

요 약 문

I. 제목

○ 낙동강 하류 부산시 취수원 수계의 조류 발생 영향 인자별 상관도 연구

II. 연구의 목적 및 필요성

○ 우리나라는 용수 공급량의 91% 이상을 하천과 호소 등 지표수에 의존하고 있으며, 특히 낙동강 하류 수계는 하천 지표수에 의한 용수 공급에 90% 이상을 의존하고 있는 실정임 (낙동강수계관리위원회, 2006; 박, 2007). 이러한 상황에서 낙동강 수계의 중·하류는 유량이 적어 유속이 느리고 비점오염물질 유입 등으로 연중 부영양화 발생 빈도가 높음 (황 등, 2013). 수계의 부영양화는 여러 가지 인자들에 의해 조류 즉 식물플랑크톤이 대량 번식되는 현상으로 정수처리 시 심각한 문제를 야기시킬 수 있음

○ 기존 연구는 조류의 분포, 생태 특성, 플랑크톤 군집 분석 및 조류 분해 세균의 분리 동정 등 조류 제어 및 제거에 중점을 두고 있으며 주로 수질인자와의 상관관계 해석에 집중하였음. 따라서, 조류 발생 영향인자들에 대한 상관관계 해석을 통해 조류를 제어 및 관리할 수 있는 방안이 필요함. 또한 조류 발생은 이러한 수질인자 뿐만 아니라 하천의 수리학적 특성과 기후조건에 따라 매우 다른 발생 특성을 나타내기 때문에 이러한 요인들을 반영한 종합적인 평가가 필요함

○ 통계 모형에 대한 입력자료는 시계열 자료에 기준한 월평균, 일평균 값을 이용함. 그러나 편차에 따른 모형의 부정확성을 최소화하고 모형을 최적화하기 위해서는 월평균 자료 보다는 일평균 자료에 기준한 입력 자료의 전처리가 필수적임. 따라서, 본 연구에서는 조류 발생에 미치는 영향인자를 수질인자에만 국한시키지 않고 기상 및 수리 자료를 종합적으로 통계 프로그램에 대입하여 조류의 발생에 미치는 영향인자를 산출하고 다중회귀모형을 구축하고자 하였음. 또한, 일일 자료에 기준한 자료의 전처리를 통해 모형에 대한 입력조건을 최적화 하고자 하였음. 이를 통해, 낙동강 뿐만 아니라 타 수계의 조류 예측 모델의 개발에도 기여하고자 함

III. 연구의 내용 및 범위

구 분	연구내용	연구범위
1차연도 (2013.3~ 2013.12)	4대강 사업 이전 낙동강 부산시 취수원 수계의 수리 특성 해석	<ul style="list-style-type: none"> 조사연구 대상지역 선정: 낙본K와 낙본I 수계의 구체적인 조사 대상지점 선정 수리 자료조사 및 분석 (2000~2007)
	4대강 사업 이전의 조류 발생 영향인자별 상관도 평가	<ul style="list-style-type: none"> 영향인자별 자료조사 및 분석 (2000~2007): 수질, 수리, 기상 인자별 조사 및 분석 상관관계 분석: <ul style="list-style-type: none"> 다중회귀분석을 통한 최적 모델 선정 수질, 수리, 기상특성 과 Chl.a와의 상관관계 각각의 영향인자들 사이의 상관관계 해석 영향인자들과 조류 발생 사이의 상관관계 해석
	4대강 사업 이후 낙동강 부산시 취수원 수계의 수리 및 수질특성 모니터링	<ul style="list-style-type: none"> 조사연구 대상지역에 대한 정부기관 측정자료 조사 및 분석 <ul style="list-style-type: none"> 국립환경과학원 측정자료 부산시 측정자료 등 수리특성 및 조류 발생 영향인자들에 대한 조사
2차연도 (2014.1~ 2014.12)	4대강 사업 이후 낙동강 부산시 취수원 수계의 수리특성 해석	<ul style="list-style-type: none"> 4대강 사업 완공에 따른 수리특성 변화 분석 <ul style="list-style-type: none"> 물금, 매리취수구역과 창녕함안보 수계 대상 보에 따른 유량, 유속, 유황 등 수리특성 변화 국토부, 환경부 자료활용
	4대강 사업 이후 조류 발생 영향인자별 상관도 분석 (2012~2013)	<ul style="list-style-type: none"> 조사연구 대상지역에 대한 정부기관 측정자료 조사 및 분석 <ul style="list-style-type: none"> 국립환경과학원 측정자료 부산시 측정자료 등 수리특성 및 조류 발생 영향인자들에 대한 조사 상관관계 분석: <ul style="list-style-type: none"> 국내외 조류 대발생 관련 학술문헌조사 다중회귀분석을 통한 최적 모델 선정 수리특성, 영양염류 농도, 수온, 일조량 등과 Chl.a와의 상관관계 각각의 영향인자들 사이의 상관관계 해석 영향인자들과 조류 발생 사이의 상관관계 해석 4대강 사업 완공에 따른 조사대상 수계의 조류 발생 특성 변화 분석
	조류 제어 및 관리를 위한 방안 도출	<ul style="list-style-type: none"> 연구결과를 토대로 낙동강 하류 부산시 취수원 수계의 조류 제어 관리 방안 도출

IV. 연구결과

○ 연도 및 월별 수질, 수리, 기상인자 변화

▪ 수질자료

- 물금, 남지지역의 1997년부터 2008년까지 Chlorophyll a 농도 변화는 유사하게 나타남. 하지만 일정한 경향을 보이지 않으며 해당기간 동안 대부분 조류 경보제의 조류경보에 해당하는 높은 농도를 나타냄. 또한 여름철 보다 겨울철에 농도가 높은 것으로 나타났음. 여름철은 주로 남조류에 의한, 겨울철은 주로 규조류에 의한 Chlorophyll a 농도이기 때문에 발생 조류 특성에 따른 생체량의 차이가 Chlorophyll a의 농도 차이에 일부 기여한 것으로 판단됨.

- Chlorophyll a의 농도 증감 형태는 영양염류의 농도변화와 크게 일치하지 않는 것으로 나타남. 이러한 원인으로는 수계의 TN 및 TP 농도가 조류의 성장을 제한할 정도로 저감되지 않았기 때문이며, 낙동강 수계 역시 이러한 원인에 의해 TN 및 TP가 Chlorophyll a의 농도에 크게 영향을 미치지 않은 것으로 판단됨. 또한 여름철 강우일수 및 강우량의 증가로 인한 비점오염물질이 유입으로 나타난 현상으로 겨울철에서 봄철까지는 TN 및 TP가 지속적으로 감소하는 경향이 나타났지만, 6월이 되면서 농도가 그대로 유지되거나 상승하는 현상이 나타났음.

- Chlorophyll a의 농도 변화는 BOD₅의 농도 변화와 상당히 유사한 형태를 나타냈음. BOD₅가 조류의 증가에 영향을 미칠 수 있지만, 조류 자체가 BOD₅ 농도로서 측정되기 때문에 조류의 증가가 BOD₅ 농도 증가를 유발하여 Chlorophyll a 농도와 BOD₅ 농도 변화가 유사한 형태를 나타냈을 수도 있음.

▪ 수리자료

- 유속 및 수심은 유량에 영향을 받는 인자로서, 유량, 유속 및 수심은 변화 형태가 유사한 것으로 나타났음.

- 겨울철에서 여름철로 바뀌면서 유량이 급속히 증가하는 경향이 나타났음. 우리나라의 경우 여름철에 강우가 집중되기 때문에 하천의 유량이 여름에 높은 경향을 나타냄. 이에 따라 여름철 Chlorophyll a의 감소 원인으로 강우량 증가에 따른 높은

유량에 의한 플러싱 방류 효과를 고려할 수 있음.

▪ 기상자료

- 강우량 및 일조시간은 연도에 따라 다양한 값을 나타내었지만, 풍속은 상대적으로 변화 없이 일정하게 나타났음. 2003년도에 Chlorophyll a의 농도가 가장 낮게 나타났으며, 이는 다른 연도에 비해 강우량의 급격한 증가로 나타난 플러싱 방류 효과에 기인한 것으로 판단됨. 여름철에 Chlorophyll a의 농도가 급격히 감소하는 경향이 나타난 것은 우리나라 기후 특성상 여름철에 집중된 강우와 일조시간의 감소가 Chlorophyll a의 농도 감소에 기인한 것으로 판단됨

○ 계절별 영향인자 분석

- 봄철은 3~5월, 여름철은 6월~8월, 가을철은 9월~11월, 겨울철은 12월~2월로 구분하여 평가하였음.

▪ 수질자료

- 물금지역의 봄철의 Chlorophyll a 농도가 가장 높게 나타난 연도는 2005년이고, 여름 및 가을은 2001년, 겨울은 2007년으로 나타났음. Chlorophyll a의 증가요인은 수질인자만으로는 크게 연관이 없는 것으로 판단됨.

- 남지지역의 봄철의 Chlorophyll a 농도가 가장 높게 나타난 연도는 2006년이고, 여름철은 2000년, 가을철은 1997년, 겨울철은 2008년으로 각 계절별로 가장 높은 Chlorophyll a 농도를 나타낸 연도가 다른 것으로 나타났음. 여름철 Chlorophyll a 농도는 수온에 영향을 받은 것으로 판단됨. 가을철 Chlorophyll a 가 가장 높은 연도는 1997년으로 TN 농도가 현저히 높지만 다른 계절에도 높은 TN농도에 비해 Chlorophyll a 농도는 높지 않기 때문에 영양염류에 의한 영향은 크지 않으며 겨울철은 영양염류 및 수온 등에 크게 영향을 받지 않은 것으로 판단됨.

▪ 수리자료

- 물금, 남지 두 지역 모두 수리인자들과 Chlorophyll a의 농도 변화를 보면 4계절 동안 대체로 부의 상관관계를 나타내고 있으나, 상대적으로 여름의 경우 수리인자와 Chlorophyll a 농도 변화의 상관성이 낮아졌음. 이는 여름은 집중호우, 태풍 등의 갑작스러운 기상인자 변화에 의한 영향으로 판단됨. 3가지 수리 데이터(유량, 유속, 수심)는 Chlorophyll a 농도와 전체적으로 부의 상관관계를 나타내는 것으로 나타났다으며, 특히 남지 지역의 봄철과 여름철, 물금 지역의 가을철의 경우 뚜렷한 경향성을 나타내었음. 이는 유량이 높아지면서 Chlorophyll a 농도가 희석되고, 또한 유속이 커져 체류시간이 감소하여 나타난 결과로 판단됨.

▪ 기상자료

- 일조시간의 경우 조류 증식에 큰 영향인자로 알려져 있는데, 물금의 경우 대체적으로 Chlorophyll a 농도와 정의 상관관계를 나타내는 경향이었으나 예외도 많았으며, 남지의 경우역시 2006년 봄철 및 2002년 가을철 등 몇몇 수치를 제외하고 Chlorophyll a 농도와 정의 상관관계로써 유사한 형태를 확인할 수 있음. 예외의 경우는 일조 시간 이외의 영향인자의 영향으로 판단됨. 강수량의 경우 Chlorophyll a 농도 변화와 비교하였을 때, 부의 상관관계가 다소 나타나는 것으로 확인할 수 있었음. 풍속의 변화는 물금에서 나타난 Chlorophyll a 농도 변화와 같은 형태로 보기 힘들며 남지는 Chlorophyll a 농도와 정의 상관관계가 나타나는 것으로 평가됨. 이는 풍속이 강하므로 하천에 공기량 즉, DO 농도의 증가에 기인하여 조류가 활발히 성장한 것으로 고려할 수 있으며, 물금은 풍속의 영향보다 다른 인자의 영향이 더 큰 것으로 볼 수 있음. 강수량의 변화는 두 지역 모두 Chlorophyll a 농도 변화와 비교했을 때 부의 상관관계가 나타나는 것으로 판단할 수 있었으며, 강수에 의해 유량이 많아지면서 Chlorophyll a 농도가 희석된 것으로 판단됨.

○ 통계적 분석

▪ 물금지역의 분석 결과

- 월 데이터를 이용하여 아래와 같은 회귀식을 도출하였고 $R^2=0.768$ 의 높은 유의성을 가짐. 주성분분석 결과는 5개의 주성분이 생성되었으며 가장 큰 분산%를 차지하는 1성분은 기상현상 관련 인자로서 설명이 되며 이는 전체 수질 변동의 41.95%를 차지함. 2성분은 조류성장을 위한 물질대사 그리고 3성분은 수리인자

4,5 성분은 영양염류로 나타남.

$$Chl.a = 0.428 + 3.799DO + 14.384BOD - 13.457NO_3.N - 1.782 Water Temp. + 6.45COD - 29.692NH_4.N \quad (R^{*2} = 0.768)$$

- 일 데이터(월 1~5회 측정)를 이용하여 해당 날에 대한 태풍의 영향을 고려하고 관리도 기법을 적용하여 평균값에서 $\pm 3\sigma$ 값을 넘어가는 자료를 걸러낸 후 다중 회귀분석을 실시, 회귀방정식은 아래와 같음.

$$Chl.a = -122.554 + 14.74BOD + 4.708DO + 7.449COD - 10.592NO_3.N - 1.232 Waternemperature - 32.414NH_4.N + 11.307 Water depth - 51.952Flowvelocity + 5.560pH \quad (R^{*2} = 0.781)$$

일 데이터를 이용한 분석이 종속변수 Chlorophyll a 에 대한 회귀식의 약간 높은 유의성을 보이며 기존의 월 데이터로부터 만들어진 회귀식의 수질인자들과 함께 수리인자(수심, 유속)까지 표현이 됨. 주성분분석 결과 고유치 1 이상의 5개의 성분이 주성분으로 선택이 되었음 이들의 누적 분산% 는 75.578%로 나타남. 그중 37.723%의 분산%를 차지하는 제1성분은 전반적인 수질인자들을 나타내는 성분으로 조류의 생장과도 관련이 있는 성분임. 2성분은 수리인자 3성분은 유입수와 영양염류에 의한 영향인자 그리고 4,5성분은 기상현상과 인 성분 인자로 나타남.

- Chlorophyll a 등급별 중회귀분석 결과 각 등급별로 데이터를 나누고 데이터 처리 과정에서 제거된 데이터들까지 포함하여 데이터 개수가 줄어든 결과 A 등급은 큰 유의성을 보이지 않았으며 데이터가 가장 많이 포함된 B등급 중회귀분석 결과는 아래와 같으며 변수로 TN이 함께 포함이 되었고 $R^2=0.520$ 으로 유의성이 있는 것으로 나타남.

$$Chl.a = 40.791 + 2.603DO + 10.953BOD - 9.538TN - 0.966 Water Temp. \quad (R^{2*} = 0.520)$$

C와 D등급은 함께 데이터를 분석한 결과 아래와 같은 회귀식 도출.

$$Chl.a = -10.94 - 2.042 Windvelocity - 40.036 TP + 0.654 Water Temp. + 1.496 DO + 2.654 BOD + 2.304 TN \quad (R^{*2} = 0.401)$$

결정계수의 값은 0.401로 높지는 않지만 어느 정도 유의성을 보이며 수리, 기상, 수질 인자가 다양하게 포함되어 있음.

▪ 남지지역의 분석 결과

- 월 데이터를 이용하여 아래와 같은 회귀식을 도출 하였고 $R^2=0.837$ 의 높은 유의성을 가짐.

$$Chl.a = -92.391 + 12.013 BOD + 16.572 pH - 17.255 NO_3.N - 0.546 Water Temp. + 4.871 COD - 3.566 Water depth + 2.087 DO \quad (R^{*2} = 0.837)$$

월 데이터의 주성분 분석 결과 가장 큰 %분산(38.5%)을 차지하는 1성분은 물금과 마찬가지로 기상인자와 관련된 성분으로 해석이 되었음. 2성분은 조류 생장에 영향이 있는 인자로 구성이 되어있으며 3,4성분은 영양염류인자와 유입수 관련성분으로 판단됨

- 1997~2003년 사이의 기상인자 일일 데이터의 부재로 2004년 이후의 자료를 대상으로 분석함. 이를 이용하여 아래와 같은 회귀식을 도출하였으며 $R^2=0.792$ 로 월 데이터 대상 분석보다 낮은 유의성을 보임. 또한 월 데이터와 다르게 수리인자가 수심이 아닌 유량 이 식에 포함됨.

$$Chl.a = -133.312 + 12.854 BOD + 11.731 pH + 10.065 COD - 48.419 NH_4.N + 1.364 DO - 0.007 Flowrate \quad (R^{*2} = 0.792)$$

일 데이터의 주성분분석 결과 고유치1 이상의 5개의 성분이 주성분으로 선택이 되었음 이들의 누적 분산% 는 79.658%로 나타남. 38.926%의 분산을 차지하는 제1성분은 계절적인 영향인자 성분으로 나타남. 2성분은 수리인자, 3성분은 조류생장 영향인자 그리고 4, 5성분은 기상인자로 나타나며 남지 지점의 주성분분석 결과 역시 월평균자료와는 다른 결과를 보이고 있음.

- 남지지역의 Chlorophyll a 등급별 중회귀분석 결과, 물금과 마찬가지로 A등급은

데이터수의 부족으로 인해 유의성을 보이는 회귀모델을 얻지 못함. B등급은 아래와 같은 회귀모델을 도출하였으며 주성분 분석 결과 제1성분이 38.655%의 분산%를 보이며 이는 영양염류와 수리인자, 계절적인 수질 인자의 작용등 복합적인 부분을 나타내는 인자로 보이며 2성분은 유기물과 조류 에 관련이 있는 성분, 3성분은 NH_4-N , 4, 5성분은 기상인자로 나타남.

$$Chl.a = -73.043 + 6.36BOD - 47.515NH_4.N + 1.92DO + 8.357COD + 6.293pH$$

$$(R^{*2} = 0.602)$$

C, D 등급 역시 데이터수의 부족으로 인해 유의한 회귀모델을 도출하지 못함. 차후 자료 보완을 통한 분석이 요구됨.

V. 연구결과와 활용계획

○ 환경적 기대성과

- 조류 발생 현상과 영향 인자별 상관관계 도출로 낙동강 하류 수계의 수질개선 책 마련을 위한 기초자료를 제공함
- 조류 발생 영향 인자별 상관성의 정량화를 통한 조류 발생 현상 예측으로 취수원 안정성 확보를 위한 정책 마련에 기초자료를 제공함

○ 경제적 기대성과

- 조류 제어 및 관리를 위한 기본 정보를 제공함으로써 취수 및 정수처리시설의 비용과 운영관리 비용을 절감할 수 있음
- 향후 낙동강 수계 조류 예경보제 수립을 위한 관련 사업 계획의 기본 방향을 제공함
- 하천 수계의 조류 발생에 따른 사회·경제적 비용 부담을 줄일 수 있음

○ 대한환경공학회지 2014 논문 1편 투고 예정

- 낙동강 하류 물금지점의 Chlorophyll-a 농도 변화에 대한 영향인자들의 복합적 평가

○ IWA Water, Energy and Climate Conference 2014 논문 2편 제출

- May 21-23, 2014, Mexico City, Mexico (<http://wecmexico2014.org>)

- Long term evaluation of eutrophication and environmental factors in downstream of Nakdong-river, South Korea
- Eutrophication feature extraction downstream of the Nakdong River according to changes in hydraulic conditions using principle components analysis

○ 낙동강 조류 제어 및 관리 정책 수립에 기여

- 부산시 취수원 안정성 향상
- 낙동강 수질관리 정책 및 하천 조류 제어 정책 수립에 기여

○ 환경부 R&D 기술수요조사 참여

- 제목 : 4대강 사업에 따른 낙동강 수계의 조류발생 특성 변화 및 조류 제어 방안
- 목표 : 4대강사업에 따른 낙동강 수계의 8개 보 구간에서 수질, 기상, 수리인자들과 조류 발생 사이의 상관관계 변화를 해석하고 보 내의 부영양화 모형을 구축함으로써 조류 제어를 위한 정책 및 방안 설정을 위한 기초자료를 제공하고자 함