지 영양상태 분포 현황(연도별읍선)

이상에서와 같이 영양상태 부메뉴에서는 농업용저수지 수질측정망으로 지정된 저수지의 영양상태별 시설수를 관리주체별(저수지별, 지사별, 지역본부별), 연도별로 쉽게 파악 할 수 있는 자료를 표와 그래프 형태로 제공해 저수지 수질관리에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

4장 농업용저수지 수질지수 개발

4장 농업용저수지 수질지수 개발

1절 국내외 수질지수 연구 사례

1. 수질지수의 정의 및 분류(최지용, 1996)

지표를 일반적으로 정의하면, “현상에 관한 기존의 자료를 정량적으로 평가하기위한 척도” 라고 할 수 있다. 지표 작성 시 현상의 범위설정방법, 기존자료의 양, 어느 정도까지 정량화 할 것인지, 평가주체는 누구인지에 따라 지표의 역할이 크게 좌우되지만 복잡한 자료를 가능한 한 이해하기 쉽게 변환시키는 것이 지표의 가장 중요한 역할이라고 할 수 있다. 환경지표는 일반적인 물리적 환경상태를 나타낼 것인지, 또는 경제 사회적 환경상태를 나타낼 것인지에 따라 여러 가지 표현방법이 있을 수 있지만, 모두가 기존의 다양한 각 항목별 환경상태를 종합하여 하나의 숫자로 계량화하여 환경상태의 좋고 나쁨을 판단하는 기준을 제시하는 것이라 할 수 있다.

지표를 이용한 수질구분에 대한 최초의 시도는 독일에서 1848년 수중미생물의 수와 물의 청정도를 연결하는 연구를 수행함으로써 시작되었다. 오늘날까지 대부분의 유럽 국가들은 수질을 분류하기 위해 생물지표를 이용해 왔으나 이들 분류시스템은 수질을 나타내기 위해 구체적인 수치적 기준을 제시하기보다는 여러 가지 생물지표를 이용해 수체의 오염수준을 분류한 것이다. 수질의 악화정도를 표현하기 위해 수치적인 범위를 사용한 경우에는 1964년에 소련에서 최초로 사용된 GI(Generalized Index)가 있고 이듬해인 1965년에 미국에서 Horton's Index가 개발됨으로서 본격적으로 시작되었다. 이때까지 개발된 수질지표는 다음 표와 같이 물리-화학적 수질 측정치를 그대로 이용한 단일항목지표와 이들 측정치를 일정한 원칙에 의해 종합화한 종합수질지표 및 수중생물을 이용한 생태지표로 대별할 수 있다.

가. 단일항목 지표

단일항목지표는 BOD, COD와 같이 대표적인 단일항목으로 수질을 평가하기 때문에 수질상황을 충분히 반영하지 못하는 어려움이 있으나, 적용의 용이성으로 인해 아직까지 상당한 국가들이 공식적인 수질평가 방법으로 단일지표를 사용하고 있다. 그러나 미국을 중심으로 한 일부 국가에서는 단일항목 평가의 불확실성으로 인해 종합수질지표 개발을 70년대 이후부터 활발히 추진한 바 있다.

(표 4-1) 수질지표의 분류

수질지표	구체적 지표
단일항목지표	BOD, COD 등 단일항목으로 수질평가
종합수질지표	일반적인 수질지수(General Water Quality Indices) 특별용도를 위한 수질지수(Specific-Use Indices) 계획지수(Planning Indices)
생태계 평가지표	IEPA/DOC 생물학적 하천의 특성(BSC) FISH/Index of Biotic Integrity(IB/AIBI) BENTHOS/Macroinvertebrate BioticIndex(MBI) STREAM Potential Index of HABITAT/BioticIntegrity (PIBI) STREAM IEPA Stream Sediment SEDIMENT/Classification

나. 종합수질지표

(1) 일반수질지표(General Water Quality Indices)

물은 생활용수, 관개수, 위락용수, 그리고 물고기와 야생동물의 서식처의 유지수 등 다양한 용도로 사용된다. 이와 같은 용도에 따라 수질기준도 다양하며 이러한 용도를 모두 고려한 수질수준을 하나의 지수로 표현한 것을 “일반수질지표(GI)”라고 한다. 일반수질용도를 위한 지수로 Horton이 1965년에 현대적인 수질 지표를 제안하였고, 수질지표를 수질관련사업의 평가와 수질정보를 공공에 알리는 도구로 사용하였다. 이전의 수질오염도에 대한 단위항목별 분류의 단점으로는 일정 농도이상 또는 이하로 구분함으로써 농도사이에 단절이 생기고, 기관마다 분류기준이 상이하며, 객관적 타당성 미비 및 농도기준간의 융통성 부재가 문제로 지적되었다. 이러한 문제를 피하기 위해, Horton은 상대적인 기초위에서 서로 비교할 수 있는 수질지표 시스템을 개발하였다.

Horton 이후에 일반수질지표에 대한 개발이 활성화되어 미국의 National Sanitation Foundation의 Water Quality Index, Prati의 Implicit Pollution Index, McDuffie의 River Pollution Index, Dinius의 Social Accounting System 등의 지표가 개발되었다. 이 중에서도 1970년에 Brown, McClelland, Deininger, Tozer 등은 Horton의 지수와 유사한 구조의 수질지표를 제시하였는데 이 연구는 National Sanitation Foundation(NSF)에 의해 지원되었기 때문에

NSFWQI(National Sanitation Foundation Water Quality Index)로 알려졌다. NSFWQI는 미국전역의 수질전문가 상당수의 의견을 조합하기 위해 Delphi 기법을 사용하여 주관적인 판단을 최소화하려고 시도하였다. 1971년에는 Prati, Pavanello, Pesarin 등이 많은 나라에서 사용되는 수질분류시스템에 기초하여 여러 국가에서 일반적으로 적용할 수 있는 수질지표를 개발하였다. 또한 1973년에, McDuffie와 Haney는 River Pollution Index(RPI)라고 부르는 비교적 간단한 수질지표를 제시했다. 이후 오리건주, 워싱턴 주를 포함한 여러 곳에서 NSFWQI를 바탕으로 종합수질지표를 개발 직접 사용하고 있다.

(2) 용도별 수질지표(Specific-Use Indices)

일반적인 수질의 개념을 수용하지 않는 수질전문가들은 수질지표가 각각의 특별한 물이용도에 맞추어 만들어져야 한다고 제안하였다. 대표적인 용도별 지표로는 물고기와 야생동물, 공공용수공급을 위한 O'Connor지수, 공공용수공급을 위한 Deininger와 Landwehr의 PWS(Public Water Supply)지수, 위락용수를 위한 Walski와 Parker지수, 공공용수공급, 관개용수를 위한 Stoner의 지수, 위락용수를 위한 Nemerow and Sumitomo의 지수 등이 있다. 이들 특별용도지수는 그 구조와 모양이 일반수질지표와 특별하게 차이가 없다.

(3) 계획지수(Planning Indices)

수질지표의 또 다른 형태는 “계획지수”로 수질관리를 위해 특별히 설계된 것이다. 일반적 수질지표 및 용도별 지표와는 달리, 이들 지표는 현 수질 상황을 설명하는데 그치지 않고 사용자가 특별한 문제를 해결하는데 있어 도움이 될 수 있도록 작성한 것이다. 계획지수는 정기적으로 측정되는 수질 오염항목 뿐만 아니라 이외의 수질에 영향을 끼치는 여러 항목들로 구성된다.

(4) 통계적 지표(Statistical Approaches)

상당수의 통계적 접근도 수질자료의 평가방법으로 제안되어 왔다. 통계적 접근방법은 문헌상 이미 사용되고 있는 통계기법을 사용하며, 다른 기법보다 주관적 가정이 적은 장점을 가지나, 복잡하고 적용에 어려움이 있다.

통계적 접근의 한 방법은 상호관계도출을 위한 인자분석을 실시하여 수질악화에 대한 항목간의 상호 중요도를 파악하는 것이다. 미국 네바다 주에서는 Carson계곡으로부터 얻은 수질자료를 이용해 수질지표를 개발하기 위해 10개의 항목에 대해 인자분석을 실시하였고 상관관계를 이용해 여분의 항목들을 제외시키면서 5개 항목(DO, BOD₅, T-P, 온도, 전도도)을 선정하여 지표를 만들었다. 가까운 일본과 태국의 경우도 이와 비슷한 방법으로 수질지표를 작성한 바 있으나 앞에서 제시한 약점 때문에 널리 이용되지는 않는 방법이다.

다. 생태계 평가지표

생태계 평가지표의 초기형태인 생물학적 수질지표는 1800년대 후반에 시작되었으나 1900년대 물리·화학적 분석기술의 발달로 크게 각광받지 못하다가 1980년 이후 미국을 중심으로 다시 주요수질지표로서 활발히 연구되고 있다. 수생태계에 바탕을 둔 평가기법은 장기간의 방대한 자료의 축적이 있어야 가능하므로 대부분의 국가에서 널리 적용하지는 못하고 있다. 생태계 평가지표는 일반적으로 수질상태에 따른 수중생물에 미치는 영향정도를 평가하는데, 여기에는 세 가지의 기본적인 접근방법이 있다.

첫 번째 접근방법은 지표유기체의 종류와 수에 기초하는 방법으로 saprobic분류시스템과 같이 하천을 유기체의 존재형태에 따라 하천을 오염영역으로 구분하는 방법과 fecal coliform과 같이 온혈동물의 내장에 기생하는 지표유기체의 존재를 이용한 분변물질에 의한 오염정도로 이용하는 경우가 여기에 속한다. 두 번째의 접근방법은 유기체의 생물학적 군집에서 종의 분산을 수학적 분석에 의해 평가하는 방법이며, 세 번째 접근방법은 오염에 대한 특정유기체의 생리적 또는 행동반응을 이용한 것이다. 예를 들면, 살충제는 물고기의 뇌에서 혈압강하효소와 같은 작용을 함으로 물고기 뇌의 혈압강하효소의 활동을 분석해 살충제 오염의 모니터로서 사용하는 경우이다. 또 독성물질에 대한 반응으로 물고기의 활동이나 움직임이 증가하는 등의 일부 종의 행동변화를 평가해 수질오염의 지표로서 이용하는 경우도 여기에 속한다.

생태학적 지표는 오염을 종합적으로 평가할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 물고기와 기타 유기체들은 물의 오염상황에 따라 반응하므로 일부

독성물질이 일시적으로 배출되어 정규적인 수질측정에서는 검출되지 않았다 하더라도, 수중유기체 평가를 통해 이들 오염물질의 영향 유무를 파악할 수 있다. 이와 같이 유기체의 생태적 상황을 분석함으로써 통상의 물리-화학적 측정에 의한 평가보다는 다양한 환경변화를 평가할 수 있으며 이는 수생생물이 수많은 물리적, 화학적, 생물학적 수질 항목들에 총체적으로 반응하기 때문이다.

2. 국내 수질지표 개발 사례

가. K-WQI(최지용, 1996)

1996년 한국환경기술개발원(현 한국환경정책평가연구원)에 의해서 한국형 종합수질지표인 Korea Water Quality Index(K-WQI)가 개발되었다. K-WQI는 항목 선정, 항목별·용도별 가중치 설정, 부지수 함수 작성, 항목의 종합화를 거쳐 개발되었다.

(1) 항목의 선정

먼저 항목의 선정으로는 수질측정 항목 중 우선 pH, DO, BOD, COD, SS, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P, 수온, 페놀류, 전기전도도, T-Coli.의 13가지 항목을 도출하였다. 이후 수질전문가의 의견을 이끌어 내기 위해 전문가 설문단 30인을 구성하여 Delphi기법을 이용해 설문을 실시하여 최종 선정 항목으로 수온, 페놀류, 전기전도도를 제외한 pH, DO, BOD, COD, SS, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P, T_Coli의 10개 항목을 종합수질지표의 구성항목으로 선정하였다.

(2) 항목별·용도별 가중치 산정

종합수질지표에 사용된 각 항목의 중요도에 따라 각 수질항목별 가중치를 주어야 하며, 가중치는 물이용 용도, 수질항목의 기여도, 각 지역의 특성에 따라 다양하다. 가중치를 구하기 위한 방법으로는 보편적 객관성의 확보를 위해 설문조사 방법을 택하였고, 설문조사내용이 일반인을 대상으로 하기에는 이해에 어려움이 있을 것으로 사료되어 설문인단을 전문가로 제한하였다. 또한 전문가들 간에도 의견의 차이가 많을 것으로 사료되어 Delphi법을 이용하여 3차에 걸쳐 같은 내용에 대해 의견수렴을 위한 수정이 가능하

도록 유도하였다. 가중치는 3차의 설문결과를 바탕으로 DO, BOD 등의 수질 항목과 생활용수, 공업용수 등의 용수이용별로 산정하였다.

(3) 부지수함수의 작성

부지수함수의 작성은 항목 선정 후 측정단위가 다른 각 항목을 공통 가치량으로 변화시켜 각 항목들을 동일한 기준점에서 비교하기 위한 공동척도화단계이다. 각 항목별로 측정된 자료는 개별항목의 평가를 행하고자 하는 경우에는 기준을 적절하게 설정하여 그 기준 이상은 “좋음”, 이하에 있는 것은 “나쁨”으로 평가하는 것이 가능하다. 그러나 개별의 일차지표의 평가에서 복수의 항목을 이용해 종합적으로 평가 하는 경우에는 고도의 가공이 필요하다. 공통단위로 환산(척도화 scaling)하는 방법은 기존의 가치기준에서 공동척도에 투영한 상대비교에 의해 무차원화 한 「지수화」와 가치기준을 도입해 가치척도에 따라 변화하는 「함수화」의 두 가지 방법이 있다. 지수화의 방법은 측정 단위가 다른 복수지표를 공통 가치량으로 수치를 변환하여 비교하는 방법으로 기준시점 또는 기준지점에 대한 비율로 나타내는 방법으로 시계 열적 변화를 보이는 경우는 기준점을 결정해 기준점을 100으로 하여 시계열지수로 나타낸다. 함수화 방법은 종합수질 지표에서의 부지수 함수가 이 방법에 속한다 할 수 있다.

(4) 수질지표 배점구분

본 설문에서는 우리나라의 수질환경기준과 우리나라 국민의 점수에 대한 일반적 사고수준을 참고로 하여 작성한 배점 구분표를 각 전문가에게 참고로 제시하였다. 점수구분은 누구나 잘 이해할 수 있는 범위를 제시하기 위해 60점 이상은 양호(보통 합격), 40점 이하는 불량(과락)의 의미가 전달되도록 구분을 하였다.

(표 4-2) K-WQI에서의 수질지표 배점구분

점수범위	수 질	잠재적인 물이용도
91-100	원시 자연수에 근접	음용수와 일부 공업·농업용수로 사용할 때 소독하는 것을 제외하고 모든 용도에 처리 없이 사용가능
81 ~90	매우 좋음	음용용도와 공업용수로 사용할 때에만 최소한의 처리*)가 필요하고 모든 종의 물고기와 야생동물의 서식에 적합하며 모든 용도에 사용할 수 있음
71-80	좋음	음용수로 사용하려면 처리비용이 조금 증가하는 수체로 물고기종과 야생동물의 종에는 영향을 미치지 않고 대부분의 용도에 적합한 수체
61~70	보통	음용수로 사용하려면 표준처리**)가 필요하고 물고기종과 야생동물의 종에 변화가 있으며 공업용수와 위락 등의 이용에 제한 없음
51 ~60	약간 오염	일부공업용수로 사용할 때에도 처리가 필요한 수체로 오염에 민감한 물고기의 생존이 의심스러우며 가시적인 오염현상이 나타나기 시작한다. 위락용수에는 적합하나 직접적인 접촉을 하는 스포츠 ^(a) 에는 부적합
41 ~50	중간정 도의 오염	음용수와 대부분의 공업·농업용수로 사용하려면 고도처리***)가 필요하다. 간접적 접촉용도의 위락용수 ^(b) 로만 사용이 가능하고 물고기가 드물게 관찰되며 오염에 내성이 있는 물고기 종만 생존
~ 40	심한 오염	음용용수로는 부적합하고 고도처리를 한 후에도 처리수질과 상관없는 공업용수와 내성이 있는 작물의 농업용수로만 사용 가능. 오염에 내성이 강한 물고기 종만이 생존가능하고 접촉이 없는 위락용수 ^(c) 와 항해에만 사용가능
<p>주 *) 최소한의 처리 : 간단한 물리적 처리와 소독 **) 표준처리 : 일반적인 물리처리, 화학처리 & 소독 ***) 고도처리 : 고도의 물리적 화학적 생물학적 처리 (a) 직접접촉운동 : 수영과 수상스키 (b) 간접접촉용도 : 낚시, 보트놀이 (c) 비접촉용도 : 미적, 경치, 소풍, 산책 등</p>		

나. 물환경종합평가방법 개발 조사(최지용, 2004~2006)

(1) 종합수질지표

상기 연구는 1996년에 개발된 K-WQI를 모태로, 기존 K-WQI가 지녔던 문제점과 한계를 보완하고, 10여 년간 변화한 국내 실정을 반영하여 새로 도입될 환경정책기본법 개정안 하에 실용화될 수 있는 종합수질지표를 개발하는데 목적을 두었다. 이를 위해 각국 종합수질지표의 이용 실태를 살폈으며 이 중 유럽의 SEQ와 캐나다 CCME에서 개발한 종합지표, 오리건 주의 종합지표를 벤치마킹하여 2가지 종합수질지표(제1안 K-CWQI, 제2안 K-SWQI)안을 제시하였다. 새로운 종합수질지표는 다음의 점에서 K-WQI의 한계를 보완하였다.

기존 지표는 사람의 건강기준을 반영하지 못했으며, 생물학적 기준을 용도 중 하나로 반영하였다. 그러나 새로운 지표에서는 사람의 건강기준을 반영하였으며, 생물분야에서는 저서형 대형무척추동물, 부착조류, 어류에 대한 연구를 진행하여 각 생물군 수질지수를 중심으로 각 지표를 이화학적 종합지표의 단위와 동일하게 부지수형태로 나타낼 수 있었다. 이를 하나의 값을 도출하지는 않았으나 프랑스의 SEQ의 방법에 입각해 가장 낮은 값을 중심으로 최종 값을 결정한다는 원칙을 제시하였다.

(가) 제 1안 K-CWQI

기존 지표의 경우, Delphi 기법에만 전적으로 의존하여 각 부지수합수를 도출하였다. 그러나 전문가의 의견으로 적합도를 수치화할 때, 특히 용도가 변수로 들어 갈 때는 주관성이 강해져 위험할 수 있다. 따라서 오리건 주처럼 지역특성을 고려한 지역맞춤형 부지수합수를 도출할 필요가 있다. 새로운 지표에서는 설문 시 최근 6년 간 전국의 실측자료 빈도를 제시함으로써 전문가의 객관적인 판단을 돕고, 각 문항 마다 근거를 제시하여 최대한 국내 실정에 적합하며 과학적 근거가 뒷받침되는 부지수합수를 도출하였다.

부지수합수에서 기존 지표는 범위를 벗어날 때, 무조건 0으로 떨어지는 오류가 있었다. 즉, 한 항목이라도 0점 처리되면 전체 종합지표 값은 기타 항목의 수준을 반영하지 못하고 무조건 0점으로 떨어지게 되어, 일시적인 현상으로 인한 수질 변화를 극단적으로 표현할 수 있는 위험성이 있었다. 모든 항목의 최솟값을 10으로 고정하여 이러한 문제를 피해나가는 오리건주처럼

새로운 지표도 하한 값을 20으로 설정하여 값이 0으로 떨어지지 않도록 하는 안전장치를 마련하였다.

(나) 제 2안 K-SWQI

기존 지표는 임의로 용도를 5가지로 구분하였으며 모든 용도에 적용되는 공통 항목을 선정하였다. 그러나 이는 특별한 근거나 전문가의 의견이 뒷받침되지 않은 결과이며 기존 상식선의 용도에 확실한 근거 부여가 필요하였다. 게다가 10년이 지난 시점에서 국내 실정이나 소비 현황 등이 변하였기 때문에 용도에 대한 면밀한 검토가 필요하였다. 따라서 새로운 지표에서는 개정안의 4가지 용도에서 편차가 심한 공업용수를 제외하고 상수원수, 수영용수, 농업용수의 3가지 용도를 설정하였다. 본 용도는 개별 관점의 프레임 역할을 할 수 있다는 면에서 의미가 크다.

기존 지표의 경우, 수질 용도를 특성화하지 않고 이에 대해 일반적인 가중치만 도출하는 문제점이 있었다. 현재 환경기준 자체가 변화 일로에 있고, 정규 측정 항목이 증가하였으며, 물이용 및 수생태계에 미치는 오염원의 연구 역시 축적되는 한편 오염원이 다변화되고 있으므로 이러한 용도를 밀접히 반영할 수 있는 용도 특이적 항목의 선정이 필요하였다. 새로운 지표에서는 이를 반영하여 생태계 쪽은 생물분야 쪽으로 같음하였고, 항목은 용도에 따라 공통이 아니라 프랑스의 SEQ처럼 용도를 잘 반영하는 항목을 중심으로 고려하였다.

기존 지표의 경우, 용도가 일반적인 가중치로 항목에 녹아들어, 용도가 아니라 항목간의 가중치에 초점을 맞추었다. 따라서 용도를 기반으로 한 항목별 취약점 파악이 곤란하였다. 효율적 수질관리를 위해서는 각 용도에 따른 개별값 도출로 수체의 용도별 적합성을 파악하고 이를 기반으로 각 용도 내 수질 저하 항목을 파악할 필요가 있다. 따라서 각 용도를 독립된 관점으로 간주, 이를 중심으로 항목을 구상하고 이에 따라 용도 내에서의 각 항목 값과 항목을 종합한 용도 값을 도출할 필요가 있었다. 새로운 지표에서는 용도를 하나의 관점으로 간주하여 용도의 개별 값을 도출하였으며 이를 통해 용도별 취약점 파악이 가능하게 되었다. 또한 용도를 중심으로 항목 값과 용도 값의 매트릭스 형태를 표현할 수 있으므로 항목별 취약점 파악 역시 가능할 수 있었다.

(2) 부착조류

부착조류는 1차 생산자인 동시에 영양염(질소, 인)을 성장에 필수적으로 요구하므로 수역의 영양염 증가로 인한 부영양화를 직접적으로 반영할 수 있고 오염스트레스에 대한 빠른 반응으로 인해 조기경보 지표중(early warning indicator)으로 이용되고 있다. 부착조류 수질평가 4등급(안)에 따른 유기물지수와 영양염지수의 범위와 점수는 아래 표와 같다.

(표 4-3) 부착조류 수질평가 4등급(안)

등급구분	유기물지수 범위 (DAIpo)	영양염지수 범위 (TDI)	점수 (종합수질지표)
매우 좋음~좋음	100~85	0~40	100~90
좋음~ 보통	85~60	40~55	90~70
보통~약간나쁨	60~40	55~70	70~50
약간나쁨~매우나쁨	40~0	70~100	50~0

(3) 저서성 대형무척추동물

저서성 대형무척추동물은 주로 수서곤충류를 대상으로 하며 하천에서의 오락계급 또는 부수생물계급(saprobity)을 표현하는 대표적인 생물군이다. 생물학적 수질평가에서 가장 먼저 사용된 생물군들로 역사가 깊고, 전 세계적으로 많이 이용하고 있는 생물군이다. 저서성 대형무척추동물의 수질평가 4등급(안)에 따른 한국오수생물지수(KSI)의 범위와 점수는 아래 표에 제시하였다.

(표 4-4) 저서성 대형무척추동물을 이용한 하천수질평가기준안

등급구분	한국오수생물지수 (KSI)	점수 (종합수질지표)
매우 좋음~좋음	0~0.8	10~90
좋음~보통	0.8~1.7	90~70
보통~약간나쁨	1.7~2.5	70~50
약간나쁨~매우나쁨	2.5~5.0	50~0

(4) 어류

어류는 하천 먹이사슬의 고차소비자로서 수질의 생태와 함께 먹이사슬 내의 생물학적 작용이 종합적인 측면을 반영하므로 생태계 건강성을 평가하는 도구로 많이 사용된다. 현재 유럽과 미국 등에서 어류를 이용한 생물지수(예를 들면, IBI, RBP 등)의 사용이 상당히 보편화되어 있는 실정이다. 어류의 수질평가 4등급(안)에 따른 모델값의 범위와 점수는 아래 표에 제시하였다.

(표 4-5) 4등급에 의거한 생물학적 수질평가기준(안) 및 생태 지표종

등급구분	모델값	생태 지표종	점수 (종합수질지표)
매우 좋음~좋음	40~38	버들치, 금강모치, 산천어, 열목더 등 서식	100~90
좋음~보통	34~32	갈겨니, 쉬리, 은어, 쏘가리 등 서식	90~70
보통~약간나쁨	29~26	피라미, 끄리, 모래무지, 참붕어 등 서식	70~50
약간나쁨~매우나쁨	22~0	붕어, 잉어, 미꾸라지, 메기 등 서식	50~0

(5) 서식지 평가 지수

서식지 평가는 모든 생물학적 평가에 지대한 영향을 미치며 생물 채집을 함에 있어서도 각 지점마다 서식환경여건에 따라 자료의 질에 영향을 줄 수 있는 중요한 요인이다. 서식지 평가가 이화학적 수질과 생물지수에 의한 평가 모두를 설명할 수는 없지만 두 하천 수질평가기법과 결합한다면 성공적인 수질평가가 될 수 있다. 물리적서식지 평가는 크게 하상구조 및 식생피복도, 유로특성, 제방 특성 및 구조를 포함한다. 서식지 평가등급(안)에 따른 서식지 평가지수의 범위와 점수는 아래 표와 같다.

(표 4-6) 서식지 평가등급(안)

등급구분	서식지 평가지수	점수 (종합수질지표)
매우 좋음~좋음	182~220	100~90
좋음~보통	124~168	90~70
보통~약간나쁨	66~110	70~50
약간나쁨~매우나쁨	8~52	50~0

다. 호수생태계 통합적 건강성 평가기법(김범철, 2007~진행 중)

(1) 한국호수수질 평가지수

(가) LQI(Korea Lake water quality index): 한국형부영양화지수

우리나라 자연환경 특성을 고려하여 외부기원 유기물을 특성을 고려한 COD, 내부생성 유기물로 식물플랑크톤의 현존량을 대신하는 Chl-a, 그리고 부영양화의 중요한 원인이 되는 인자 TP 등 세 가지를 호수 수질 평가 항목으로 선정하였다. 한국에 분포하는 500여개의 호수를 대상으로 계절적 변동의 median이 가지는 분포 확률을 조사하여 평가 항목에 대하여 25th percentile, 75th percentile을 산출하였다. 지수의 분산을 결정하기 위하여 25th percentile을 지수 40으로 75th percentile을 지수 60으로 정하여 수질 항목간의 직선회귀식을 로그변환하여 선형화하고 LQI의 각 지수값을 계산하였다. 각 계산식은 다음과 같다.

$$\text{LQI (Chl.a)} = 12.2 + 38.6 \log(\text{Chl-a mg/m}^3)$$

$$\text{LQI (T-P)} = 114.6 + 43.3 \log(\text{T-P mg/L})$$

$$\text{LQI (COD)} = 5.8 + 64.4 \log(\text{COD mg/L})$$

LQI에 의한 호수의 수질 상태는 30이하의 빈영양, 50이하의 중영양, 70이하의 부영양, 그리고 70이상은 과부영양 상태로 평가한다.

위의 세 가지 LQI를 종합하여 나타낼 경우에는 외부기원과 내부기원에 각각 50%의 가중치를 주어 평균 LQI를 계산한다. 내부생성유기물의 지표는 조류의 밀도지표인 Chl-a이며 TP는 조류의 밀도를 좌우하는 지표이므로 이 두 가지에 각각 25%의 가중치를 주어 다음 계산식과 같이 계산하여 사용한다. T-P 항목 외에 투명도와 탁도를 보조자료로 사용할 수 있다. 조사 기관에 따라서 투명도를 측정하기도 하고 탁도를 측정하기도 하므로 사용가능한 지표를 선택하여 계산에 사용한다.

$$\text{평균 LQI} = 0.5 \text{ LQI(COD)} + 0.25 \text{ LQI(Chl-a)} + 0.25 \text{ LQI(TP, Turb., SD)}$$

한국에 분포하는 농업용 저수지 500개와 중-대형 호수 자료 84개, 그리고 직접 현장에서 측정된 22개 호수자료에 대하여 LQI를 이용하여 한국 호

수의 영양분포를 평가하였다. 그 결과, 56%가 빈-중영양상태, 44%가 부-과부영양상태로 평가되었다. 이는 한국 호수의 특징을 고려하여 개발된 평가 지표 LQI가 한국의 전반적인 호수의 영양상태를 평가하는데 적합하다는 것을 나타낸다. 따라서 LQI가 호수의 통합적 건강성 지표 개발에 중요한 수질 평가메트릭 개발에 중요한 기본 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

(표 4-7) 한국 호수의 LQI 분포도

Lake water quality Index (LQI)		Lake and reservoir	
		No	%
30 ≥ LQI	Oligotrophic	38	6
50 ≥ LQI ≥ 30	Mesotrophic	307	50
70 ≥ LQI ≥ 50	Eutrophic	222	36
LQI > 70	Hypertrophic	50	8
Total		617	100

(인용자료: 농어촌연구원 - 농업용저수지 500여개, 환경부 - 중대형호 84개, 강원대 - 현장측정 22개 호수)

(나) LEHA_w: 로지스틱 모델을 이용한 수질평가 지수

LQI를 이용한 수질의 평가 시 너무 낮은 수치나, 너무 큰 수치에 대한 평가 오류가 발생하는 경우가 나타나 새롭게 로지스틱 모델을 이용하는 호수 수질 건강성 평가 지수를 개발하였다. 호수수질 조사 결과는 정규분포를 보이지 않으므로, 로그 변환을 하여 누적도수 분포를 구하여 가장 적합한 모델을 통해 수식을 완성하였다. 이 평가 지수는 개별 항목별로 모델을 적용하여 개별 수질 항목을 평가 할 수 있다.

한국 호수 수질 평가 지표의 평가 항목인 COD, TP, Chl.a에 대하여 모델을 구하였다. 수질기준에서 COD를 대신하여 유기물 평가항목으로 제시되고 있는 TOC(Total organic carbon)을 평가할 수 있는 계산식도 다음과 같이 구하였다.

$$LEHA_{COD} = 100 - \left(\frac{1}{1 + e^{-(\log(COD) - 0.68)/0.15}} \times 100 \right) \text{ (COD mg/L)}$$

$$LEHA_{TP} = 100 - \left(\frac{1}{1 + e^{-(\log(TP) - 1.48)/0.26}} \times 100 \right) \text{ (T-P mg/L)}$$

$$LEHA_{Chl.a} = 100 - \left(\frac{1}{1 + e^{-(\log(Chl.a) - 1.05)/0.33}} \times 100 \right) \text{ (Chl-a mg/m}^3\text{)}$$

$$LEHA_{TOC} = 100 - \left(\frac{1}{1 + e^{-(\log(TOC) - 0.65)/0.14}} \times 100 \right) \text{ (TOC mg/L)}$$

(2) 동 · 식물플랑크톤

동 · 식물플랑크톤 군집은 영양염류의 유입, 계절에 따른 온도와 일사량의 변화와 같은 환경의 영향에 의해서 천이되어진다. 현재까지 식물플랑크톤 군집의 특성은 호수의 건강성이나 환경적 특성을 잘 반영하는 지표로 활용되고 있지만, 동물플랑크톤 군집은 환경적 특성을 제대로 반영하기 어려운 지표로 인식되어왔다. 따라서 다양한 분석방법을 통하여 동 · 식물 플랑크톤의 지표 이용 가능성을 확인하였다.

조사 대상 호수에서 출현한 동 · 식물플랑크톤의 탄소생체량을 이용하여 SAD 곡선을 비교하였다. 식물플랑크톤의 경우 빈-중영양상태인 호수에서 종 풍부도와 종 다양도가 낮게 나타났으며, 부-과영양 호수에서 높게 나타났다. 식물플랑크톤은 호수 수질이 부영양 할수록 종 다양도와 풍부도가 증가하는 경향을 보였으나 동물플랑크톤은 식물플랑크톤과 같이 확연한 차이를 보이지 않았다. 수질지표인 LQI와 플랑크톤의 생체량과의 비교에서도 식물플랑크톤은 호수 영양상태에 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 동물플랑크톤은 상관성이 낮게 나타났다.

따라서 호수 건강성 평가 항목으로 동물플랑크톤은 제외하고, 식물플랑크톤의 생체량, 남세균 생체량, 식물플랑크톤 출현종수의 세 가지 항목을 이용하여 로지스틱 모델을 적용한 모델식을 개발하였다.

$$LEHA_{PB} = 100 - \left(\frac{1}{1 + e^{-(\log(PB) - 3.16)/0.58}} \times 100 \right)$$

(PB; phytoplankton biomass $\mu\text{gC/L}$)

$$LEHA_{C_{yano.}} = 100 - \left(\frac{1}{1 + e^{-(\log(C_{yano.}) - 1.77)/0.93}} \times 100 \right)$$

(Cyano.; Cyanobacteria biomass $\mu\text{gC/L}$)

$$LEHA_{P.S.No.} = 100 - \left(\frac{1}{1 + e^{-(\log(P.S.No.) - 1.82)/0.10}} \times 100 \right)$$

(P.S.No.; Phytoplankton species of number: 출현종수)

(3) 어류(LEHA_F)

어류의 조사는 조사지점의 선정, 방법, 조사 도구 별 결과가 큰 차이를 나타낼 수 있으므로 조사방법의 확립이 매우 중요하다. 이에 조사 방법을 매뉴얼화 하고 어류를 이용한 호수생태건강성 평가 모델의 후보를 검토하고 메트릭을 개발하였다. 어류 군집 조사는 조사시기와 조사지점에 따라서 자료의 변이가 극명하게 나타나기 때문에 조사시기는 수체가 가장 안정된 시기에 실시되어야 한다.

LEHA_F 모델 개발을 위해 우리나라 호수 생태 특성에 맞게 수정하였으며, 총 8개의 메트릭을 개발하였다. 메트릭에 1, 3, 5의 수치를 부여하였으며, 8개 메트릭 점수를 합산하여 높은 점수가 양호상태를 나타내도록 하였다. 개발한 어류 메트릭 평가 점수는 (표 4-8)과 같다. 각 등급의 계급 간격은 US EPA 방법을 적용하였으나 향후 우리나라 호수의 좀 더 폭넓은 조사 실시 후 등급값을 수정, 보완하는 것이 필요하다.

호수의 형태나 크기에 따라 조사결과가 큰 차이를 나타내므로 호수를 만수면적 기준으로 소형호와 중형호, 대형호로 나누었으며, 조사 어구에 따른 값의 차이를 최소화하기 위해 조사 어구의 조합별 유형을 세 가지로 나누어 평가 점수를 재산정하였다.

(표 4-8) 어류 메트릭 평가 점수 기준

모델 메트릭 특성 및 변수	어구 조합	유역 크기	메트릭 점수		
			1	3	5
I. 종조성 특성 (Species composition)					
M1. 어류의 종 다양도 지수	A1	전체 적용	<0.80	0.8 - 1.56	>1.56
	A2		<0.70	0.7-1.60	>1.60
M2. 민감종 수	A1	대형호	<2	2-3	>3
		중형호	<1	1-2	>2
		소형호	<1	1-2	>2
	A2	대형호	<2	2-4	>4
		중형호	<1	1-3	>3
		소형호	<1	1-2	>2
M3. 내성종의 상대빈도	A1	전체	>67%	56-67%	<56%
	A2	적용	>74%	57-74%	<57%
II. 영양단계 특성 (Trophic composition)					
M4. 잡식종의 상대빈도	A1	전체 적용	>42%	12-42%	<12%
	A2		>40%	10-40%	<10%
M5. 총식종의 대빈도	A1	전체 적용	<4%	4-24%	>24%
	A2		<4%	4-20%	>20%
III. 종 풍부도 및 개체 건강도 특성 (Fish abundance & Fish health)					
M6. 군집 우점도 지수	A1	전체 적용	>30%	20-30%	<20%
	A2		>33%	22-33%	<22%
M7. 베스의 상대빈도	A1	전체 적용	>8%	0-8%	0%
	A2		>5%	0-5%	0%
M8. 비정상개체 출현빈도		전체적용	>1%	0-1%	0%

*A1 (대안 1) = 투망, 족대를 이용한 채집기법

A2 (대안 2) = 투망, 족대, 삼중자망, 정치망을 이용한 채집기법

(4) 수생식물

식물은 좋은 지표가 될 특성을 갖고 있어 최근 들어 널리 이용되고 있다. 또한 이동성이 없이 연중 생육기 내 분포하므로 조사하기 쉬울 뿐만 아니라 수계의 물리적, 화학적, 생물학적 변화에 민감하게 반영한다. 수생식물의 조사내용은 호수의 수변부 혹은 연안대에서 수생식물의 출현 식물상, 식생도 조사에 의한 식생분포, 식물군집별 식생 구조와 분포도이다.

메트릭은 분류된 습지식물, 지표종 목록과 문헌에서 공통적으로 사용하고 있는 항목에서 평가 메트릭을 선정하였다. 대상 호수에서 실측한 값을 이용하여 서식지지표와 상관분석을 통해 유의한 관계를 가지는 메트릭을 선택

하였다. 수생식물의 평가항목으로는 (표 4-9)의 메트릭에서 정리한 11개 항목을 선정하였다.

(표 4-9) 수생식물 메트릭 평가 점수 기준

Metric	점수		
	1 (빈약)	3 (중간)	5 (양호)
Richness			
총 종수	≤40	41-80	≥81
임의습지 식물 종수	≤11	12-18	≥19
절대습지 식물 종수	≤6	7-14	≥15
민감습지종 종수	≤1	2-3	≥4
멸종위기식물 종수	≤1	2-3	≥4
특산식물 종수	≤1	2-3	≥4
귀화식물 종수	≥12	4-11	0-3
Abundance (가능한 조사구가 3개 이하인 경우는 1점)			
민감습지종 피도(%)	≤0.01	0.02-4	≥5
특정식물종 피도(%)	≤0.01	0.02-4	≥5
Area			
정수식물 분포면적(%)	≤3, ≥51	4-10	11-50
침수식물 분포면적(%)	≤0.01	0.02-0.4	≥0.5

(5) 그 외 평가 항목

건강성 평가항목으로써 개발 평가지표로 제시된 항목들의 특성을 고려하여 통합지표 항목을 선정하였으며, 관리에 따라 개선이 불가능한 동물플랑크톤, 저서성 대형무척추동물, 물리적여건 등의 항목은 통합지표항목에서 배제하고, 참고 조사항목으로 정하였다.

저서성 대형 무척추동물은 호수 생태계의 복잡성과 저서동물의 다양성을 고려하여 간편성과 정밀성 두 가지 조건을 고려한 지수를 제시하였다. 기존의 건강성 평가를 위한 메트릭 평가 (Barbour 등 1995; Blocksom 등 2002; FDEP 2000)에서 제시되어 사용된 평가 방법에 생태정보학적 기법을 추가하여 메트릭을 검정하였다. 군집의 다양성, 내성, 구성 및 영양성에 대하여 변

별성, 연관성 및 스트레스에 대한 반응 정도를 평가하였다.

물리적 여건으로는 수위변동, 호수의 크기, 수변경사, 토양조직 등이 있는데, 수위변동을 제외하고는 인위적 교란이 작기 때문에 관리개선이 불가능하다. 우리나라 대부분의 호수는 인공호로써 호수의 수위변동으로 인하여 생물상이 잘 발달하지 못하며, 특히 수변식생대의 성장을 저해하고, 저서동물과 어류의 서식처를 파괴하여 생물량이 감소하게 된다. 따라서 물리적 여건은 통합지표 항목에서는 제외하였으나 조사 항목으로 수위변동과 수변경사를 선정하여 조사방법을 제시하였다.

3. 국외 수질지표 개발 사례(최지용, 1996; 2007)

가. 미국

(1) NSFQI(National Sanitation Foundation Water Quality Index)

종합수질지표가 가장 많이 연구된 곳은 미국이다. 1965년 Horton은 수온, pH, 포화용존산소량, 전기전도도, 알칼리도, 탄소, 염소, 분원성대장균 및 폐수처리효율 등 8개 항목을 선정하여 현대적인 수질지표를 제안하였다(과학기술처, 1989). Horton 이후에 일반수질지표에 대한 개발이 활성화되어 미국 National Sanitation Foundation의 Water Quality Index, Prati의 Implicit Pollution Index, McDuffie의 River Pollution Index, Dinius의 Social Accounting System 등의 지표가 개발되었다. 이 중에서도 1970년에 Brown, McClelland, Deininger, Tozer 등은 Horton의 지수와 유사한 구조의 수질지표를 제시하였는데, 이 연구는 National Sanitation Foundation(NSF)에 의해 지원되었기 때문에 NSFQI로 알려졌다.

NSFWQI의 수질평가항목은 수온, pH, DO, BOD₅, NO₃-N, PO₄-P, 분원성대장균, TS(Total Solids), 탁도 등 총 9개 항목으로 WQI의 산정 식은 다음과 같다.

$$NSFWQI = \sum_{i=1}^9 W_i \cdot I_i$$

W_i = 항목별 가중치

I_i = 등급곡선에 의한 부지수

1 = 조사항목

항목별 가중치는 델파이기법을 이용하여 미국전역의 수질전문가 상당수의 의견을 조합해 산출되었으며, 산정된 NSFQI에 의한 오염도 평가기준은 다음 표와 같다.

(표 4-10) 산정된 NSFQI에 의한 오염도 평가기준

NSFWQI 산정치	평 가
90점 이상	우 수
89 ~ 70점	양 호
69 ~ 50점	보 통
49 ~ 30점	나쁨
29점 이하	아주 나쁨

(2) 노스캐롤라이나주 - Mecklenburg County

노스캐롤라이나 주의 Mecklenburg County에서는 지표수의 수질을 개선하고 물의 용도를 보존하기 위해 1995년부터 "Surface Water Improvement and Management Environmental Protection(MCDEP)"를 실시해오고 있다. Mecklenburg County에서는 상당량의 수질자료를 단일한 값으로 전환한 종합수질지표를 사용하는데, 여기에는 BOD, DO, 분원성대장균, pH, 수온, TN, TP, TS, 탁도 등 9개의 수질항목을 그 대상으로 하고 있다. 이 항목들은 지역의 수질전문가의 의견을 종합하여 결정되었다. 한편, 호수에 대해서는 Chlorophyll-a, DO, pH, SecchiDisk Depth, 전도도, 수온, 총알칼리도, TN, TP의 9개 항목을 대상으로 하고 있다. MCDEP에 의해 매월 40개의 샘플을 하천에서, 17개의 샘플을 호수에서 채취하여 분석하고 있으며, 분석된 결과들을 토대로 연간 수질지표를 산출해내고 있다.

(표 4-11) 노스캐롤라이나 Mecklenburg County 종합수질지표값과 수질 상태 판정

종합수질지표값	수질 판정	수질 상태
0~25	나쁨 (Poor)	수생태계에서 한정된 종만이 존재 오염에 민감하고 수질에 많은 문제가 있음 수영 등의 여가활동에 적합하지 않음
26~50	약간나쁨 (Fair)	수생태계의 종다양성이 낮음 점원 및 비점 오염원에 의해 수질이 위협받음
51~70	보통 (Average)	수생태계의 종다양성 감소의 신호 영양염류가 증가하고 조류가 성장하고 있음
71~90	좋음 (Good)	수생태계의 종다양성이 높음 물의 모든 용도에 적합
91~100	매우좋음 (Excellent)	

(3) Des Moines River Water QualityNetwork(DMRWQN)

DMRWQN는 아이오아주를 흐르는 Des Moines River의 수질관리 프로젝트로 아이오아주립대학교 토목공학과에서 미육군공병단의 지원을 받아 수행하고 있다. 1967년부터 실시되어온 이 프로젝트는 상류의 댐이 강의 하류에 미치는 영향을 평가하는 것을 목적으로 하고 있으며, 30여 년 동안 수질을 분석하고 있다.

본 프로젝트에서는 DMRWQN내에 있는 강의 수질상태를 일반대중들이 쉽게 알아볼 수 있도록 DMRWQI(Des Moines River WaterQuality Index)를 산정하였는데 그 방법과 절차는 NSFQWI에 근거하고 있다. 즉, 각 지점에서 DO, pH, BOD, 질산성질소, 아질산성질소, 비이온화 암모니아질소, 탁도, SS를 측정하고 등급곡선(rating curve)를 이용하여 얻은 각각의 index score를 합한 점수로 수질상태를 표시하고 있는 것이다. 수질상태는 0~100점 사이의 수치로 나타내며 91점 이상이면 “우수”, 71~90점은 “양호”, 51~70점은 “보통”, 26~50점은 “나쁨”, 25점 이하는 “매우 나쁨”으로 판정된다(Department of the Army RockIsland District Corps of Engineers, 2002).

(4) Boulder Creek Watershed

콜로라도 Boulder county에서는 지역주민들이 환경정보에 쉽게 접근할 수 있도록 EPA EMPACT(Environmental Monitoring for Public Access and Community Tracking) program의 지원을 받아 BASIN(Boulder Area Sustainability Information Network) 이라는 지역 서비스를 제공하고 있다.

BASIN에서는 NSFQI를 적용하여 Boulder Creek Watershed의 수질상태를 지역주민들에게 제시하고 있다. 이를 통해 지역주민들은 지역에서 수질 때문에 일어 날 수 있는 문제들을 이해할 것으로 기대하고 있다. 저수기의 수질 종합지표는 A, B, C, D, 표로 표시하며, 이 구분은 NSFQI에 근거 하고 있다.

(5) 일리노이주

미국에서는 각 주에서 지정한 물의 용도에 대해 종합수질지표의 적합성을 평가하여 이를 중앙정부에 보고하도록 하고 있다. 이에 따라 각 주는 수중생태계 보존, 물고기 섭취, 수영 등의 위락용도, 음용수 용도 등과 같이 용도를 분류하여 그 적합성을 평가하고 있다. 평가방법은 주별로 차이가 있으며 일리노이 주의 경우, 하천을 수 중생태계, 물고기 소비, 수영, 음용수공급, 이차적인 수집축 등의 용도로 분류하고 적합성정도를 Full(중분적합), Full/Threatened(적합), Partial/Minor Impairment(부분적합), Partial/Moderate Impairment(부분부적합), Nonsupport(부적합)로 평가하고 있다.

(6) 오리건주

오리건주는 하천의 수질을 쉽고 간명하게 나타내기 위해 1970년대 하천 관련지표를 개발하여 지금까지 지속적으로 수정해오고 있다. 1970년대 말까지는 하천의 기능을 새롭게 알아가면서 이러한 연구가 지표에 반영되었으나, 그 결과 지표의 계산과 결과보고에 많은 인력이 소요되어 1983년 잠시 중단되었다. 오리건주가 채택한 지표는 NSFQI(National Sanitation Foundation's Water Auality Index)를 참고하여 DO, BOD, pH, NHs-N, NO₃-N, TS, 대장균의 6개에서 나중에 추가된 수온과 T-P까지 총 8개가 있다. 하천의 손상정도는 각 지표를 이용하여 용존산소부족, 부영양화, 물리적 특성, 용존물질, 위해성으로 나누고 그 정도를 판단하고 있다.

나. 캐나다(Canadian Council of Ministers of the Environment, 2001)

캐나다에서는 CCMEWQI(Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index)를 개발하여 일반인들도 수질의 전반적인 상황을 쉽게 이해할 수 있도록 하고 있다. CCMEWQI 이전에도 Center St. Laurent, Quebec, British Columbia, Manitoba, Alberta, Ontario 등에서 WQI를 사용하고 있었지만 캐나다의 수질을 단일한 지표로 나타내기 위해 CCMEWQI를 개발하였다. CCMEWQI는 세 가지 factor로 계산된다.

① Factor 1 : 범위 (Scope)

F1은 관찰기간 동안 수질 가이드라인을 벗어나는 정도를 나타낸다.

$$F_1 = \left(\frac{\text{Number of failed variables}}{\text{Total number variables}} \right) \times 100$$

Variable은 관찰기간 동안 조사된 수질항목수를 나타낸다.

② Factor 2 : 빈도(Frequency)

F2는 목표(objective)를 만족시키지 못한 조사수(failed test)의 백분율을 나타낸다.

$$F_2 = \left(\frac{\text{Number of failed tests}}{\text{Total number of tests}} \right) \times 100$$

③ Factor 3 : 크기(Amplitude)

F3는 목표를 만족시키지 못한 조사수의 정도를 나타내며 다음 식에 의해 계산된다.

$$F_3 = \left(\frac{nse}{0.01nse + 0.01} \right) \times 100$$

여기에서 nse는 $nse = \frac{\sum_{i=1}^n excursion}{\text{Number of tests}}$ 로 계산되며, excursion은 각각의 측정값의 농도가 목표치보다 얼마나 크거나 작은가(목표치를 최소치로 하는 경우)를 나타내는데 다음과 같이 계산된다.

$$excursion_i = \left(\frac{Failed\ Test\ Value_i}{Objective_i} \right) - 1 \quad \text{측정치가 목표치를 초과해서는 안 될 경우}$$

$$excursion_i = \left(\frac{Objective_i}{Failed\ Test\ Value_i} \right) - 1 \quad \text{측정치가 목표치보다 낮아서는 안 될 경우}$$

위에서 구한 F1, F2, F3를 이용한 CCMEWQI는 다음과 같이 계산된다. 이렇게 계산된 CCMEWQI는 캐나다 전역에 걸쳐 적용되고 있다.

$$CCMEWQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$$

(표 4-12) CCMEWQI값에 따른 수질 판정과 상태

지수 값	수질 판정	수질 상태
95~100	Excellent	- 실질적인 위협 없이 수질이 보호되고 있는 상태 - 자연 상태의 매우 근접한 수준 - 측정값들이 항상 목표치를 만족할 때 달성 가능한 수준
80~94	Good	- 경미한 수준으로 수질이 위협받고 있는 상태 - 자연 상태나 바람직한 수준에 거의 접근한 상태
65~79	Fair	- 평상시 수질은 보호받고 있으나 종종 위협받고 있는 상태 - 자연 상태나 바람직한 수준에서 때때로 벗어나는 상태
45~64	Marginal	- 수질이 자주 위협받고 있는 상태 - 자연 상태나 바람직한 수준에서 자주 벗어나는 상태
0~44	Poor	- 수질이 거의 항상 위협받고 있는 상태 - 자연 상태나 바람직한 수준에서 대부분 벗어나는 상태

다. 일본

일본은 우리나라와 같이 중요한 몇 가지의 항목으로 수질을 평가하고 있으며 종합지표는 정부차원에서 개발되거나 이용되고 있지는 않고 연구자들이 연구용으로 개발하여 이용하는 경우는 있다. 지표의 개발 예로는 많은 수질측정 항목들이 서로 강한 상관관계를 가지고 있는 것을 이용해 통계적 기법을 적용하여 개발하였다. 예를 들면 BOD의 경우 다른 수질항목과 밀접한 관계가 있으며 이 경우 BOD가 수질을 대표하는 것으로 보고 BOD와 같

이 수질을 대표하는 수개의 항목을 이용해 지표를 개발하였다. 대표항목의 선정은 통계적인 방법에 의해 이루어지며 주로 주성분 분석에 의해 선정하는 방법이 이용된다. 그 예로 神奈川縣내 27개 하천을 대상으로 많은 수질항목을 주성분 분석법으로 집약해, 수질에 가장 큰 영향을 끼치는 DO, BOD, PO₄-P, NH₃-N의 4항목을 이용해 종합수질지표(WQI)를 다음과 같이 산정하였다(岡野, 1983).

$$WQI = 0.162 \times DO + 1.34 \times \log(BOD + 0.90) + 1.54 \times \log(PO_4-P + 0.094) + 1.22 \times \log(NH_3-N + 0.49) + 0.146$$

라. 유럽

현재 유럽은 WFD(Water Framework Directive)에 기반하여 수질과 관련된 모든 정책이 수립되고 있다. 이 정책에는 하천 및 호소의 생태적 상태에 대한 일반적인 정의를 내리고, 하천 및 호소 각각에 대해 생물학적, 형태학적, 물리학적 평가요소와 등급을 제시하고 있다. 유럽은 지표수체의 수질을 구분하기 위해 기본적으로 WFD 규정을 준수하면서 각국에 알맞은 내용을 전개하기 때문에, WFD의 부속서 V의 내용을 충분히 인지하고 유럽의 종합수질지표를 이해할 필요가 있다. 현재 프랑스의 경우 비교적 WFD의 지침에 근접하게 종합평가지표를 개발하여 적용하고 있다.

(1) 프랑스 (L.C. Oudin, 2000 Water Agencies(France), 2000)

프랑스는 1971년 하천수질 평가방법을 도입하여 수질보호를 위한 계획과 모니터링, 물이용에 이를 활용하고 있다. 본 5개 수질 등급은 물리·화학적, 수문·생물학적 상태를 반영하는 제한된 인자들에 의해 1A/1B/2/3/등급 외로 구분되며, 이는 각각 파랑/초록/노랑/주황/빨강의 색으로 대표되었다. 이 “다목적” 그리드는 주된 용수 이용과 어류 보전을 위한 지속가능성에 대한 일반적인 평가에 기반하여 수립되었다.

1990년대에 환경개발부, 그리고 물관리청(water agency)은 하천 수질 평가를 위한 본 접근법을 3개 부분 시스템으로 설계, 강화하여, 기존 수질 등급을 현대화하기로 결정하였다. S.E.Q(Systeme d’Evaluation de la Quality)라 명명한 이 새로운 시스템은 ① 물의 물리-화학적 질(Water S.E.Q. : River quality based on Water component), ② 하상 및 독의 인공화 정도(Physical

S.E.Q. : River quality based on Physical component), ③ 수로 (water course)에서의 생물학적 균락의 상태 (Biological S.E.Q.: River quality based on Biological component)를 동시에 평가한다. S.E.Q. 시스템은 물리화학적, 생물학적 변수를 이용하여 수질 등급을 5단계로 구분하며 프랑스 환경개발부와 물관리청이 협력하여 평가법을 개선해나가고 있다. S.E.Q. 시스템은 다음과 같다.

- 기본단위 설계(modular design)를 가지고 있다: 이 시스템은 과학적이고 기술적인 발전 및 지역적 특성에 맞추어질 수 있다.
- 국가 차원에서 수자원 관리와 연관된 이해관계자 모두가 사용할 수 있다.
- EU의 물관리기본지침(WFD) 및 기타 적용 가능한 지침과 일치한다.
- 기술자, 의사결정자, 물이용자 사이의 관계를 정립함으로써 환경 및 유산 (heritage) 문제를 고려할 수 있게 해준다.

Water-S.E.Q.는 수생태계 보호, 물의 이용, 위락용수로 활용 등의 다양한 목적별로 다양한 기준을 모두 고려하고 있으며, 153개 항목(parameter)으로 이루어진 15개 지표(indicator)를 통해 수질, 수질 분류, 사용적합도 등을 판단하고 있다. Ver. 2에서 물이용은 음용수, 위락용수, 관개용수, 축산용수, 양식으로 구분하고, 여기에 수생생물 부문이 더해져 6가지 용도로 구분되게 되며, 각 용도는 그 용도의 수질을 평가하기에 적합한 지표를 선택하게 된다. 6가지 용도에 따른 물이용의 적합도는 5단계(파랑, 초록, 노랑, 주황, 빨강)로 구분한다.

(2) 영국

현재 영국에서 사용되고 있는 공식적인 분류시스템은 하천수질을 DO, BOD, NH₃-N 등의 연간측정자료 95 %를 이용해 1A에서 4까지의 5개 등급중 하나에 속하는 것으로 분류하고 있다. 종합수질지표는 공식적으로 사용하지는 않지만 연구자들이 관심을 가지고 개발하고 있다. House(1989)는 수질지표를 일반수질지표(WQI : Water Quality Index)와 용도관련지수로 구분하여 개발하였다. 일반수질지표(WQI)는 잠재적인 수용도의 범위에서 수질을 반

영하는 것으로 영국에서 정기적으로 모니터링되는 9개의 물리-화학적 그리고 생물학적 항목에 기초하고 있다. 용도별 지수로는 원수의 적합성 반영 정도를 나타내는 PWSI(Public Water Supply Index), 독성에 대한 지수로서 ATI(Aquatic Toxicity Index), 공공용수공급용으로의 적합성이나 수생태계 유지를 위해 영향 정도를 파악하기 위한 PSI(Potable Sapidity Index)가 있다. PWSI지수는 음용수 공급 적합성에 대한 수질을 반영하는 것으로 13개의 정기적으로 모니터링되는 항목에 기초한 것이다. 나머지 두개의 지수는, 잠재적으로 사람과 수중생물체에 독성을 끼치는 중금속, 살충제, 그리고 탄화수소 등에 기초한 것이다. 두 지수 중 ATI는 물고기와 야생동물의 종족보호를 위한 물의 적합성을 반영하고, PSI는 공공용수 공급을 위한 물의 적합성을 반영한다. 이들 지수들은 9개와 12개의 대표적인 독성항목에 기초하고, 만약 독성지수가 WQI 또는 PWSI보다 열악한 수질을 나타낸다면 독성지수점수에 기초하여 WQI나 PWSI에서 얻어진 점수를 넘는 용도로 점수가 수정된다. WQI와 PWSI에서는 전문가에 의해 매겨진 각 공공용수 공급을 위한 물의 적합성을 반영한다. 이들 지수들은 9개와 12개의 대표적인 독성항목에 기초하고, 만약 독성지수가 WQI 또는 PWSI보다 열악한 수질을 나타낸다면 독성지수점수에 기초하여 WQI나 PWSI에서 얻어진 점수를 넘는 용도로 점수가 수정된다. WQI와 PWSI에서는 전문가에 의해 매겨진 각 항목의 가중치들이 사용되었지만 ATI와 PSI에서는 독성항목이 가지는 특성 때문에 가중치를 적용하지 않았다.

(3) 폴란드

폴란드는 종합지표 작성을 위해 기본항목과 추가항목의 2종류로 나누어 사용하였다(Dojilido *et. al.*, 1994). 기본항목은 BOD₅, SS, T-P, NH₃-N, DS, COD_{Mn}, DO로 이들 항목들은 수년간 자료가 축적되어 있고, 수질평가에 상당한 중요성이 있는 항목들이고, 추가항목은 Fe, Phenol, Organic-N, 경도, Mg, pH, 황화물, Cl, COD_{Cr}, 질산염, Pb, Hg, Cu, Cr⁺⁶, Zn, Cd, Ni, Free-CN 등으로 기본 항목에서 계산된 WQI보다 낮은 경우에만 고려된다. 사용항목의 수에 따라 WQI 값이 달라지기 때문에 다른 하천 또는 다른 연도의 자료와 비교할 경우, 사용된 항목수가 같아야 하므로 두 종류의 지표가 제시되었다. 기본 항목으로부터 계산된 WQI는 시간과 공간에 따른 수질비교를 위해 사용될 수 있어야 하고 추가적인 항목을 포함하는 WQI는 하천의 오염에 보다

많은 정보를 제시하지만 수질의 비교에는 사용할 수 없다.

WQI 계산과정은 먼저 기본항목에 대한 단일 지수를 계산하고, 기본항목의 조화평균을 사용하여 기본 WQI를 계산한다. 그리고 추가로 결정된 항목에 대한 단일지수를 계산, 추가항목과 기본항목에 대해 계산된 WQI의 값을 비교하고, 종합 WQI 산정을 위해 추가항목의 단위지표값이 기본항목 WQI보다 낮은 항목을 선정하여 계산, 최저단위지수에서 한계항목을 선택(이 항목은 종합 WQI의 수치에 큰 영향을 미침)하는 순서로 진행된다.

수질지표는 0에서 100의 범위에 있으며, 깨끗한 물은 100의 값을 가지고, 오염된 물은 0의 값을 가진다. 항목별 지수값(Unit WQI)은 각 수질항목으로부터 계산되며 각 수질항목의 농도(mg/L)를 0~100의 무차원의 수치로 전환하는 연속함수로 계산하고 등급은 4단계로 구분하였다.

(표 4-13) 등급별 점수범위

등급	점수범위	비고
4	0 ~ 25	오염된 물 ↕ 깨끗한 물
3	26 ~ 50	
2	51 ~ 75	
1	76 ~ 100	

수질지표의 종합화방법으로는 조화평균의 제곱근이 선정되었다. 항목별 부지수의 평균법 중 이 방법을 채택한 이유는 이 평균이 가장 낮은 수치를 나타내는 항목에 높은 통계적 의미를 주는 한편 다른 모든 항목을 고려할 수 있는 방법이기 때문이다. 이 방법의 장점은 다양한 항목에 대한 가중치를 고려하지 않아도 된다는 점이다. 그러나 이와 같은 일정가중치 시스템은 다양한 항목 간 특성을 고려하지 않음으로 수질평가를 부적절하게 이끌 수도 있다.

$$WQI = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2}}} \quad \text{if } x_i \neq \text{for each } I$$

$$WQI = 0 \quad \text{if } x_i \equiv \text{for any } I$$

여기서 WQI : 기본수질지표, n : 취해진 지수의 수, xi : 항목 i에 대한 단일지수

마. 러시아

러시아에서는 1964년에 처음으로 일반수질지표(GI : General Index)가 제안된 이래 수질지표에 대한 관심이 지속되고 있으며 여러 종류의 종합지수가 개발되었다. 종합지표에 포함되는 항목은 시료채취지점에서 수체의 상태와 독성물질 등 수질특성을 나타내는 항목을 사용하였고 대부분의 연구자들은 GI안에 포함시켜야 할 항목을 BOD, SS, pH, DO, 대장균, 질산염, Cl, 황산염 등으로 하였으며, GI의 일반적인 형태는 다음과 같이 부지수 함수를 구해 이를 단순산술평균하는 형태를 취하고 있다(Evdokimov, 1990).

$$I = \frac{\sum_i I_i}{n}$$

여기서 n 은 항목수이고 I_i 는 각 항목별 부지수함수로 함수로 산정한 값을 수질등급에 따라 다시 환산한 정수값이다. 매우 깨끗한 하천의 GI는 0~1, 깨끗한 하천은 2, 보통인 하천은 3~4, 약간 오염된 하천은 5~7, 중간정도로 오염된 하천은 8~10, 아주 많이 오염된 하천은 10 이상이 된다.

또 한 예로 러시아과학원 산하의 Ural Scientific Center는 수오염지수 X 를 하천의 화학적 지수 X_{chem} 과 미생물적 지수 X_{bac} 으로 분리하여 계산한 후 종합화하는 다음의 식을 제안했다.

$$X = \sqrt{X_{chem} X_{bac}}$$

모든 화학적 오염물질들은 동급의 위해성을 나타내는 그룹으로 나누어지고, 각 그룹에서 최대치를 구해 이들 최대치의 총합을 다음 식과 같이 구하였다.

$$X_{chem} = \max_i \left(\sum_{j=1}^{n_j} \frac{S_{ij}}{MAC_i} \right)$$

여기서 S_{ij} 는 j 번째 집합의 i 번째 유해물질의 농도이며, MAC_i 는 수용도의 분류에서 최대허용농도(Maximum Allowable Concentration)에 해당하며, n_j 는 j 번째 그룹에 포함되는 총 물질수이다.

X_{bac} 는 위락용도를 위해 사용되는 하천수에 대해 러시아 보건부가 규정한 기준과 실제 대장균지수의 비율이다. 이 지수는 오염물질농도를 물질의

유해성향과 관계없이 선형합으로 계산한 것이 단점이다. 더욱이, 필수오염 물질인 한 화학물질의 수치만 반영하고, 나머지는 최대함수에 의해 제외된다. 수질 GI는 수질의 일반적인 평가와 시계열적 경향 파악 및 수처리시설의 효과 파악에 이용되고 있다.

바. 뉴질랜드

뉴질랜드에서는 일반용, 목욕수용, 용수공급용, 그리고 물고기 산란용의 네 가지 지표가 강과 하천에 대해 고안되었다. 이 중에서 일반적 지표는 실질적으로 수중생태계, 미관, 낚시, 관개, 용수공급 및 수영을 종합적으로 만족시키도록 하는 복합적인 일반수질 지표이다. 지표의 작성은 미국의 National Sanitation Foundation에서 수행한 지표작성방법을 이용하였다. 4개의 용도에 대해 선정한 항목은 DO, pH, 탁도, 온도, BOD₅, 암모니아, Fecal Coliforms 이다. 독성물질은 물질간의 특성이 크기 때문에 포함되지 않았으며 실질적으로 뉴질랜드의 물은 거의 독성이 없다.

부지수곡선은 표준 그래프의 양식을 이용하여 x축은 측정되는 항목치의 기대범위를 나타내도록 하였고, y축은 0에서 100의 점수 범위를 갖도록 작성하였다.

(표 4-14) 부지수의 범위에 대한 설명

부지수 범위	용도에 따른 적합도
$0 \leq I_{sub} < 20$	모든 용도에 전체적으로 부적합
$20 \leq I_{sub} < 40$	여러 가지 용도에 부적합
$40 \leq I_{sub} < 60$	주된 용도, 일부용도에 절충가능
$60 \leq I_{sub} < 80$	모든 용도에 적합
$80 \leq I_{sub} < 100$	모든 용도에 매우 적합

각 항목별로 부지수값(I_{sub})을 산정한 후 최종적인 종합화는 최소함수로 결정하였다(David, 1989).

$$WQI = MIN(I_{sub})$$

각 용도에 대한 물의 적합성은 “가장 열악한 수질”특성에 의해 대부분 결정되므로, 최종적인 물의 상태 결정은 최소값을 이용하였다. 최소함수는 항목수에 제한이 필요 없고, 새로운 항목이 마지막 단계에서 쉽게 추가될 수 있는 장점이 있다.

사. 말레이시아

말레이시아에서는 DO, BOD, COD, SS, NH₃-N, pH 등의 수질항목을 선정하여 강에 대한 WQI를 개발하고 있다. WQI 계산은 다음의 식과 같다.

$$WQI = 0.22*SI_{DO} + 0.19*SI_{BOD} + 0.16*SI_{COD} + 0.15*SI_{NH_3-N} + 0.16*SI_{SS} + 0.12*SI_{pH}$$

여기에서, SI = 각 수질항목의 subindex를 의미한다. 계산된 WQI는 0~100사이의 값을 가지며, 각 구간별로 수질 용도를 정하고 있다.

(표 4-15) 말레이시아의 WQI 구간별 수질용도

WQI Usage	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
일반	심하게 오염된						약간 오염됨		깨끗함	
수질등급	V				IV	III			II	I
공공용수 공급	부적합				미심적용	고도의 처리가 필요함			약간의 정화가 필요함	정화가 필요없음
위락	부적합		명백하게 오염되어 보임	단지 Boating 가능	물에 접촉하는 것에 미심적용	박테리아 검사가 통과될 정도로 오염됨		모든 위락에 적합		
물고기, 패류, 야생생물	부적합			단지 잡종 어종	단지 일반 어종	민감한 어종	송어류	모든 어류에 적합		
항해	부적합			명백하게 오염되어 보임	적합					
처리된 물 소용	부적합	적합								

아. 태국

일반적으로 종합수질지표에 포함되는 항목은 전문가의 견해나 현재의 수분류시스템에 기초하여 선택되어지며, 이 경우 항목간의 상호관계가 무시

되는 것이 문제점으로 지적되고 있다. 수체에서 발생하는 물리-화학적 공정들은 매우 복잡하고 상호 관련 적이어서 한 항목을 강조하는 것이 다른 항목에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 제안된 한 가지 방법이 자료평가에 있어 다중분석방법의 도입이다. 태국에서 개발한 방법은 측정된 모든 수질항목을 인자분석을 통해 최소한의 항목으로 감소시켜 이를 회귀식으로 표현하고 있다. 인자분석을 위해 13개의 수질항목(pH, 온도, NO₂-N, DO, BOD, NO₃-N, T-N, T-P, 탁도, SS, Cl⁻, 전도도, Total Coliform)이 선택되었고 선택기준은 일반적인 수용도를 위해 수질지표에 보편적으로 포함되는 항목, 가능한 폭넓은 자료의 유용성, 자료가 장래에도 수집되어 지속적인 비교가능성에 두었다. 인자분석을 통해 하천의 오염된 부분과 오염되지 않은 부분에 대해 다음과 같은 항목으로 구분하였다.

(표 4-16) 오염정도별 인자분석 결과

하천구간	오염된 부분	오염되지 않은 부분
인자 1	- 염소(CHLO), 전도도(COND)	- DO, NO ₃ -N
인자 2	- 탁도, 부유고형물	- 탁도, 부유고형물
인자 3	- DO, 총질소, BOD, 대장균	- NO ₂ -N, 인

인자분석을 통해 선정된 항목을 이용해 하천의 오염된 부분과 오염되지 않은 부분으로 구분하였고 다시 각각은 3구간(상류, 중류, 하류)으로 구분하여 회귀식을 산정하였으며 오염되지 않은 부분의 결과는 다음과 같다 (Lohani and Todino, 1984).

$$WQI1 = -3.102 + 1.624 \log(\text{DO}) + 0.256 \log(\text{CHLO}) - 0.160 \log(\text{NO}_3) + 0.071 \log(\text{COND}) \quad (R^2 = 0.90)$$

$$WQI2 = -3.194 + 1.226 \log(\text{TURB}) + 0.633 \log(\text{SUSP}) \quad (R^2 = 0.90)$$

$$WQI3 = 8.744 - 0.478 \log(\text{TURB}) - 0.548 \log(\text{SUSP}) + 3.383 \log(\text{NO}_2) \quad (R^2 = 0.90)$$

자. 나이지리아

나이지리아에서는 자연수체의 용도를 물고기의 양식, 가정용, 산업용,

그리고 기타의 4단계로 분류하고 있다. 사용한 수질항목은 수온, pH, DO, BOD, NH₃-N, sulphide(S⁻²), silica, 경도 등이다. WQI의 점수범위는 0점에서 100점까지의 값으로 표현되고, 0~25, 26~50, 51~70의 WQI수치의 하천은 매우 나쁜 하천수질, 나쁜 하천수질, 중간정도의 하천수질로 구분되었고, 71~90과 91~100의 WQI치를 가지는 하천은 좋은 하천수질, 매우 좋은 하천수질로 구분하였다 (Erondy and Nduka, 1993).

차. 이라크

이라크에서는 농사, 축산, 물고기 및 수중생물 유지용수의 3가지 용도로 나누어 TDS, pH, DO, Coli(MPN), Ec, SAR, Cl⁻, NO₂-N, NH₃-N, Cu, B, Ni 등 12개의 항목으로 종합수질지표를 만들었으며 수질등급은 5개의 등급으로 구분하고 있다(Mohammed and Samahat, 1987).

수질지표의 종합화 함수는 다음과 같이 배수형을 취하였다.

$$WQI = \prod_{i=1}^n f_i(p_i)^{\frac{1}{n}} \times 100$$

여기서 n = i번째 용도와 관련이 있는 항목의 수, p_i = i번째 항목의 측정값, f_i(p_i) = i번째 항목에 대한 부지수함수

한편 WQI의 범위와 용도분류는 분류 제안 범위를 정하여 90점 이상을 1등급, 19점 이하를 5등급으로 하였다. 기하평균은 그 용도에 관련된 모든 항목 중 낮은 부지수함수값을 가지는 항목에 민감하게 반응하므로 WQI값이 나쁜 수질을 적절히 반영하게 하였다.

(표 4-17) WQI의 분류 제안범위

용도분류	WQI범위
I	90이상
II	75-89
III	50-74
IV	20-49
V	19이하

2절 농업용저수지 수질지수 개발

1. 농업용저수지 수질지수 형태 검토

국내 호소의 수질을 평가하기 위해 많이 사용되는 지수는 (표 4-18)과 같다. 호소수질등급은 국가수질관리의 목표이며, 배출허용기준 등 수질오염에 대한 각종 규제기준의 근거가 되는 지수로 환경정책기본법에 명시된 지수이다. 호소수질등급은 Ia부터 VI까지 총 7단계로 구성되어 있는 단일항목 지표(수)이다. 9개의 수질항목(pH, COD, SS, DO, T-P, T-N, Chl-a, 총대장균군, 분원성대장균군)별로 별도의 분류기준이 있어 분류기준별 서로 다른 수질등급으로 판정된다.

(표 4-18) 국내 적용 중인 수질지수

수질지수	등급	특징
호소수질등급	7단계 (Ia~VI)	<ul style="list-style-type: none"> ·국내 호소에 적용되고 있는 단일항목지표 ·9개의 수질지표(항목)별로 별도의 분류기준 ·수질지표(항목)별로 판정된 수질등급이 서로 달라 저수지 수질관리에 어려움 ·농업용저수지는 주로 COD기준 수질등급을 적용하여 관리 ·단일항목지표로 종합적인 저수지 수질평가 어려움
Vollenweider 영양상태	5단계 (극빈~부)	<ul style="list-style-type: none"> ·T-N과 T-P의 농도를 기준으로 등급 산정됨 ·81%가 중영양과 중부영양으로 분류되어 변별력 부족
TSI	100단계 (0~100)	<ul style="list-style-type: none"> ·SD, TP, Chl-a농도를 기준으로 별도의 지수 산정 후 산술평균하여 통합된 지수 산정 ·1977년 개발이후 세계 여러 나라에서 적용 ·수환경이 크게 달라 우리나라에 직접 적용하기엔 한계
LQI (TSI _{ko})	100단계 (0~100)	<ul style="list-style-type: none"> ·우리나라 호소에 적합하도록 새로 개발 중인 지수 ·COD, TP, Chl-a농도 별로 지수 산정 후 항목별 가중치를 적용하여 통합지수 산정 ·여러 수질항목이 반영된 종합수질지수
K-WQI (K-CWQI)	100단계 (100~0)	<ul style="list-style-type: none"> ·델파이조사방법으로 개발된 종합수질지수 ·수질항목별로 별도의 지수를 산정할 수 있는 부지수합수를 개발하였으며, 수질항목별 가중치를 적용하여 합한 값을 K-WQI로 함 ·K-WQI는 10개 항목, K-CWQI는 8개 수질항목을 사용 ·다른 수질지수와 달리 지수가 높을수록 수질 양호

호소수질등급은 수질항목별로 수질등급이 서로 달라 호소의 수질관리
에 어려움이 있으며, 농업용저수지는 주로 COD기준 수질등급을 적용하여
저수지의 수질을 관리하고 있다. 호소수질등급은 단일항목지표로 저수지의
종합적인 수질상태를 평가하는데 한계가 있다.

Vollenweider 영양상태는 (표 4-19)와 같이 총인과 무기질소의 농도에 따
라 호소의 영양상태를 극빈영양, 빈중영양, 중영양, 중부영양, 부영양의 5단
계로 분류한다. Vollenweider영양상태를 국내 농업용저수지 수질측정망 대상
저수지로 적용할 경우 약 81%가 중영양과 중부영양으로 분류되어 저수지별
수질평가를 위한 변별력이 부족한 문제점이 있다.

(표 4-19) Vollenweider의 영양상태 분류

영양상태	총인(mg/L)	무기질소(mg/L)
극빈영양	<0.005	<0.2
빈중영양	0.005-0.01	0.2-0.4
중영양	0.01-0.03	0.3-0.65
중부영양	0.03-0.1	0.5-1.5
부영양	>0.1	>1.5

Carlson(1977)은 투명도(Secchi Disk, SD)를 기본으로 적용하여, 여기에 투
명도(SD)와 Chl-a와의 상관관계, Chl-a와 TP와의 상관관계를 연결지어 SD,
Chl, TP를 사용하여 부영양화도를 정량적으로 나타낼 수 있는 부영양화도지
수를 개발하였다. 호소의 수질상태를 판정하기 위해서용 세 가지 TSI의 산
술평균값을 사용한다.

LQI는 김범철(2008)에 의해 개발된 지수로 약 500여개 우리나라 호소의
실측 COD, TP, Chl-a농도의 분포를 바탕으로 0~100 사이의 값을 갖는다.
LQI는 3가지 수질항목별로 별도의 지수(LQI(COD), LQI(TP), LQI(Chl-a))가
있으며, 이들을 종합한 LQI는 LQI(COD)에 50%의 가중치를 주고, LQI(TP)와
LQI(Chla)에는 각각 25%을 가중치를 주어 합하면 된다.

K-WQI는 최지용(1996)에 의해 전문가에 의한 델파이 조사방법으로 개
발된 종합수질지수이다. 10개의 수질항목별로 별도의 지수를 산정할 수 있
는 부지수함수가 있으며, 수질항목별 가중치를 적용하여 합한 값이 K-WQI

이다. 2008년에 K-WQI의 일부 문제를 보완한 K-CWQI를 개발하였으며, K-CWQI는 K-WQI와 달리 8개의 수질항목을 사용한다. K-WQI와 K-CWQI는 다른 지수와 달리 지수가 높을수록 수질이 양호한 상태를 의미한다.

농업용저수지의 수질상태를 평가하기 위해 호소수질등급과 같은 단일 항목지표보다는 TSI, LQI, K-WQI와 같은 종합수질지료가 더 적합할 것으로 판단된다.

2. 수질지수 개발방법 검토 및 적용가능성 분석

앞서 설명한 수질지수의 농업용저수지 적용가능성을 분석하기 위해 종합수질지수 형태의 TSI, LQI, K-WQI, K-CWQI에 대해 (표 4-20)과 같이 자세히 검토하였다.

(표 4-20) 종합수질지수 산정방법 분석

	TSI(1977)	LQI(2006~)	K-CWQI(2006)
지수 산정식	$TSI = \frac{(TSI_{SD} + TSI_{Chla} + TSI_{TP})}{3}$	$LQI = 0.5LQI_{COD} + 0.25LQI_{TP} + 0.25LQI_{Chla}$	$K-CWQI = \prod_{i=1}^8 I_i \times w_i$
부지수 함수	$TSI_{SD} = 10 \times \left(6 - \frac{\ln(SD)}{\ln 2} \right)$ $TSI_{TP} = 10 \times \left(6 - \frac{\ln(48/TP)}{\ln 2} \right)$ $TSI_{Chla} = 10 \times \left(6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln(Chla)}{\ln 2} \right)$	$LQI_{COD} = 5.8 + 64.4 \log(COD)$ $LQI_{Chla} = 12.2 + 38.6 \log(Chla)$ $LQI_{TP} = 114.6 + 43.3 \log(TP)$	pH $< 11 : -3.6797pH^2 + 48.115pH - 53.83$ $> 11 : 280.92e^{-0.2027pH}$ COD $< 2 : -5BOD + 100$ $> 2 : -30.648 \ln COD + 112.27$ $SS : 98.518e^{-0.0302SS}$ $DO : 31.655 \ln DO + 21.942$ $TP : -20.034 \ln TP + 0.3435$ $TN : -24.264 \ln TN + 49.697$ $Chla$ $< 70 : -19.375 \ln Chla + 120.52$ $> 70 : -56.073 \ln Chla + 278.23$ FC $< 1000 : -6.942 \ln FC + 107.59$ $> 1000 : -36.304 \ln FC + 310.72$
수질 항목	SD, TP, Chl-a	COD, TP, Chl-a	pH, COD, SS, DO, TP, TN, Chl-a, F-Coli
지수 범위	0~100	0~100	100~0
대상	호소	호소	하천, 호소 별도
개발 방법	SD기준	농도분포를 바탕으로 25percentile을 40, 75percentile을 60으로 지정	전문가에 의한 델파이조사로부터 수질항목별 부지수 함수 및 가중치 결정

가. TSI(Trophic State Index, 1977)

부영양호와 빈영양호를 나누는 기준들이 다양하고 서로 다르기 때문에 어떤 호수를 부영양호로 판정하여야 할지 빈영양호로 판정하여야 할지를 결정하기 어렵다. 따라서 부영양화를 비교하기 위해서는 객관적인 지수로 나타내는 것이 필요하다. 이러한 취지에서 Carlson(1977)은 투명도를 기본으로 적용하며, 여기에 투명도(SD)와 Chl-a 농도(Chl)와의 상관관계, Chl과 TP와의 상관관계를 연결지어 SD, Chl, TP를 사용하여 부영양화도를 정량적으로 나타낼 수 있는 부영양화도지수를 개발하였다.

수중에 무기부유물이 적은 호수에서는 부유물의 대부분이 식물플랑크톤이며 투명도는 식물플랑크톤의 현존량에 의해 좌우된다는 전제하에 투명도를 기본으로 부영양화도를 평가하고자하였다. 투명도가 1/2로 감소할 때 식물플랑크톤 현존량은 약2배 증가한다. Carlson은 지금까지 보고된 최대 투명도인 41m보다 크고 이에 가장 가까운 정수의 역수를 가진 2의 배수 64m (= 26)를 부영양화도 지수 0으로 정하였고 투명도가 1/2로 감소할 때마다 지수가 10씩 증가하도록 하였다. 따라서 투명도가 2m 일 때 TSI는 50으로 정의되고 투명도가 26, 25, 24, 23, 22, 21, 20, 2-1, 2-2, 2-3, 2-4m로 감소함에 따라 부영양화도 지수는 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 으로 증가한다. 즉 다음과 같은 투명도를 기본으로 하는 부영양화도 지수 TSI(SD)를 제창하였다.

$$TSI(SD) = 10 * (6 - \frac{\ln(SD)}{\ln 2}) \quad (\text{식5-10})$$

여기에 Chl과 TP의 상관관계를 첨가하여 TSI(Chl)과 TSI(TP)도 제안하였다. 미국의 많은 호수에서 조사된 투명도와 Chl-a농도와의 경험적인 관계식

$$SD = 7.69(Chl. a)^{-0.68} \quad \text{또는} \quad \ln(SD) = 2.04 - 0.68 \ln(Chl. a)$$

을 (식5-10)에 대입하여 TSI를 SD의 함수에서 Chl.a의 함수로 변형시켜 TSI(Chl)을 만들었다.

$$TSI(Chl. a) = 10 * (6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln(Chl. a)}{\ln 2}) \quad (\text{식5-11})$$

여기에 이번에는 Chl-a 농도와 TP농도사이의 경험적인 관계식

$$\ln(Chl.a) = 1.449\ln(TP) - 2.442 \quad (\text{식5-12})$$

를 (식5-11)에 대입하여 TSI를 TP의 함수로 변형시켰다.

$$TSI(TP) = 10 * \left(6 - \frac{\ln \frac{48}{TP}}{\ln 2} \right) \quad (\text{식5-13})$$

그 결과 SD, Chl, TP의 세 가지 변수를 사용하는 부영양화도지수를 제창하였으며 일반적으로 이 세 가지 TSI의 평균치를 제시한다. 부영양호와 빈영양호의 경계는 TSI 50~55 에 해당한다.

우리나라의 주요 호수를 대상으로 투명도와 Chl-a, TP의 상관관계를 분석한 결과는 외국의 경우와 유사하다. 그러나 일부 호수에서는 무기부유물질(부유토사)로 인하여 투명도가 크게 저하되는 예도 있으며 체류시간이 짧은 호수에서는 여름 홍수기에 TP에 비하여 SD와 Chl-a 농도가 낮은 것을 볼 수 있다. 투명도와 Chl-a, TP의 관계는 다음과 같은 회귀식으로 나타났다.

$$SD = 4.90(Chl.a)^{-0.45} \quad (r^2 = 0.62) \quad (\text{식5-14})$$

$$Chl.a = 0.26 TP^{1.01} \quad (r^2 = 0.62) \quad (\text{식5-15})$$

$$SD = 16.2 TP^{-0.65} \quad (r^2 = 0.77) \quad (\text{식5-16})$$

한편 유럽의 호수에서는 $SD = 9.33(Chl.a)^{-0.51}$ 의 관계식을 얻었다(OECD). Aizaki 등(1981)은 Chl-a 를 기본기준으로 하고 일본 호수에서의 상관관계식을 적용함으로써 수정된 지수를 제안하였다. 우리나라 호수의 지표 간 상관관계가 외국과 다르다면 우리나라의 상관관계를 적용하여 Aizaki 등이 일본의 호수에서 얻은 상관관계를 적용한 것과 같이 TSI를 한국의 지수로 수정할 수도 있다. 부영양화도지수의 중심이 되는 지표는 지수마다 다르며 지표간의 상관관계도 지역의 자연환경에 따라 다르다.

나. LQI(Lake Water Quality Index)

우리나라 자연환경 특성을 고려하여 외부기원 유기물을 특성을 고려하여 COD, 내부생성 유기물로 식물플랑크톤의 현존량을 대신하는 Chl-a, 그리

고 부영양화의 중요한 원인이 되는 인자 TP 세 가지를 호수 수질 평가 항목으로 선정하였다. 한국에 분포하는 500여개의 호수를 대상으로 계절적 변동의 median이 가지는 분포 확률을 조사하여 평가 항목에 대하여 25th percentile, 75th percentile을 산출하였다. 지수의 분산을 결정하기 위하여 25th percentile을 지수 40으로 75th percentile을 지수 60으로 정하였다. 이는 전국 500여개 호수 수질자료의 median이 지수 50을 가지게 되며 지수 40과 60사이에 우리나라 호수의 50%가 포함된다는 것을 의미한다. 각 지표항목의 분포를 log변환하여 선형화하고 각 부영양화지수와 농도의 관계식을 구하였다. 각 계산식은 다음과 같다.

$$\text{LQI (COD)} = 5.8 + 64.4 \log(\text{COD mg/L}) \quad (\text{식5-17})$$

$$\text{LQI (Chl.a)} = 12.2 + 38.6 \log(\text{Chl-a mg/m}^3) \quad (\text{식5-18})$$

$$\text{LQI (T-P)} = 114.6 + 43.3 \log(\text{T-P mg/L}) \quad (\text{식5-19})$$

위의 세 가지 LQI를 종합하여 나타낼 경우에는 외부기원과 내부기원에 각각 50 %의 가중치를 주어 평균 LQI를 계산한다. 내부생성유기물의 지표는 조류의 밀도지표인 Chl.a이며 TP는 조류의 밀도를 좌우하는 지표이므로 이 두 가지에 각각 25 %의 가중치를 주어 다음 계산식과 같이 계산하여 사용한다. T-P 항목 외에 투명도와 탁도도 보조자료로 사용할 수 있다. 조사 기관에 따라서 투명도를 측정하기도 하고 탁도를 측정하기도 하므로 사용가능한 지표를 선택하여 계산에 사용한다.

$$\text{평균 LQI} = 0.5 \text{ LQI(COD)} + 0.25 \text{ LQI(Chl.a)} + 0.25 \text{ LQI(TP)} \quad (\text{식5-20})$$

이외에도 투명도와 탁도도 부영양화를 지표하는 보조 자료로서 사용할 수 있다. 조사 기관에 따라 투명도를 측정하기도 하고 탁도를 측정하기도 하므로 가용한 조사항목에 따라 다음 두 가지 지표 가운데에서 선택하여 사용할 수 있다.

$$\text{LQI (SD)} = 56 - 49.6 \log(\text{SD m}) \quad (\text{식5-21})$$

$$\text{LQI (TUR)} = 29.7 + 28.1 \log(\text{TUR NTU}) \quad (\text{식5-22})$$

LQI에 의한 호수의 수질 상태는 30이하는 빈영양, 50이하는 중영양, 70이하는 부영양, 그리고 70이상은 과부영양 상태로 평가한다. 한국에 분포하는 농업용 저수지 500 개와 중-대형 호수 자료 84개, 그리고 직접 현장에서 측정된 22개 호수자료에 대하여 LQI를 이용하여 한국 호수의 영양분포를 평가하였다. 그 결과, 56%가 빈-중영양상태, 44%가 부-과부영양상태로 평가되었다. 이는 한국 호수의 특징을 고려하여 개발된 평가 지표 LQI가 한국의 전반적인 호수의 영양상태를 평가하는데 적합하다는 것을 나타낸다.

다. K-CWQI

1996년에 개발된 K-WQI를 모태로, 기존 K-WQI가 지녔던 문제점과 한계를 보완하고, 10여 년간 변화한 국내 실정을 반영하여 새로 도입될 환경정책기본법 개정안 하에 실용화될 수 있도록 종합수질지표를 개발하였다. K-CWQI는 항목의 선정, 부지수 함수 작성, 항목별 가중치 설정, 항목의 종합화를 거쳐 개발되었다.

(1) 항목의 선정

항목 선정은 수질환경기준에 근거하여 하천·호소별, 각 수체의 하위항목, 농도에 대한 등급까지 수질환경기준 개정안의 틀 안에서 결정함으로써 향후 행정 적용시 혼선을 줄일 수 있도록 하였다. 호소의 경우 전문가 설문조사 결과를 바탕으로 96%의 전문가가 호소 항목으로 적합하다는 의견을 제시한 pH, COD, SS, DO, TP, TN, Chl-a, 분원성대장균군을 기준 항목으로 채택하고 있다.

(2) 부지수 함수 작성

전문가 설문을 통해 우리나라의 수질환경기준과 우리나라 국민의 점수에 대한 일반적 사고 수준을 참고로 하여 작성한 배점 구분표를 각 전문가에게 제시하여 검증을 검증 받았다. 점수구분은 누구나 잘 이해할 수 있는 범위를 제시하기 위해 60점 이상은 보통, 40점 이하는 나쁨으로 구분하였다. 또한 “매우나쁨”은 예외적으로 20~40점의 범위를 갖게 설정하여 아무리 수질이 나빠도 20점 미만으로는 떨어지지 않는 안정장치를 갖도록 하였다.

각 수질항목별 부지수함수를 결정하기 위해 선형식, semi-log식, log-log

식을 부지수 함수의 기초식으로 하여 전문가들이 산정한 수질농도별 평균점수를 각 식에 접합시켰을 때 상관성이 가장 높은 함수를 선택하였다. 또한 기존에 개발된 K-WQI에서 부지수함수값은 일정 기준을 넘어서면 하한값 없이 바로 '0'으로 떨어져 종합수질지표 자체값을 '0'으로 만드는 문제가 있었다. K-CWQI는 이를 보완하여 각 항목의 부지수함수의 최소값을 '20'으로 고정하여 그 항목에서 수질이 아무리 낮더라도 최소한 20점의 점수는 확보할 수 있는 안전장치를 마련하였다. K-CWQI에서 사용되는 부지수함수는 다음과 같다.

(표 4-21) K-CWQI 부지수함수

항목	부지수함수	R ²
pH	$< 11 : M(pH) = -3.6797pH^2 + 48.115pH - 53.83$ $> 11 : M(pH) = 280.92e^{-0.2027pH}$	0.9993 0.9966
COD	$< 2 : M(COD) = -5BOD + 100$ $> 2 : M(COD) = -30.648\ln COD + 112.27$	1.0000 0.9937
SS	$M(SS) = 98.518e^{-0.0302SS}$	0.9954
DO	$M(DO) = 31.655\ln DO + 21.942$	0.9891
TP	$M(TP) = -20.034\ln TP + 0.3435$	0.9870
TN	$M(TN) = -24.264\ln TN + 49.697$	0.9932
Chl-a	$< 70 : M(chla) = -19.375\ln Chla + 120.52$ $> 70 : M(chla) = -56.073\ln Chla + 278.23$	0.9853 1.0000
분원성대장균군	$< 1000 : M(FC) = -6.942\ln FC + 107.59$ $> 1000 : M(FC) = -36.304\ln FC + 310.72$	0.9789 0.9999

(3) 항목별 가중치 설정

항목별 중요도를 정량화하기 위해 계층분석과정(AHP)를 이용하여 8개 항목 상호간의 중요도를 비교하여 설정하였다. 호소의 항목별 가중치는 다음과 같다.

(표 4-22) K-CWQI 항목별 평균 가중치

항목	pH	COD	SS	DO	TP	TN	Chl-a	FC
가중치	0.05	0.25	0.07	0.09	0.19	0.13	0.13	0.08

(4) 항목의 종합화

K-XWQI의 부지수 함수를 K-WQI와 동일한 감소형 지수로 선정하였으며, 가중된 곱의 형태(weighted product)를 종합화식으로 선택하였고, 구체적인 식은 다음과 같다.

$$K-CWQI = \prod_{i=1}^8 (I_i \times w_i) \quad (\text{식5-23})$$

여기서 I_i : 각 항목의 부지수함수 계산값

w_i : 2차에 걸친 설문결과 평균가중치

(5) K-CWQI 점수 구간별 특성

K-CWQI의 결과를 기존의 호소수질등급과 비교하고 각 점수 구간별 특성을 정리하면 다음과 같다.

(표 4-23) K-CWQI 점수 구간별 특성 및 용도

등급		K-CWQI	특성 및 용도
매우 좋음	Ia	100~90	-용존산소가 풍부하고 오염물질이 없는 청정상태의 생태계 -간단한 정수처리 후 생활용수 이용 가능
좋음	Ib	89~80	-용존산소가 많은 편이며, 오염물질이 거의 없는 청정상태에 근접한 생태계
약간 좋음	II	79~70	-약간의 오염물질은 있으나 용존산소가 많은 상태의 다소 좋은 생태계 -일반적 정수처리 후 생활용수 이용 가능 -수영용수 이용 가능
보통	III	69~60	-용존산소를 소모하는 오염물질이 보통수준에 달하는 일반 생태계 -고도의 정수처리 후 생활용수 이용 가능 -일반적 정수처리 후 공업용수 이용 가능
약간 나쁨	IV	59~50	-상당량의 용존산소를 소모하는 오염물질이 있어 나쁜 영향을 받는 생태계 -고도의 정수처리 후 공업용수 이용 가능 -농업용수 이용 가능 -낚시 가능
나쁨	V	49~40	-과량의 용존산소를 소모하는 오염물질이 있어 물고기가 드물게 관찰되는 빈곤한 생태계 -산책 등 국민의 일상생활에 불쾌감을 유발하지 않는 한계 -특수한 정수처리 후 공업용수 이용 가능
매우 나쁨	VI	39~20	-용존산소가 거의 없는 오염된 물로 물고기가 살 수 없음

국내 호소 수질평가에 이용되고 있는 3가지 수질지수(TSI, LQI(TSIko), K-CWQI(K-WQI)) 중 TSI는 농업용저수지 수질측정망 조사 항목으로 투명도(SD)가 포함되어 있지 않아 적용할 수 없으며, K-WQI는 DOs, NH₃-N, NO₃-N, TC(총대장균군)가 포함되어 있지 않고, K-CWQI는 FC(분원성대장균군)가 포함되어 있지 않아 적용할 수 없다. 반면에 LQI는 COD, T-P, Chl-a의 농도만을 요구하여 농업용저수지 수질측정망 조사자료 만으로 충분히 적용이 가능하다.

3. 농업용저수지 수질지수 개발

가. 농업용저수지 수질지수(LQI_{ar}, rLQI_{ar}) 개발

LQI 개발 방법이 명확하고 쉬워 농업용저수지 수질측정망 조사자료 만을 이용해 별도의 농업용저수지 수질지수를 개발할 수 있을 것으로 판단되어, 농업용저수지 수질을 평가하기 위한 별도의 농업용저수지 수질지수를 개발하였다.

지금까지 수집된 농업용저수지 수질조사 자료를 종합한 결과 1996년부터 2011년까지 총 7373개의 수질자료가 수집되었다. 연도별로 조사된 지점수가 차이가 발생하여, 수집된 기간별로 그룹을 정하여 각 그룹별로 확률분포를 비교하였다. 전체 기간(1996~2011) 동안 수집된 자료를 1그룹, 수질측정망이 지정되어 본격적으로 운영되었던 2001~2011 동안 수집된 자료를 2그룹, 측정지점수가 동일한 2001~2008 동안 수집된 자료를 3그룹, 가장 최근인 2011년에 수집된 자료를 4그룹으로 지정하여 각 그룹별 25 percentile과 75 percentile의 농도를 구하였다. 기존의 LQI와 비교하기 위해 LQI 개발에 사용되었던 25 percentile과 75 percentile도 구하였다. 각 그룹별 항목별 25 percentile과 75 percentile 농도는 (표 4-24)와 같다.

(표 4-24) 수질항목별 25th percentile과 75th percentile 농도

구 분	기간	자료수	COD (mg/L)	T-P (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
25th percentile	1996~2011	7373	3.80	0.017	5.50
	2001~2011	6368	3.70	0.016	5.20
	2001~2008	3892	3.70	0.015	5.40
	2011	825	3.70	0.015	5.40
	LQI	500	3.73	0.020	5.38
75th percentile	1996~2011	7373	7.30	0.059	20.30
	2001~2011	6368	7.20	0.058	18.80
	2001~2008	3892	7.20	0.056	21.20
	2011	825	7.20	0.056	21.20
	LQI	500	7.23	0.060	20.38

(표 4-24)에서 일부 항목을 제외하고는 각 그룹별 25th percentile과 75th percentile 농도가 비슷한 범위의 값을 나타내었고, LQI와도 비슷한 범위를 나타냈다. 본 연구에서 농업용저수지 수질지수 개발에 농업용저수지 수질측정망이 운영되어 조사되기 시작했던 2001년부터 2011년까지 수집된 6,368개의 수질측정자료를 이용하여 농업용저수지 수질지수를 개발하였다. LQI 지수 개발방법과 유사하게 2001년부터 2011년까지 실측된 연평균 COD, T-P, Chl-a 농도의 확률분포로부터 25th percentile에 해당되는 COD 3.70 mg/L, T-P 0.016 mg/L, Chl-a 5.20 mg/m³에서 지수 '40', 75th percentile에 해당되는 COD 7.20 mg/L, T-P 0.058 mg/L, Chl-a 18.80 mg/m³에서 지수 '60'이 되도록 하였다. 또한 낮은 농도에서 음의 값이 발생하는 문제를 해결하기 위해 2001년부터 2011년까지 실측된 연평균 COD, T-P, Chl-a의 농도 중 최저농도를 바탕으로 COD 1.0 mg/L, T-P 0.001 mg/L, Chl-a 0.4 mg/m³에서 지수가 '0'이 되도록 하였고, 실측된 최고농도를 바탕으로 COD 28.0 mg/L, T-P 1.000 mg/L, Chl-a 250 mg/m³에서 지수가 '100'이 되도록 하였다. 각 지표항목의 분포를 log변환하여 선형화하고 지수와 농도의 관계식을 구하였다. 각 계산식은 다음과 같다.

$$LQI_{ar}(\text{COD}) = 0.3769 + 69.096 \log(\text{COD mg/L}) \quad (\text{식5-17})$$

$$LQI_{ar}(\text{T-P}) = 100.39 + 33.413 \log(\text{T-P mg/L}) \quad (\text{식5-18})$$

$$LQI_{ar}(\text{Chl.a}) = 14.319 + 35.769 \log(\text{Chl-a mg/m}^3) \quad (\text{식5-19})$$

위의 세 가지 LQI_{ar} 를 종합하여 나타낼 경우에는 LQI와 동일하게 COD에 50%의 가중치를 주고, T-P와 Chl-a에 각각 25%의 가중치를 주어 다음 계산식과 같이 계산하여 사용한다.

$$LQI_{ar} = 0.50 LQI_{ar}(\text{COD}) + 0.25 LQI_{ar}(\text{T-P}) + 0.25 LQI_{ar}(\text{Chl-a}) \quad (\text{식5-20})$$

또한 높은 값이 좋은 수질을 나타낼 수 있도록 추가로 rLQI_{ar}지수를 개발하였다. rLQI_{ar}지수는 (식5-21)과 같이 100에서 (식5-20)에서 산정한 LQI_{ar} 을 뺀 값으로 대부분 LQI_{ar} 과 비슷한 특징을 갖는다.

$$rLQI_{ar} = 100 - LQI_{ar} \quad (\text{식5-21})$$

나. 개발된 농업용저수지 수질지수(LQI_{ar}, rLQI_{ar}) 적용성 평가

개발된 농업용저수지 수질지수(LQI_{ar}, rLQI_{ar})의 적용성을 평가하기 위해 부지수함수 도출에 이용한 COD, T-P, Chl-a의 최소, 최대, 25 percentile, 75 percentile 농도에 대한 LQI, LQI_{ar}, rLQI_{ar}을 산정하였으며, 그 결과는 (표 4-25)와 같다. (표 4-25)에서 본 연구에서 개발한 농업용저수지 수질지수(LQI_{ar}, rLQI_{ar})는 당초 계획과 같이 최소, 최고 농도에서 각각 0과 100의 값을 나타내었고, 25 percentile과 75 percentile 농도에서 각각 40과 60의 값을 나타내었다. LQI 역시 25 percentile과 75 percentile에서 약간의 차이가 있기는 하지만, LQI_{ar}과 유사한 값을 나타내었다. 반면에 최저농도에서 COD, T-P, Chl-a의 LQI 값은 각각 6, -15, -3을 나타내었고, 최고농도에서는 각각 99, 115, 105를 나타내었다. 그러므로 농업용저수지 수질측정망 실측자료로부터 개발한 농업용저수지 수질지수(LQI_{ar}, rLQI_{ar})가 농업용저수지의 수질농도 분포를 잘 반영하여 지수가 산정되는 것으로 나타났다.

(표 4-25) 확률분포별 LQI, LQI_{ar} 및 rLQI_{ar}

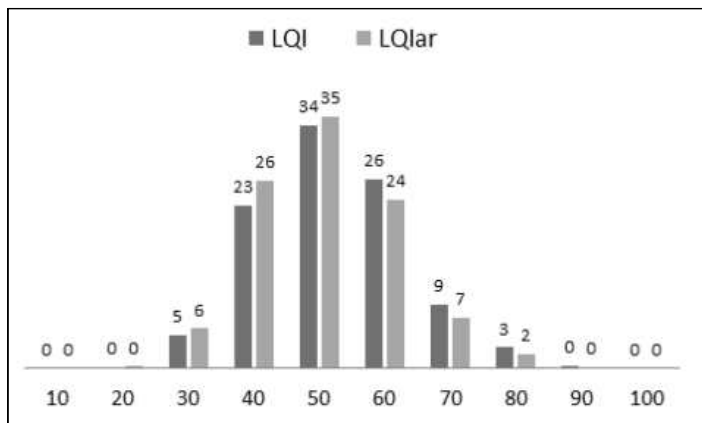
구 분		COD	T-P	Chl-a
최소	농도 (mg/L, mg/m ³)	1.00	0.001	0.4
	LQI	6	-15	-3
	LQI _{ar}	0	0	0
	rLQI _{ar}	100	100	100
25 percentile	농도 (mg/L, mg/m ³)	3.70	0.016	5.2
	LQI	42	37	40
	LQI _{ar}	40	40	40
	rLQI _{ar}	60	60	60
75 percentile	농도 (mg/L, mg/m ³)	7.20	0.058	18.80
	LQI	61	61	61
	LQI _{ar}	60	59	60
	rLQI _{ar}	40	41	40
최대	농도 (mg/L, mg/m ³)	28.0	1.000	250
	LQI	99	115	105
	LQI _{ar}	100	100	100
	rLQI _{ar}	0	0	0

농업용저수지 수질지수를 기존의 호소 생활환경기준과 비교하기 위해 호소 생활환경기준의 등급별 COD, T-P, Chl-a 농도를 이용해 LQI, LQI_{ar}, rLQI_{ar}을 산정한 결과는 (표 4-26)과 같다. 농업용저수지의 수질기준인 IV등급의 LQI와 LQI_{ar}은 각각 69와 66로 산정되었다. Ia와 Ib는 LQI와 LQI_{ar}이 동일한 지수값을 나타내는 반면, 등급이 낮아질수록 차이가 커져서 V등급에서는 LQI가 LQI_{ar}보다 약 4높은 값을 나타내었다. 그러므로 저농도와 고농도를 제외한 구간에서는 LQI와 LQI_{ar}이 비슷한 값을 나타내었다.

(표 4-26) 호소수질등급별 농업용저수지 수질지수

		Ia	Ib	II	III	IV	V	VI
호소 수질 등급	COD	<2	<3	<4	<5	<8	<10	>10
	T-P	<0.01	<0.02	<0.03	<0.05	<0.1	<0.15	>0.15
	Chla	<5	<9	<14	<20	<35	<70	>70
수질 지수	LQI	<31	<42	<50	<57	<69	<78	>78
	LQI _{ar}	<31	<42	<49	<55	<66	<74	>74
	rLQI _{ar}	>69	>58	>51	>45	>34	>26	<26

2011년에 실측한 농업용저수지 825개소에 대해 LQI와 LQI_{ar}을 산정한 결과 <그림 4-1>과 같은 분포를 나타내었다. LQI_{ar}은 대부분 30~80사이에 존재하였으며, LQI_{ar} 50, 40, 60 순으로 많은 분포를 나타내었다.



<그림 4-1> LQI 및 LQI_{ar} 분포

rLQI_{ar}은 0부터 100사이의 값을 갖는 지수로 범위가 매우 넓어 10개 이하의 등급수를 갖도록 재분류하여 사용할 수 있다. rLQI_{ar}은 일단위에서 반올림하여 11개 등급으로 재분류한 rLQI_{ar}10로 사용할 수 있으며, 이를 다시 기존의 수질등급과 유사한 Ia(매우 좋음) ~ VI(매우나쁨)로 재분류 할 수 있다. 또한 (표 4-27)과 같이 A(100~65), B(64~55), C(54~45), D(44~35), E(34~25), F(24~0)의 6단계로 분류하거나, 우수(100~65), 보통(64~45), 문제(44~35), 과락(35~0)의 4단계로 재분류할 수 있다. 마지막으로 영양상태를 나타내는 빈영양(100~65), 중영양(64~45), 부영양(44~35), 과영양(35~0)의 4단계로 재분류하여 사용할 수 있다.

(표 4-27) rLQI_{ar} 재분류 및 2011년 측정망대상저수지 분포 비율

기존 호소 수질등급	rLQI _{ar}	재분류					
		rLQI _{ar} 10	1안		2안	3안	4안
Ia	100 ⋮ 95	100 (0%)	Ia (0%)	매우 좋음 (0%)	A (6%)	우수 (6%)	빈영양 (0%)
	94 ⋮ 85	90 (0%)					
	84 ⋮ 75	80 (0%)					
	74 ⋮ 69	70 (6%)					
Ib	69 ⋮ 65	60 (6%)	Ib (6%)	좋음 (6%)	B (26%)	보통 (61%)	중영양 (61%)
II	64 ⋮ 58	60 (26%)	II (26%)	약간좋음 (26%)			
III	54 ⋮ 51	50 (35%)	III (35%)	약간보통 (35%)			
IV	45 ⋮ 44 ⋮ 35	40 (24%)	IV (24%)	약간나쁨 (24%)	D (24%)	문제 (24%)	부영양 (24%)
V	34 ⋮ 26	30 (7%)	V (7%)	나쁨 (7%)	E (7%)	과락 (9%)	과영양 (9%)
VI	24 ⋮ 15	20 (2%)	VI (2%)	매우나쁨 (2%)	F (2%)		
	14 ⋮ 5	10 (0%)					
	4 ⋮ 0	0 (0%)					

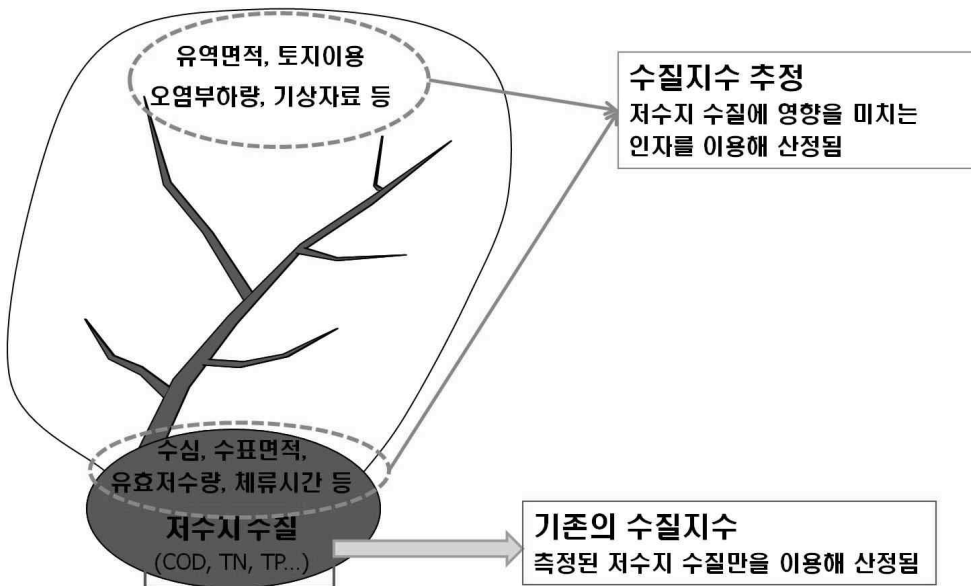
5장 농업용저수지 수질지수 추정기법 연구

5장 농업용저수지 수질지수 추정기법 연구

1절 수질지수 추정기법 연구 방향

1. 기존 수질지수 산정법과 차이점

농업용저수지의 수질은 유역면적, 토지이용, 오염부하량과 같은 유역 특성인자와 저수지 수심, 만수면적, 유효저수량 및 체류시간과 같은 저수지 특성인자에 영향을 받아 저수지의 수질로 나타난다. 기존의 수질지수는 이미 나타난 저수지의 수질만을 이용해 수질상태를 나타내도록 지표 또는 지수를 개발한 반면, 본 연구에서의 목표는 저수지 수질을 제외한 저수지 수질에 영향을 미치는 유역 및 저수 특성인자를 이용해 수질지수를 추정할 수 있는 수질지수 추정기법을 개발하는 것이다. 본 연구에서 개발하고자 하는 수질지수 추정기법은 기존의 수질지수와 달리 오염부하량, 토지이용 등과 같은 유역 및 저수지 특성인자의 변화에 따른 저수지 수질변화를 분석할 수 있어 저수지 수질관리에 도움을 줄 수 있다.

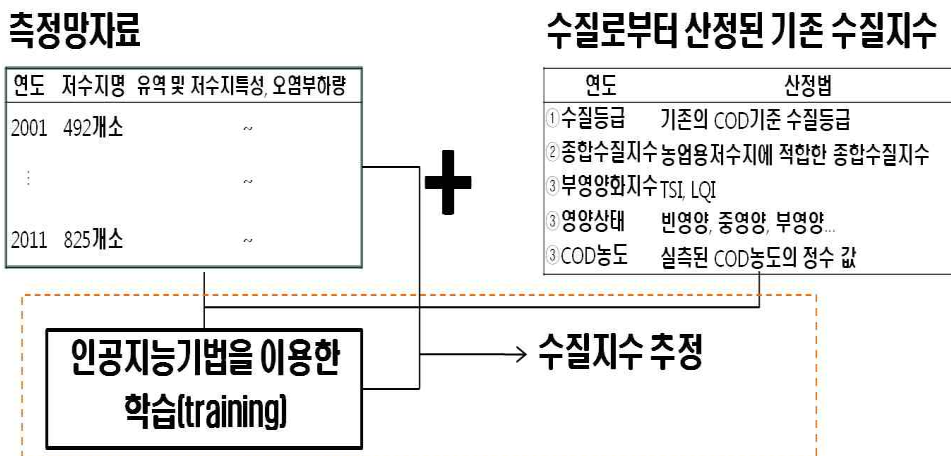


<그림 5-1> 농업용저수지 수질지수 추정 개념도

2. 인공지능기법을 이용한 수질지수 추정기법 개발 방향

농림축산식품부에서는 주요 농업용저수지 825개소(2013년 기준)를 측정망 저수지로 지정하여 각 시설의 유역 및 저수지 제원, 유역의 발생부하량(생활계, 축산계, 산업계, 양식계, 토지계), 토지이용, 저수지의 수질 등을 매년 조사하여 수집하고 있다. 따라서 장기간 많은 농업용저수지를 대상으로 수집된 측정망 자료를 인공지능기법을 이용해 농업용저수지의 수질과의 관계를 분석하여 추정기법을 개발하였으며, 다음과 같은 과정으로 개발하였다.

- ① 매년 실측된 수질을 이용해 여러 종류의 수질지수를 산정함
- ② 수집된 수질측정망자료, 기상자료 및 산정된 수질지수를 DB화함
- ③ 상관관계 분석 등을 통해 여러 개의 수질측정망 인자 및 기상자료 중 저수지 수질에 영향을 크게 미치는 영향인자 선정함
- ④ 인공지능기법을 이용해 선정된 저수지 수질영향인자와 산정된 수질지수 사이의 관계를 학습(training)시킴
- ⑤ 학습된 인공지능기법에 수질지수를 추정하고자하는 저수지의 수질영향인자를 입력하면, 해당저수지의 수질지수가 추정됨.



<그림 5-2> 농업용저수지 수질지수 추정 과정

2절 수질지수 추정을 위한 인공지능기법 연구

1. 서론

환경 분야에서 사용되고 있는 대부분의 수질모델은 물질수지, 물리·화학적 법칙을 기반으로 개발되었으며, 모델링 과정이 주로 모델 구축 및 검보정에 집중된다. 환경 분야에 있어서 이러한 모델링 방법은 환경시스템과 관련된 모든 과정을 묘사하는데 한계가 있으며, 모델 검보정을 위한 실측 자료가 부족하여 많은 노력과 시간을 투자하는데 비해 정확도 및 정밀도가 낮은 문제점을 가지고 있다.

Hong and Bhamidimarri(2003)는 실규모 활성슬러지 하수처리장의 비선형 다변량 공정모델을 유도하는데 유전자 프로그래밍(GP) 기반의 자동 공정모델 유도 시스템을 개발하였고, 개발된 모델은 일반적인 수치모델보다 훨씬 높은 정확도를 나타내었다. Khalil *et al.*(2012)은 수년간 실측된 수질자료를 인공신경망(ANN) 기법으로 학습시킨 후 실측하기 쉬운 수질항목을 이용해 실측하기 어려운 수질을 예측한 결과 실측된 수질과 예측된 수질이 유사하게 나타나 적용성이 뛰어나다고 판단하였다.

이처럼 일부 분야에서는 전통적인 수치모델보다 데이터기반의 모델링 방법이 더 높은 정확도를 나타내기도 한다. 그러므로 환경 분야에서 전통적인 수치모델링 기법 외에 데이터기반의 모델링 방법을 도입하여 병행 사용하거나 두 방법을 서로 연계하여 적용하는 방법도 고려할 만한 가치가 있다고 생각한다.

본 연구에서는 농업용저수지의 수질관리를 위해 기존에 많이 사용되고 있는 수치모델이 아닌 수집된 자료로부터 수질지수를 추정하는 데이터기반의 모델링(data based modeling) 방법을 선택하였다. 여러 데이터기반의 모델링 방법 중 인공지능기법을 이용해 저수지 수질에 영향을 미치는 인자로부터 농업용저수지 수질지수를 추정하는 방법을 선택하였다. 농업용저수지 수질지수를 추정할 수 있는 인공지능기법으로 인공신경망(Artificial Neural Network) 기법, 유전자프로그래밍(genetic programming) 기법, 의사결정트리(decision tree) 기법을 선택하였다. 각 인공지능기법별 기본 이론 및 장·단점에 대해 다음에 자세히 설명하였다.

2. 인공신경망(ANN; Artificial Neural Network)

가. 인공신경망의 기본이론

인간의 뇌는 처리의 최소단위인 뉴런(neuron)이라는 기본소자를 이용하여 정보를 처리한다. 뉴런이라는 신경세포는 세포체(cell body), 수상돌기(dendrites), 그리고 축삭돌기(axon)로 구성되었고, 뉴런간의 정보전달은 시냅스(synapse)라는 것을 통하여 전달하고 있다. 뉴런의 동작원리는 단순하지만 수많은 신경세포들이 연결망을 이루어 인간의 복잡한 모든 행동을 통제하고 조절하고 있는 것이다. 신경망모형은 이러한 신경세포의 정보처리 과정을 수학적으로 모델링한 것으로써 입력과 출력을 가지는 자동적인 학습기계라고 말할 수 있다. 즉, 인공신경망은 인간 두뇌의 구조와 기능을 모방하여 신경세포가 갖는 처리와 특징을 각각 입력과 출력 그리고 정보처리부분과 기억장소를 가진 매우 간단한 컴퓨터와 동일한 구조를 가지고 연결강도를 이용하여 정보를 출력하여 주는 것이다.

인공신경망모형은 McCulloch and Pitts(1943)가 단순한 형태의 뉴런(neuron)을 제안하면서 탄생하였다. 이들의 뉴런은 다른 뉴런으로부터의 입력에 대한 가중 합을 계산하고, 그 값이 임의의 임계값을 경계로 하여 0과 1을 출력하도록 한 단순한 논리를 구현한 형태이다. Donald Hebb(1949)는 두 뉴런 사이의 연결강도(weight)를 조절할 수 있는 학습규칙을 최초로 발표하였다. 이후 Frank Rosenblatt(1958)는 퍼셉트론(perceptron)이란 최초의 신경망모형을 발표하면서 많은 연구가 뒤따르게 되었다. 퍼셉트론 모형은 입력층과 출력층으로 구성되며 어떠한 형태의 패턴이 입력층에 주어지면, 신경망내의 연결강도들을 스스로 조정하면서 학습할 수 있도록 한 것이다.

퍼셉트론이 제안된 후에 신경망모형은 큰 기대를 모았다. 그러나 Marvin Minsky and Seymour Papert(1969)가 저서 「Perceptron」에서 단일층 신경망의 이론적 한계를 지적하였다. 이들은 퍼셉트론 모형을 수학적으로 분석하여, 이 모형이 간단한 XOR 함수도 모의하지 못하며 선형분리 문제밖에 해결할 수 없는 한계점을 명확히 밝히면서 신경망에 관한 연구는 약 20여 년간의 상당히 오랜 암흑기를 거치게 된다. Rosenblatt이 제안한 단순 퍼셉트론(simple perceptron)의 한계는 은닉층이 없다는 것이다. 따라서 입력층, 출력층의 단순 퍼셉트론에 하나 이상의 은닉층을 가지는 다층 퍼셉트론(multi-layer perceptron)과 같은 새로운 모형이 제시되었다. 그러나 이를 학습시킬 수 있는 알고리즘이 개발되지 않아 지속적인 발전은 이루어지지 않았다.

그 후 Hopfield(1982)는 순환신경망 구조와 연상 메모리를 가지는 Hopfield 모델을 발표하였고, Kohonen(1982)는 비교사학습(unsupervised learning)의 일종인 SOFM(self organizing feature map)을 개발하여 다층 퍼셉트론의 학습을 가능하게 하는 델타규칙의 일원화를 개발하였는데, 그것이 바로 유명한 역전파학습(back propagation) 알고리즘이다. 역전파학습 알고리즘은 입력값에 의해서 얻어진 출력값과 목표값과의 오차를 역으로 전파시켜 연결강도를 조절해 나가는 방법이다. 역전파 알고리즘이 발표된 이후 신경망이론에 대한 연구가 활발하게 이루어지기 시작하였으며, RBF(radial-basis function networks) 등과 같은 신경망 모형이 우후죽순처럼 등장하게 된다. 이처럼 발전되어 온 신경망 모형이 응용되어지고 있는 분야는 매우 다양하며 거의 모든 공학분야, 의학분야, 심지어 경영학 분야에도 이용되고 있으며, 최근 수자원 및 영상처리 분야에도 활발하게 적용되고 있다.

나. 인공 신경망의 특징 및 기능

신경망은 단순한 기능을 가진 무수히 많은 신경세포 또는 처리소자(processing element)들이 병렬 연결된 연산구조로 되어 있다. 그 특징은 다음과 같다.

- (1) 각 신경세포는 다른 신경세포들과 완전히 독립된 기능을 갖는다. 즉, 신경세포의 출력은 자신과 연결된 연결강도를 통하여 직접 전달되는 정보에만 의존할 뿐, 다른 정보들과는 무관하다. 이와 같은 특징으로 인하여 병렬처리가 가능하므로 연산속도가 매우 빠르다.
- (2) 신경망은 무수히 많은 연결강도를 가지고 있다. 따라서 정보의 분산 표현 및 처리가 가능하다. 또, 중복성(redundancy)이 크므로 fault-tolerant 할 뿐만 아니라 일부의 정보로부터 전체를 얻을 수 있는 연산기억(associative memory) 특성을 갖는다.
- (3) 학습이나 훈련을 통해 연결강도를 조정함으로써 새로운 정보를 추가하거나 변경할 수 있는 적응특성을 가지고 있다.

신경망은 알고리즘을 프로그램 명령어에 의해 순차적으로 처리하는 패턴인식방식의 컴퓨터로는 해결하기가 곤란한 다음과 같은 문제들에 적합하다고 알려져 있다.

- (1) 패턴분류(pattern classification) : 입력패턴들을 그 특성에 따라 분류한

다. 이때, 분류된 집단(class)이나 군(cluster)은 그것을 대표하는 고유한 패턴으로 식별될 수 있다.

(2) 패턴완성(pattern completion) : 불완전한 패턴으로부터 완전한 패턴을 생성한다. 잡음제거 문제도 여기에 속한다.

(3) 함수근사(function approximation) : 입력패턴에 대응하는 출력패턴을 생성한다. 이때, 입력과 출력 사이의 대응관계는 임의의 함수 또는 mapping이 가능하다. 패턴접합 문제도 넓은 의미에서 여기에 속한다고 볼 수 있다.

이러한 문제들의 공통적인 특징은 다음과 같다. 첫째, 주어진 문제를 수학적 표현으로 정의하기가 곤란하기 때문에 알고리즘에 따라 해를 구하기는 어렵지만, 사람은 그 해법에 관한 노하우를 가지고 있다는 것이다. 둘째, 주어진 문제의 입력패턴과 출력패턴의 예를 충분히 많이 생성해 낼 수 있어서 이들로부터 입력과 출력 사이의 일반적인 관계를 추출하는 것이 가능하다. 이를 위해서는 처리해야 할 정보의 양이 매우 많다. 따라서 정보를 순차적으로 처리하는 컴퓨터로는 해를 구하는 과정이 매우 비효율적이고 시간도 많이 걸린다. 그러므로 병렬구조를 가지고 많은 양의 데이터를 사용하여 학습하는 신경망이 이와 같은 문제들을 해결하는데 적합할 것이다. 신경망 또는 신경회로 컴퓨터는 실제로 패턴인식, 음성인식, 음성합성, 자동번역, 최적화, 적응제어, 수치 예측 등 많은 분야에 응용되고 있다.

다. 인공신경망의 구성요소

생물학적 신경망이 단순한 신경세포들의 대단위 병렬연결로 이루어져 있듯이, 신경망도 단순한 기능을 수행할 수 있는 신경세포들의 수많은 병렬연결로 이루어져 있다. 기능면에 있어서도 생물학적 신경망과 마찬가지로 병렬분산 처리를 할 수 있을 뿐만 아니라, 학습이나 훈련을 통해서 연결강도를 조정하여 정보를 추가하거나 변경할 수 있는 적응특성을 가지고 있다. 이와 같이 거시적 차원에서 볼 때, 신경망은 생물학적 신경망의 구조와 기능을 닮았다고 할 수 있다. 그러나 신경세포들의 구체적인 기능, 연결선을 통한 신호의 전달체계, 연결강도의 조정 메커니즘 등과 같은 미시적 차원의 구조와 기능은 생물학적 신경망과 많은 차이가 있거나, 전혀 다를 수도 있다. 신경망을 구성하는 기본적인 요소로는 다음과 같은 세 가지를 꼽을 수 있다.

- (1) 신경세포(neuron) 또는 처리소자(processing element)
- (2) 연결강도(connection weight)
- (3) 학습규칙(learning rule) 또는 훈련 알고리즘(training algorithm)

라. 인공신경망의 종류

신경망은 구조와 학습, 연산에 사용된 연산 원리에 따라 여러 가지로 분류되며, 일반적으로 사용되는 신경회로망의 형태는 (표 5-1)과 같다. 신경망 모형은 입력자료가 이진수의 형태이거나 연속적인 값을 가지는 실수 형태로 구분된다. 신경망 모형에서의 학습은 임의의 초기 값에서 시작하여 지속적인 개선을 통하여 적절한 연결강도를 구하는 과정이다. 이러한 학습방법에 따라 신경망 모형은 교사학습(supervised learning)과 비교사학습(unsupervised learning) 모형으로 나눌 수 있다. 교사학습은 입력자료에 의한 출력 값과 비교할 수 있는 목표 값(target value)이 존재하며, 그 오차를 이용해 학습을 수행하여 그 결과를 출력하는 것이고, 비교사학습은 목표 값이 없으며 입력자료와 신호만이 제공되므로 자기조직화에 의해 학습하게 되고 그 결과를 출력한다.

(표 5-1) 신경회로망의 종류

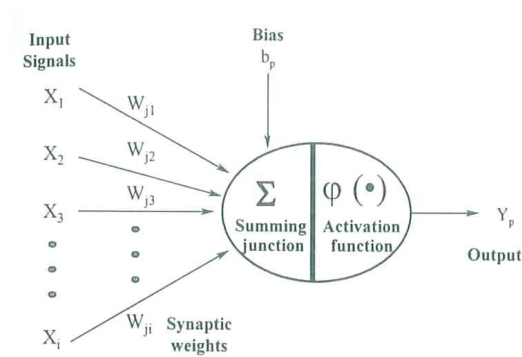
Input type	Learning type	Model
Binary	Supervised	- Hopfield network - Boltzmann machine - Hamming network
	Unsupervised	- ART(Adaptive Resonance Theory)
Real	Supervised	- Simple perceptron - Multilayer perceptron
	Unsupervised	- Kohonen self organizing

마. 연산 방법

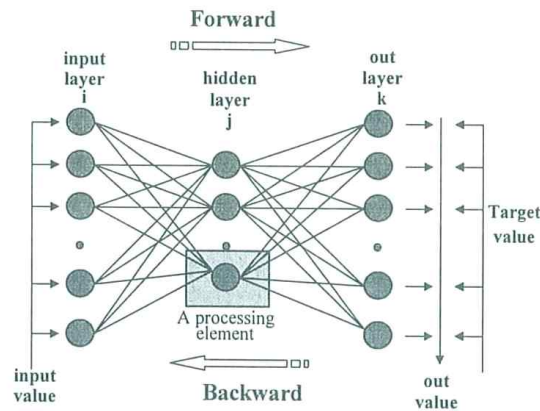
인공신경망 모형의 기본적인 연산과정은 <그림 5-3>에서 보는 바와 같이, 뉴런의 연산이 입력자료(input signal)의 벡터 X_i 와 연결강도(synaptic weights)의 벡터 W_{ji} 에 의한 곱의 형태로 나타나며, 이들로부터 결합함수

(summing junction) Σ 를 계산하는 과정으로 이루어진다. 이 결합함수로부터 선형 또는 비선형적인 특성을 가지게 하는 활성화함수(activation function)를 통해 출력의 과정으로 연산이 수행되는 것이다.

다층 퍼셉트론은 은닉층이 없이 단지 입력층과 출력층으로만 구성된 단순 퍼셉트론의 한계를 보완하기 위해 입력층과 출력층 사이에 하나 이상의 은닉층을 둔 것이다. <그림 5-4>는 은닉층이 하나인 전형적인 다층 퍼셉트론의 구조를 보여주고 있다. 다층 순방향 신경망(feed-forward neural networks)은 교사학습으로써, 실측치와 모의치를 최소자승법에 의해 가중합수를 최소화하는 것이다.



<그림 5-3> 인공신경망의 처리 요소



<그림 5-4> 전형적인 3층 구조의 인공신경망

3. 유전자 프로그래밍(GP; Genetic Programming)

가. 유전자 프로그래밍의 기본이론

유전자 프로그래밍은 사용자가 명시적으로 프로그래밍을 하는 것이 아니라 컴퓨터로 하여금 주어진 문제를 해결하는 프로그램을 자동적으로 작성하도록 하기 위해 고안된 기술이다. 프로그램을 함수와 변수로 구성된 일종의 구조체로 간주하고 미리 정의된 문법에 어긋나지 않도록 이들을 구성한다. 일반적으로 <그림 5-5>와 같이 root가 하나인 트리의 형태로 프로그램을 구성하며, 이것이 유전자 프로그래밍에서 개체의 유전자형이 된다.

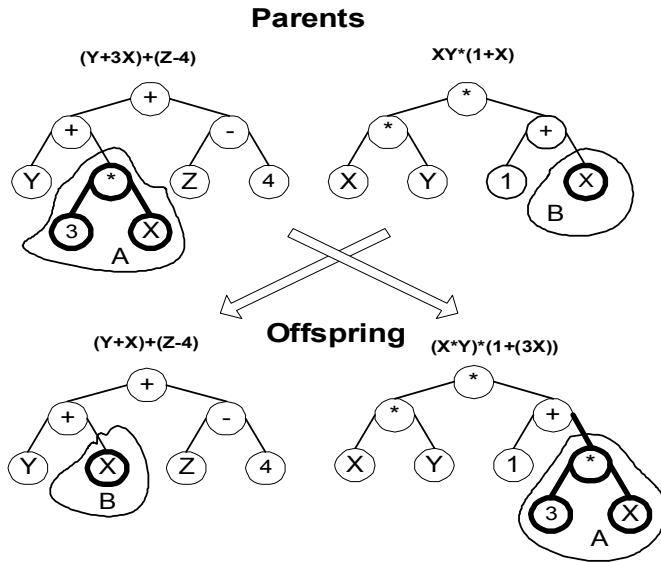
$$\begin{array}{c} (1.5+X)+Z-Y \\ + \\ + \quad - \\ 1.5 \quad X \quad Z \quad Y \end{array}$$

<그림 5-5> 유전자 프로그래밍의 유전자형

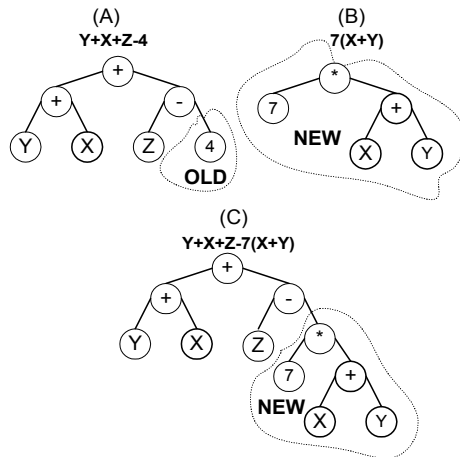
유전자 프로그래밍은 유전자 알고리즘의 확장으로, 집단의 개체를 프로그램으로 정의하였다. 기본적인 동작과 특성은 유전자 알고리즘과 유사하지만, 개체의 표현형이 다르기 때문에 약간의 차이점이 있다. 유전자 프로그래밍의 해영역은 함수와 변수의 조합으로 발생할 수 있는 모든 가능한 프로그램이기 때문에 매우 광범위하다. 함수는 산술연산, 논리연산 및 사용자정의 연산 등 매우 다양하며, 이들 중 문제에 따라 적절히 선택하여 사용한다.

다른 진화 연산 기법과 같이 유전자 프로그래밍은 다수의 개체로 구성된 집단을 기반으로 진화를 수행하며, 세대마다 기존 집단의 우수한 개체들에 유전 연산을 적용하여 새로운 개체를 획득한다. 우수한 유전 형질을 가지는 개체는 살아남고 그렇지 못한 개체는 도태되는 적자생존 원리를 바탕으로 최적의 해를 탐색한다. 이러한 유전자 프로그래밍에서 진화 연산 과정은 복잡한 시스템에서 측정된 자료에 가장 적합한 수학적 모델을 자동적으로 만들어 주는데 효과적으로 사용된다.

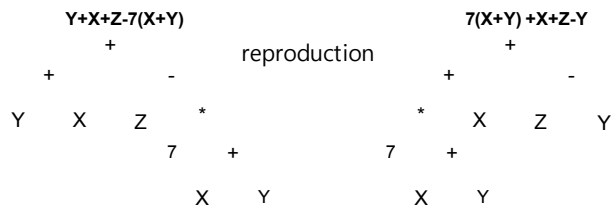
하나의 개체는 한 개 또는 여러 개의 염색체로 구성되며 염색체를 변형하는 연산자들을 유전 연산자라 한다. 유전연산자로는 교차(crossover), 돌연변이(mutation), 복제(reproduction) 연산자가 있다. <그림 5-6~8>은 유전자 프로그래밍에서 사용되는 유전 연산을 보여준다.



<그림 5-6> 교차 연산의 원리



<그림 5-7> 돌연변이 연산의 원리



<그림 5-8> 복제 연산의 원리

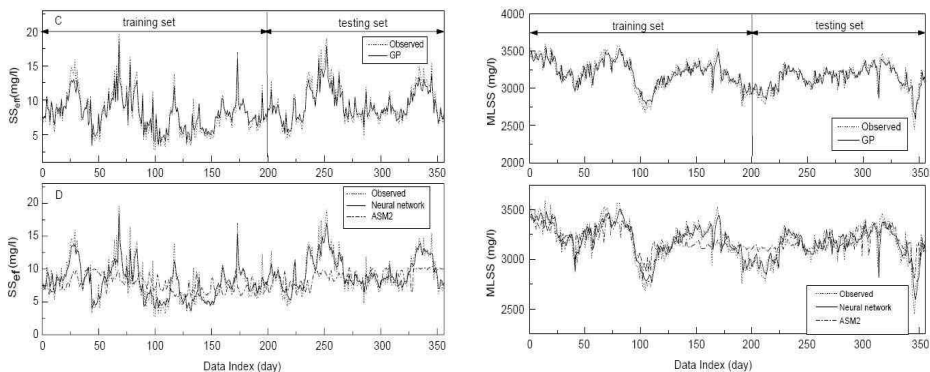
GP에서 진화적인 탐색 과정은 복잡한 시스템에서 관측된 자료와 가장 높은 적합도를 보이는 수학적 모델을 자동으로 발견하는데 매우 좋은 능력을 갖고 있다(Hong and Bhamidimarri, 2003; Hong *et al.*, 2005).

이 기술은 특정한 문법을 가지는 프로그램으로 해결될 수 있는 모든 문제에 적용될 수 있으며, 문제영역에 의존적이지 않기 때문에 보다 다양한 분야에 사용될 수 있다. 최근에는 최적화문제나 어셈블리 코드의 진화, 진화하드웨어, 캐릭터행동진화 등의 문제에 많이 도입되고 있다.

GP기법의 장점 덕분에 몇몇 공학적인 문제를 해결하기 위한 비선형 다변량 모델을 도출하는데 성공적으로 적용되고 있다(McKay *et al.*, 1997; Willis *et al.*, 1997; Hong, 2001; Whigham and Recknagel, 2001; Hong, 2003; Hong and Bhamidimarri, 2003; Hong *et al.*, 2005).

나. 환경공학분야 유전자 프로그래밍 적용 사례

유전자 프로그래밍 기법의 하수처리공정에의 적용 사례는 Hong *et al.*(2003)이 뉴질랜드의 Paraparumu 하수 처리장의 유출수 SS와 반응조 내의 MLSS 농도를 예측한 것이다. 이 연구에서는 유전자 프로그래밍 기법뿐만 아니라 대표적인 mechanistic 모델인 ASM2와 인공 신경망 모델 기법을 이용하여 예측한 값과 실제 측정값의 농도 차이를 비교하였다. 그 결과 인공지능 기법인 인공 신경망 모델과 유전자 프로그램 모델 기법을 통한 예측 값은 실제 측정값과 상당히 비슷한 것으로 나타났으나, ASM2 모델을 통한 예측 값은 측정값과 어느 정도 차이가 있었다(표 5-2).



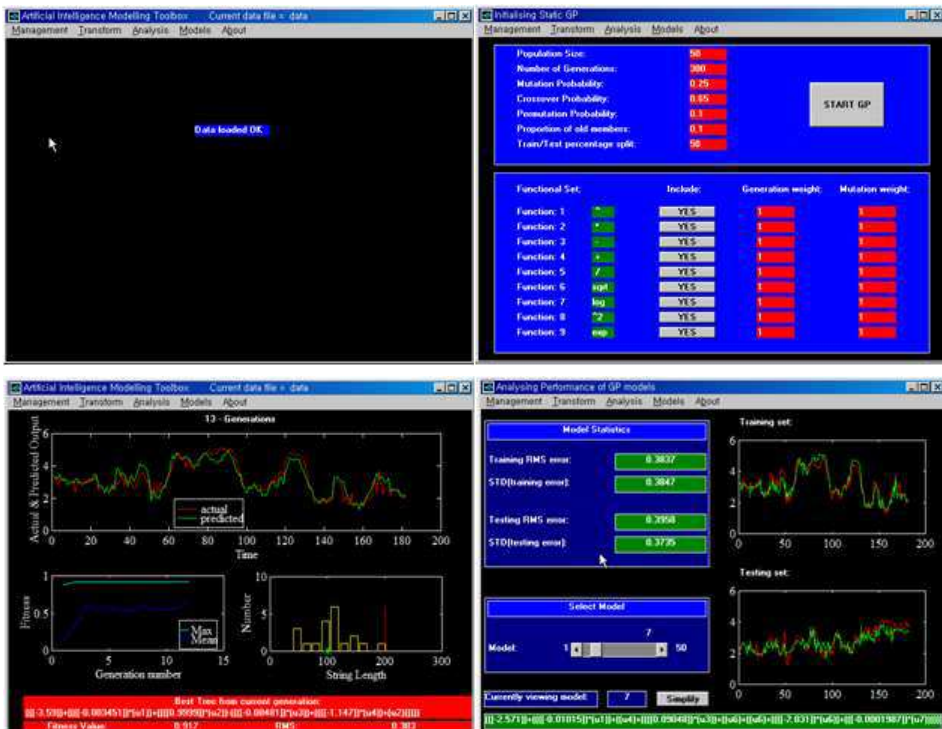
<그림 5-9> 유전자 프로그래밍을 이용한 SS 및 MLSS농도 예측 결과

(표 5-2) 세 종류의 모델 기법의 예측 성능 비교

Models	SS _{eff}		MLSS	
	RMSE _{tst}	R ²	RMSE _{tst}	R ²
GP	1.57	0.814	94.8	0.852
Neural network	1.68	0.808	102.3	0.839
ASM2	3.23	0.26	247	0.41

다. 유전자 프로그래밍 기법 적용을 위한 프로그램

본 과제에서는 유전자 프로그래밍 기법 적용을 위해 상용 프로그램 틀인 'Matlab'을 이용하였으며, 이를 이용해 Timothy Hong이 개발한 프로그램을 본 연구에 적합하도록 수정, 개발하였다. 이 프로그램은 컴퓨터 프로그래밍에 대한 지식이 없어도 사용 가능하게 제작하였다.



<그림 5-10> 유전자 프로그래밍 기법을 위해 사용한 프로그램

본 연구에서 사용한 유전자 프로그래밍의 기본 알고리즘은 다음과 같다.

- (1) 초기화: 임의로 초기 개체군(N개)을 생성한다. 세대 $K=0$
- (2) 유전자 루프(Genetic loop): 세대 $K=K_{max}$ 가 될 때까지 반복 실행한다.
 - (a) 개체군에서 각각의 모델을 실행한다.
 - (b) 현재 세대의 개체군에서 각각의 모델에 대한 목적함수를 구한다.
 - (c) 현재의 개체군에서 교차, 돌연변이, 복제 연산에 의해 새로운 개체군을 생성한다.
 - (i) 교차연산, 돌연변이, 복제 연산의 확률을 정한다.
 - (ii) 교차연산, 돌연변이, 복제 연산을 이용하여 새로운 개체군을 생성한다.
 - (iii) 모두 N개의 개체군이 발생할 때까지 (i)과 (ii) 과정을 반복한다.
 - (iv) parent 개체군의 old 모델은 생성된 새 모델로 대체된다.
 - (d) 다음 세대($K+1$)로 진행한다.

(표 5-3)은 본 연구에서 사용한 유전자 프로그래밍의 파라미터와 사용가능한 함수를 나타낸다. 사용 가능한 함수로는 기본 산술 연산자인 $+$, $-$, \times , \div 함수들과 승(power), 루트(root), 로그(log), 지수(exponential) 함수들이 사용되었다. 본 연구에서 세대 수는 모두 50이며, 각 세대는 500개(개체 수)의 후보 모델을 포함하고 있다. 교차, 돌연변이, 복제 연산의 확률은 각각 65, 25, 10%로 하였다. 이는 전 세대에 생성된 좋은 모델들이 버려지는 것을 막기 위해 10%의 복제 연산을 허용하였다.

(표 5-3) 사용한 파라미터와 사용 가능한 함수

파라미터	값
개체 수	500
세대 수	50
교차 확률(%)	65
돌연변이 확률(%)	25
복제 확률(%)	10
사용가능한 함수	$+$, $-$, \times , \div , \wedge , $\sqrt{\quad}$, log, e

4. 의사결정트리(decision tree)

가. 의사결정트리의 기본이론

의사결정트리는 데이터마이닝 분석의 대표적인 분석방법이며, 예측과 분류를 위해 보편적으로 이용되는 강력한 툴이다. 인공지능, 기계학습, 통계 분석에서도 결정트리 알고리즘은 활용이 많이 되고 있다. ‘의사 결정 트리’는 간단하게 ‘결정 트리(decision tree)’ 또는 ‘결정 나무’라고 불리기도 한다.

신경망구조 분석과는 달리 나무구조로 규칙을 표현하기 때문에 이해하기가 쉽다. 어떤 적용에서는 얼마나 잘 분류하거나 예측하는냐 만이 문제화 되기도 한다. 즉, DM발송회사는 모델이 어떻게 구성되었는지 보다는 얼마나 자신의 메일에 잘 대답을 해줄 수 있는 집단을 분류해줄 수 있는지에 관심을 가지고 있다. 하지만, 어떤 경우에는 왜 이런 결정을 하게 되었는지 설명하는 것도 중요하며 의사결정나무분석은 이러한 경우에 유용하다.

주어진 데이터를 분류(classification)하는 목적으로 주로 사용되며, 예측(prediction)하는 목적으로도 일부 사용된다. 즉, 목표 변수가 범주형인 경우 사용되며 목표변수가 수치형인 경우에는 결정트리 알고리즘에 적용할 수 없다. 목표 변수가 수치형인 데이터에 적용하고자 한다면 목표변수를 수치형 변수에서 범주형 변수로 이산화한 후 적용하면 된다.

나. 의사결정트리 분석의 장점

의사결정트리 분석의 장점은 다음과 같다.

- 이해하기 쉬운 규칙을 형성
- 많은 컴퓨팅 작업 없이 분류과정 형성
- 연속변수와 범주형 변수에 모두 사용 가능
- 예측과 분류부분에서 가장 효과적인 방법

결정트리를 이용한 데이터 분석 결과는 나무(tree) 구조로 표현되기 때문에 사용자가 결과를 쉽게 이해하고 설명할 수 있는 장점이 있다. 분류율에 대한 정확도만 따지자면 신경망(Neural Network) 또는 로지스틱 회귀분석 등의 분류 방법들 보다 낮게 평가되기도 하지만 결과를 쉽게 이해하고 설명할 수 있으며 의사결정을 하는데 직접적으로 사용할 수 있는 장점이 있기 때문에 데이터마이닝 적용 시 매우 많이 사용되고 있다.

다. 의사결정트리 분석의 한계

일반적인 결정트리 알고리즘의 한계와 단점은 다음과 같다.

- (1) 데이터의 특성이 특정 변수에 수직/수평적으로 구분되지 못할 때 분류율이 떨어지고, 트리가 복잡해지는 문제가 발생한다. 이는 신경망 등의 알고리즘이 여러 변수를 동시에 고려하지만 결정트리는 한 개의 변수만을 선택하기 때문에 발생하는 문제이다.
- (2) 결정트리는 Hill Climbing 방식 및 Greedy 방식을 사용하고 있다. 일반적인 Greedy 방식의 알고리즘이 그렇듯이 이 방식은 최적의 해를 보장하지는 못한다.
- (3) 약간의 차이에 따라 (레코드의 개수의 약간의 차이) 트리의 모양이 많이 달라질 수 있다. 두 변수가 비슷한 수준의 정보력을 갖는다고 했을 때, 약간의 차이에 의해 다른 변수가 선택되면 이 후의 트리 구성이 크게 달라질 수 있다.

라. 의사결정트리 알고리즘 종류

의사결정트리분석의 트리형성 알고리즘은 다양하지만, 가장 보편적인 것으로 CHAID(chi-squared automatic interaction detection)와 CART(classification and regression trees)이고, 좀 더 새로운 알고리즘은 C4.5를 들 수 있다. 이 중 데이터마이닝에서 가장 많이 언급되고 사용되는 알고리즘은 C4.5로 ID3 알고리즘을 보완하여 개발되었다.

(표 5-4) 의사결정트리 알고리즘 분류

알고리즘	평가지수(선택방법)	비고
ID3	Entropy	다지분리(범주)
C4.5	Information Gain	다지분리(범주) 및 이진분리(수치)
CHAID	카이제곱(범주), F검정(수치)	통계적 접근 방식
CART	Gini Index(범주), 분산의 차이(수치)	통계적 접근 방식, 항상 2진 분리

위 알고리즘들 중에서 ID3, C4.5 알고리즘들은 인공지능, 기계학습 분야에서 개발되어 발전되어 왔다. 반면, CHAID 및 CART 알고리즘은 통계학 분야에서 개발된 알고리즘들이다. 두 분류는 이러한 이유로 비슷하면서도 약간 다른 접근 방식을 갖는다. 인공지능 계열의 알고리즘들은 엔트로피, 정보이득 개념을 사용하여 분리기준을 결정하고, 통계학에 기초한 CHAID 및 CART 알고리즘들은 카이스퀘어, T검정, F검정 등의 통계분석법을 사용한다. 결정트리 알고리즘들은 기본적인 생성 방식은 유사하며 가치를 분리하는 방식(분리에 사용될 변수 및 기준을 선택하는 방식)에서 약간의 차이를 갖는다.

마. C4.5 알고리즘

(1) C4.5 알고리즘 소개

C4.5 알고리즘은 1993년 Quinlan에 의해 제안된 알고리즘으로 ID3 알고리즘의 단점을 보완하고 새로운 기능을 추가한 알고리즘이다. ID3 알고리즘은 트리 기반의 분류 알고리즘에 있어 대표적인 알고리즘이지만, 다음과 같은 한계점을 갖고 있다.

- **수치형 속성 취급 (handling continuous attributes)** : ID3 알고리즘은 범주형 속성에 대해서만 트리를 생성하는 방법을 제시하고 있다. 따라서 수치형 속성은 모델 생성에 활용할 수 없는 한계가 있다. C4.5에서는 수치형 속성까지 사용하는 방법에 대해서 제안한다.
- **무의미한 속성을 제외하는 문제** : 학번, 생일, 번지수(세부주소)등과 같이 모든 레코드를 잘게 분할하는 (극단적으로는 한 개의 속성으로 구분하는) 속성이 선택되지 않도록 하는 것이 필요하다.
- **나무의 깊이 문제 (how deeply to grow the decision tree)** : ID3 알고리즘으로 나무 모델을 생성할 경우 나무의 깊이가 너무 깊게 들어가는 문제가 있다. C4.5 알고리즘에서는 이 문제를 해결하기 위해 깊이를 어느 정도까지 진행할 것인가에 대하여 제안한다. 이것은 “과적합(overfitting) 문제” 및 “가지치기(pruning)”와 관련이 있다.
- **결측치 처리 (handling missing attributes values)** : 데이터 중 특정 속성의 값이 부분적으로 입력되어 있지 않는 데이터에 대한 처리 문제

- **비용고려** (handling attributes with different costs) : 속성들을 서로 다른 가중치를 반영하여 사용하는 방법
- **효율성** : 시행되는 시간적인 효율성을 높이는 방법

(2) C4.5 에서 수치형 속성을 처리하는 방법

C4.5 알고리즘은 모든 속성이 명목형 속성 또는 범주형 속성일 경우에만 처리가 가능하다. 그러나 실세계의 데이터들은 대부분 수치형 속성들을 포함하고 있기 때문에 c4.5 알고리즘에 수치형 속성을 처리할 수 있도록 확장하는 것이 필요하다. 수치형 속성에 대하여 binary 방식과 split 방식의 두 가지 방식을 고려할 수 있는데, (표 5-5)와 같이 수치형 속성을 갖고 있는 기상 데이터에 대하여 분석을 하는 경우를 예를 들어 설명하고자 한다.

(표 5-5) 기상 데이터 예

instant	outlook	temperature	temperature	humidity	windy	play
1	sunny	85	hot	high	false	no
2	sunny	80	hot	high	true	no
3	overcast	83	hot	high	false	yes
4	rainy	70	mild	high	false	yes
5	rainy	68	cool	normal	false	yes
6	rainy	65	cool	normal	true	no
7	overcast	64	cool	normal	true	yes
8	sunny	72	mild	high	false	no
9	sunny	69	cool	normal	false	yes
10	rainy	75	mild	normal	false	yes
11	sunny	75	mild	normal	true	yes
12	overcast	72	mild	high	true	yes
13	overcast	81	hot	normal	false	yes
14	rainy	71	mild	high	true	no

온도에 대한 분할을 고려해보면, 온도는 다음과 같이 표현될 수 있다. (표 5-6)에서 72, 75의 경우 클래스 값이 두 개가 기록된 것은 같은 온도 값에 대한 레코드가 2개로 중복된 경우이다.

(표 5-6) 온도 데이터 예

64	65	68	69	70	71	72	75	80	81	83	85
yes	no	yes	yes	yes	no	no yes	yes yes	no	yes	yes	no

위 표에서 보면 분할할 수 있는 분할지점(breakpoint)은 11개가 존재한다. 만약 같은 클래스에 대해서 분할을 허용하지 않는다면 8개의 가능한 분할지점이 있다. 각 분할지점에 대한 information gain 값은 Entropy 식에 의해 계산될 수 있다.

예를 들어, [온도 <71.5]를 기준으로 하면 4개의 yes와 2개의 no가 포함된다. 반면 [온도 >71.5]에 대해서는 5개의 yes와 3개의 no가 포함된다. 따라서 Information value는 아래와 같이 계산된다. 아래와 같이 71.5도를 분할점으로 한 온도라는 속성을 기준으로 분할하면 0.939의 information gain 값을 얻는다.

$$Info([4,2], [5,3]) = (6/14) * Info([4,2]) + (8/14) * (Info[5,3]) = 0.939 \text{ bits.}$$

위와 같은 방식으로 information gain이 가장 낮은 분할지점을 찾는 방법과 같은 더 복잡한 아이디어를 사용하면 더 좋은 information gain을 얻을 수도 있지만, 특정 값을 찾아서 그 값을 기준으로 하여 분할하는 단순한 방법을 일반적으로 많이 사용한다. 예를 들어, 인스턴스기반 학습에서 개념의 중간지점을 분할점으로 선택하는 단순한 방식이다.

분할정복 방식을 사용하여 의사결정트리를 생성할 때, 분할을 위한 첫 번째 속성이 선택되면 그 속성에 의하여 하위노드들이 분리되고 각 하위 자식노드들에 대하여 재귀적으로 알고리즘을 호출된다. 수치형 속성에 대해서는 각 노드의 레코드들을 수치형 속성의 값에 따라 정렬해야 한다. 실제로 의사결정트리를 생성하는 프로그램들이 이러한 방식을 사용한다. 그러나 사실은 각 노드별로 다시 정렬할 필요는 없다. 왜냐하면 상위노드에서 정렬된 순서는 하위 노드에서도 그대로 사용될 수 있기 때문이다. 빠른 프로그램의 구현을 위해서는 상위 노드의 정렬 정보를 사용하면 된다. 기상 데이터 분석에서 온도 속성에 대해 고려해보면, 온도 속성의 정렬 순서는 다음과 같다.

(표 5-7) 온도 속성 정렬 순서

64	65	68	69	70	71	72	72	75	75	80	81	83	85
7	6	5	9	4	14	8	12	10	11	2	13	3	1

위 표에서 아래에 기록된 숫자는 각 인스턴스들의 번호를 의미한다. 즉, 인스턴스 7의 온도는 64도이고, 인스턴스 6의 온도는 65도이다. 최 상위노드에서 outlook이라는 속성을 분할하기 위하여 선택했다고 가정하면, 자식 노드들 중에서 outlook=sunny 인 경우에 해당하는 노드는 outlook이 sunny 값을 갖는 인스턴스들의 번호는 1, 2, 8, 9 그리고 11이다. 상위노드에서 생성된 순서를 사용하여 하위 노드의 순서를 찾을 수 있다. 그러므로 각 수치형 속성의 순서는 처음의 상위 노드(루트노드)에서 결정되므로 하위 노드에서 더 이상 반복적인 정렬을 하지 않아도 된다.

의사결정트리는 명목형(범주형) 속성을 테스트 할 때, 각 분할되는 가지(branch)는 속성이 갖는 값들의 개수만큼 펼쳐지게 된다. 그러나 수치형 속성에 대해서는 하나의 분할점 값을 기준으로 2개의 가지(branch)를 펼쳐게 된다. 이러한 방식(수치형 속성에 대해서 2개의 가지를 펼치는 방식)은 명목형 속성과 수치형 속성을 처리하는 면에서 중요한 차이점을 발생시키게 된다. 명목형 속성에 대해서는 상위노드에서 선택되었다면 하위 노드에서는 다시 고려할 필요가 없다. 반면에 수치형 속성에 대해서는 같은 속성에 대해서도 계속적인 분할이 발생할 수 있다. 명목형 속성은 루트노드로부터 단 한번만 선택될 수 있지만, 수치형 속성의 경우 여러 차례 (하위노드에서) 테스트될 수 있다.

하나의 수치형 속성에 대한 기준이 한꺼번에 나타나지 않고, path에 걸쳐서 분산되어 나타나기 때문에 이러한 방식으로 생성된 트리는 복잡하고 이해하기 어려울 수 있다. 이러한 문제를 개선해서 만들기는 어렵지만 이해하기 좋은 트리를 생성하기 위해서는 상위노드로부터 여러 개의 기준값을 선정하여 다중 분할하는 multiway (\leftrightarrow binary-way) 테스트를 사용한다.

바. 의사결정트리 적용성 검증

(1) 의사결정트리 검증 방법

의사결정트리는 교사(supervised) 학습방법으로 군집을 잘 분류하는지 검증하기 위해 2010년 수질측정망의 수질결과와 이미 분류된 수질등급을 이용해 의사결정트리를 학습시킨 후 저수지의 수질농도만을 주어질 경우 정상적으로 수질등급을 분류하는지 검증을 해보았다.

검증에 이용한 수질자료는 2010년 825개 저수지 및 담수호에서 수집한 자료 중 담수호와 일부 저수지의 결과를 제외한 812개 저수지의 연평균 COD, T-N, T-P의 농도와 COD기준 수질등급을 이용하였다. 812개 저수지의 연평균 COD, T-N, T-P 및 COD기준 수질등급을 excel로 정리한 후 의사결정트리의 입력자료로 활용하였다. 의사결정트리를 이용해 812개 저수지의 COD, T-N, T-P 및 COD기준 수질등급을 입력하여 학습시킨 후 COD, T-N, T-P만을 이용해 COD기준 수질등급을 추정하였다.

(2) 의사결정트리 검증 결과

812개 저수지에 대해 의사결정트리를 이용해 COD, T-N, T-P로부터 수질등급을 추정한 결과는 <그림 5-11>과 같다.

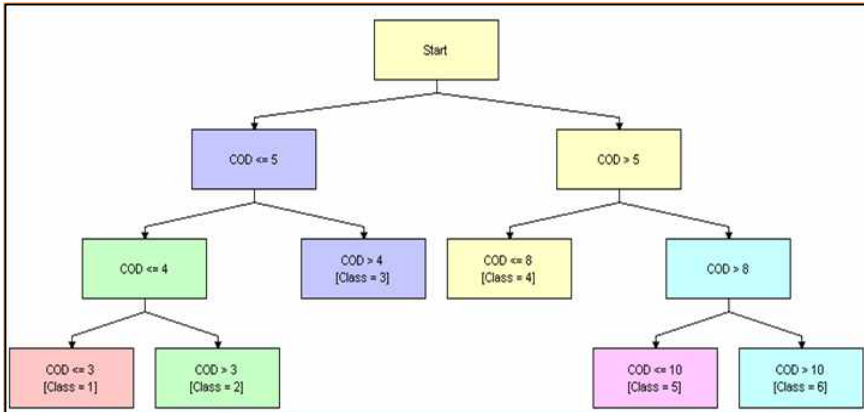
Confusion Matrix For: Class
(None of the test rows were skipped)

		ACTUAL						Prediction Totals	Prediction Error%
		1	2	3	4	5	6		
PREDICTIO	1	62	0	0	0	0	0	62	0.00%
	2	0	162	0	0	0	0	162	0.00%
	3	0	0	169	0	0	0	169	0.00%
	4	0	0	0	302	0	0	302	0.00%
	5	0	0	0	0	54	0	54	0.00%
	6	0	0	0	0	0	63	63	0.00%
Actual Totals		62	162	169	302	54	63	812	0.00%
Actual Error%		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

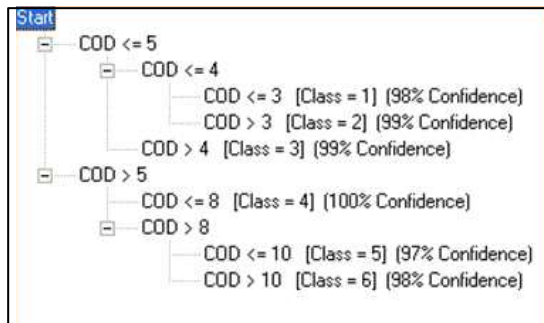
<그림 5-11> 의사결정트리를 이용한 수질등급 추정결과 검증

812개 저수지의 COD기준 수질등급은 Ib등급이 62개소, II등급이 162개소, III등급이 169개소, IV등급이 302개소, V등급이 54개소, VI등급이 63개소였으며, 의사결정트리를 이용해 COD기준 수질등급을 추정한 결과도 <그림 5-12>와 같이 동일한 개소수를 나타내었다. 또한 실제 수질등급과 추정된

수질등급이 동일한지를 매트릭스로 표현한 결과 정확히 일치하였으며, 오차는 0이다. 또한 ECM은 학습을 통해 군집만 분류하는 것이 아니라, 군집을 분류했던 규칙을 찾아준다. 규칙은 <그림 5-12>와 같은 순서도와 <그림 5-13>과 같은 fuzzy rule 형태로 제공한다.



<그림 5-12> 의사결정트리를 이용해 찾아낸 분류 규칙



<그림 5-13> 의사결정트리를 이용해 도출한 fuzzy rule

의사결정트리를 이용해 찾아낸 fuzzy rule를 다시 정리하면 (표 5-8)과 같으며, 실제 COD를 기준으로 한 호소 수질등급 기준과 일치하였다. 그러나 Ia 등급에 대해서는 찾아내지 못했는데, 그 원인은 주어진 812개 저수지에 Ia에 해당되는 저수지가 없기 때문에 Ia를 분류하기 위한 기준 또한 찾아내지 못했다. 즉, 의사결정트리가 COD, T-N, T-P와 수질등급만을 주어진 상태에서 수질등급을 분류한 규칙을 정확히 찾아 낼 수 있음을 알 수 있었다.

(표 5-8) 의사결정트리를 이용해 도출한 fuzzy rule

기준	등급
COD ≤ 3	1등급
3 < COD ≤ 4	2등급
4 < COD ≤ 5	3등급
5 < COD ≤ 8	4등급
8 < COD ≤ 10	5등급
10 < COD	6등급

이상에서와 같이 본 연구에서 개발한 의사결정트리는 저수지의 COD, T-N, T-P농도 및 COD기준 수질등급을 이용해 교사학습을 한 후 저수지의 COD, T-N, T-P농도만 주어질 경우 정확히 수질등급을 추정하였고, 또한 수질등급을 분류했던 규칙도 정확히 도출해 주었다. 그러므로 의사결정트리를 이용해 농업용저수지 수질측정망의 구역 및 저수지 특성자료와 저수지 수질로부터 산정한 기존의 수질관련 지수사이의 규칙을 교사학습과정을 통해 정확히 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 진화 군집분류 알고리즘(ECM)

가. 개요

ECM은 Evolving Clustering Method의 약자로 동적으로 군집(cluster)의 수를 추적하기 위한 최적화 과정이나 각각의 데이터의 중심을 찾을 필요 없고 온라인(on-line) 방식으로 사용될 수 있는 거리기반의 단일패스(one pass) 군집분류 알고리즘이다. 또한 ECM은 오프라인(off-line)으로도 사용될 수 있는데, 이 경우 ECM은 최소값을 얻기 위한 목적함수를 만들기 위해 최적화 과정(최소화 제약)을 적용한다. ECM은 ‘진화하는 연결주의자 시스템(Evolving Connectionist Systems)’ 함수들의 집합으로, GUI는 MATLAB 수치계산 환경에서 실행된다.

나. ECM 함수를 이용한 군집분류 데이터 셋

ecm은 다음의 명령어로 불러올 수 있다 :

```
[result] = ecm(dataset, parameters);
```

여기서, dataset은 각각의 행에는 데이터가 있는 행렬(matrix)형태이고, parameters는 군집분류 매개 변수들을 세팅하기 위한 구조이다. 이 구조는 다음과 같이 2개의 필드를 갖는다.

parameters.dthr : 거리 한계 값(초기값: 0.1).

parameters.epochs : 오프라인 모드를 위한 최적화 과정의 epochs의 수,
만약 0이면 온라인 군집분류를 실행함(초기 값 : 0).

군집분류 결과(*result*)는 여러 개의 필드를 갖는 구조이다.

result.Cent : 군집의 중심

result.Obj : 목적 값

result.MaxD : 최대 거리

다. ECM함수를 이용한 그래프 그리기

ecm을 실행하여 결과 구조(structure)가 생성된 후 ecmp 함수는 군집분류 결과를 그래프로 그리기 위해 사용될 수 있다. 이 함수는 다음과 같이 불러올 수 있다.

```
ecmp = (result, p);
```

여기서, *p*는 숫자 : 1~4를 입력할 경우 원 데이터의 샘플과 군집 중심을 그릴 수 있고, 5~8을 입력할 경우 PCA를 그릴 수 있다. 2개의 매개 변수 *XData*와 *YData*는 그래프를 그리기 위해 사용될 수 있다. 예를 들어

result.XData = 1 : 첫 번째 열 데이터가 x축으로 사용되는 것을 의미함

result.YData = 2 : 두 번째 열 데이터가 y축으로 사용되는 것을 의미함

라. ECM함수의 예

예 1

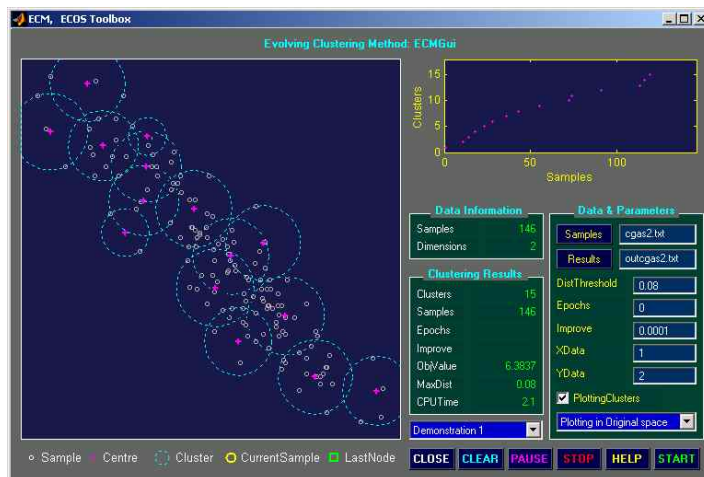
step 1 :	%데이터 로딩
<i>load cgas2.txt</i>	
setp 2 :	%군집분류를 위해 <i>ecm</i> 불러오기
<i>[res] = ecm(cgas2);</i>	
setp 3 :	%그래프 그리기 위해 <i>ecmp</i> 불러오기
<i>ecmp(res);</i>	
	%결과 그래프 그리기

예 2

step 1 :	%데이터 로딩
<i>load wat2.txt</i>	
setp 2 :	%매개변수 세팅
<i>parm.dthr = 0.15;</i>	
<i>parm.epochs = 3;</i>	
setp 3 :	%군집분류를 위해 <i>ecm</i> 불러오기
<i>[res] = ecm(wat2,parm);</i>	
setp 4 :	%그래프 그리기 위해 <i>ecmp</i> 불러오기
<i>ecmp(res,3);</i>	

마. ECM GUI 사용하기

ECM GUI는 다음 그림과 같으며, *ecmgui*를 입력하여 실행할 수 있다.



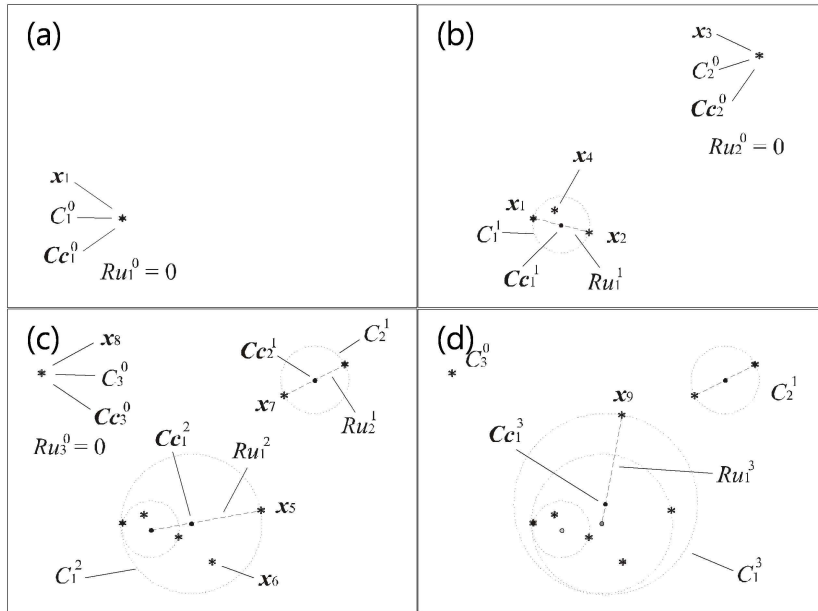
<그림 5-14> ECM GUI 실행화면

- data & parameters 영역에 있는 samples 버튼을 클릭하여 입력파일을 선택하거나 직접 파일명을 입력한다. 데이터 셋은 반듯이 ECM함수 (*ecm*)에서 사용되고 있는 데이터 셋과 동일한 구조로 이루어져 있어야 한다.
- 만약 결과 파일을 원한다면, result버튼을 클릭하여 결과파일을 선택하거나 버튼 옆에 직접 파일명을 입력한다. 결과 파일에는 군집의 중심과 반경이 저장된다. 결과 파일에서 각각의 행은 군집 중심 벡터와 반경을 의미한다.
- Data & Parameters영역에 있는 매개 변수 값을 초기 값을 그대로 이용하거나 수정하여 입력한다.
- 군집분류를 시작하기 위해 start 버튼을 클릭하고, 군집분류 정보와 결과는 값과 그래프로 동시에 화면에 나타난다.

바. 온라인 진화적 군집분류방법의 기술적 배경

진화적 군집분류 방법(ECM)은 입력 데이터의 동적 군집분류를 위해 단일패스(one pass) 알고리즘을 사용하기 때문에 빠르다. ECM은 거리기반의 군집분류 방법으로 군집의 중심이 온라인 모드에서 진화되는 노드형태로 나타난다. 각각의 군집의 최대거리(*MaxDist*, 군집중심과 군집 내 특정 점 사이의 최대거리)는 한계 값(*Dthr*)보다 작으며, 군집의 수를 추정하는데 영향을 미치는 매개 변수이다.

군집분류 과정에서 예제 데이터는 입력된 데이터를 이용하고 이러한 과정은 비어있는 군집 세트에서 출발한다. 새로운 군집이 생성될 때 군집의 중심(*Cc*)이 놓이고 군집의 반경(*Ru*)는 0으로 초기화 된다. 지속적으로 더 많은 예가 생성되면서 몇몇 이미 생성된 군집은 변경된 중심과 반경 값을 이용해 갱신된다. 어떤 군집이 갱신되고 어떻게 변하는지는 현재 데이터 예의 위치에 따라 달라진다. 군집은 군집반경(*Ru*)이 한계 값(*Dthr*)보다 크거나 같으면 갱신되지 않는다. 2차원 공간에서 간단한 ECM 군집분류의 절차는 <그림 5-15>와 같다.



x_i : example, Cc_j^k : cluster center, \bigcirc C_j^k : cluster, Ru_j^k : cluster radius

<그림 5-15> ECM을 이용한 간단한 군집분류 과정

(표 5-9) ECM 적용과정 설명

단계	설명
(a)	새로운 군집 C_1^0 을 생성하기 위한 예제 x_1
(b)	x_2 : 군집 갱신 $C_1^0 \rightarrow C_1^1$ x_3 : 새로운 군집생성 C_2^0 x_4 : 아무것도 수행하지 않음
(c)	x_5 : 군집 갱신 $C_1^1 \rightarrow C_1^2$ x_6 : 아무것도 수행하지 않음 x_7 : 군집 갱신 $C_2^0 \rightarrow C_2^1$ x_8 : 새로운 군집생성 C_3^0
(d)	x_9 : 군집 갱신 $C_1^2 \rightarrow C_1^3$

- 0단계 : 입력자료로부터 첫 번째 예를 단순히 이용해서 첫 번째 군집의 중심 C_{c_1} , 초기에 세팅된 군집의 반경 Ru_1 값 0을 이용해 첫 번째 군집 C_1 을 생성한다.
- 1단계 : 입력 데이터의 모든 예가 나타났다면, 군집분류 과정은 종료된다. 그렇지 않으면, 현재 입력 예 x_i 는 이용되고, 이번 예와 모든 n 이미 생성된 군집 중심 C_{c_j} 사이의 일반화된 기하학적 거리 (*normalized Euclidean distances* $d(i,j)$)가 다음과 같이 계산된다.

$$d(i,j) = \| x_i - C_{c_j} \|, j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{식5-1})$$

이번 연구에서 2개의 q 요소 벡터 x 와 y 사이의 거리 $\| x - y \|$ 는 다음과 같이 정의된 일반화된 기하학적 거리를 의미한다.

$$\| x - y \| = \left(\sum_{i=1}^q |x_i - y_i|^2 \right)^{1/2} / q^{1/2} \quad (\text{식5-2})$$

여기서 $x, y \in R^q$.

- 2단계 : 만약 중심이 C_{c_m} , 군집 반경 Ru_m , C_{c_m} 과 예 x_i 사이의 거리값 $d(i,m)$ 을 갖는 군집 C_m 이 존재한다면, 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$d(i,m) = \min d(i,j) = \min (\| x_i - C_{c_j} \|) \quad (\text{식5-3})$$

여기서, $d(i,m) \leq Ru_m, j = 1, 2, \dots, n$

현재의 예 x_i 는 군집 C_m 에 속하는 것으로 여겨진다. 이 경우, 새로운 군집은 생성되지도 않고 기존에 존재하던 군집도 갱신되지 않는다 (<그림 5-15>의 데이터 벡터 x_4 와 x_6). 이 알고리즘은 그리고 나서 다시 1단계로 되돌아간다.

- 3단계 : 모든 n 개의 존재하는 군집들로부터 다음의 값을 계산하는 과

정을 통해 중심 Cc_a , 반경 Ru_a , 거리값 $d(i,a)$ 를 갖는 군집 C_a 찾고

$$S_{ij} = s(i,j) = d(i,j) + Ru_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{식5-4})$$

그리고 최소값 $s(i,a)$ 를 갖는 군집 C_a 를 선택한다.

$$S_{ia} = s(i,a) = d(i,a) = Ru_a = \min s(i,j), j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{식5-5})$$

○ 4단계 : 만약 $S_{ja} > 2Dthr$ 이면, 예 x_i 는 기존에 존재하는 어떠한 군집에도 소속되지 않는다. 새로운 군집이 0단계에서 설명한 방법과 동일하게(<그림 5-15>의 입력 데이터 벡터 x_3 와 x_8) 생성된다. 그리고 알고리즘은 1단계로 되돌아간다.

○ 5단계 : 만약 $S_{ja} < 2Dthr$ 이면, 중심 Cc_a 의 이동, 반경 Ru_a 의 증가를 통해 군집 C_a 가 갱신된다. 갱신된 Ru_a^{new} 는 $S_{ja}/2$ 와 동일하게 세팅되고, 새로운 중심 Cc_a^{new} 는 입력 벡터 x_i 와 오래된 군집 중심 Cc_a 의 연결선 위에 놓여진다. 새로운 중심 Cc_a^{new} 로부터 점 x_i 까지 거리는 Ru_a^{new} (<그림 5-15>의 입력 데이터 점 x_2, x_5, x_7, x_9)와 동일해진다. 그리고 알고리즘은 1단계로 되돌아간다.

이와 같은 방법은 비록 이 알고리즘이 이전 예의 특정 정보를 유지하지 못하더라도 특정 군집의 중심과 이 군집에 소속되었지만 가장 먼 예 사이의 최대 거리는 한계값 $Dthr$ 이내를 유지한다.

사. ECMc - 나선형 문제에서 교사 분류를 위한 ECM의 확장

일반적으로 ECM은 비교사(unsupervised)방식으로 실행된다. 하지만, 특별한 경우에는 교사(supervised)분류자로 확장될 수 있다. 교사 분류 임무는 q 부분집합에 속하는 데이터 셋 $\{x_i\} = \{[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}]\}$, $i = 1, 2, \dots, l$ 을 학습시켜 분류사(classifier)를 설정하는 것이라고 가정한다.

이 아이디어는 n_c 군집 중심을 찾기 위한 모든 클래스 부분집합에 ECMc를 적용하는 것이다.

$n_c = \sum_{k=1}^q m_k$, 여기서 m_k 는 k번째 부분집합의 노드 번호이다.

모든 입력 데이터 벡터 $x = [x_1, x_2, \dots, x_p]$ 를 위해 분류사(classifier)는 n_c 노드로부터 하나의 노드 C_{c_k} 를 찾는다. 이 입력 데이터 x 는 이 부분집합(클래스)에 속한다. 여기서 n_c 노드는 k번째 부분집합에 놓이고 입력 공간에서 x 까지의 최소거리를 갖는다.

2개 나선형 문제는 주어진 밀도 하에서 데이터 점을 생성하는 잘 알려진 벤치마크 임무이다. 밀도1에서 생성된 학습 데이터 셋은 각각의 나선에 대해 97개 데이터를 갖은 194개 데이터로 구성된다. 밀도4에서 생성된 테스트 데이터 셋은 각각의 나선에 대해 385개 데이터를 갖는 770개의 데이터로 구성된다. 나선을 생성하기 위해 사용된 식은 아래와 같으며, 학습 데이터는 <그림 5-16>과 같다.

$$\begin{cases} \gamma = (\theta + \pi/2)/\pi \\ \theta = k\pi/16, k = 1, 2, \dots, 96 \end{cases} \quad (\text{밀도1, 학습용 데이터}) \quad (\text{식5-6})$$

$$\begin{cases} \gamma = (\theta + \pi/2)/\pi \\ \theta = k\pi/64, k = 1, 2, \dots, 384 \end{cases} \quad (\text{밀도4, 테스트용 데이터}) \quad (\text{식5-7})$$

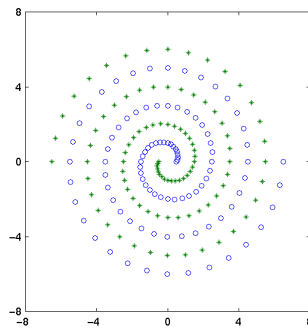
$$\text{나선1} : \begin{cases} x = \gamma \cos(\theta) \\ y = \gamma \sin(\theta) \end{cases} \quad (\text{식5-8})$$

$$\text{나선2} : \begin{cases} x = -\gamma \cos(\theta) \\ y = -\gamma \sin(\theta) \end{cases} \quad (\text{식5-9})$$

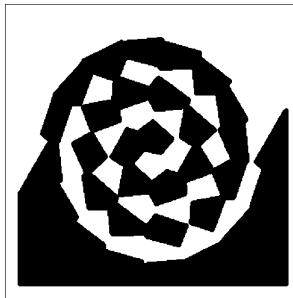
ECMc 분류의 2가지 케이스의 매개변수와 결과는 다음과 같으며, <그림 5-16>의 (b)와 (c)는 ECMc의 2가지 케이스를 위한 결정 영역을 보여준다.

(표 5-10) 2가지 케이스에 대한 ECMc 매개변수 및 결과

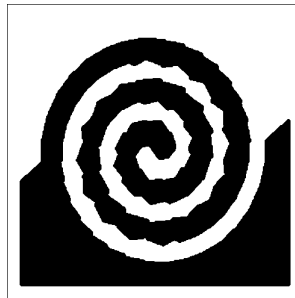
Case 1	매개변수	Sthr	0.955
	결과	노드 수	64
		학습용 분류율	100%
		테스트용 분류율	98.4%
Case 2	매개변수	Sthr	0.98
	결과	노드 수	124
		학습용 분류율	100%
		테스트용 분류율	100%



(a) 2개 나선문제의 학습용 데이터



(b) ECMc의 결정 영역(case 1)



(c) ECMc의 결정 영역(case 2)

<그림 5-16> 2가지 나선문제 : ECMc의 학습용 데이터와 결정 영역

6. 수질지수 추정을 위한 인공지능기법 선정

수질지수 추정을 위한 4가지의 인공지능기법의 장단점은 (표 5-11)과 같다. 인공지능기법은 상대적으로 정확도가 높은 수질지수 추정이 가능하지만, 향후 수질지수 추정모델을 개발하는데 어려움이 있다. 유전자 프로그래밍기법은 학습과정(training)을 통해 데이터로부터 식이 도출되어 도출된 식을 이용해 쉽게 수질지수 추정이 가능하고 회귀분석보다 더 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 도출된 식이 복잡하고, 자료가 부족한 경우 정확도가 저하된다는 문제가 있다.

의사결정트리는 학습과정(training)을 통해 데이터로부터 분류기준(fuzzy rule)이 도출되어 도출된 fuzzy rule을 이용해 쉽게 수질지수 추정이 가능한 장점이 있으나, 수질지수 등급의 수가 너무 많은 경우 분류의 정확도가 저하되는 문제가 있다. 진화군집분류기법은 최근에 개발된 기법으로 정확도 높은 결과를 얻을 수 있기는 하지만, 적용 전 충분한 검토가 필요하다.

(표 5-11) 인공지능기법별 비교

수질지수추정기법	장점	단점
①인공신경망 (ANN)	높은 정확도의 수질지수 추정 가능	수질지수 추정모델을 만들기 다소 어려움
②유전자프로그래밍 (Genetic Programming)	학습과정을 통해 식이 도출되어 도출된 식을 통해 쉽게 지수 추정 가능 회귀분석보다 좋은 결과 도출가능	도출된 식이 다소 복잡함 자료 부족 시 정확도 저하 많은 인자 고려불가
③의사결정트리 (decision tree)	분류기준(fuzzy rule)이 도출되어 도출된 fuzzy rule을 이용할 경우 쉽게 지수 추정가능	등급의 수가 너무 많을 경우 분류에 정확도 저하
④진화군집분류 (ECM)	최근에 개발된 기법으로 정확도 높을 수 있음.	적용 전 충분한 검토 필요

3절 인공지능기법을 이용한 수질지수 추정

1. 수질지수 추정을 위한 영향인자 검토 및 DB구축

가. 유역 및 저수지 제원

수질지수 추정을 위해 이용 가능한 유역 및 저수지 제원 자료는 농업용 저수지 수질측정망조사를 통해 수집된 유역 및 저수지 제원자료 중 저수지 수질에 영향을 미칠 가능성이 있는 인자를 선택하였다. 선택된 유역 및 저수지 제원자료는 유역 및 저수지 제원과 저수지 수질과의 상관분석을 통해 상관성이 높다고 판단되는 인자인 유역면적(ha), 만수면적(ha), 유효저수량(천톤), 유효수심(m, 유효저수량/만수면적), 수해면적(ha)이다.

나. 오염부하량

농업용저수지 수질측정망 조사를 통해 매년 인구수, 축산 사육두수(한우, 젓소, 돼지), 산업체 방류량, 토지이용면적(논, 밭, 산림, 기타)을 수집한 후 발생원별 발생부하량을 산정하고 있다. 본 연구에서 오염부하량자료로 생활계, 축산계, 산업계, 양식계, 토지계의 BOD, T-N, T-P 배출부하량을 이용하여 각각의 오염계, 점원(생활계+축산계+산업계), 기타(산업계+양식계+토지계) 및 전체(점원+토지계)로 구분하여 데이터를 정리하였다.

일반적으로 발생부하량보다 배출부하량이 저수지 수질에 더 직접적인 영향을 미치지만 다음과 같은 이유에 의해 발생부하량을 사용하였다. 1)측정망 조사에서는 발생부하량 만을 산정하고 있어 배출부하량을 이용할 수 없었다. 2)저수지 유역을 GIS를 이용해 구분한 리별 점유율과 환경부 자료의 리별 배출부하량을 이용해 유역의 배출부하량을 산정할 수는 있으나, 3장에서 설명한 ‘배출부하량 산정’에서와 같이 산정된 리별 배출부하량이 리별로 균일하게 분포하지 않을 경우 더 큰 오차가 생길 수 있으므로 사용할 수 없었다. 3)2009년에 1회 조사되었던 배출부하량자료를 이용해 수질지수 추정기법을 개발하더라도 매년 수질측정망 대상저수지의 배출부하량자료가 갱신되지 않기 때문에 사용할 수 없는 문제가 있다.

다. 기상인자

농업용저수지의 유역 및 저수지 특성인자가 동일하더라도 저수지 수질은 기상인자에 의한 영향을 크게 받을 수 있기 때문에 농업용저수지 수질지수 추정에 이용할 인자로 기상인자를 추가하였다. 기상인자 중 농업용저수

지 수질에 영향을 미치는 인자로 연평균 강수량을 선정하였다. 저수지별 연평균 강수량 자료는 개별 저수지 관할 측후소의 연평균 강수량을 기상청으로부터 제공받아 저수지별 연도별 정리하였다. 또한, 동일한 강수량에 대해서 저수지별로 어떤 저수지는 갈수년이 될 수 있고 어떤 저수지는 풍수년이 될 수 있기 때문에 개별 저수지 관할측후소의 30년 평균 연평균 강수량과의 비(강우비)를 수질지수 추정에 이용하였다. 강우비는 해당 연도에 1보다 크면 30년 평균 연평균강수량보다 더 많은 비가 내린 해이고, 1보다 작으면 비가 적게 내린 해를 의미한다.

라. 수질 지수

본 연구에서 추정할 수질지수는 기존에 개발된 수질관련 지표 및 지수를 인공지능기법을 이용해 추정하는 것으로 농업용저수지의 평가에 사용될 수 있는 다양한 지수를 선정하였다.

COD기준 호소수질등급은 농업용저수지 수질관리에 많이 이용되고 있는 지수이지만, COD만을 고려하여 산정된 지수이다. 이와 같은 형태의 수질지수는 기존 수질등급에 익숙한 관리자에게 편할 수는 있지만, COD농도만을 이용해 저수지의 수질을 평가한 지수이기 때문에 저수지의 수질상태를 종합적으로 나타낼 수 없다. COD기준의 호소수질등급이 COD농도만을 이용했다는 문제점을 극복하기 위해 COD, T-N, T-P, Chl-a 수질등급의 산술평균값을 추가로 고려하였지만, 4개의 개별지수를 산술평균하여 사용하는 방법이 아직 이론적 근거가 미흡하다. 또한 최근에 추가된 TOC기준 호소수질등급도 추가하여 분석을 수행하였다. Vollenweider 영양상태는 농업용저수지에서 많이 이용되고 있지만, 약 90%가 중영양과 중부영양으로 분류되어 변별력이 없는 문제가 있다.

최근 우리나라 호소에 적합하도록 환경부에서 개발 중인 LQI와 LEHAW를 선정하였으며, 이 중 LQI는 일부 고농도 및 저농도에서 범위(0~100)를 벗어나는 경우가 생기고, 좋은 수질이 낮은 값을 나타내어 혼동의 우려가 있어 이를 개선하기 위하여 극값이 수렴하는 로지스틱함수를 적용한 지수가 LEHAW이며, 두 개의 수질지수가 함께 개발되고 있다. 이외에 추가한 LQI에서 대형 호수의 측정값을 제외하고 농업용저수지에 적합한 rLQIar을 추가로 개발하였다. LQI, rLQIar, LEHAW 지수는 장기간의 연구를 통해 이론적 근거가 명확하고, 다양한 수질항목을 고려하여 농업용저수지의 수질을 종합적으

로 나타낼 수 있지만, 범위가 0~100으로 등급의 수가 너무 많아 인공지능기법을 이용하여 추정하는데 어려움이 있어 일단위에서 반올림하여 11단계(0~10)로 등급수를 축소하여 수질지수 추정연구를 하였다.

(표 5-12) 농업용저수지 수질지수 추정에 사용된 지수

관리지수형태	산정법	장점	단점
①COD기준 호소수질등급	7단계(Ia~VI)	가장 흔하게 사용하는 수질등급으로 수질 상태 비교 용이	COD만 고려됨
②TOC기준 호소수질등급	7단계(Ia~VI)	유기물 총량 지표에 가까운 TOC 활용	TOD만 고려됨 축적된 수질자료 부족
③4항목평균 호소수질등급	COD, T-N, T-P, Chl-a 등급 산술평균	COD뿐만 아니라 다른 항목 고려 가능	방법의 이론적 근거 부족
④Vollenweider 영양상태	T-N, T-P 5단계(극빈영양~부영양)	흔히 사용되는 지수 영양물질인 T-N, T-P	단계수(5단계)가 적음
⑤LQI	COD, T-P, Chl-a의 회귀식 도출 후 가중치 적용	우리나라 호소 대상 COD, T-P, Chl-a 실측값을 적용한 지수 다른 수질항목도 추가 적용 가능	범위 넓음(0.0~100.0) 고농도, 저농도에서 범위 초과 높은 점수가 나쁜 수질
⑥rLQIar	COD, T-P, Chl-a의 회귀식 도출 후 가중치 적용	농업용저수지에 적합하도록 LQI를 보완하여 개발	범위 넓음(0.0~100.0)
⑦LEHAw	COD, T-P, Chl-a의 로지스틱함수식 도출 후 가중치 적용	COD, T-P, Chl-a 고려 우리나라 호소 대상 실측값을 적용한 지수 0~100까지 고르게 분포	범위 넓음(0.0~100.0) 개발 진행 중
⑧COD농도 정수값 (CODI)	COD농도의 정수값 (0~30)	COD농도 기준에 익숙한 사용자에게 해석 용이 지수가 아닌 COD 농도가 출력	COD만 고려됨 COD농도 범위에 대한 사전 지식이 부족한 사용자에게 불편

7개의 수질지수 외에 COD의 정수값을 이용한 CODI 지수를 추가하였는데, CODI는 COD기준 호소수질기준보다는 등급의 수가 많아 세밀한 수질변화를 반영할 수 있고, COD농도에 익숙한 수질관리 담당자에게 유용하다는 장점이 있으나 익숙하지 않은 경우에는 해석에 어려움이 있다.

본 연구에서는 검토한 8가지 수질관련지수를 모두 적용하여 각각의 지수에 대한 추정기법을 도출하였다.

마. DB구축

저수지 수질에 영향을 미치는 저수지 제원(유역면적, 만수면적, 유효저수량, 유효수심, 수해면적), 연도별 COD, T-N, T-P의 발생부하량(생활계, 축산계, 산업계, 양식계, 토지계) 및 연도별 연평균 강수량과 30년 평균 대비 비율, 8가지 수질지수(COD기준 호소수질등급, TOC기준 호소수질등급, 4가지 항목 평균 호소수질등급, Vollenweider영양상태, LQI10, rLQI_{ar}10, LEHA_w10, COD농도의 정수값인 CODI)를 MS-Access를 이용해 DB를 구축하였다. 1993년부터 수집된 측정망 자료 중 일부 결측자료를 제외한 DB로 구축된 자료수는 6,797개이다.

2. 인공지능 기법을 이용한 농업용저수지 수질지수 추정

수질지수 추정을 위한 인공지능기법연구에서 유전자 프로그래밍기법(genetic programming)과 의사결정트리기법(decision tree)이 농업용저수지 수질지수 추정 및 수질지수 추정모델 개발을 위해 적합한 기법으로 선정되었다. 선정된 2개의 인공지능기법 외에 다중선형회귀분석 기법(multi linear regression)도 적용하여 농업용저수지 수질지수를 추정하였으며, 각 기법별 결과를 비교하기 위해 (표 5-13)과 같이 오차와 상관계수를 산정하였다.

전체적으로 의사결정트리기법(decision tree)을 적용한 경우가 유전자프로그래밍기법(GP)과 다중선형회귀분석기법(MLR)을 적용한 경우보다 오차가 작고 상관계수가 높은 것으로 나타났다. 따라서 수질지수 추정을 위한 인공지능기법으로 의사결정트리기법을 선정하였다.

(표 5-13) 인공지능기법별 수질지수 추정 결과

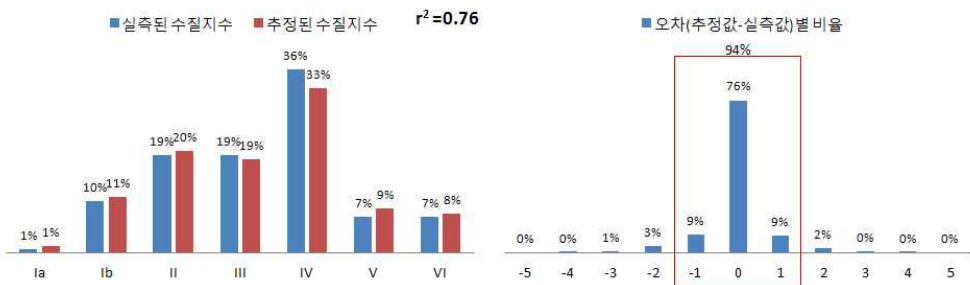
수질지수	의사결정트리		유전자프로그래밍		다중회귀분석	
	error	r ²	error	r ²	error	r ²
① 수질등급 (COD기준)	24%	0.76	62%	0.47	66%	0.43
② 수질등급 (TOC기준)	23%	0.88	61%	0.51	64%	0.48
③ 수질등급 (4항목평균)	22%	0.77	67%	0.43	72%	0.36
④ Vollenweider영양상태	18%	0.59	49%	0.27	44%	0.24
⑤ LQI10	24%	0.77	57%	0.41	60%	0.39
⑥ rLQI _{ar} 10	23%	0.78	59%	0.40	59%	0.39
⑦ LEHA _w 10	34%	0.78	71%	0.54	79%	0.40
⑧ CODI	35%	0.75	73%	0.40	80%	0.33

3. 의사결정트리 기법을 이용한 농업용저수지 수질지수 추정

의사결정트리 기법을 이용해 6,797개의 수질측정망 제원, 오염부하량, 기상자료를 이용해 농업용저수지의 수질지수를 추정한 후 실측된 수질로부터 산정된 수질지수와 그 결과를 비교·분석하였다.

가. 수질지수별 추정결과 및 오차분석

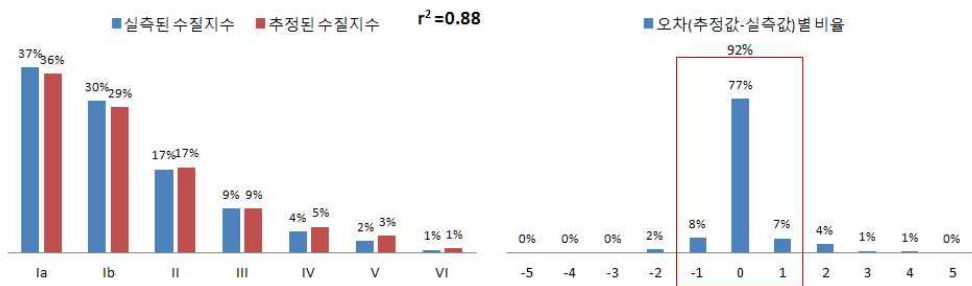
COD기준 호소수질등급은 Ia~VI 등급 모두 수질농도로부터 산정한 COD기준 호소수질등급과 3% 포인트 이내의 차이를 나타내었으며, 전체적인 등급 분포도 호소수질등급과 매우 유사하게 추정되었다. 전체 6,797개의 데이터 중 76%인 5,143개가 저수지 수질농도를 이용해 산정한 COD기준 호소수질등급과 인공지능기법을 이용해 유역제원 및 부하량자료로부터 추정한 COD기준 호소수질등급과 일치하는 것으로 나타났으며, 9%는 추정된 COD기준 호소수질등급이 1등급 높게 9%는 1등급 낮게 나타났다. 동일한 저수지에서 매년 약간의 수질등급이 변하는 것을 고려해 1등급 차이나는 부분까지 추정이 잘된 것으로 가정할 경우 전체 94%가 저수지 수질농도로부터 산정한 COD기준 호소수질등급과 유역제원 및 부하량자료로부터 추정한 COD기준 호소수질등급이 유사하게 나타났다.



<그림 5-17> COD기준 호소수질등급의 실측값 및 추정값

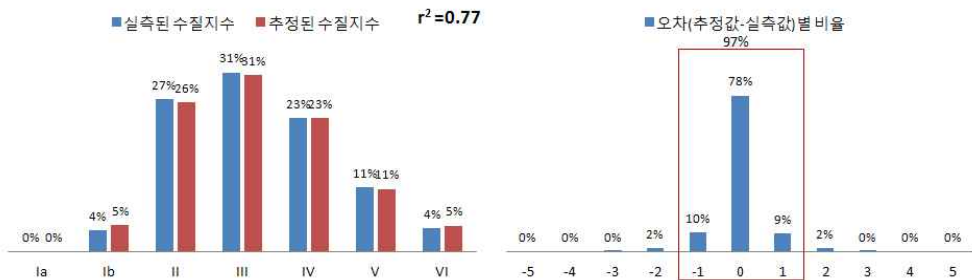
TOC기준 호소수질등급은 COD기준 호소수질등급과 달리 Ia가 제일 높은 비율을 차지하고 있으며, VI로 갈수록 지속적으로 비율이 감소하는 경향을 나타내었다. Ia~VI 등급 모두 추정된 TOC기준 호소수질등급과 실측된 TOC기준 호소수질등급 사이에 1%포인트 이내의 차이를 나타내어 실측된

TOC기준 호소수질등급과 매우 유사하게 추정되었다. 전체 2,327개의 데이터 중 77%인 1,784개가 저수지 수질농도를 이용해 산정한 TOC기준 호소수질등급과 인공지능기법을 이용해 유역제원 및 부하량자료로부터 추정한 TOC기준 호소수질등급이 일치하는 것으로 나타났으며, 7%는 1등급 높게 8%는 1등급 낮게 추정되었다. TOC기준 호소수질등급은 2010년부터 2013년 수질 측정자료가 포함되어 상대적으로 오차가 적고 r^2 값이 높게 나타났다. 하지만 분석에 이용된 data의 수가 적어 다양한 조건이 고려되지 않아, 분석에 이용되지 않은 새로운 data에 대해서는 상대적으로 정확도가 떨어질 수 있다.



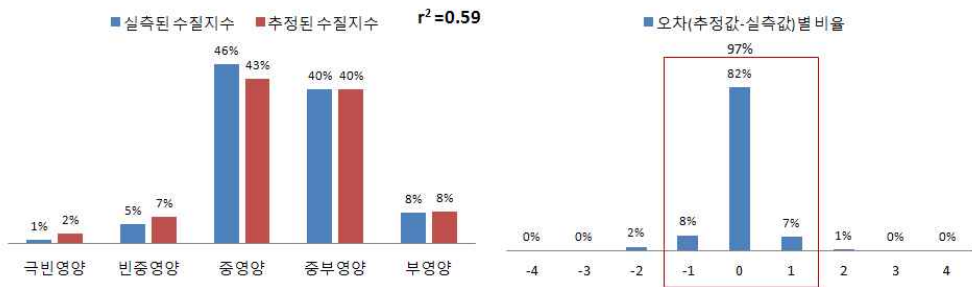
<그림 5-18> TOC기준 호소수질등급의 실측값 및 추정값

유역제원 및 부하량자료로부터 추정한 4항목평균 호소수질등급은 실측한 수질로부터 COD, T-N, T-P, Chl-a기준 호소수질등급을 산술평균한 4항목평균 호소수질등급과의 등급별 오차는 1%포인트 이내로 매우 적게 나타났으며, 등급별 분포도 실측한 4항목평균 호소수질등급과 매우 유사하게 나타났다. 전체적으로 78%는 정확하게 추정하였으며, 9%는 1등급 높게 10%는 1등급 낮게 추정되었다. 1등급 차이나는 부분까지 추정이 잘된 것으로 가정할 경우 전체 97%가 평균 호소수질등급과 유사하게 모의되었다.



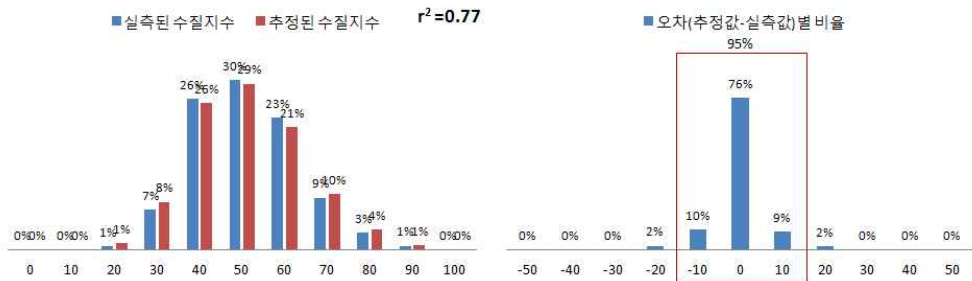
<그림 5-19> 4항목 평균 호소수질등급의 실측값 및 추정값

Vollenweider 영양상태는 등급의 수가 5개로 적고, 약 86%가 중영양과 중부영양으로 집중되어 있어 다른 지수보다 상대적으로 정확히 추정된 비율이 82%로 매우 높게 나타난 반면, r^2 값은 0.59로 낮게 나타났다. Vollenweider 영양상태는 대부분 중영양과 중부영양에 집중되어 농업용저수지의 수질상태를 나타내는데 변별력이 낮은 단점이 있다.



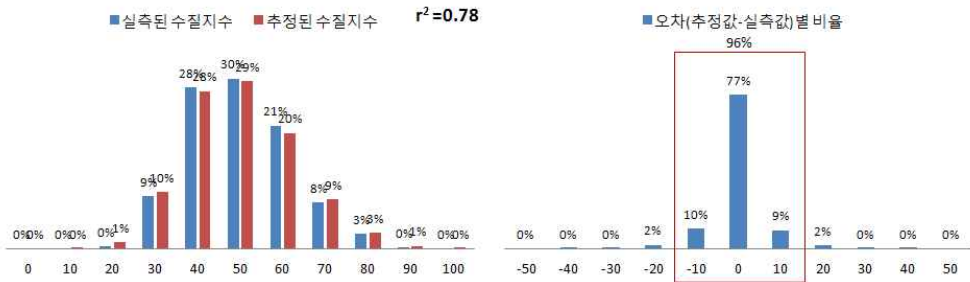
<그림 5-20> Vollenweider 영양상태의 실측값 및 추정값

LQI10지수는 호소수질등급보다 등급수가 더 많음에도 불구하고 저수지 수질로부터 산정한 등급별 LQI10지수와 저수지제원 및 부하량자료로부터 추정된 LQI10지수 사이의 오차가 2% 포인트 이내로 매우 정확하게 추정되었다. 또한, 전체의 76%가 실측된 LQI10지수와 추정된 LQI10지수가 정확하게 일치하는 것으로 나타나, COD기준 호소수질등급 및 4항목평균 호소수질등급과 비슷한 정확도를 나타내었다.



<그림 5-21> LQI10의 실측값 및 추정값

본 연구에서 LQI지수를 보완 개발한 rLQI_{ar}10지수를 농업용저수지 수질 측정망 자료로부터 추정한 결과 LQI10과 유사한 경향을 나타내었으며, 정확도가 소폭 상승한 것으로 나타났다. 저수지 수질로부터 산정한 등급별 rLQI_{ar}10지수값과 저수지제원 및 부하량자료로부터 추정한 rLQI_{ar}10지수값 사이의 오차가 1% 포인트 이내로 매우 정확하게 추정되었으며, 전체의 77%가 실측된 rLQI_{ar}10지수값과 추정된 rLQI_{ar}10지수값이 정확하게 일치하는 것으로 나타났다. 2등급 이상 오차가 발생하는 경우는 전체의 4%로 96%가 1등급 이내의 오차를 나타내었다.

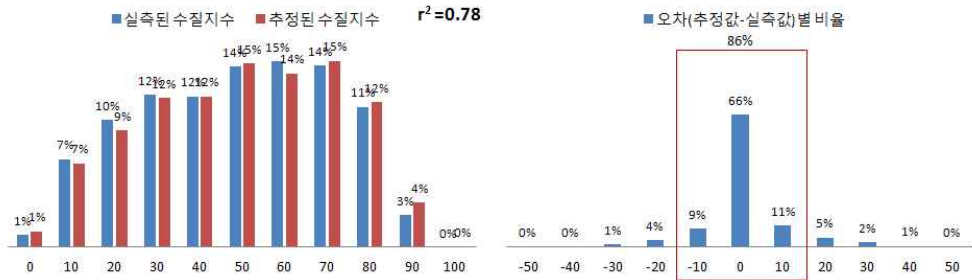


<그림 5-22> rLQI_{ar}10의 실측값 및 추정값

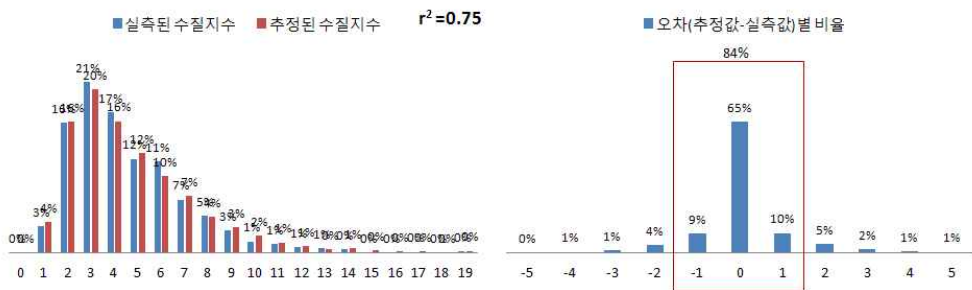
LEHAW10지수는 다른 지수와 달리 0, 10, 90, 100을 제외하고 대부분 10~15% 범위의 고른 분포를 나타내었다. 의사결정트리 기법을 이용해 추정된 수질지수를 실측된 수질지수와 비교한 결과, 전체의 66%만이 실측된 수질지수와 정확히 일치하게 추정되어 다른 수질지수 보다 상대적으로 낮은 정확도를 나타내었다. 또한 실측된 수질지수와 추정된 수질지수 사이에 2등급 이상 오차가 나는 경우는 전체의 14%로 매우 높게 나타났다. 이와 같이 다른 지수보다 오차가 크게 나타난 이유는 등급별 고른 분포를 나타내기 때문이라 생각된다.

COD농도 정수 값을 나타내는 CODI지수는 다른 지수보다 등급수가 2~3 배 이상 많음에도 불구하고 등급별 오차는 1% 포인트 이내로 매우 적게 나타났다. 전체적으로 실측된 수질지수와 의사결정트리 기법을 이용해 추정된 수질지수가 동일한 경우가 69%로 LEHAW10지수와 비슷한 값을 나타내었지만 다른 지수보다 적게 나타났다. 또한 실측된 수질지수와 추정된 수질지수

사이의 오차가 2등급 이상인 비율이 전체의 16%로 LEHAW10과 비슷하기는 하지만, 그 외의 다른 지수보다 크게 나타났는데, 이는 등급의 수가 다른 지수보다 2~3배 많기 때문이다.



<그림 5-23> LEHAW10의 실측값 및 추정값



<그림 5-24> CODI의 실측값 및 추정값

나. 수질지수별 인공지능기법에 의한 추정법 적용성 평가

8개 농업용저수지 수질지수별로 유역제원 및 발생부하량 자료로부터의 사결정트리 기법을 이용한 수질지수 추정법의 적용성을 평가한 결과는 (표 5-14)와 같다.

COD기준 호소수질등급은 실측한 저수지 수질로부터 산정한 COD기준 호소수질등급과 추정된 COD기준 호소수질등급 사이에 오차가 적고 r^2 가 높게 나타나 인공지능기법을 이용해 저수지 제원 및 부하량자료 만으로도 농업용저수지 수질지수 추정이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 하지만 COD기준 호소수질등급은 COD만이 고려되어 농업용저수지의 종합평가가 불가능하여 다른 지수들과 병행하여 사용하는 것이 좋을 것으로 생각된다. TOC기

준 호소수질등급은 다른 지수에 비해 적은 데이터를 이용해 상대적으로 오차가 적고 r^2 값이 높게 나타났으나, 추후 데이터가 수집되면 다시 인공지능 기법을 학습시킨 후 수질지수를 추정하는 것이 좋다. 또한 최근에 호소수질 등급에 추가되어 농업용저수지에 사용하기 위해서는 충분한 검토가 필요하다. 4항목평균 호소수질등급은 여러 수질항목이 고려되어 종합적인 저수지 수질평가가 가능했고, COD기준 호소수질등급보다 더 실측된 수질지수와 유사하게 추정되었다. 하지만, 일반적으로 4개의 호소수질등급을 평균하여 사용하는 경우가 거의 없기 때문에 보조적인 수질지수 사용하는 것이 좋을 것 같다.

$rLQI_{ar}10$ 지수는 100에서 $LQI_{ar}10$ 을 뺀 것을 제외하고 $LQI10$ 지수와 대부분 비슷한 경향을 나타내었으며, 호소수질등급보다 등급수가 11등급으로 더 많음에도 불구하고 호소수질등급과 유사한 수준의 오차 및 r^2 값을 나타내었다. 본 연구에서 사용된 $LQI10$ 과 $rLQI_{ar}10$ 지수는 등급수가 11개로 재분류 과정을 거쳐 우수(0~30), 보통(40, 50), 문제(60), 과락(70~100) 또는 A(0~30), B(40), C(50), D(60), E(70), F(80~100)와 같은 형태로 등급을 재분류 할 수 있는 장점이 있다. 저수지 COD농도의 정수값을 지수로 하는 CODI는 단계가 0~20사이로 매우 많음에도 불구하고 전체적으로 실측된 CODI와 추정된 CODI사이의 차이가 크지 않고 매우 유사하게 나타났다. Vollenweider영양상태는 비록 오차는 적지만, 대부분의 농업용저수지가 중영양과 중부영양으로 분류되어 변별력이 부족하다.

본 연구에서 적용한 8개의 수질지수 중 우리나라에서 가장 많이 사용하고 있는 COD기준 호소수질등급을 주된 수질지수로 사용하면서 보조적으로 4항목(COD, T-N, T-P, Chl-a)의 호소수질등급을 평균한 4항목평균 호소수질등급, COD, T-P, Chl-a의 농도가 종합적으로 고려되는 $rLQI_{ar}10$ (또는 $LQI10$) 지수, COD농도를 나타내는 CODI를 병행해서 사용하면 농업용저수지의 수질을 종합적으로 잘 나타낼 수 있을 것으로 생각된다. 또한 이들 4개 지수는 인공지능기법을 이용해 추정된 수질지수가 실측된 수질지수와 매우 유사하게 추정되어 효과적으로 저수지 유역환경변화에 따른 저수지의 수질변화를 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

(표 5-14) 수질지수별 인공지능기법에 의한 추정기법 적용성 평가

수질지수	적용성 분석 결과
COD기준 호소수질등급	-정확도 높게 모의 됨 -COD만 고려되어 저수지의 종합평가 불가
TOC기준 호소수질등급	-COD기준 호소수질등급보다 오차가 적기는 하지만 -적은 수의 data를 이용하여 정확도가 낮을 수 있음
평균 호소수질등급	-종합적 저수지 수질평가 가능함 -COD만을 이용한 경우보다 정확도 더 높음 -실제로는 이용되지 않는 수질지수임
Vollenweider 영양상태	-단계가 5단계로 적고, T-P와 T-N만 고려됨 -86%가 중영양과 부영양으로 변별력 부족함
LQI10	-합리적으로 종합적 저수지 수질평가 가능함 -정확도 높게 모의되고, 단계가 10단계로 적절함 -재분류 가능:
rLQIar10	우수(>90), 보통(70~80), 문제(50~60), 과락(40이하) A(>90), B(80), C(70), D(60), F(<50)
LEHAW10	-합리적으로 종합적 저수지 수질평가 가능함 -정확도 높게 모의되고, 단계가 10단계로 적절함 -다른 지수에 비해 오차가 더 큼 -아직 연구가 진행 중으로 사용한 사례가 적음
CODI (COD농도 정수값)	-단계가 많음에도 정확도 높게 추정됨 -COD만 고려되어 저수지의 종합평가 불가 -단계가 많아 세밀한 수질변화를 표현하기에 적합함

6장 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발 및 활용방안

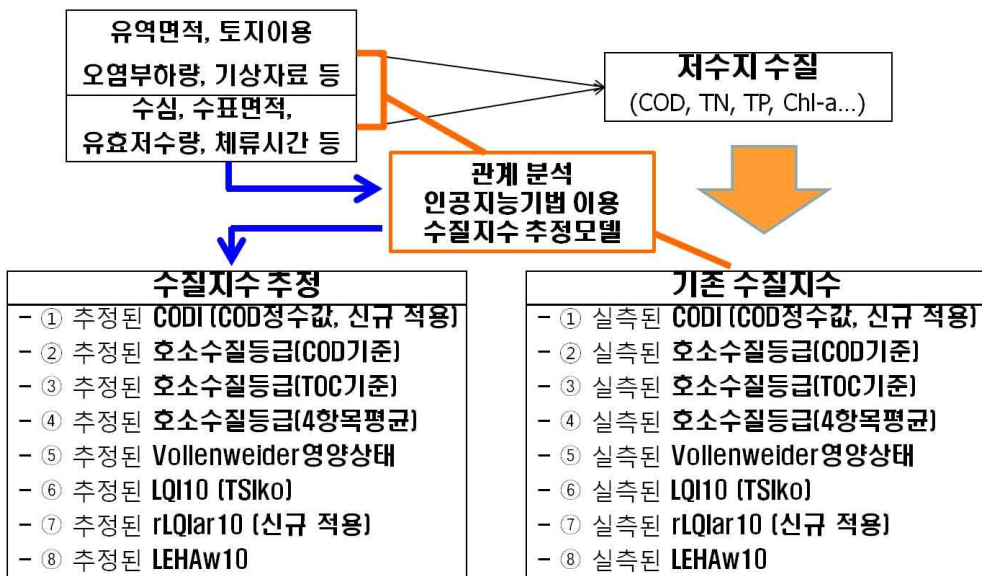
6장 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발 및 활용방안

1절 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발

1. 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발 방향

일반적으로 기상자료, 유역면적, 토지이용, 발생부하량과 같은 유역 인자와 수심, 수표면적, 유효저수량, 체류시간과 같은 저수지 인자의 영향을 받아 저수지의 수질이 나타난다. 저수지에 나타난 수질을 실측하여 얻은 수질 농도를 이용해 여러 종류의 수질지수를 산정한다.

본 연구에서는 기상자료(강수량, 기온 등), 유역정보(유역면적, 토지이용, 발생부하량 등), 저수지 제원정보(저수지 수표면적, 유효저수량 등)와 실측된 기존 수질지수와의 관계를 인공지능기법(의사결정트리기법)을 이용해 분석하여 fuzzy rule을 도출하고, 도출한 fuzzy rule을 이용해 수질지수를 추정할 수 있는 수질지수 추정모델을 개발하였다. 이렇게 개발된 수질지수 추정모델을 이용하여 유역의 환경변화에 따른 저수지 수질변화를 분석하는데 활용할 수 있다.

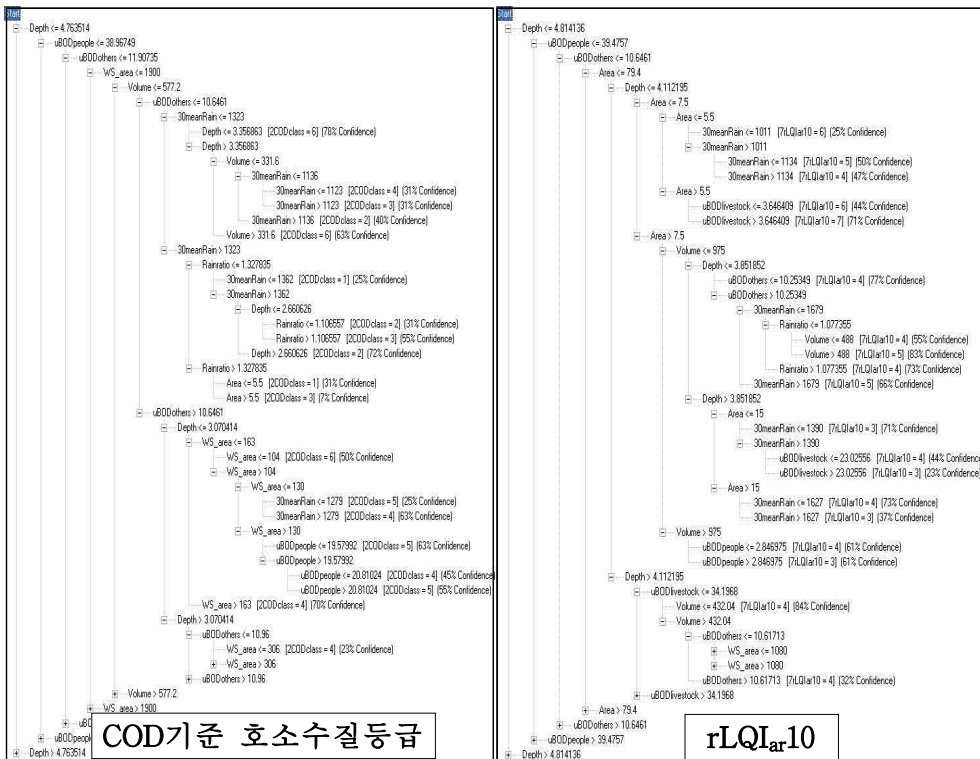


<그림 6-1> 수질지수 추정모델 개발 흐름도

2. 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발

가. Fuzzy rule도출 및 수질지수 추정을 위한 함수식 작성

농업용저수지 수질지수 추정모델을 개발하기 위해 구축한 수질측정망 자료와 측정된 수질을 이용해 산정한 8가지 수질지수 사이의 관계를 의사결정트리(decision tree) 기법을 이용해 학습(training) 시킨 후 수질지수를 추정할 수 있는 fuzzy rule을 도출하였으며, 이중 예로써 2개 수질지수에 대해 도출된 fuzzy rule은 다음과 같다.



<그림 6-2> 의사결정트리기법에 의해 도출된 fuzzy rule

<그림 6-2>의 fuzzy rule은 매우 간략하게 표현한 것으로 실제로 더욱 복잡한 형태이며, JAVA를 이용해 if-then문으로 변환하여 수질지수를 추정할 수 있는 함수식을 만들었다.

라. 수질지수 추정모델의 구성 및 세부기능

(1) 화면구성 및 모델 실행 방법

본 연구에서 개발된 인터넷 기반의 농업용저수지 수질지수 추정모델은 <그림 6-4>와 같다. 인터넷 화면에 해당 홈페이지 주소를 입력하면 언제 어디서나 쉽게 접속하여 수질지수를 추정할 수 있다. 화면의 구성은 사용자가 쉽게 이용할 수 있도록 입력화면과 결과화면을 분리하여 개발하였다. 입력 화면은 원하는 저수지와 연도를 선택하는 메뉴와 실제 7개의 모델 입력 값이 입력되는 부분으로 구성된다. 결과화면은 8개의 수질지수별 추정된 수질지수와 실측된 수질지수로 구분하여 화면에 나타나도록 하였다.

입력화면에 있는 7개의 입력 값을 자동 또는 직접 입력한 후 별도의 모델 실행과정 없이 ‘수질지수 추정 결과’탭을 클릭하면 입력된 값을 이용해 자동으로 모델이 실행된 후 결과가 ‘수질지수 추정 결과’에 나타난다. 이와 같이 7개의 입력 값을 입력하고 결과화면 탭을 선택하는 간단한 과정만으로 주어진 입력 값에 대한 결과를 쉽게 확인 할 수 있도록 하였다.



<그림 6-4> 개발된 수질지수 추정모델의 화면 구성

(2) 측정망 저수지의 자료 입력 방법

본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델은 사용자 편의를 위해 측정망

대상 저수지에 대해 수질지수를 추정할 경우 이미 구축된 DB로부터 다음과 같이 저수지 제원 및 부하량이 자동으로 입력되도록 하였다.

콤보박스를 이용해 원하는 지역본부, 지사, 저수지를 차례로 선택하면 선택된 저수지의 ‘관할측후소’, ‘유역면적’, ‘만수면적’, ‘유효저수량’ 값이 구축한 web DB로부터 자동으로 입력되도록 하였으며, 자동 입력된 값은 필요시 화면상에서 직접 수정할 수 있도록 하였다.



<그림 6-5> 저수지 제원 자동입력 기능

저수지를 선택하여 관할측후소와 저수지 제원 자료를 불러들인 후 특정 연도를 선택하면 구축한 측정망DB로부터 선택한 저수지의 해당 연도 부하량 값이 항목별로 자동 입력되도록 하였다. 이렇게 지역, 지사, 저수지, 연도를 차례로 선택하면 모든 입력 항목이 채워진다.



<그림 6-6> 부하량 자동입력 기능

(3) 측정망 저수지 외 자료 입력 방법

농업용저수지 수질측정망 대상 저수지가 아닌 경우 불러올 DB가 존재하지 않기 때문에 이런 경우는 대상지역의 측후소와 저수지 제원 및 부하량을 직접 입력할 수 있도록 하였다.



<그림 6-7> 입력자료 직접 입력 화면

오염부하량은 직접 입력도 가능하나 조사되지 않아 자료가 없을 경우 저수지 유역의 개발 정도에 대한 정보만으로도 개략적인 부하량 입력이 가능하도록 '기본 부하비 입력 기능'을 추가하였다. 기본 부하비는 측정망 저수지 유역을 대상으로 축적된 자료로부터 생활계, 축산계, 기타 BOD부하비 (BOD 발생 부하량을 유역면적으로 나눈 값)의 10, 30, 50, 70, 90, 95, 99.5번째 백분위수(percentile)에 해당되는 통계값을 유역의 개발 정도에 따라 미개발, 저개발, 평균개발, 개발지, 고개발, 난개발, 최대개발의 7단계로 정하였다. 따라서 사용자는 대상지역의 유역 개발정도에 따라 7단계 중 하나를 선택하면 개략적인 부하량 값을 입력할 수 있다.



<그림 6-8> 기본 부하비 자동입력 기능

(4) 불확실성을 고려한 수질지수 추정

지수의 등급 수가 적어지면 추정된 결과의 정확도는 높아질 수 있지만, 세부적인 수질변화가 지수로 잘 반영되지 않는 문제가 생길 수 있다. 예를 들어 저수지의 COD가 7.9 mg/L인 경우 부하량이 약간 증가하여 8.1 mg/L로 증가한 경우 농도가 0.2 mg/L가 증가되었지만, COD기준 호소수질등급은 IV

등급에서 V등급으로 수질이 크게 악화된 것으로 나타나는 문제가 생긴다. 반대로 유역의 부하량이 감소하여 COD가 7.9 mg/L에서 5.1 mg/L로 낮아진 경우에 농도가 2.8 mg/L가 감소하였음에도 불구하고 COD기준 호소수질등급은 동일하게 IV등급으로 나타나는 문제가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 불확실성을 고려하여 수질 지수를 추정할 수 있도록 Monte Carlo simulation을 적용하였다. 일반적인 모델링은 입력 인자별로 주어진 1개의 값을 이용해 모델링을 수행하는 반면, Monte Carlo simulation기법은 입력 인자별로 범위 값이 입력되도록 하여 모델이 주어진 범위 값을 이용해 수천 번 이상 실행되어 얻은 수천 개의 결과 값을 얻을 수 있는 기법이다. 이렇게 얻어진 수천 개의 결과 값을 통계 분석하여 모델 결과에 대한 분포, 평균, 표준편차, 분산, 범위 등 다양한 형태의 통계 값을 얻을 수 있어 모델의 불확실성, 입력자료의 불확실성을 고려한 모델링을 수행할 수 있도록 해준다.

본 연구에서는 Monte Carlo simulation기법을 적용하여 일부 입력 인자에 대해 -0.3 ~ 0.3 사이의 난수를 2,000개 발생시켜 이 값을 입력된 값에 곱해 새로운 입력 값 2,000개를 생성시킨 후 모델을 각각 실행하여 2,000개의 수질 지수 추정 결과 값을 얻었다. 2,000개의 결과 값을 통계 분석하여 평균값 및 최소값과 최대값을 이용해 범위를 산정하였다.

입력자료	불확실성 고려 전				입력자료	불확실성 고려 후			
종류	추정된 수질지수		실측된 수질지수		종류	추정된 수질지수		실측된 수질지수	
	추정값	범위	중값	범위		평균값	범위	중값	범위
CODI	12		12	10~21	12.4	10~15	12	10~21	
수질등급(COD)	VI		VI	VI~VI	VI (6.2)	V~VI	VI	VI~VI	
수질등급(TOC)	IV		V	V~VI	IV (4.8)	II~VI	V	V~VI	
수질등급(평균)	V		VI	V~VI	V (5.5)	IV~VI	VI	V~VI	
VW영양상태	중부		중부	중~중부	중부 (4.1)	중~중부	중부	중~중부	
LQI	70		77	73~92	73	60~90	77	73~92	
rLQIar	30		25	11~29	28	20~30	25	11~29	
LEHaw	10		8	2~11	10	0~20	8	2~11	
*2000 ~ 2012 data					*2000 ~ 2012 data				

<그림 6-9> 불확실성 고려 전·후 결과 화면

이와 같이 Monte Carlo simulation기법을 적용하여 평균값 및 범위(최소값~최대값)를 얻을 수 있으며, 평균값을 계산하는 과정에서 반올림을 적절히 활용하면 각각의 수질지수 등급별로 10등급을 추가하여 세부적인 수질변화를 수질지수에 반영하여 나타낼 수 있게 된다. 예를 들어 COD기준 호소수

질등급의 경우 각 등급별로 10등급이 추가되어 IV등급을 4.0, 4.1, 4.2, … , 4.8, 4.9 등급으로 표현하여 세부적인 수질변화를 지수로 나타낼 수 있게 된다.

(5) 실측된 수질지수 자동 산정

추정된 수질지수와 비교하여 분석하기 위해 ‘입력자료’화면에서 저수지를 선택하면 저수지 제원이 입력화면에 입력되면서 동시에 모델 내부에 입력된 실측수질을 이용해 수질지수가 자동으로 산정된다. 산정된 8개의 실측 수질지수에 대해 중앙값(median)과 범위(최소값~최대값)가 자동으로 계산되어 화면에 나타나게 된다. 실측된 수질지수에 활용되는 자료는 해당저수지가 측정망 저수지로 선정된 이후부터의 모든 자료가 입력, 계산되어 해당저수지의 전 기간 수질과악이 가능하며, 이용된 자료의 기간을 결과화면 하단에 출력하여 몇 년간의 자료인지를 사용자가 파악할 수 있도록 하였다.

종류	추정된 수질지수		실측된 수질지수	
	평균값	범위	중앙값	범위
CODI	12.4	10~15	12	10~21
수질등급(COD)	VI (6.2)	V~VI	VI	VI~VI
수질등급(TOC)	IV (4.8)	II~VI	V	V~VI
수질등급(평균)	V (5.5)	IV~VI	VI	V~VI
VW영양상태	중부 (4.1)	중~중부	중부	중~중부
LQI	73	60~90	77	73~92
rLQIar	28	20~30	25	11~29
LEHaw	10	0~20	8	2~11

*2000 ~ 2012 data

<그림 6-10> 결과화면의 실측된 수질지수

(6) 조건 변화 분석 기능

다음으로 기본 DB의 자료를 조건 변화시켜 그 결과를 모의할 수 있는 간단한 시나리오 기능을 개발하여 사용자가 쉽게 저수지와 유역의 환경변화에 따른 저수지의 수질변화를 추정할 수 있도록 다양한 옵션의 ‘조건 변화 분석’기능을 추가하였다. 화면에서 ‘조건 변화 분석’옵션을 선택하면 초기 입력화면 하단에 <그림 6-11(b)>와 같이 조건변화를 입력할 수 있는 화면이 나타나도록 하였다. 하단의 조건변화 입력화면에 7개 입력 인자에 대해 다양한 변경옵션을 선택하여 값을 입력할 수 있도록 하였다.

2절 농업용저수지 수질지수 추정모델 활용방안

이번 절에서는 본 연구에서 개발한 농업용저수지 수질지수 추정모델의 활용방안에 다음과 같이 6가지로 나눠 예제를 통해 설명하였다.

1. 저수지 수질관리를 위한 기준
2. 신규 조성 예정 저수지의 수질예측
3. 신규 오염원 영향 검토
4. 수질개선대책 수립 대상지의 부하량 삭감 영향 검토
5. 기존 인터넷 기반 시스템과 연계
6. 기타 활용방안

1. 저수지 수질관리를 위한 기준으로 활용

가. 유역의 오염원 관리 특성 및 수질관리 방향 분석

유역 제원(유역면적, 만수면적, 유효저수량)이 비슷한 농업용저수지에서 발생부하량이 더 많더라도 저수지의 수질은 더 좋은 경우가 발생할 수 있다. 이는 저수지의 수질이 유역의 발생된 부하량보다는 처리시설에 의해 삭감된 후 배출되는 부하량에 더 큰 영향을 받기 때문이다. 하지만 본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델에서는 발생된 부하량이 많이 처리된 저수지와 그렇지 않은 저수지가 있더라도 입력된 저수지 제원과 발생부하량 값이 동일하다면 같은 수질지수 값을 나타내게 된다.

따라서 이를 역으로 이용할 수 있는데 예로 <그림 6-12>와 같이 저수지 제원은 비슷하나 발생부하량이 차이나는 농암지와 만수지의 수질지수를 비교해 보았다. 발생부하량은 칠곡지가 농암지보다 더 크기 때문에 수질이 더 나쁜 것으로 수질지수를 추정하였다. 하지만 실측된 수질지수를 보면 두 저수지에서 비슷한 범위를 보이고 있다.

이렇게 추정된 수질지수보다 실측된 수질지수가 수질이 더 나쁜 경우 해당 저수지는 유역에서 발생되는 오염부하량이 조건이 비슷한 다른 저수지에 비해 오염부하량이 적게 삭감되어 많은 오염부하량이 배출되는 유역임을 의미하며, 반대로 추정된 수질지수보다 실측된 수질지수가 수질이 더 좋은

것으로 나타나면, 해당 저수지는 유역에서 발생하는 오염부하량이 조건이 비슷한 다른 저수지에 비해 오염부하량이 더 많이 처리되어 상대적으로 적은 오염부하량이 배출되는 유역임을 의미한다.

(a) 농암저수지 입력화면

입력자료 수질지수 추정 결과

종류: 관할특후소, 목천영동, 농암, 2012

항목	값
관할특후소	보은
유역면적 (ha)	490
만수면적 (ha)	9.6
유효저수량 (천 ³ m)	649
생환계	9.8
BOD부하량(kg/d)	축산계 106.7
기타	5.8

'2012년 '농암저수지' 정보가 입력되었습니다.

(b) 농암저수지 결과화면

입력자료 수질지수 추정 결과

종류	추정된 수질지수		실측된 수질지수	
	평균값	범위	중앙값	범위
CODI	5.7	3~8	7	5~9
수질등급(COD)	III (3.4)	II~IV	IV	IV~V
수질등급(TOC)	I b (1.7)	I a~II	II	I b~II
수질등급(평균)	IV (4.5)	II~V	V	IV~V
VW영양상태	빈중 (2.5)	빈중~빈중	중	중~중
LQI	52	40~60	60	55~68
rLQIar	58	50~60	42	34~46
LEHAw	46	30~60	30	17~39

*1999 ~ 2012 data

(c) 칠곡저수지 입력화면

입력자료 수질지수 추정 결과

종류: 경기, 평택, 칠곡(안성), 2012

항목	값
관할특후소	수원
유역면적 (ha)	391
만수면적 (ha)	15.8
유효저수량 (천 ³ m)	544
생환계	44
BOD부하량(kg/d)	축산계 241.3
기타	4.6

'2012년 '칠곡(안성)저수지' 정보가 입력되었습니다.

(d) 칠곡저수지 결과화면

입력자료 수질지수 추정 결과

종류	추정된 수질지수		실측된 수질지수	
	평균값	범위	중앙값	범위
CODI	8.6	5~11	8	5~11
수질등급(COD)	VI (6.2)	VI~VI	IV	III~VI
수질등급(TOC)	III (3.2)	II~IV	II	II~III
수질등급(평균)	V (5.3)	IV~VI	IV	III~V
VW영양상태	중부 (4.1)	중~중부	중	빈중~중
LQI	59	40~80	59	47~68
rLQIar	31	20~40	42	33~54
LEHAw	27	10~40	31	17~56

*2001 ~ 2012 data

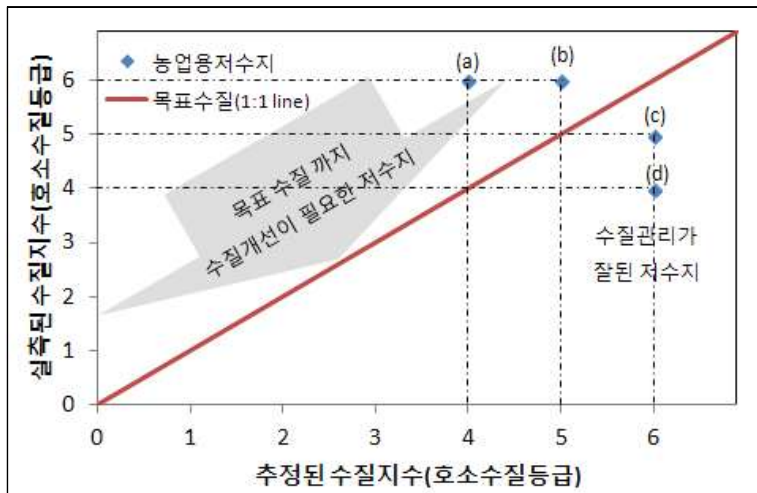
<그림 6-12> 농암저수지와 칠곡저수지 수질지수 추정 결과

농암저수지와 같이 추정된 수질보다 실측된 수질이 나쁜 저수지는 유역에서 발생하는 오염부하량이 조건이 비슷한 저수지보다 상대적으로 적게 제거된 것으로 유역의 오염부하량을 다른 저수지에 비해 상대적으로 관리가 잘 안 되고 있으므로, 이러한 저수지는 저수지의 수질개선을 위해 처리시설을 이용한 오염부하량 삭감대책을 수립하는 것이 적당하다. 또한 추정된 수질지수와 실측된 수질지수의 차이가 클수록 오염부하량 삭감대책의 효과는 더 크게 나타날 수 있다.

반대로 철곡저수지와 같이 유역에서 발생하는 오염부하량이 많이 제거되어 추정된 수질보다 실측된 수질이 깨끗한 저수지는 유역의 오염부하량을 다른 저수지에 비해 상대적으로 잘 관리하고 있으므로, 이러한 저수지는 유역에서 발생하는 오염부하량을 추가로 삭감시키는 대책을 수립하더라도 저수지의 수질개선 효과는 크게 나타나지 않을 수 있다. 그러므로 이러한 저수지는 처리시설을 이용한 부하량 삭감대책 보다는 현 상태를 유지하는 것이 바람직하다. 이러한 저수지의 수질을 개선시키고자 할 경우 처리시설을 이용한 부하량 삭감대책보다는 오염원 자체를 제거하여 발생부하량을 저감시키는 대책을 수립하는 것이 적당하다.

나. 저수지 수질관리를 위한 목표 수질지수 설정

일반적으로 저수지의 수질은 저수지 및 유역의 제원 및 오염부하량 조건 등에 영향을 받아 서로 다르게 나타나며, 도달 가능한 수질 또한 서로 다르다. 그러나 모든 농업용저수지를 호소수질등급의 IV등급 이내가 되도록 관리하는 것은 일부 저수지에 대해서 불가능할 수 있다. 그러므로 불가능한 목표를 설정하여 저수지를 관리하기 보다는 저수지 유역 여건 등을 고려하여 저수지마다 도달 가능한 목표수질을 정하여 목표 수질을 유지할 수 있도록 저수지를 관리하는 것이 더 합리적이다.



<그림 6-13> 수질관리를 위한 목표 수질지수 설정

본 연구에서 개발한 농업용저수지 수질지수는 장기간 수집된 농업용저수지 수질측정망 자료로부터 특정 저수지 조건(유역 체원 및 부하량)에 대해 평균적으로 나타나는 수질지수를 추정해 준다. <그림 6-13>의 (c), (d)저수지와 같이 실측된 수질이 추정된 수질보다 깨끗한 저수지(조건이 비슷한 저수지들 보다 수질이 깨끗한 저수지)가 있는 반면에, (a), (b)저수지와 같이 실측된 수질이 추정된 수질보다 오염된 저수지(조건이 비슷한 저수지들 보다 오염된 저수지)도 있다.

추정된 수질지수를 목표수질로 할 경우 (a)와 (b)저수지는 목표수질보다 오염된 저수지를 의미하며, (c)와 (d)저수지는 목표수질보다 수질이 깨끗한 저수지를 의미한다. 비록 (c)저수지가 V등급으로 농업용수 수질기준 IV등급을 초과하기는 하지만, 추정 수질이 VI등급임에도 불구하고 실측 수질은 V등급을 유지하고 있어 오염 도달치 보다는 저수지 수질관리가 잘 이루어지고 있는 것으로 발생 오염원 자체를 제거하지 않는 한 수질을 IV등급에 맞추는데 어려움이 있다. (a)와 (b)저수지는 모두 VI등급으로 수질개선이 필요한 저수지인데, 2개 저수지 모두 수질개선을 위한 목표수질을 IV등급 이내로 유지하기 보다는 각각 추정한 수질지수인 IV등급과 V등급을 목표로 수질개선대책을 수립하는 것이 적합할 수 있다.

이와 같이 수질지수 추정모델로부터 얻은 추정 수질지수는 오염 발생부하량이 평균적으로 처리되었을 경우 예상되는 값이므로, 추정된 수질지수를 해당 저수지의 목표수질로 설정하여 관리하면 저수지별 유역환경을 고려한 목표 설정이 가능하여 합리적인 저수지 수질관리가 가능해 진다.

2. 신규 조성 예정 저수지의 수질 예측

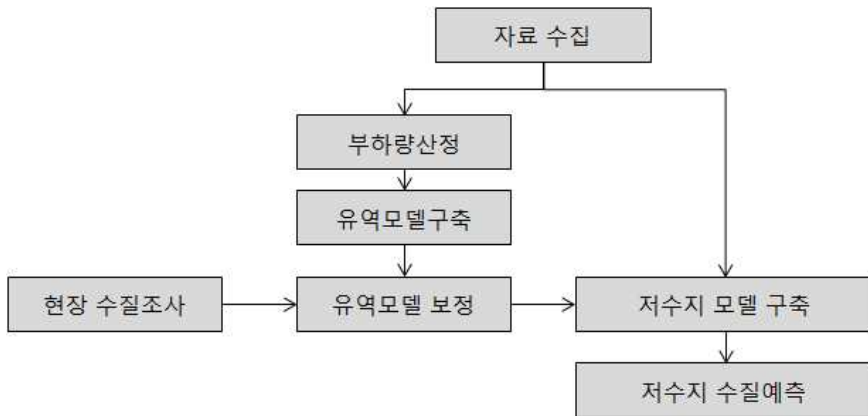
본 연구에서 개발한 농업용저수지 수질지수 추정모델의 활용방안으로 신규저수지 조성 시 예상되는 저수지 수질 상태를 추정하는데 사용할 수 있다. 신규저수지의 수질지수 추정은 조성 예정지 유역의 오염원 자료가 있는 경우와 없는 경우로 나누어 활용법을 설명하겠다.

가. 오염원 조사가 이루어진 경우

(1) 기존의 수질 모델링기법을 이용한 수질예측

기존에 대관령 식수전용댐 개발사업(2010)과 대룡지구 농촌용수개발사

업(2012)에서 신규 조성 예정 저수지의 수질을 유역모델과 저수지모델을 연계하여 예측한 결과가 있어, 수질지수 추정모델을 적용하여 얻은 결과와 그 값을 비교하였다. 일반적으로 신규 조성 저수지의 수질은 <그림 6-14>와 같은 과정으로 수질을 예측한다. 유역의 제원, 토지이용, 오염원자료, GIS자료, 과거 수질 및 유량조사 자료 등과 같은 자료를 수집한 후 토지계를 제외한 계별 발생부하량 및 배출부하량을 산정한다. 산정된 부하량과 GIS자료를 바탕으로 유역모델(HSPF)을 구축한 후 현장에서 조사한 유량 및 수질자료를 바탕으로 유역모델(HSPF)을 보정한다. 수집된 자료와 보정된 유역모델 결과를 바탕으로 저수지모델을 구축하여 저수지 조성 후 수질을 예측한다. 저수지 규모 및 사업성격에 따라 다르기는 하지만, 현장조사를 포함하여 최소 한 달 이상의 시간이 소요된다.

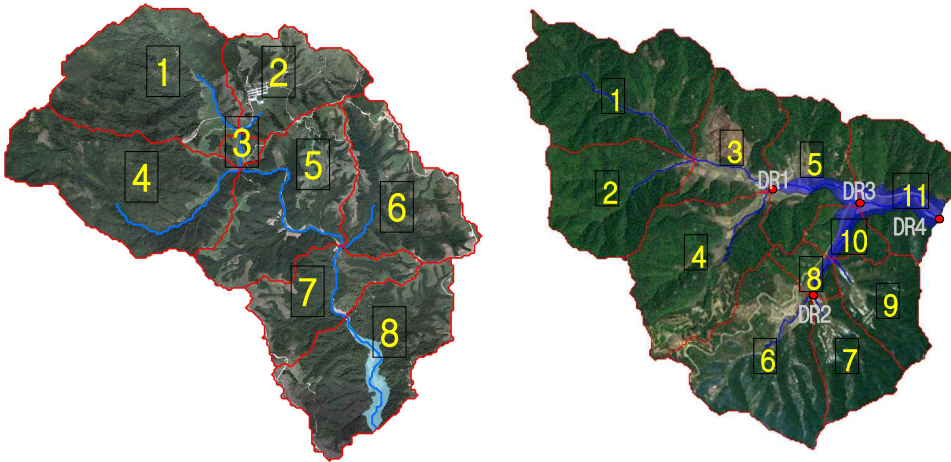


<그림 6-14> 신규저수지 수질예측 과정

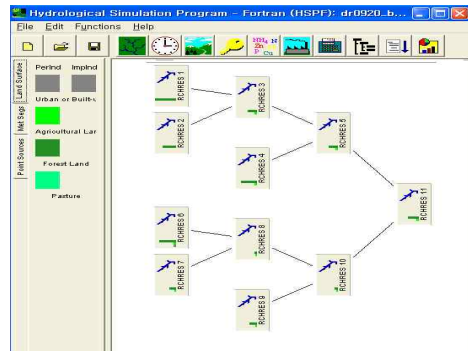
신규 조성 예정인 대관령지구와 대룡지구 저수지의 제원 및 유역의 부하량은 (표 6-1)과 같다. 대관령 지구는 유효저수량 2,846천톤, 수심 13.1m, 유역면적 1,530ha, 만수면적 21.8ha 규모의 저수지로 점오염원으로 축산계만 존재하는 상대적으로 오염원이 적은 지구이다. 대룡 지구는 유효저수량 1,457천톤, 수심 9.7ha, 유역면적 420ha, 만수면적 15ha 규모의 저수지로 점오염원으로 약간의 생활계와 축산계 오염원이 존재한다.

(표 6-1) 대관령지구 및 대룡지구의 제원 및 오염부하량

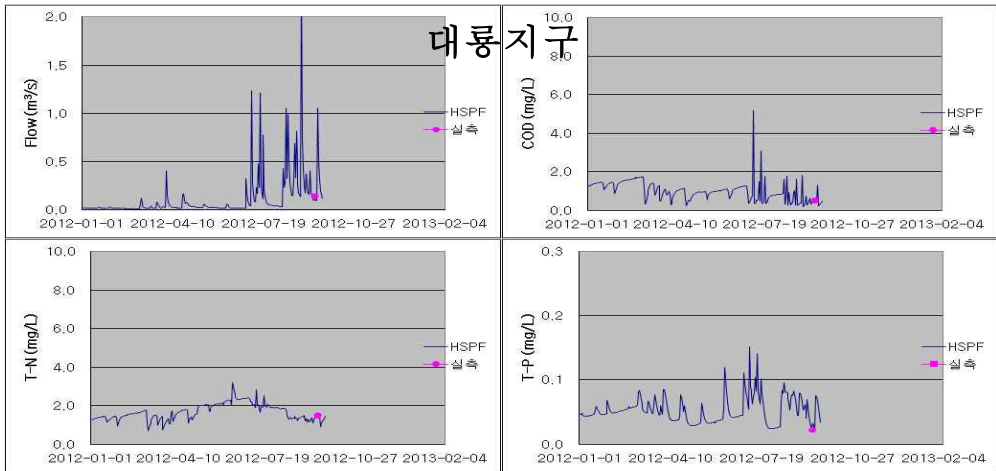
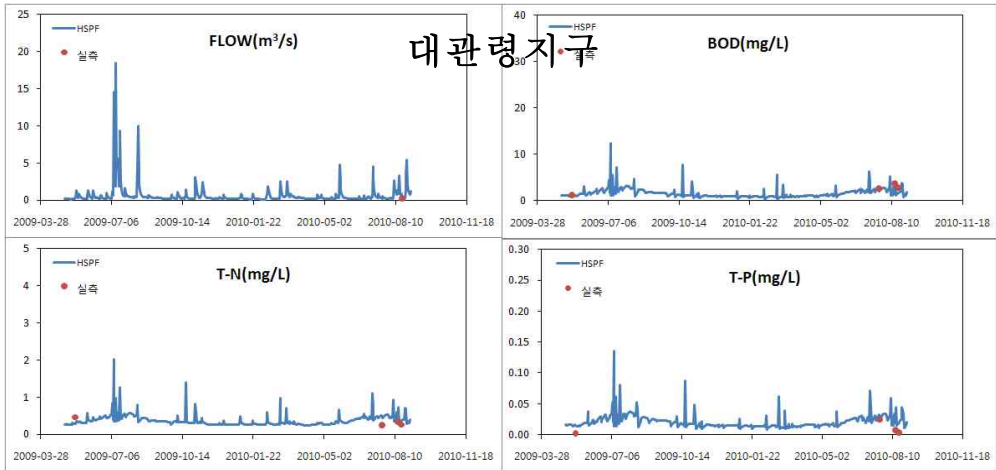
지구	유효저수량 (천톤)	유효수심 (m)	유역면적 (ha)	만수면적 (ha)	수해면적 (ha)	BOD 발생부하량(kg/일)			
						생활계	축산계	점원	총계
대관령	2,846	13.1	1530	21.8	70	0	161	161	176
대룡	1,457	9.7	420	15	214	2	12	14	21
지구	T-N 발생부하량(kg/일)				T-P 발생부하량(kg/일)				
	생활계	축산계	점원	총계	생활계	축산계	점원	총계	
대관령	0	47	47	64	0	16	16	17	
대룡	1	3	3	14	0	1	1	2	



<그림 6-15> 대관령지구 및 대룡지구 유역 및 소유역 분할도



<그림 6-16>대관령지구 및 대룡지구 HSPF모식도

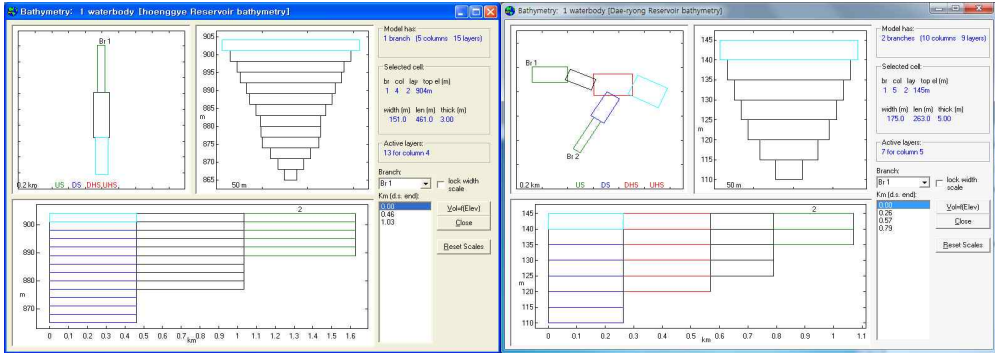


<그림 6-17> 대관령지구 및 대룡지구 HSPF모델 보정

유역모델 구축을 위해 <그림 6-15>와 같이 대관령지구 및 대룡지구의 유역을 각각 8개와 11개의 소유역으로 분할하였다. GIS자료로부터 소유역별 정보를 추출한 후 기상자료, 배출부하량 등의 자료를 이용해 <그림 6-16>과 같이 유역모델을 구축하였다. 구축된 유역모델(HSPF)을 현장에서 조사한 실측 유량 및 수질을 이용해 보정한 결과는 <그림 6-17>과 같다.

저수지모델(CE-QUAL-W2)은 CAD도면 자료를 이용하여 <그림 6-18>과 같이 저수지 모형을 구축하였으며, 유역모델결과를 저수지모델 입력자료로 변형한 후 저수지 수질을 예측한 결과는 (표 6-2)에 정리하였다. 기존의 모델링방법으로 예측한 대관령지구의 COD, T-N, T-P, Chl-a의 농도는 각각

4.09 mg/L, 0.39 mg/L, 0.023 mg/L, 3.49 mg/m³로 나타났으며, 대룡지구는 3.24 mg/L, 0.38 mg/L, 0.028 mg/L, 10.23 mg/m³로 나타났다. COD기준 수질등급으로는 대관령지구가 3등급, 대룡지구가 2등급을 나타내었다.



<그림 6-18> 대관령지구 및 대룡지구 CE-QUAL-W2 모식도

(표 6-2) 대관령지구 및 대룡지구 모델링 결과

	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)	수질등급 (COD기준)	Vollenweider 영양상태
대관령	4.09	0.39	0.023	3.49	III	증영양
대룡	3.24	0.38	0.028	10.23	II	증영양

(2) 수질지수 추정모델을 이용한 수질지수 추정

개발한 농업용저수지 수질지수 추정모델을 이용하여 신규 조성 예정 저수지의 수질지수를 추정해 보았다. 추정한 결과는 <그림 6-19>와 같으며, 이를 수질모델링 기법 이용해 예측된 수질로부터 산정한 수질지수와 비교·분석하였다(표 6-3).

(a) 대관령지구 입력화면 및 결과화면

지역분부	지사및시군	저수지	연도	종류	추정된 수질지수	
항목	값				평균값	범위
관할특류소	대관령			CODI	3.7	3~5
유역면적 (ha)	1530			수질등급(COD)	II (2.8)	I b~III
만수면적 (ha)	21.8			수질등급(TOC)	I b (1.7)	I a~III
유요저수량(천 ³ m)	2846			수질등급(평균)	III (3.5)	III~III
생활계	0			VW영양상태	빈중 (2.6)	빈중~빈중
BOD부하량(kg/d)	속산계 161			LQI	48	50~50
기타	22.1			rLQIar	61	60~60
				LEHAw	61	50~90

(b) 대룡지구 입력화면 및 결과화면

지역분부	지사및시군	저수지	연도	종류	추정된 수질지수	
항목	값				평균값	범위
관할특류소	부여			CODI	3.9	3~5
유역면적 (ha)	420			수질등급(COD)	III (3.6)	II~IV
만수면적 (ha)	15			수질등급(TOC)	I b (1.9)	I a~III
유요저수량(천 ³ m)	1457			수질등급(평균)	III (3.2)	II~III
생활계	2.5			VW영양상태	빈중 (2.6)	빈중~빈중
BOD부하량(kg/d)	속산계 11.6			LQI	43	40~50
기타	4.6			rLQIar	59	60~60
				LEHAw	63	30~90

<그림 6-19> 대관령지구 및 대룡지구 수질지수 추정 결과

(표 6-3) 기존 모델링 기법으로 산정한 수질지수 및 추정된 수질지수

		CODI	COD기준 수질등급	평균 수질등급	VW 영양상태	LQI10	rLQIar10	LEHAw10
모델링 수질지수	대관령	4 (4.1)	III	II	중	40 (42)	60 (59)	70 (67)
	대룡	3 (3.2)	II	II	중	40 (44)	60 (57)	60 (64)
추정된 수질지수	대관령	4 (3.7)	II (2.8)	III (3.5)	빈중	50 (48)	60 (61)	60 (61)
	대룡	4 (3.9)	III (3.6)	III (3.2)	빈중	40 (43)	60 (59)	60 (63)

전체적으로 수질지수 추정모델로 추정된 결과와 수질 모델을 이용해 예측한 수질지수 사이에는 COD기준 호소수질등급, 4항목 평균 호소수질등급, Vollenweider영양상태는 1등급 차이가 났으나, CODI, LQI, rLQIar, LEHAw는 매우 유사한 값을 나타냈다.

수질모델링을 이용한 수질예측은 다양한 시나리오분석이 가능하고 수

질항목별 자세한 농도를 예측할 수 있는 장점이 있지만, 시간이 많이 소요된다는 단점이 있다. 본 연구에서 개발한 농업용저수지 수질지수 추정모델은 수질모델링을 통해 얻은 수질지수와 약간의 차이는 나지만, 빠른 시간내에 쉽게 조성 예정인 신규 저수지의 수질을 추정할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델은 수질모델링을 통해 정확한 수질을 예측하기 전에 미리 수질지수를 추정하는 보조적인 수단으로 충분히 활용이 가능할 것으로 판단된다.

나. 오염원 자료가 없는 신규 조성 예정 저수지 수질지수 추정

저수지의 수질을 예측하기 위해서는 유역의 오염 부하량자료가 반드시 필요하다. 그러나 후보지 선정 단계에서 물리적 인자(저수지 유효저수량, 수심, 만수면적 등)만을 고려해 여러 개의 후보지를 선정하고 최적의 저수지 조성 예정지를 선정하는 단계에서는 본격적인 부하량 조사 작업 없이 물리적 인자만으로 판단을 내리게 된다.

이런 경우에는 1절 2항에서 설명한 개발정도에 따른 부하비 입력 방법으로 부하량을 입력하여 수질지수를 추정할 수 있다. 앞에서 적용한 대룡지구에 대해 부하량자료가 없는 것으로 가정해 유역 개발정도를 선택하여 수질지수를 추정했으며, 그 결과는 수질모델을 이용한 결과 및 실측 부하량 자료를 이용해 수질지수를 추정한 결과와 비교해 보았다.

유역의 개발정도는 7단계 중 미개발쪽에 가까운 저개발(두 번째)와 평균 개발(세 번째)를 선택하여 결과를 추정하였으며, 그 결과는 <그림 6-20>과 (표 6-4)에 나타내었다. CODI의 경우 평균값이 3.7~4.2 사이로 추정되었고, COD기준 수질등급은 III등급(3.4~3.8등급)사이로 추정되었으며, rLQIar지수는 51~60 사이로 추정되었다. 부하비를 이용한 부하량 입력 방법으로 추정한 결과를 기존의 수질모델링 결과 및 부하량을 이용하여 수질지수를 추정한 결과와 비교해본 결과 부하량 자료가 있는 경우의 수질지수 추정 결과는 모두 이 범위 내에 있었으며, 수질모델링을 이용해 수질을 예측하여 수질지수를 산정한 결과는 CODI, COD기준 수질등급, Vollenweider영양상태가 1등급 이내로 차이가 날뿐 그 이외의 수질지수는 거의 비슷한 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 그러므로 개략적인 유역의 개발정도의 범위를 가정하여 예상되는 수질지수의 범위 값을 추정하는데 충분히 활용할 수 있다.

(a) 저개발 지역의 기본 부하비 입력 시 추정결과

지역본부	지사및시군	저수지	연도	종류	추정된 수질지수	
					평균값	범위
항목				값		
관할속후소				부여		
유역면적 (ha)				420		
만수면적 (ha)				15		
유효저수량 (천 ³ m)				1457		
생활계				5		
축산계				4		
기타				10		
BOD부하비(저개발 지역, 30%)						
				CODI	3.7	3~5
				수질등급(COD)	III (3.4)	I b~IV
				수질등급(TOC)	II (2)	I a~III
				수질등급(평균)	II (2.8)	II~III
				VW영양상태	빈중 (2.6)	빈중~빈중
				LQI	43	40~50
				rLQIar	60	60~60
				LEHaw	62	30~90

(b) 평균개발 지역의 기본 부하비 입력 시 추정결과

지역본부	지사및시군	저수지	연도	종류	추정된 수질지수	
					평균값	범위
항목				값		
관할속후소				부여		
유역면적 (ha)				420		
만수면적 (ha)				15		
유효저수량 (천 ³ m)				1457		
생활계				11		
축산계				42		
기타				11		
BOD부하비(평균개발 지역, 50%)						
				CODI	4.2	4~5
				수질등급(COD)	III (3.8)	II~IV
				수질등급(TOC)	I b (1.6)	I a~II
				수질등급(평균)	III (3.7)	II~V
				VW영양상태	빈중 (2.9)	빈중~중
				LQI	42	40~50
				rLQIar	51	40~60
				LEHaw	64	30~90

<그림 6-20> 대룡지구의 부하량 자료가 없는 경우 수질지수 추정

(표 6-4) 대룡지구의 부하량 자료가 없는 경우 수질지수 추정 결과

예측방법	CODI	COD기준 수질등급	평균 수질등급	VW 영양상태	LQI10	rLQIar10	LEHaw10	
수질 모델링결과	3 (3.2)	II	II	중	40 (44)	60 (57)	60 (64)	
수질지수 추정모델	부하량 입력	4 (3.9)	III (3.6)	III (3.2)	빈중 (2.6)	40 (43)	60 (59)	60 (63)
	저개발 유역 가정	4 (3.7)	III (3.4)	II (2.8)	빈중 (2.6)	40 (43)	60 (60)	60 (62)
	평균개발 유역 가정	4 (4.2)	III (3.8)	III (3.7)	빈중 (2.9)	40 (42)	50 (51)	60 (64)

3. 신규 오염원 영향 검토

일반적으로 산업단지과 같은 대규모 신규 오염원의 유입 영향은 사전환경성검토 단계에서 여러 분야에 대한 현장조사와 수질모델을 통해 수질영향을 분석하게 된다. 그러나 소규모 산업단지 및 공장과 같은 신규 오염원의 유입 영향은 시간과 비용 상의 문제로 기존의 수질모델로 그 영향을 분석하지 않은 상태에서 결정을 내리는 것이 현실이다.

본 연구에서 개발된 농업용저수지 수질지수 추정모델은 유역제원 및 발생부하량 정보만으로 개략적인 수질지수를 추정할 수 있기 때문에 신규 산업단지 및 공장의 발생부하량 자료만 확보한다면 <그림 6-21>과 같이 ‘조건 변화 분석’기능을 이용해 발생부하량 증가에 의한 저수지 수질지수 변화를 추정함으로써 신규 오염원에 의한 저수지 수질영향을 개략적으로 분석할 수 있다.



<그림 6-21> 신규 오염원 영향 분석 화면

예로 어천저수지 유역에 신규 공장이 설립된다는 가정 하에 그 영향을 다음과 같이 분석해 보았다. 어천저수지의 2012년에 수질추정망을 통해 실측된 수질지수를 보면 평균 COD농도는 6.9 mg/L였으며, COD기준 호소수질등급은 IV등급을 나타내고 있다. 어천저수지 유역에 발생부하량이 10 kg/day인 신규 공장을 설립할 경우 예상되는 수질변화 분석을 위해 수질지수 추정모델의 ‘조건 변화 분석’기능을 선택한 후 <그림 6-21(c)>와 같이 BOD부하량-기타에 변경조건으로 ‘증감’을 선택하여 공장의 발생부하량 ‘+10’을 입력한 후 실행하면 <그림 6-21(d)>와 같이 예상되는 수질지수가 화면에 나타난다.

신규 공장 설립 전·후의 추정된 수질지수를 비교하면, 공장설립 전에는 CODI는 6.9, COD기준 호소수질등급은 IV(4.9)등급으로 겨우 농업용수 수질기준 IV등급을 유지하고 있었으나, 공장 설립 후에는 CODI는 8.3으로 증가하였고, COD기준 호소수질등급은 V(5.2)등급으로 농업용수 수질기준 IV등급을 초과하는 것으로 나타났다.

이와 같이 본 연구에서 개발한 농업용저수지 수질지수 추정모델을 이용하면 쉽고 빠르게 개략적인 신규 오염원의 영향을 분석할 수 있다. 시간과 비용이 충분한 경우에는 자세한 현장조사 후 기존의 수질모델링 방법으로 신규 오염원의 영향을 분석하는 것이 보다 더 정확하게 결과를 얻는 것이 바람직하다.

4. 수질개선대책 수립 대상지의 부하량 삭감 영향 검토

일반적으로 수질개선대책 수립 대상 저수지로 선정되면, 자세한 현장조사를 통해 수질과 오염원자료를 수집하고, 수질모델링하여 수질개선대책에 따른 수질을 예측한다. 이러한 과정을 통해 목표 수질을 만족시킬 수 있는 최적의 개선대책 조합을 선정하여 수질개선대책을 수립하게 된다.

본격적인 수질개선대책을 수립하기 전 대상 저수지를 선정하는 단계에서는 모델링 작업을 통한 수질개선효과 분석 없이 해당저수지의 현재 오염상태와 중요성 등을 토대로 대상저수지를 선정하게 된다. 하지만 저수지마다 유역 및 저수지의 특성상 부하량 삭감에 의한 저수지 수질개선 정도는 다르게 나타날 수 있다. 예를 들어 일부 저수지는 약간의 부하량 제거만으로도 수질이 크게 개선되는 반면, 일부 저수지는 부하량을 많이 제거하더라도 수질개선 효과는 미비하게 나타날 수 있다. 만약 후자에 해당되는 저수지가 수질개선대책 수립 대상 저수지로 선정된 경우 본격적인 수질개선대책 수립 단계에서 목표수질을 만족시키기 위해 무리하게 많은 수질개선 대책들을 적용하여 사업비가 큰 것으로 산정되어 사업화까지 이어지지 않고 수질개선대책 수립으로만 끝나게 되어 비용과 시간을 낭비하게 될 수 있다.

본 연구에서 개발한 농업용저수지 수질지수 추정모델은 본격적인 수질개선대책 수립 전인 대상저수지 선정단계에 활용하여 대상지를 선정하고, 선정 후 목표수질 달성을 위한 적정 삭감 부하량을 개략적으로 산정해 볼 수 있다.

경기도 안성시에 위치한 만수저수지를 예를 들어 설명하면<그림 6-22>, 만수저수지는 2012년 수질측정망 결과에 의하면 평균 COD농도가 11.9 mg/L로 COD기준 호소수질등급 VI등급의 수질을 나타내고 있다. 만수저수지의 수질을 개선하기 위해 2012년 현재의 발생부하량(생활계: 41.2 kg/d, 축산계: 2661.1 kg/d, 기타: 4.9kg/d)을 2001년 수준(생활계: 23.2 kg/d, 축산계: 484.2 kg/d, 기타: 4.9 kg/d)까지 감소시킬 경우 예상되는 저수지 수질개선 정도를 분석하는데 수질지수 추정모델을 사용하였다. 2001년 수준까지 부하량을 삭감시키기 위해 2012년 생활계 및 축산계 부하량의 43%와 82%에 해당되는 생활계 18.0 kg/day, 축산계 2176.9 kg/day의 부하량을 삭감시켜야 한다.



<그림 6-22> 부하량 삭감 영향 분석 화면

이를 모의하기 위해 <그림6-22(c)>와 같이 '변경 조건'을 '증감'으로 선택한 후 삭감할 부하량을 입력하고 모델을 실행하면 <그림 6-22(d)>와 같이 삭감 후 수질지수가 추정된다. 삭감 전<그림 6-22(b)>과 삭감 후<그림

6-22(d)>의 수질지수를 비교하면, 부하량 삭감 전에 COD기준 호소수질등급이 VI(6.2)등급이고 CODI가 12.5였던 것이 삭감 후에 COD기준 호소수질등급이 V(5.8)등급, CODI 11.2로 수질이 소폭 개선되는 것으로 나타났으나, 여전히 호소수질등급의 농업용수에 해당되는 IV등급 수질을 만족시키지는 못하는 것으로 나타났다. 즉, 2012년의 생활계 및 축산계 부하량의 43%와 82%를 삭감시키더라도 저수지의 수질은 농업용수 수질기준을 만족하지 못하는 것으로 예측되었다. 실제 2001년 실측된 수질을 이용해 산정한 지수는 각각 CODI 12, 수질등급(COD) VI, 수질등급(평균) VI, Vollenweider영양상태 중부, LQI 77, rLQIar 25, LEHaw 8로 실제로도 농업용수 수질기준을 만족시키지 못했던 것으로 나타났다. 따라서 현재의 만수저수지에서 IV등급의 수질을 만들기 위해서는 상당한 수준의 부하량 삭감이 필요하다.

만수저수지의 수질이 IV등급을 만족시키는 적정 삭감량을 추정하기 위해 생활계, 축산계 및 기타 부하량의 삭감량을 더 증가시켜 여러 번의 입력을 반복하면서 적정한 삭감 부하량을 산정하였다. <그림 6-23>과 같이 생활계, 축산계 및 기타 오염부하량을 75%, 90%, 34% 삭감시킬 경우 목표수질인 IV등급을 만족시키는 것으로 나타났다. 즉, 생활계, 축산계 및 기타 오염부하량을 각각 30.9 kg/day, 1295 kg/day, 1.7kg/day 삭감시키면 목표수질을 달성할 수 있는 것으로 나타났다.



<그림 6-23> 목표수질 달성을 위한 삭감부하량 산정

그러나 유역의 생활계, 축산계 및 기타 발생 오염부하량을 75%, 90%, 34% 제거하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 이러한 경우 수질개선사업에

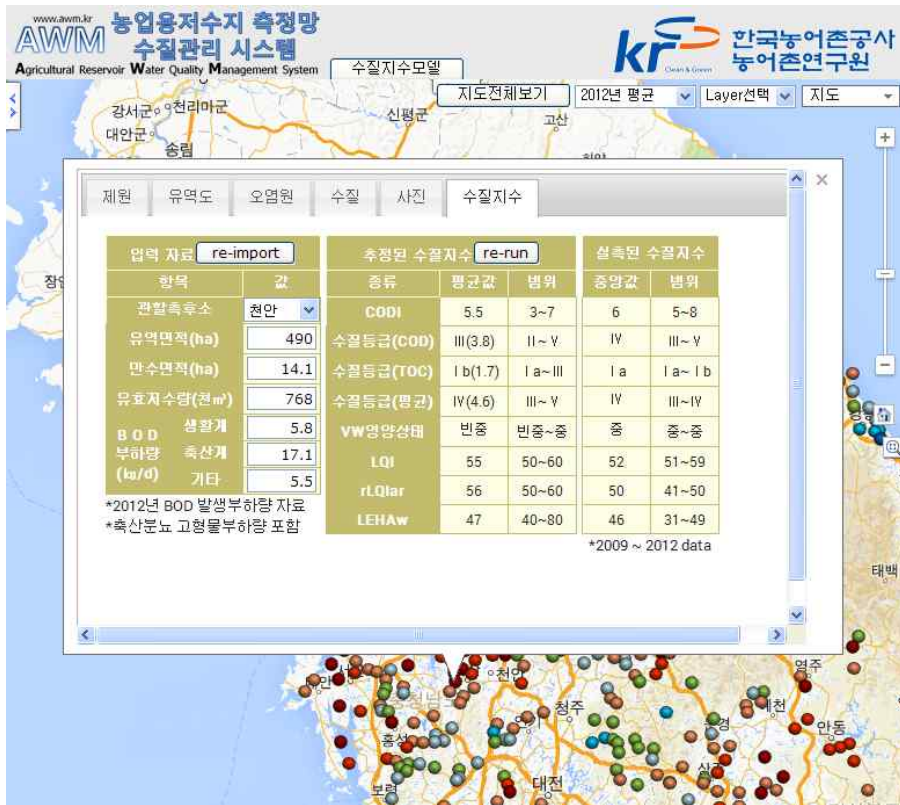
많은 사업비가 투자해야 하며, 다양한 대책을 수립해야 할 가능성이 있다.

이와 같이 수질개선대책 수립 대상 저수지 선정 단계에서 본 연구에서 개발한 농업용저수지 수질지수 추정모델을 이용해 부하량 삭감 시 개략적인 수질개선 정도 및 목표수질 달성 가능성을 검토할 수 있어 합리적으로 수질개선대책 수립 대상 저수지를 선정할 수 있게 된다. 본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델은 개략적인 사업타당성 검토 단계에 적용하여야 하며, 실제 수질개선대책 수립을 위해서는 현장 조사된 자료를 이용해 기존의 수질모델을 구축한 후 다양한 대책들의 조합에 대해 예상되는 수질을 예측하여 최종 수질개선대책을 수립하는 것이 적합하다.

5. 기존의 인터넷 기반 시스템 연계

개발한 수질지수 추정모델은 별도의 URL로 제공하기 보다는 RIMS와 같이 한국농어촌공사에서 운영 중인 인터넷 기반의 저수지 관리시스템에 모듈로 추가하여 모델의 활용성과 관리의 효율성을 더욱 높일 수 있다. RIMS와 같은 대부분의 인터넷 기반 시스템은 보유하고 있는 여러 종류의 자료를 인터넷을 통해 표, 그래프 및 GIS자료의 형태로 사용자에게 자료를 보여주는 역할을 한다. 이러한 시스템에 본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델을 추가할 경우 수집된 자료를 단순히 보여주는 것 외에 모델링 기능이 추가된다면 합리적인 저수지 수질관리가 가능해 질 수 있다.

예를 들어 <그림 6-24>와 같이 기존에 개발된 인터넷 기반 시스템(다른 과제에서 개발하였던 수질관리시스템)에 수질지수 추정모델을 추가할 수 있다. 기존의 인터넷 기반의 수질관리 시스템은 구글 지도에 수질측정망 위치가 표시되고, 해당 저수지를 클릭할 경우 수집된 수질측정망 자료의 유역도 및 제원, 연도별 오염원, 연도별 실측된 수질 등의 세부자료를 보여주는 기능만 있어 저수지 수질을 종합적으로 관리하는데 한계가 있다. 그러나 이러한 기존의 웹기반 시스템에 본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델을 <그림 6-24>와 같이 추가하면, 수집된 자료를 단순히 보여주는 기능 외에 수질지수 추정기능이 추가되어 다양한 유역환경 변화에 따른 저수지 수질변화를 개략적으로 분석할 수 있어 합리적인 저수지 수질관리가 가능해진다.



<그림 6-24> 인터넷 기반 시스템과 연계

6. 기타 활용방안

본 연구에서 개발된 농업용저수지 수질지수 추정모델은 저수지 제원 및 오염부하량 자료로부터 수질지수를 추정하는 모델로 추정된 지수는 저수지의 잠재적인 오염도를 나타내는 수질지수로 활용될 수 있다. 이렇게 수질지수 추정모델로 추정된 지수를 잠재적인 저수지의 오염도를 의미하는 잠재 수질지수로 하여 기존의 수질지수와 병행하여 사용될 수 있다. 추정된 수질지수는 기존의 지수와 동일한 형태를 갖지만 기존 수질지수는 실측된 수질을 이용해 산정되는 반면, 추정 수질지수는 저수지의 제원 및 부하량으로부터 산정된다. 그러므로 본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델을 이용할 경우 8개의 기존 수질지수와 병행하여 8개의 추정 수질지수가 산정된다.

추정 수질지수는 유역과 저수지 특성을 이용해 개발한 지수로 계획지수에 해당되며, 기존의 수질지수보다 유역관리를 위해 더 유용하게 활용될 수

있다. 계획지수 형태의 추정 수질지수는 농업용저수지의 효율적 수질관리를 위한 목표로 개발되는 “custom-designed”지수로 저수지 수질의 효율적 관리를 위해 이용할 수 있어 활용성이 매우 크다. 농업용뿐만 아니라 각종 용수 시설 개발적지 조사 및 최적 저수지 수질관리방안 도출에도 사용될 수 있다. 또한 추정 수질지수는 잠재적 오염지수 및 환경평가시스템 등으로도 활용성이 많다.

본 연구에서 개발된 추정 수질지수는 다양한 기존의 수질지수와 동일한 형태를 갖고 있기 때문에 초기에는 한국농어촌공사 자체적으로 농업용저수지 수질관리를 위한 지수로 활용할 수 있다. 또한 각종 수질관리계획을 수립하는데 활용성이 클 것이라 기대된다. 유역에 공장이나 축산단지 등 오염원이 입지할 경우 추정 수질지수를 산정하여 그 영향을 판단하는데 좋은 도구가 될 것이다. 이렇게 활용도를 높인 후 장기적으로는 계획지수형태의 추정 수질지수를 보다 강력한 수단으로 활용이 가능하다. 즉, 일정 지수값 이하의 경우에는 추가 오염원 입지를 금지하거나, 유역특성 및 저수지 특성상 일정 지수값 이상으로 관리가 어려운 경우에는 저수지 건설을 원칙적으로 금지하도록 하는 자료로도 활용될 수 있다.

7장 요약 및 결론

7장 요약 및 결론

본 연구에서는 장기간 수집된 농업용저수지 수질측정망자료를 인공지능기법을 활용하여 저수지의 수질을 효율적으로 관리할 수 있는 농업용저수지 수질지수 추정모델을 개발하였으며, 이를 수질관리 담당 실무자들에게 제공하여 농업용저수지 수질관리 및 수질개선사업 등에 적극 활용될 수 있기를 기대한다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1절 농업용저수지 유역과 저수지 수질특성 분석

‘유역의 발생부하량 및 제원’, ‘유입하천 유량 및 수질’과 ‘저수지 수질’과의 상관관계를 분석하기 위해 경기도내 측정망대상저수지(55개소) 중 접근이 용이한 31개소에 대해 유입하천의 유량 및 수질, 저수지 수질을 현장 조사하였다. 유입하천의 유량 및 수질과 저수지 수질과는 매우 높은 상관관계를 나타낸 반면, ‘유역의 발생부하량 및 제원’과 ‘유입하천 유량 및 수질’, ‘유역의 발생부하량 및 제원’과 ‘저수지 수질’사이에는 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 그러므로 기존의 방법으로는 ‘유역의 발생부하량 및 제원’과 ‘저수지 수질’사이에 상관관계가 낮아 ‘유역의 발생부하량 및 제원’으로부터 수질 추정이 어렵다. 또한 저수지의 오염정도에 따라 선별한 저수지의 수질을 조사한 결과 저수지 수질은 유입수의 수질 외 다른 인자의 영향을 받아 결정되므로 저수지 특성과 기상자료, 유역제원 등 여러 영향 인자를 검토하여 종합적으로 저수지 상태를 평가해야 한다.

2절 수질측정망 자료 DB구축 및 수질분석시스템 개발

시설제원 및 조사지점 자료, 유역오염원 조사자료, 저수지 수질조사자료 및 기타 관련 자료를 수집한 후 MS-Access를 이용해 DB를 구축하였으며, 인터넷을 통한 접근이 가능하도록 MySQL을 이용해 web-DB를 구축하였다.

수질측정망결과를 관리조직별(지역본부, 지사, 개별저수지), 연도별로 여러 형태의 분석자료 및 통계값을 제공하기 위해 Adobe Flash를 이용해 수질측정망 자료분석시스템을 개발하였으며, 적용성 분석을 통해 자료분석시스템의 문제점을 보완하였다.

3절 농업용저수지 수질지수 추정기법 연구

측정망 자료를 이용해 개발한 농업용저수지 수질지수 추정기법은 기존의 수질지수와 달리 저수지 수질에 영향을 미치는 인자를 이용해 수질지수를 추정하는 기법으로, 유역의 오염부하량, 토지이용 등 유역환경변화에 따른 수질변화 분석이 가능하여 간단한 수준의 수질모의가 가능하다.

농업용저수지 수질지수 추정기법을 이용해 추정할 지수로 농업용저수지 수질상태를 잘 표현할 수 있는 수질지수 7개(COD기준 호소수질등급, TOC기준 호소수질등급, 4항목 평균 호소수질등급, Vollenweider영양상태, LQI, LEHaw, CODI)를 선정하였다. 이중 LQI지수가 일부 고농도 및 저농도에서 범위를 벗어나는 값을 나타내고, 좋은 수질이 낮은 값으로 표현되는 문제가 있어 이를 보완하여 $rLQI_{ar}$ 지수를 보완·개발하였다. 저수지 수질에 영향을 미치는 인자로 유역면적, 만수면적, 유효저수량, 유효수심(유효저수량/만수면적), 연도별 BOD의 생활계, 축산계, 산업계+양식계+토지계 발생부하량 및 연도별 총 강수량과 30년 평균 총 강수량을 선정하였다.

선정된 저수지 수질에 영향을 미치는 인자로부터 저수지 수질지수를 추정할 수 있는 인공지능기법으로 의사결정트리기법과 유전자 프로그래밍기법을 선정하였고 그 결과를 다중선형 회귀분석 결과와 비교한 결과 의사결정트리기법의 결과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 의사결정트리기법을 이용해 저수지 수질에 영향을 미치는 인자로부터 저수지 수질지수를 추정한 결과 COD기준 호소수질등급, Vollenweider영양상태, $rLQI_{ar}$, CODI의 오차는 각각 24%, 18%, 23%, 35%였으며, r^2 는 각각 0.76, 0.59, 0.78, 0.75로 나타나 추정 수질지수가 실측된 수질지수를 유사하게 추정하고 있는 것으로 판단하였다.

4절 농업용저수지 수질지수 추정모델 개발 및 활용방안

의사결정트리 기법을 이용해 저수지 수질에 영향을 미치는 인자로부터 저수지 수질지수를 추정할 수 있는 fuzzy rule을 도출하였다. 도출된 fuzzy rule을 이용해 개발된 모델의 배포, 업데이트 등의 관리가 용이하고 사용자가 쉽게 접근할 수 있도록 인터넷 기반의 수질지수 추정모델을 개발하였다. 또한 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 다양한 기능을 추가하여 개발한 모델의 활용성이 높도록 하였다. 농업용저수지 수질지수 추정모델은 적은 입력자료(7개)를 요구하며, 자동입력기능으로 쉽고 빠른 모델 실행이 가능하고,

기존 수질지수 산정과 불확실성 분석을 통한 추정치 통계값(오차범위)을 제공하여 결과 값에 대한 해석 효율을 높였다. 또한 유역 및 저수지의 조건 변화에 따른 수질지수를 추정할 수 있어 여러 가지 시나리오에 따른 수질 변화와 개선효과를 미리 예측해 볼 수 있다.

적용 가능한 시나리오 분석으로는 저수지의 유역의 오염원 관리 특성 분석 및 수질관리목표 설정, 신규 조성 예정 저수지의 수질 추정, 유역의 신규 오염원 영향 검토, 수질개선대책 수립 대상지의 적정 삭감부하량 검토 등의 활용법을 제시하였다. 또한 모델의 관리 효율성을 높이고, 활용성을 극대화하기 위하여 기존의 인터넷 기반 저수지 관리시스템과 연계 적용도 가능하다.

연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

연구목표	연구목표 달성 실적	달성도	대외 기여도
농업용저수지의 수질 특성 분석	-저수지 및 유입하천 현장 조사 -실측자료와 측정망자료를 활용한 상관관계 분석	100%	100% 기초자료 제공
수질측정망자료 DB구축 및 자료분석시스템 개발	-저수지 제원, 오염원, 수질 관련 자료 수집 -수집된 자료를 MS-Access, MySQL을 이용해 DB구축 -수질측정망 자료분석시스템 개발	100%	100% 구축된 DB 실무자 제공
농업용저수지 수질지수 개발 및 수질지수 추정 기법 연구	-수질지수의 선정 및 개발 -수질지수 추정기법을 개발할 수 있는 인공지능기법 선정 및 개발 -수질지수 추정을 위한 영향인자 검토 및 추정기법 개발	100%	100% 개발된 시스템을 수자원관리처에 제공
농업용저수지 수질지수 추정모델 개발 및 활용방안 제시	-저수지 및 유역의 조건변화에 따른 수질지수 추정이 가능한 모델의 개발 -수질지수 추정모델의 활용방안 제시	100%	100% 실무부서에 제공하여 저수지 수질평가에 활용

연구개발결과의 활용계획

(1) 활용하고자 하는 사업명(또는 정책명)

- 본사 농업용저수지 신규 개발사업 타당성 분석
- 농업용수 수질개선사업 타당성 분석
- 지방자치단체 농업용저수지 유역 내 신규 오염원 입지 인허가

(2) 활용 주관부서(공사 부서)

- 농림축산식품부 농업기반과
- 한국농어촌공사 환경지질처, 지역 지역본부, 농어촌연구원
- 시도 및 지방자치단체 농업용저수지 담당자

(3) 사업(또는 정책) 반영내역 및 계획

- 실무부서에 제공하여 농업용저수지 관리를 위한 도구 활용
- 농업용저수지 수질 관리정책 수립을 위한 보조자료 제공
- 수질개선사업 수립 및 설계를 위한 시나리오분석에 활용

(4) 사업부서 교육 및 기술지원 내역 및 계획 등 기타활용 방안

- 본사 및 지역본부 등의 실무자를 대상으로 한 교육 및 매뉴얼 배포를 통한 실용화
- 연구결과의 전문학술지 게재 및 학술발표를 통한 홍보

참고문헌

참고문헌

- 권순국 (1998) 우리나라 비점원 수질오염관리의 문제점과 개선방안. 한국환경공학회지
- 김호섭, 황순진 (2004) 육수학적 특성에 따른 국내저수지의 부영양화 유형 분석-엽록소 a와 수심 중심으로. 한국육수학회지. 37(2):213-226
- 농림축산식품부 (2010) 농업용수 수질측정망조사 보고서. 한국농어촌공사
- 농어촌연구원 (2010) 농업용저수지 유형별 수질예측모델 적용방안 연구. 한국농어촌공사 농어촌연구원
- 문병로 (2008) 쉽게 배우는 유전 알고리즘 : 진화적 접근법
- 윤춘경, 신아현, 정광욱, 장재호 (2007). BASINS/WinHSPF를 이용한 남한강 상류유역의 비점오염원 저감효율 평가. 수질보전 한국물환경학회지. 23(6):951-960
- 이경락, 최재신, 김한순 (2003) 박실지와 정양지의 식물플랑크톤 군집의 계절 변동. 18:273-280
- 최영길 (1995) 담수의 부영양화. pp.168-210
- 최지용 (1996) 종합수질지표의 개발. KETRI 기본과제 연구보고서.
- 한국농어촌공사 (2010) 농업용수 수질관리 매뉴얼
- 한국농어촌공사 (2011) 통합수자원관리시스템 구축을 위한 마스터플랜 수립 최종보고서
- Brainwood, M. A., S. Burgin, and B. Maheshwari (2004) Temporal variations in water quality of farm dams: Impacts of land use and water resources. *Agric. Water Mgmt.* 70(2):151-175
- Carlson, R.E. (1977) A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography.* 22(2):361-369
- David G. Smith (1989) A New Form of Water Quality Index for Rivers and Streams, *Wat. Sci. Tech.* 21(2):123-127
- Denis Couillard and Yves Lefebvre (1986) Indice de qualité de l'eau pour détecter l'impact de la pollution diffuse urbaine, *Can. J. Civ. Eng.*, 13
- Dojlido J., J. Raniszewski and J. Woyciechowska (1994) Water Quality Index - Application for Rivers in Vistula River Basin in Poland, *Wat. Sci. Tech.* 30(10):57-64

- EPA (1994) Illinois Assessment Methodology, Illinois'. 305(b) Report
- EPA (1994) Ohio Assessment Methodology, Ohio. 305(b) Report
- EPA (1996) Guideline for Preparation of the State Water Quality Assessments. 305(b) Reports
- Erondu E. S. and E. C. Nduka (1993) A Model for Determining the Water Quality Index(WQI) for the New Calabar River at Aluu-Port Harcourt, Nigeria, Inter. J. Environmental Studies, Vol. 44, 131-134
- Evdokimov S. A (1990) Generalized Surface Water Quality Indices, Scientific-Research Institute of Economics and Organization of Material and Technical Supply. No. 2: 109-114, March-April
- FISHER, T. R., A. B. GUSTAFSON, G. M. RADCLIFFE, AND L. HAAS. (2001) Effects of atmospheric nitrogen deposition on algal assemblages in Chesapeake Bay. Final Report. Chesapeake Bay Program Office.
- Gburek, W.J., and Folmar, G.J. (1999) A ground water recharge field study – Site characterization and initial results: Hydrological Processes, Vol. 13, 2,813-2,831
- Harper D. (1992) *Eutrophication of freshwater*. Chapman and Hall. p. 327
- Hong, B. C. Paik (2007) Evolutionary Multivariate Dynamic Process Model Induction for a Biological Nutrient Removal process. Journal of Environmental Engineering 133:12(1126)
- House, M. A., D. H. Newsome (1989) Water Quality Indices for the Management of Surface Water Quality, Wat. Sci. Tech. 21:1137-1148
- House, M. A., J. B. Ellis (1987) The development of Water Quality Indices for Operational Management, Wat. Sci. Tech. Vol.19. No.9
- H. Barbosa (1997) A coevolution genetic algorithm for a game approach to structural optimization. International congerence on Genetic Algorithms. pp.545-552
- Kim B., Heo W.M., Lim B.J., Hwang G.S., Choi K.S., Choi J.S. and Park J.H. (2001) The Limnological Survey of Major Reservoirs in Korea (4): Lake Juam. Korean journal of Limnology. 34(1):30-44
- Lenat, D.R. and J.K. Crawford. (1994) Effects of land use on water quality and aquatic biota of three North Carolina streams. Hydrobiologia

294:85-199

- Lu, L. (1999) Implementation of a two-way interactive atmosphere and ecological model and its application to the central United States. Ph.D. Dissertation, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, CO, p.134
- Michael Negnevitsky (2009) Artificial Intelligence 2nd Edition
- Mohammed Y. Al-Ani, Samahat M. Al-nakib (1987) Water Quality Index Applied to the Classification and Zoning of Al-Jaysh Canal, Baghdad-Iraq, Environ. Sci. Health, A22(4):305-319
- M. Candido, S. Khator, R. Barcia (1998) A genetic algorithm based procedure for more realistic job shop scheduling. International Journal of Production Research 36(12):3437-3457
- OECD. (1982) *Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control, Organisation for Economic Co-operation and Development*. Paris, France, p.154
- Timothy Hong *et al.* (2003) Analysis of municipal wastewater treatment plant using a neural network-based pattern analysis. Water Research 37:1608-1618
- Tong, S.T.Y. and Chen, W. (2002) Modeling the Relationship Between Land Use and Surface Water Quality. *Journal of Environmental Management* 66(4):377-393
- T. Hong, P. A. White (2005) Automatic rainfall recharge model induction by evolutionary computational intelligence. Water Resources Research 41, W08422
- T. Hong, R. Bhamidimarri (2007) Online Nonlinear Sequential Bayesian Estimation of a Biological Sequencing Batch Reactor for BOD and Ammonia Removal.
- US. EPA (1976) Water Quality Criteria

분야별 공동연구 참여자 명단

목 차	소속	참여자	비 고
1장 서론	한국농어촌공사 농어촌연구원	엄한용, 함종화	
2장 농업용저수지의 수질특 성 분석	한국농어촌공사 농어촌연구원	김동환, 유선아	
3장 수질측정망 DB구축 및 자료분석시스템 개발	한국농어촌공사 농어촌연구원	함종화, 김동환	
4장 농업용저수지 수질지수 개발	한국농어촌공사 농어촌연구원	함종화, 김형중, 김동환	
5장 농업용저수지 수질지수 추정기법 연구	London South Bank University 한국농어촌공사 농어촌연구원	Timothy Hong 함종화	위촉 연구
6장 농업용저수지 수질지수 추 정모델 개발 및 활용방안	한국농어촌공사 농어촌연구원	함종화, 김형중	
7장 요약 및 결론	한국농어촌공사 농어촌연구원	엄한용, 함종화	

부록

수질지수 추정모델 매뉴얼

부록. 수질지수 추정모델 매뉴얼

본 연구에서 개발한 수질지수 추정모델은 저수지와 유역의 조건변화에 따른 저수지 수질 예측 및 수질개선사업의 기본계획 수립 전 사업의 검토 등 여러 가지 경우에 사용할 수 있다. 모델의 소개에 앞서 본 모델은 사업 시행 전 개략적 검토를 위한 도구로써 사용할 것을 권장하며, 본 모델을 통한 시나리오 검토 후 사업의 중요성에 따라 반드시 기존의 검증된 수질모델링 기법을 적용하여 사업의 타당성을 판단하여야 한다. 본 매뉴얼에서는 수질지수 추정모델의 구성 및 사용방법에 대해 간단한 예를 들어 설명하였다.

1. 모델의 접속 및 화면의 구성

가. 모델의 접속 및 초기화면

본 모델은 웹기반으로 개발하였으므로 접속을 위해 인터넷 창에서 다음의 주소를 입력하면 된다. [<http://www.awm.kr/wqim.html>]을 입력하면 아래와 같은 수질지수 추정모델의 초기화면이 나타난다.

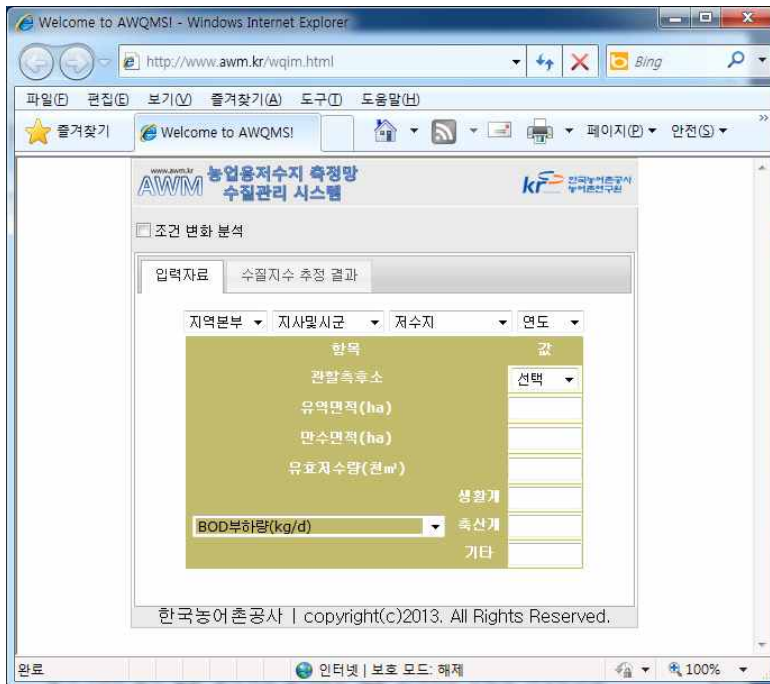


그림 1 수질지수 추정모델의 초기화면

나. 화면의 구성

모델의 초기화면에는 조건변화 분석, 입력자료, 수질지수 추정 결과, 지역본부, 저수지, 관할측후소 등이 보이는데,

먼저 ①‘조건 변화 분석’은 해당 저수지의 제원 및 부하량 변화에 따른 결과를 분석할 수 있는 기능으로 입력자료를 모두 입력한 후 사용한다. 이 기능은 모델의 사용 방법에서 설명하였다.

②‘입력자료’는 모델 초기화면에서 저수지와 연도의 선택할 수 있는 화면이다. 입력방법은 자동입력과 직접입력의 방법이 있다.

③‘수질지수 추정 결과’는 ‘입력자료’에서 모든 항목을 입력한 후 해당 탭을 클릭하면 수질지수 추정 결과화면이 출력된다. 화면에서의 구성은 탭으로 ‘입력자료’와 ‘수질지수 추정 결과’가 분리되어 있지만 각각 모델의 입력자료를 입력하고 모델을 실행하는 버튼이다.

④번에는 네 개의 선택박스가 있는데, 지역본부-지사및시군-저수지-연도를 차례로 선택한다. 저수지와 연도를 선택하면 815개 측정망 저수지 중 해당 저수지의 제원과 연도별 부하량 자료를 자동으로 불러들인다.

⑤번에서는 ④번에서 선택한 해당저수지와 연도의 관할측후소, 유역면적, 만수면적, 유효저수량, BOD부하량 자료가 입력된다. 모든 자료가 입력된 후 ③번의 ‘수질지수 추정 결과 탭’을 클릭하면 그림 2의 오른쪽화면과 같이 8종류의 수질지수에 대한 결과화면이 추정값과 실측값으로 나누어 나타난다.

The figure consists of two screenshots from the AWM (농업용저수지 측정망 수질관리 시스템) interface. The left screenshot shows the '조건 변화 분석' (Condition Change Analysis) screen. It has tabs for '조건 변화 분석', '입력자료', and '수질지수 추정 결과'. The '입력자료' tab is active, showing dropdown menus for '경기', '화성수원', '홍부(물향)', and '2011'. Below these is a table of station details:

항목	값
관할측후소	수원
유역면적 (ha)	1320
만수면적 (ha)	50.3
유효저수량 (천m³)	1839.7
생원기	420.9
BOD부하량 (kg/d)	속선기 238
가타	16.2

The right screenshot shows the '수질지수 추정 결과' (Water Quality Index Estimation Results) screen. It has tabs for '입력자료' and '수질지수 추정 결과'. The '수질지수 추정 결과' tab is active, displaying a table of 8 water quality indices:

종류	추정된 수질지수		실측된 수질지수	
	평균값	범위	중앙값	범위
CODI	8.1	7~10	11	8~24
수질등급(COD)	V (5.6)	IV~VI	VI	V~VI
수질등급(TOC)	II (2.9)	I a~IV	III	II~IV
수질등급(평균)	V (5.3)	IV~VI	V	V~VI
VW영양상태	중부 (4)	중~중부	중부	중~중부
LQI	69	60~70	75	67~93
rl.QIar	27	20~30	27	10~35
LEHAW	15	10~20	10	2~18

Both screenshots include the footer: '한국농어촌공사 | copyright(c)2013. All Rights Reserved.'

그림 2 모델의 입력화면(좌) 및 결과화면(우)

2. 모델 사용 방법

가. 자료의 입력

(1) 측정망 저수지일 경우

- 지역본부-지사및시군-저수지 선택 → 해당 저수지의 유역면적, 만수면적, 유효저수량 자동 입력됨
- 연도 선택 → 해당 연도의 BOD부하량 자동 입력됨

(2) 측정망 저수지가 아닌 경우

대상지역의 측후소와 저수지 제원 및 부하량을 직접 입력해야 함

- 관할측후소 - 저수지 유역과 가장 가까운 기상대 선택
- 저수지 제원(유역면적, 만수면적, 유효저수량) - 해당 지사나 RIMS를 통해 자료를 얻은 후 직접 입력
- BOD부하량 - 직접 입력도 가능하나 조사되지 않아 자료가 없을 경우 유역의 개발 정도 7가지 중 하나를 선택 → 부하량 자동 입력됨(측정망 전체 부하량 자료를 7단계로 구분한 값으로 개략적인 값으로 이용할 수 있음)

항목	값
관할측후소	원안
유역면적(ha)	375
만수면적(ha)	22.3
유효저수량(m ³)	614
BOD부하량(kg/d)	11
BOD부하량(g/ha/d)	42
BOD부하량(0단계 개발 유역, 10%)	11
BOD부하량(1단계 개발 유역, 30%)	11
BOD부하량(2단계 개발 유역, 50%)	11
BOD부하량(3단계 개발 유역, 70%)	11
BOD부하량(4단계 개발 유역, 90%)	11
BOD부하량(5단계 개발 유역, 95%)	11
BOD부하량(6단계 개발 유역, 99.5%)	11

그림 3 기본 부하량 자동입력 기능

나. 수질지수 추정결과

- 자료의 입력 완료 후 '수질지수 추정 결과' 탭 클릭
- 추정된 수질지수 - 평균값과 범위가 출력(2,000번의 모델 실행 후 결과값의 오차와 불확실성을 고려해 범위 산정)

- 실측된 수질지수 - 선택한 저수지의 전체 수질 자료를 이용해 수질지수 자동 산정
- 해당 저수지의 전 기간 수질과악이 가능하여 추정된 수질지수와 비교·분석이 가능(하단에 측정기간 표시)

종류	추정된 수질지수		실측된 수질지수	
	평균값	범위	중앙값	범위
CODI	12.4	10~15	12	10~21
수질등급(COD)	VI (6.2)	V~VI	VI	VI~VI
수질등급(TOC)	IV (4.8)	II~VI	V	V~VI
수질등급(평균)	V (5.5)	IV~VI	VI	V~VI
VW영양상태	중부 (4.1)	중~중부	중부	중~중부
LQI	73	60~90	77	73~92
rLQIar	28	20~30	25	11~29
LEHaw	10	0~20	8	2~11

*2000 ~ 2012 data

그림 4 수질지수 추정 결과 화면

다. 조건 변화 분석(시나리오 분석)

모델 화면에서 ‘조건 변화 분석’을 선택하면 초기화면 아래 조건 변화를 입력할 화면이 나타남

- 7가지 입력항목 중 변경하고자 하는 항목의 변경조건을 클릭하여 ‘변경’, ‘증감’, ‘비율’의 방법으로 초기값 수정 가능
- ‘변경’ - 초기값을 입력값으로 바꿈
- ‘증감’ - 초기값에 입력값 만큼 더하거나 빼줌
- ‘비율’ - 입력값을 초기값에 곱해줌

조건 변화 입력 후 ‘수질지수 추정 결과’ 클릭 → 수질지수 추정 결과 출력 (다양한 조건변화에 따른 저수지 수질변화를 쉽게 분석할 수 있음)

The screenshot shows the '조건 변화 분석' (Condition Change Analysis) screen. At the top, there's a table showing estimated water quality indices for various parameters. Below this, there's a section for '조건 변화에 따른 지수 추정' (Index Estimation according to Condition Change). This section includes a table for inputting change conditions for parameters like '관할축소' (Area Reduction), '유역면적(ha)', '만수면적(ha)', '유요지수량(천m³)', and 'BOD부하량(kg/d)'. The '변경조건' (Change Condition) column has dropdown menus for '동일' (Same), '변경' (Change), '증감' (Increase/Decrease), and '비율' (Ratio). The '값' (Value) column has a '선택' (Select) dropdown.

그림 5 조건 변화 분석 기능

3. 수질지수 추정모델의 활용 사례

본 모델을 활용할 수 있는 방법을 4가지의 사례를 통해 설명하였다.

1. 저수지 수질관리를 위한 기준으로 활용
2. 신규 조성 예정 저수지의 수질예측
3. 신규 오염원 영향 검토
4. 수질개선대책 수립 대상지의 부하량 삭감 영향 검토

적용사례 1. 저수지 수질관리를 위한 기준으로 활용

추정된 수질지수와 실측된 수질지수의 차이를 이용한 분석으로 추정지수가 실측지수보다 높은 경우와 그 반대의 경우에 대해 발생부하량이 처리되어 배출되는 부하량을 간접적으로 판단할 수 있음

(1) 유역의 오염원 관리 특성 분석

- 적용 저수지 : 저수지 및 유역 제원이 비슷한 농암지와 칠곡지
- 농암저수지 : 추정된 수질지수 < 실측된 수질지수
- 칠곡저수지 : 추정된 수질지수 > 실측된 수질지수
- 설명 : 추정된 수질지수는 입력된 발생부하량에 의해 결정되나 실측된 수질지수는 배출부하량의 영향을 받음. 따라서 실측지수가 추정지수보다 높은 농암지는 발생부하량이 상대적으로 적게 제거된 저수지이며, 칠곡지는 반대로 발생부하량이 더 많이 처리되어 배출부하량이 적은 저수지임(자세한 설명은 본문 6장 2절 1번 참고)
- 적용방법 : 추정된 수질보다 실측된 수질이 나쁜 저수지는 오염원 처리시설을 이용한 오염부하량 삭감대책을 수립하는 것이 적당하며, 추정된 수질보다 실측된 수질이 깨끗한 저수지는 유역의 오염부하량을 다른 저수지에 비해 상대적으로 잘 관리하고 있으므로 오염부하량을 추가로 삭감시키는 대책을 수립하더라도 저수지의 수질개선 효과는 크게 나타나지 않을 수 있음

(a) 농암저수지 입력화면

입력자료 수질지수 추정 결과

총복 육천영동 농암 2012

항목	값
관찰측후소	보은 <input type="button" value="▼"/>
유역면적 (ha)	490
만수면적 (ha)	9.6
유효저수량 (천 ^m)	649
생량계	9.8
BOD부하량(kg/d) <input type="button" value="▼"/>	축산계 106.7
기타	5.8

'2012년 '농암저수지' 정보가 입력되었습니다.

(b) 농암저수지 결과화면

입력자료 수질지수 추정 결과

종류	추정된 수질지수		실측된 수질지수	
	평균값	범위	중앙값	범위
CODI	5.7	3~8	7	5~9
수질등급(COD)	Ⅲ (3.4)	Ⅱ~Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ~Ⅴ
수질등급(TOC)	I b (1.7)	I a~Ⅱ	Ⅱ	I b~Ⅱ
수질등급(평균)	Ⅳ (4.5)	Ⅱ~Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ~Ⅴ
VW영양상태	빈중 (2.5)	빈중~빈중	중	중~중
LQI	52	40~60	60	55~68
rLQIar	58	50~60	42	34~46
LEHaw	46	30~60	30	17~39

*1999 ~ 2012 data

(c) 칠곡저수지 입력화면

입력자료 수질지수 추정 결과

경기 평택 칠곡(안성) 2012

항목	값
관찰측후소	수원 <input type="button" value="▼"/>
유역면적 (ha)	391
만수면적 (ha)	15.8
유효저수량 (천 ^m)	544
생량계	44
BOD부하량(kg/d) <input type="button" value="▼"/>	축산계 241.3
기타	4.6

'2012년 '칠곡(안성)저수지' 정보가 입력되었습니다.

(d) 칠곡저수지 결과화면

입력자료 수질지수 추정 결과

종류	추정된 수질지수		실측된 수질지수	
	평균값	범위	중앙값	범위
CODI	8.6	5~11	8	5~11
수질등급(COD)	ⅤI (6.2)	ⅤI~ⅤI	Ⅳ	Ⅲ~ⅤI
수질등급(TOC)	Ⅲ (3.2)	Ⅱ~Ⅳ	Ⅱ	Ⅱ~Ⅲ
수질등급(평균)	Ⅴ (5.3)	Ⅳ~ⅤI	Ⅳ	Ⅲ~Ⅴ
VW영양상태	중부 (4.1)	중~중부	중	빈중~중
LQI	59	40~80	59	47~68
rLQIar	31	20~40	42	33~54
LEHaw	27	10~40	31	17~56

*2001 ~ 2012 data

그림 6 농암저수지와 칠곡저수지 수질지수 추정 결과

(2) 저수지 수질관리를 위한 목표 수질지수 설정

- (a)와 (b)저수지 : 추정된 수질지수 < 실측된 수질지수
- (c)와 (d)저수지 : 추정된 수질지수 > 실측된 수질지수
- 설명 : 저수지마다의 제원과 부하량 조건에 따라 도달 가능한 수질이 있으므로 저수지 별 도달 가능한 목표수질을 정하여 관리하는 것이 합리적임
- 적용방법 : (a)와 (b)저수지는 실측 지수가 6등급으로 수질개선이 필요한 저수지로 각각의 추정 지수인 4등급과 5등급을 목표로 수질개선 대책을 수립하는 것이 적절함. (c)와(d) 저수지는 추정지수가 6등급임에도 불구하고 실측지수가 각각 4와 5등급으로 오염 도달치 보다는

저수지 수질관리가 잘 이루어지고 있는 것으로 발생 오염원 자체를 제거하지 않는 한 수질을 4등급에 맞추는데 어려움이 있음

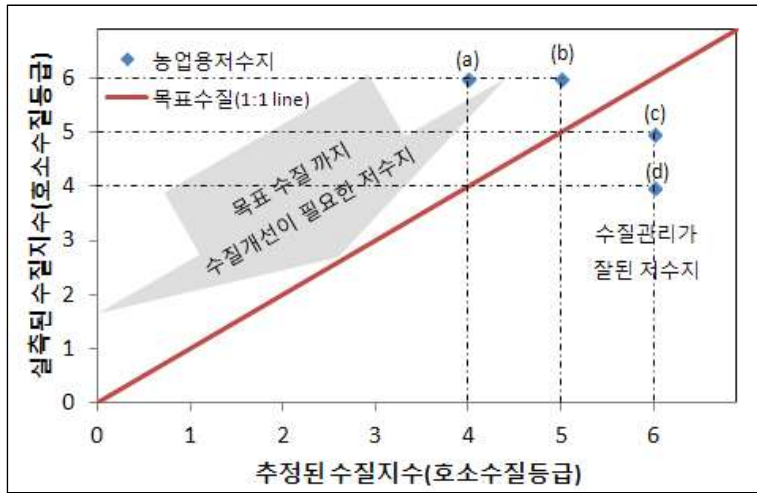


그림 7 수질관리를 위한 목표 수질지수 설정

적용사례 2. 신규 조성 예정 저수지의 수질 예측

농업용저수지의 신규 조성 시 수질등급이 농업용수 수질기준인 4등급 이내로 공급할 수 있는 지를 예측할 수 있음. 신규 저수지 예정 지구에서 오염원 조사가 이루어진 경우와 오염원 자료가 없는 경우 각각 본 모델을 적용할 수 있음

- 적용 대상지 : 대관령 식수전용댐 개발사업(2010)
 대룡지구 농촌용수 개발사업(2012)
- 설명 : 실제 신규 대상저수지 사업계획을 실시했던 지구를 대상으로 수질지수 추정모델을 적용함(자세한 설명은 본문 6장 2절 2번 참고)

(1) 오염원 조사가 이루어진 경우

- 적용방법 : 먼저 해당 지구의 관할측후소를 선택한 후 사업에서 계획한 유역면적과 만수면적, 저수량과, 오염원 자료 중 BOD 부하량을 각각 입력한 후 수질지수를 추정함. 추정결과 COD기준 수질등급은 대

관령 지구와 대룡지구에서 각각 2등급과 3등급을 나타냄. 수질을 더 개선시킬 목적으로 저수량과 부하량을 조절하여 적절한 저수지 규모나 오염부하량을 정하는 데도 활용할 수 있음

(a) 대관령지구 입력화면 및 결과화면

지역본부		지사및시군		저수지		연도		종류	추정된 수질지수	
항목	값	평균값	범위	종류	평균값	범위				
관찰측후소	대관령	CODI	3.7	3~5						
유역면적 (ha)	1530	수질등급(COD)	II (2.8)	I b~III						
만수면적 (ha)	21.8	수질등급(TOC)	I b (1.7)	I a~III						
유호저수량(천 ³ m)	2846	수질등급(평균)	III (3.5)	III~III						
생활계	0	VW염암상태	빈중 (2.6)	빈중~빈중						
BOD부하량(kg/d)	속산계 161	LQI	48	50~50						
기타	22.1	rLQIar	61	60~60						
		LEHaw	61	50~90						

(b) 대룡지구 입력화면 및 결과화면

지역본부		지사및시군		저수지		연도		종류	추정된 수질지수	
항목	값	평균값	범위	종류	평균값	범위				
관찰측후소	부여	CODI	3.9	3~5						
유역면적 (ha)	420	수질등급(COD)	III (3.6)	II~IV						
만수면적 (ha)	15	수질등급(TOC)	I b (1.9)	I a~III						
유호저수량(천 ³ m)	1457	수질등급(평균)	III (3.2)	II~III						
생활계	2.5	VW염암상태	빈중 (2.6)	빈중~빈중						
BOD부하량(kg/d)	속산계 11.6	LQI	43	40~50						
기타	4.6	rLQIar	59	60~60						
		LEHaw	63	30~90						

그림 8 대관령지구 및 대룡지구 수질지수 추정 결과

(2) 오염원 자료가 없는 경우

- 적용방법 : 유역 오염원 조사 자료가 없는 경우 개략적인 부하량 값을 이용하여 수질 예측이 가능함. 해당 유역의 개발정도를 모델에서 제시한 7단계의 개발정도 중 하나를 고르면 부하량이 자동으로 입력됨. 예로 대룡지구는 유역개발이 거의 이루어지지 않았으므로 7단계 중 미개발쪽에 가까운 저개발(두 번째)과 평균개발(세 번째)을 선택하여 수질지수를 추정한 결과 수질등급이 3등급으로 나타나 농업용수 수질기준을 충분히 만족하였음

(a) 저개발 지역의 기본 부하비 입력 시 추정결과

지역본부	지사및시군	저수지	연도	종류	추정된 수질지수	
					평균값	범위
항목				값		
관할측후소				부여		
유역면적 (ha)				420		
만수면적 (ha)				15		
유효저수량 (천 ³ m)				1457		
생활계				5		
축산계				4		
기타				10		
BOD부하비(저개발 지역, 30%)						
				CODI	3.7	3~5
				수질등급(COD)	III (3.4)	I b~IV
				수질등급(TOC)	II (2)	I a~III
				수질등급(평균)	II (2.8)	II~III
				VW영양상태	빈중 (2.6)	빈중~빈중
				LQI	43	40~50
				rLQIar	60	60~60
				LEHaw	62	30~90

(b) 평균개발 지역의 기본 부하비 입력 시 추정결과

지역본부	지사및시군	저수지	연도	종류	추정된 수질지수	
					평균값	범위
항목				값		
관할측후소				부여		
유역면적 (ha)				420		
만수면적 (ha)				15		
유효저수량 (천 ³ m)				1457		
생활계				11		
축산계				42		
기타				11		
BOD부하비(평균개발 지역, 50%)						
				CODI	4.2	4~5
				수질등급(COD)	III (3.8)	II~IV
				수질등급(TOC)	I b (1.6)	I a~II
				수질등급(평균)	III (3.7)	II~V
				VW영양상태	빈중 (2.9)	빈중~중
				LQI	42	40~50
				rLQIar	51	40~60
				LEHaw	64	30~90

그림 9 대룡지구의 부하량 자료가 없는 경우 수질지수 추정

표 1 대룡지구의 부하량 자료가 없는 경우 수질지수 추정 결과

부하량 입력 방법	CODI	COD기준 수질등급	평균 수질등급	VW 영양상태	LQI10	rLQIar10	LEHaw10
부하량 직접 입력	4 (3.9)	III (3.6)	III (3.2)	빈중 (2.6)	40 (43)	60 (59)	60 (63)
저개발 지역 가정	4 (3.7)	III (3.4)	II (2.8)	빈중 (2.6)	40 (43)	60 (60)	60 (62)
평균개발 지역 가정	4 (4.2)	III (3.8)	III (3.7)	빈중 (2.9)	40 (42)	50 (51)	60 (64)

적용사례 3. 신규 오염원 영향 검토

유역에 신규 오염원이 들어설 때 그에 따른 저수지 수질 변화를 예측할 수 있음

- 적용 저수지 : 어천저수지
- 설명 : 해당 저수지의 현재 수질지수와 오염원이 들어선 후의 수질지수를 추정하여 비교함으로써 오염원의 영향을 파악함
- 적용방법 : 먼저 신규 오염원의 부하량 자료를 확보한 후 조건 변화 분석에서 해당 시설의 BOD부하량을 입력한 후 수질지수 추정. 예로 신규 오염원이 산업계 시설이며, BOD부하량의 하루 발생량이 10 kg 일 경우 그 값을 입력하여 수질지수를 추정한 결과 저수지 수질은 기존에 수질등급이 4등급이었으나 5등급으로 악화됨



그림 10 신규 오염원 영향 분석 화면

적용사례 4. 수질개선대책 수립 대상지의 부하량 삭감 영향 검토

저수지의 수질을 개선할 목적으로 유역의 부하량을 삭감하는데 따른 수질변화를 예측할 수 있음

- 적용 저수지 : 만수저수지
- 설명 : 수질개선대책 수립 대상 저수지의 현재 수질지수를 추정한 후 조건변화 분석에서 부하량을 조절하여 사업 목표의 수질을 만족하는 적절한 삭감 부하량을 산정함.
- 적용방법 : 만수저수지의 수질은 2012년 COD가 12 mg/L 이상이며, 수질등급이 6등급을 나타내고 있음. 2012년 현재의 발생부하량(생활계: 41.2 kg/일, 축산계: 2661.1 kg/일, 기타: 4.9 kg/일)을 2001년 수준(생활계: 23.2 kg/일, 축산계: 484.2 kg/일, 기타: 4.9 kg/일)으로 감소시킬 경우 예상되는 저수지 수질개선 정도를 분석함. 적용 결과 수질은 COD 11.2 mg/L, 수질등급이 5등급으로 개선되기는 하였으나 4등급의 수질을 만들기 위해서는 상당한 수준의 부하량 삭감이 필요함

(a) 만수저수지 2012년 입력화면

(b) 부하량 삭감 전 수질지수 추정결과

종류	추정된 수질지수		실측된 수질지수	
	평균값	범위	중앙값	범위
CODI	12.5	10~15	12	10~21
수질등급(COD)	Ⅵ (6.2)	Ⅴ~Ⅵ	Ⅵ	Ⅵ~Ⅶ
수질등급(TOC)	Ⅳ (4.7)	Ⅱ~Ⅵ	Ⅴ	Ⅴ~Ⅵ
수질등급(평균)	Ⅴ (5.5)	Ⅳ~Ⅵ	Ⅵ	Ⅴ~Ⅵ
VW영양상태	중부 (4.1)	중~중부	중부	중~중부
LQI	73	60~90	77	73~92
rLQIar	29	20~30	25	11~29
LEHaw	10	0~20	8	2~11

*2000 ~ 2012 data

(c) 삭감부하량 입력화면

(d) 부하량 삭감 후 수질지수 추정결과

종류	추정된 수질지수	
	평균값	범위
CODI	11.2	8~15
수질등급(COD)	Ⅴ (5.8)	Ⅳ~Ⅵ
수질등급(TOC)	Ⅲ (3.3)	Ⅱ~Ⅳ
수질등급(평균)	Ⅴ (5.5)	Ⅳ~Ⅵ
VW영양상태	중부 (4.2)	중~중부
LQI	70	40~80
rLQIar	31	20~50
LEHaw	15	0~20

그림 11 부하량 삭감 영향 분석 화면

- 추가로 더 많은 부하량 삭감을 통해 IV등급의 수질을 만족하는 수준을 찾은 결과 오염부하량의 삭감량은 생활계, 축산계 및 기타 발생부하량을 각각 현재의 75%, 90%, 34% 제거해야하는 것으로 나타남. 이와 같이 부하량 삭감 시 개략적인 수질개선 정도를 파악하고, 목표수질 달성을 위한 적절한 삭감 부하량을 검토할 수 있음



그림 12 목표수질 달성을 위한 삭감부하량 산정

4. 모델 사용 시 주의사항

추정 수질지수는 유역과 저수지 특성을 이용해 개발한 지수로 계획지수에 해당되며, 유역관리를 위해 더 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구에서 개발한 추정 수질지수는 다양한 기존의 수질지수와 동일한 형태를 갖고 있어 농업용저수지 수질관리를 위한 지수로 활용할 수 있으며, 각종 수질관리계획을 수립하는 지원 도구로 활용할 수 있다. 본 모델의 활용도를 높인 후 장기적으로는 계획지수형태의 추정 수질지수를 보다 강력한 수단으로 활용하여 예측된 수질결과에 따라 추가 오염원 입지를 금지하거나, 저수지 건설을 재검토하도록 하는 자료로도 활용될 수 있기를 기대한다.

현재로서는 본 모델의 적용성을 자체적으로 평가하였으나 지속적인 모델의 업데이트를 통해 시스템의 적용성을 더욱 높여야 한다. 또한 본 모델은 수질항목이 아닌 개략적인 수질지수를 산정하기 때문에 사업 계획 수립 전 개략적인 영향을 검토하는 자료로써 활용하기를 권장한다. 만약 시간과 비용의 문제로 수질모델을 적용하지 않고, 사업을 결정하는 경우에는 본 모델

을 사용하여 사업 계획의 타당성을 더 높일 수 있을 것으로 판단한다. 하지만 사업의 계획 설계 시 시간과 비용이 충분하다면 현장조사를 실시한 후 기존의 수질모델링 방법을 이용하여 수질을 예측하는 것이 보다 정확하고, 검증된 결과를 얻을 수 있다.

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부로부터 연구비를 지원받아 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 수행한 연구보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용은 연구원의 공식견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.

■ 발 행 처

인공지능기법을 이용한 농업용저수지 수질지표 및 관리모델 개발	
발행일	2013. 12
발행인	박 정 환
발행처	한국농어촌공사 농어촌연구원
주 소	경기도 안산시 상록구 사동 해안로 870 전 화 031 - 400 - 1700 FAX 031 - 409 - 6055
※ 이 책의 내용을 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다. 단, 이 책의 출처를 명시하면 인용이 가능합니다.	