

# 계층분석적 의사결정기법을 이용한 비점원오염 관리지역의 선정

## Selecting Target Sites for Non-point Source Pollution Management Using Analytic Hierarchy Process

신정범\*, 박승우\*\*, 김학관\*\*\*, 최라영\*\*\*\*

Jung Bum Shin, Seung Woo Park, Hak Kwan Kim, Ra Young Choi

### 요지

본 논문에서는 비점원오염 관리를 위한 지역선정을 위하여 계층분석적 의사결정기법에 의한 접근 방법을 제시하였다. 주어진 유역 내에서의 비점원오염의 중요기여 인자간의 관계를 반영한 것이 본 연구의 특징이다. 주요인자로는 경사도, 유달거리, 유효강우비, 불투수면적비, 토양유실량이다. 각 인자의 가중치는 계층분석적 의사결정기법(AHP)으로 구하였으며 각 인자의 가중값과 속성 값의 단순 부가가중 합으로 표현되는 비점원오염 영향지수를 정의하였다. 높은 영향지수를 가지는 지역을 비점원오염 관리지역으로 제안하였으며, 시험유역으로 벌안HP#6유역을 선정하여 적용해보았다. 관리지역 결과를 비교하기 위하여 AGNPS 모의를 통한 비점원오염 부하량간의 분석을 시도하였다. 비교 및 분석을 위해 Moran's I를 이용하였으며, T-N은 0.38~0.45, T-P는 0.15~0.22의 범위를 보였다. 이는 두 접근 방법이 상이함에도 공간적으로 유사한 경향을 보인다는 것을 말한다. 본 연구에서 제시하는 방법은 비점원오염 관리지역 선정에 있어서 적용가능 함을 의미한다.

핵심용어 : 비점원오염 영향지수, AHP, GIS, Moran's I

### 1. 서 론

비점원오염 관리지역은 유역내 위치하는 지역 중 비점원오염이 수질오염에 미치는 영향이 큰 지역으로 오염원에 대한 제어 및 관리가 필요한 지역을 말한다(MOE, 2006). 비점원오염은 오염물질이 특정 지점이나 장소에서 배출되어 오염을 일으키는 점원오염과 달리 광범위한 지역에 걸쳐 발생하는 형태의 오염이다. 비점원오염 발생에 의한 오염을 제어할 수 있는 종합적인 관리방안으로 다양한 최적관리기법(Best Management Practices, BMP)이 제시되었다. BMP는 비점원오염의 발생 및 유출을 최소화하는데 적합한 유·무형의 방법을 뜻한다. BMP를 적용하였을 때 비점원 발생량 대비 배출부하량을 어느 수준까지 줄이는 등의 제어 및 관리 목표나 수준을 적용할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Kang et al., 2003; Amanda and Allen, 2006). 또한 다양한 종류의 BMP를 유역내 위치하는 모든 비점원오염원에 적용하기 보다는 유역 출구에 비점원오염 영향이 큰 지역을 대상으로 적정한 최적관리기법을 적용하는 것이 더욱 중요하다(Kwun et al., 1998).

비점원오염 관리지역 선정 방법에는 원단위법을 적용하는 방법, GIS를 이용한 USLE에 의한 토양유실량 추정에 의한 방법, 의사결정에 의한 오염영향 지수 산출을 이용한 정성적인 분석 방법, 비점원오염 모델링에 의한 방법 등이 있다. Jeon(1996)은 GIS를 이용하여 비점원오염의 원인지역 분석을 위해 유출, 토양유실량 간의 공간분석을 시도하였다. Michele et al.(2005)은 하천오염 기여지역 분석을 위하여 하천오염에 기여하는 지수를 산출하여 전문가그룹에 의한 영향계수를 이용하는 연구가 있었다. Kang(2002)은 AGNPS와 SWAT

\* 정회원 · 서울대학교 지역시스템공학부 대학원 · E-mail : pusan7@snu.ac.kr

\*\* 정회원 · 서울대학교 지역시스템공학부 교수 · E-mail : swpark@snu.ac.kr

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 농업생명과학연구원 · E-mail : kwans2@snu.ac.kr

\*\*\*\* 서울대학교 농업생명과학연구원 · E-mail : cry@snu.ac.kr

모형을 이용한 격자 및 수문단위 소유역에서의 오염부하량을 분석하여 최적관리기법, 수환경정화공법등을 적용한 단위구역별 삽감량등을 제시하여 결과 분석하였다.

한국환경정책·평가원(KEI, 2006)은 전국 840개 소유역을 대상으로 원단위법을 이용한 오염배출부하량 자료를 활용하여 생물학적 산소요구량, 총질소, 총인의 각각 비점원오염기여율이 50% 이상인 유역을 비점오염원 관리지역 대상으로 제시하였다. 이 방법은 비점원오염 관리가 우선적으로 시행되어야 할 대상유역의 선정방법으로 적합한 것으로 평가되고 있다.

그러나 비점원오염 원단위법에 의한 배출부하량만을 기준으로 하여 관리지역을 제시하는 방법은 각 비점오염원의 발생 및 유출에 있어서 수리학적 특성에 의하여 부하량의 증·감에 작용하는 인자 등이 고려되지 않는 경우가 많다. 비점원오염 물질의 배출은 수문현상과 밀접한 관련을 맺고 있기 때문에 이러한 요소들을 고려하여 비점원오염 관리지역을 선정할 필요가 있다. 전문가그룹에 의한 오염기여지역 산정방법의 경우 비점원오염의 도달률에 작용하는 인자를 충분히 고려하지 못하며 검정과정에 있어서 불합리성이 내포하고 있는 단점이 있다. 또한 비점원오염 모델링에 의한 방법은 실제 사용 자료의 부족 및 통계학적 모델의 한계로 인하여 모델의 적용이 쉽지 않은 경우가 빈번하다(Michele, 2005).

본 연구에서는 복잡하고 많은 시간과 비용이 소요되는 비점원오염 모델보다는 간단하면서도 명확하게 결과를 제시할 수 있는 계층분석적 기법을 이용한 비점원오염 관리지역 선정 방법을 논의하고자 한다. 비점원오염 기여 인자를 선정하고 각 인자의 중요도를 계층분석적 의사결정기법을 이용하여 비점원오염원 관리지역 선정 방법을 제시하고자 한다. 그리고 의사결정기법의 특성상 물리적, 화학적인 오염물질의 거동에 대한 모의가 불가능한 한계점에 대한 비교분석으로 계층분석적 의사결정기법을 이용해 분석된 공간적 분포와 비점원오염 모델(AGNPS)을 통해 분석된 공간적 분포를 상호 비교 등을 통하여 비점원오염 관리지역 선정의 타당성 및 합리성을 검증하도록 하였다.

## 2. 계층분석적 의사결정기법

### 2.1 비점원오염 기여 인자

본 연구에서는 원단위법에 의한 비점원오염발생량에 대하여 유달거리, 불투수면적의 비율, 지면경사, 토양유실량, 유효강우비를 비점원오염에 기여하는 인자로 제시하였다. 이들 인자는 오염물질이 수체까지 이동하는 동안에 회석, 확산, 이류, 침전, 흡착, 탈착, 용해, 침투 등의 자연적 현상을 발생시키는 것으로 오염물질의 거동에 큰 영향을 준다. 유달거리는 오염물질이 발생하여 유역의 출구점까지 이르는 거리를 의미하며 오염물질의 자연적인 정화작용에 있어서 유달거리가 길수록 정화작용 효율성도 높아진다. 불투수율은 오염부하량 증가에 영향을 미치는 요인이다. 지면경사의 경우 각 격자의 지면평균경사가 클 수록 오염물질의 배출특성이 빠르며 이는 오염물질의 침전, 흡착 등의 자연적 현상에 의한 오염물질 삽감율을 크게 낮추는 작용을 한다. 토양 침식에 의해 발생하는 토양유실량은 각종 오염물질의 이송 매개체로서 인과 질소 같은 영양물질이나 독성 물질을 운송하여 수질에 직접적인 영향을 미치며, 유사와 수문현상은 비점원오염 배출부하량과 양의 상관관계를 보인다(Kwun et al., 1998).

### 2.2 비점원오염 영향지수

비점원오염 관리지역을 선정하기 위하여 유역내 위치하는 각 격자별로 비점원오염 영향지수를 산출하였다. 비점원오염 영향지수는 유역내 비점원오염에 의하여 유역 출구에 영향을 기여하는 정도를 수치화 한 것으로, 식(1)과 같은 과정에 의하여 격자별로 지수 값을 산출하였다.

$$NPSI_i = NPS_i \times W_{NPS} + SL_i \times W_{SL} + ER_i \times W_{ER} + IMP_i \times W_{IMP} + DD_i \times W_{DD} + S_i \times W_S \quad (1)$$

여기서,  $NPSI$ 는 비점원오염 영향지수,  $NPS$ 는 비점원오염발생량,  $SL$ 는 토양유실량,  $ER$ 는 유효강우비,  $IMP$ 는 불투수면적 비율,  $DD$ 는 유달거리,  $S$ 는 지면경사를 나타낸다. 아래첨자  $i$ 는 전체격자 중  $i$ 번째 격자를 가리키며,  $W$ 는 각 인자에 해당하는 가중치를 나타낸다.

그리고 비점원오염 영향지수 산정시 각 속성 값의 상대적인 크기의 영향을 제거해주기 위하여 최대값과 최소값을 기준으로 하여 0~1 사이의 값으로 일반화(normalization)해주었다.

### 2.3 인자별 가중치 산정

계층분석적 의사결정기법(Analytic Hierarchy Process : AHP)은 다기준 의사결정 방법 중에서 가장 널리 쓰이는 방법이다. 이 방법은 Saaty(1980)에 의해 개발되었으며, 조직화되어 있지 않은 복잡한 문제를 구성요소로 세분화해 나가는 과정을 통해 효과적인 의사결정이 이루어지도록 유도한다(Park, 1999).

본 연구에서는 비점원오염 유출기여 인자의 가중치 산정을 위해 AHP 기법 중 쌍대비교 방식을 이용하였다. 쌍대비교 방식은 두 가지 기준을 동시에 고려할 수 있다는 장점이 있고, 다른 방식에 비하여 이론적인 근거가 명확하며, GIS 기반의 의사결정 문제에 있어 적용성이 가장 용이한 방식이다(Hong and Park, 2003). 즉 요소들간의 상대적 중요도를 나타내는 쌍대비교 행렬을 구성하여 각 인자별 가중치를 계산한다.

각 인자에 대하여 비점원오염 및 수질, 토양 분야에서 15년 경력이상의 전문가 45명을 대상으로 설문하였다. 쌍대비교 행렬의 일관성 비율(CR: Consistency Ratio) 0.2를 기준으로 각 평가자의 응답에 대하여 일관성이 저조한 행렬구성을 제외하였다. AHP 기법에 의하여 산정된 각 기여 인자별 가중치는 표 1과 같다.

표 1 인자별 가중치

Factor	Weight
Soilloss in each cell <SL>	0.2650
Effective rainfall <ER>	0.2585
Delivery distance <DD>	0.2444
Impervious area ratio <IMP>	0.1601
Slope <S>	0.0720
Non-point source generation <NPS>	0.2387

### 3. 비점원오염 관리지역 선정

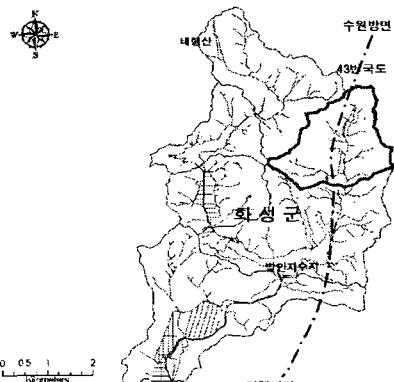


그림 1 시험유역 지리적개요.

#### 3.1 시험유역

본 연구에서는 경기도 화성시 봉담면과 팔탄면에 위치하고 있는 발안유역 중 북동쪽에 위치한 HP#6 소유역을 시험유역으로 선정하였다. 그림 1은 HP#6을 포함하고 있는 발안유역의 위치를 보여주고 있다.

#### 3.2 인자별 자료구축

본 연구에서는 토지이용계 부하량이 비점원오염 발생의 주요부분을 차지하므로 이를 비점원오염 발생량으로 하였다. 국립환경과학원(2002)이 제시한 지목별 발생원단위를 이용하여 발생량을 구하였다.

격자별 토양유실량을 산정하기 위하여 토양유실량 추정에 널리 쓰이는 범토양유실량 추정식(USLE)을 이용하여 격자별 토양유실량

을 구하였다.

비점원오염부하의 배출에서 강우의 영향을 충분히 고려하기 위하여, 10mm/day 이상 강우강도를 부하량의 배출이 일어나는 유효강우량으로 제시하였으며(Eom, 2004), 연 강우량에 대비한 유효강우량의 비중을 지표로 사용하였다.

불투수면적 비율은 전체 면적에 대한 녹지를 제외한 면적의 백분율을 이용하여 토지의 불투수성 나타내었다. 유역 출구에 이르는 각 격자별 유달거리는 ArcHydro Tool을 이용하여 분석하여 자료구축 하였으며, 지면경사의 경우 DEM(Digital Elevation Map)을 이용하여 각 격자의 지면평균경사를 구하였다.

#### 3.3. 비점원오염 관리지역 선정

식(1)에 의하여 격자별 비점원오염 영향지수를 산정하였으며, 그 결과를 이용하여 비점원오염 관리지역을 선정하였다. 비점원오염 영향지수의 값이 높은 지역 순으로 순위화 하여 상위 10%, 20%를 기준으로 2등급화 하여 T-N, T-P에 대하여 그림 2에 제시하였다. 각각의 항목에 대하여 제시된 관리지역이 비슷한 지역으로

분석되었으며, 대부분의 지역이 대지 및 밭으로 이용하고 있는 상태였다. 이는 유역내 비점원오염에 의한 관리지역을 보여주며, T-N, T-P의 각각의 항목에 대하여 1등급이 중복되는 지역부터 우선적으로 최적관리 기법을 적용하여 유역내 비점원오염부하량의 정량적인 삭감이 필요한 것으로 판단된다.

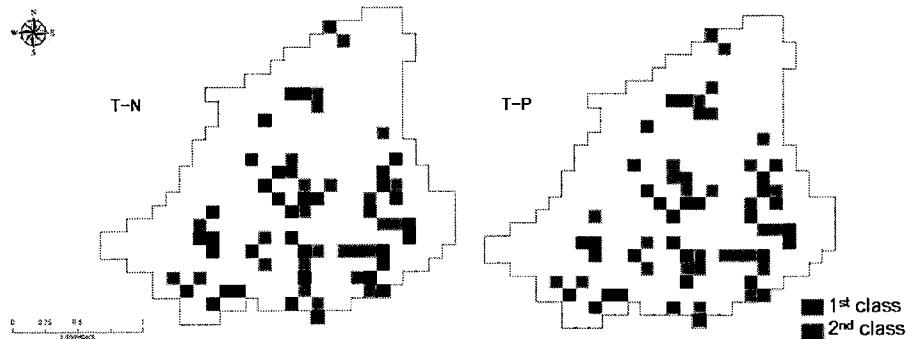


그림 2 비점원오염 관리지역의 선정.

#### 4. AGNPS 모형

AGNPS 모형은 농촌유역의 비점원오염의 발생원 파악과 이의 억제를 위한 BMPs를 적용하기 위한 목적으로 공동개발된 분포형 매개변수 모형이다(Young et al., 1987; Jeon, 2001). 비점원오염에 의한 부하량 모의를 위해 강우량이 많은 8회의 강우사상에 대하여 수문자료 분석하여 모의하였다. 모형의 오염원자료는 토지 이용에 따른 비점원오염원에 의한 결과만을 비교하기 위해 점원오염원자료는 제외시켰다. 본 연구에서는 Kang, et al.(2003)이 이 유역에 모의하여 높은 적용성을 보인 매개변수를 이용하였다. 강우량이 많은 8회의 강우사상에 대하여 AGNPS 모의하여 격자별 비점원오염 부하량(T-N, T-P)을 구하였다.

#### 5. 비점원오염 관리지역 선정결과의 비교

##### 5.1 격자별 일치도 비교

본 연구에서 제시한 관리지역과 AGNPS 모형의 모의를 통하여 선정된 결과를 비교하는 과정을 그림 3에 나타내었다. T-N에 비하여 T-P의 경우 격자별 속성 값의 상대적인 차이가 미미하여 T-N은 10%(36격자), T-P는 20%(72격자)를 기준으로 하여 관리지역을 도시하였으며, 일치여부 분석결과 T-N의 경우 12개 격자의 일치도를 보였으며, T-P의 경우 T-N에 비하여 낮은 일치도를 보였다. T-P의 경우 격자별 비점원오염 발생량이 절대적으로 적은 소유역이여서 AGNPS모형 모의시 격자별 수문수리학적 인자에 의하여 민감하게 반응을 보이기 때문인 것으로 분석되었다. 이는 상대적으로 오염 부하량이 큰 대규모의 유역에 적용시 오차에 의한 영향을 줄일 수 있을 것이라 판단된다.

##### 5.2 공간적 상관성 분석

앞서 제시한 관리지역의 격자별 비교에 더하여 전체 격자에 대한 공간적 결과를 분석하기 위하여 공간적 상관성 분석을 하였다. 공간적 상관이란 어떠한 현상의 공간적 분포 패턴을 기술하고 설명하는데 있어서 변량의 크기가 유사한 지역끼리 서로 이웃하고 있는 현상을 의미한다. Moran's I는 공간적 자기성을 측정, 검정하는 방법으로 공간적 상관성을 측정하기 위해 고안한 통계치로서 Cliff and Ord(1973)에 의하여 정립 및 일반화되었다. Moran's I는 1에 가까울수록 양의 정적 상관관계가 강하게 나타나며, -1에 가까울수록 음의 부적 상관관계가 강하게 나타남을 보여준다.

본 연구에서는 global Moran's I를 이용하여 AHP기법에 의한 비점원오염 영향지수 분포와 AGNPS 모형에 의한 비점원오염부하 격자별 분포의 공간적 상관성을 분석하였다. 두 연구방법에 의한 격자별 속성 값의

공간적 분포 상관성을 분석한 결과를 표 3에 제시하였다. 강우사상별 Moran's I 값이 T-N의 경우 0.378~0.454, T-P의 경우 0.153~0.219의 범위를 보여 두 연구방법에 의한 결과는 높은 정적인 상관성을 갖는 것으로 분석되었다. 이는 본 연구에 의한 격자별 비점원오염 영향지수의 분포가 AGNPS 모형의 격자별 분포와 유사한 경향을 보인다는 것을 말한다.

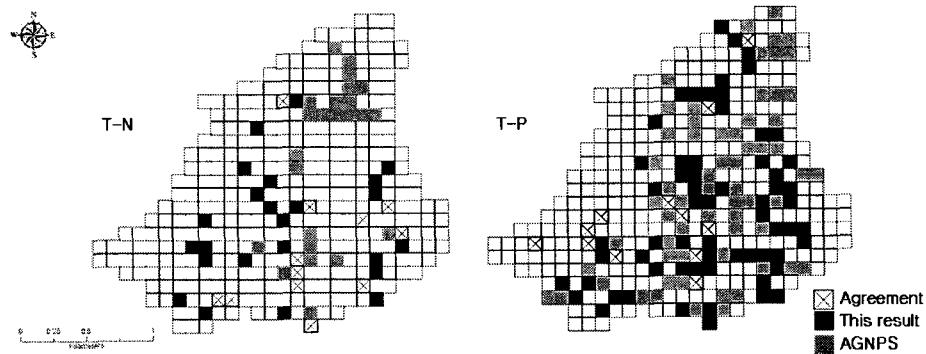


그림 3 본 연구결과와 AGNPS 모의 결과의 관리지역 선정비교.

표 3 본연구와 AGNPS 모의 결과간의 Moran's I.

Item	96-06-17	97-06-25	97-06-30	97-08-03	97-08-04	99-08-02	99-09-20	00-07-22	average
T-N	0.419	0.378	0.398	0.378	0.454	0.444	0.450	0.441	0.420
T-P	0.188	0.161	0.182	0.161	0.153	0.163	0.150	0.219	0.172

## 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 비점원오염 모델들의 실제 가용자료 부족 및 통계학적 모델의 적용이 불가능한 한계점에 대한 방안으로 간단하면서도 명확하게 결과를 제시할 수 있는 방법을 제시하였다. 비점원오염부하에 영향을 미치는 인자들을 조사하고 계층분석적 의사결정방법(AHP)기법을 이용한 비점원오염부하 영향지수를 제시하였으며, 이를 이용하여 유역내 비점원오염에 대한 관리지역을 선정하게 된다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 각 인자간의 상호 중요도를 산출하기 위해 비점원오염 및 수질, 토양 분야의 전문가를 대상으로 AHP 기법을 이용하여 각 인자간의 가중치를 산출하였다. 토양유실량이 가장 높은 중요도를 갖는 것으로 나타났으며, 다음으로 유효강우비, 유달거리, 불투수면적비율, 지면경사 순으로 나타났다.
- 산정된 가중치를 이용하여 단순 부가 가중법에 의하여 격자별 비점원오염 영향지수를 산정하였으며, 이에 의하여 유역내 위치하는 단위구역 중 비점원오염 영향에 대하여 관리가 필요한 지역으로 제시하였다.
- 본 연구에서 제시한 관리지역과 AGNPS에 의한 지역간의 비교에서 T-N의 경우 12개 격자의 일치도를 보였으며, T-P의 경우 T-N에 비하여 낮은 일치도를 보였다. AHP기법에 의한 비점원오염 영향지수 분포와 AGNPS 모형에 의한 비점원오염부하 격자별 분포의 공간적 상관성을 분석한 결과 Moran's I의 값이 T-N의 경우 0.378~0.454, T-P의 경우 0.153~0.219의 범위로 나타나 두 연구방법에 의한 결과는 높은 정적인 상관성을 갖는 것으로 분석되었다.
- 관리지역의 일치도 판별과 Moran's I를 이용한 공간적 상관성 분석 결과, 본 연구에서 제시된 접근방법은 향후 대규모 유역에서의 비점원오염 제어 및 관리를 위한 관리지역 선정에 사용 가능할 것으로 판단된다.

## 감 사 의 글

본 연구는 농림부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임.