

연구논문

## 낙동강 중류 지역의 통합적 유역환경평가 및 유형화 \*

정성관 · 박경훈

경북대학교 조경학과 · 토론토대학교 지리학과  
(2004년 5월 3일 접수, 2004년 6월 10일 승인)

### An Integrated Watershed Environmental Assessment and Classification of the Mid-Nakdong River Region\*

Jung, Sung-Gwan · Park, Kyung-Hun

Department of Landscape Architecture, Kyungpook National University  
Department of Geography Program in Planning, University of Toronto  
(Manuscript received 3 May 2004; accepted 10 June 2004)

#### Abstract

Many of today's environmental problems are regional in scope and their effects overlap and interact. The purpose of this paper is to develop a simple method for an integrated assessment of environmental conditions across the Mid-Nakdong River Region, by combining data on land use, impervious cover, roads, streams, riparian areas, forest patches, population, pollutant loadings, soil erosion and topography. A cluster analysis was used to identify groups of sub-watersheds with similar environmental characteristics. The mean value for each group was used to find watershed that may be more vulnerable to future environmental degradation. Watersheds in cluster I and II had high amount of forest, but the amount of riparian vegetation was low. Watersheds in cluster III, which located in the middle Geumho River and the main course of Nakdong River, had a greater proportion of their agriculture, a greater proportion of agriculture on steep slopes, and less forest adjacent to streams. Watersheds in cluster IV and V were in the most urbanized areas of the region. The principal adverse impacts for watersheds in this group were high scores for urban area, impervious cover, pollutant loadings, population density, forest fragmentation, and low amounts of forest and riparian forest cover.

\* 이 논문은 2003년도 경북대학교 Post-Doc. 연수지원에 의하여 연구되었음.

Notwithstanding the exploratory nature of cluster analysis, it appears to be a useful tool for grouping watersheds with similar environmental characteristics.

Key words : Watershed environment, Cluster analysis, Nakdong River, Landscape ecology, GIS

## I. 서론

오늘날의 환경문제는 복잡한 상호관계와 다중성을 가지는 다양한 압력요인에 의해서 야기되고 있기 때문에, 단편적 또는 사안적 대처가 아닌 통합적 관점에서 해결방안을 모색할 필요성이 있다 (Hunsaker *et al.*, 1990; O'Neil *et al.*, 1997; Wickham *et al.*, 1999). 유역은 통합적 관점에서 환경을 다루고자 할 때 효과적으로 적용가능한 공간범위로 인간활동과 자연환경의 복잡한 상호관계에 의해서 형성된 생태계 영역이라 할 수 있다. 이러한 유역개념은 토지, 산림, 동식물, 수자원 등 자연자원의 관리 및 모니터링, 그리고 인간활동과 자연환경의 상호작용이 환경질에 미치는 영향을 확인·분석·평가하는 통합환경평가에 도입되고 있으며(EEA, 1998), 최근에는 GIS 및 원격탐사기술의 발달로 광역적 공간규모에서도 적용이 가능해지고 있다(Riitters *et al.*, 1995; EPA, 1997; Wickham *et al.*, 1999).

미국, 캐나다, 일본 등은 유역환경평가와 자연자원관리에 관련된 연구를 다양한 분야에서 수행하고 있는데, Zandbergen(1998)은 캐나다 Brunetee 강 유역을 대상으로 불투수성 포장률, 수변식생, 오염부하량, 수질, 어류 및 인간의 건강도 지수 등의 지표로 유역의 도시화에 따른 생태적 위험도를 평가하였다. Wickham *et al.*(1999)은 미국 Mid-Atlantic 지역을 대상으로 토지이용패턴, 수변구역, 산림경관구조, 토양침식, 인구밀도 등의 지표로 유역단위의 경관특성을 분석하였고, Jone *et al.*(2001)은 이러한 경관특성과 하천 수질간의 상호관계를 다중회귀분석으로 규명하였다. APEIS(Asia-Pacific Environmental Innovation

Strategy Project)는 일본 국립환경연구소를 중심으로 아시아-태평양 지역의 환경기술 혁신과 지속 가능한 개발을 위한 국제 간 공동연구로서 유역단위의 농업생산성과 물, 영양물질 그리고 탄소의 순환과정, 침전물 이동 등 다양한 생태적 기능을 시뮬레이션하기 위한 통합유역관리모델을 개발하고 있다. 한편, 국내는 정성관과 박경훈(2000)이 낙동강 중·상류 유역을 대상으로 토지이용, 오염물질 배출부하량, 인구밀도에 관련된 평가지표를 토대로 환경구조를 분석하였고, 조용현(1997)은 하천수질을 비롯한 유역의 토지이용패턴, 지형조건, 수변구역의 상태 등을 종합적으로 고려한 하천자연도 평가방법을 개발하였고, 이창희 등(1999)과 김종원(2000)은 효율적 물관리를 위해서 유역단위의 통합환경관리가 필요하다는 것을 강조하였다.

이상과 같이 미국 등을 중심으로 한 선진국은 자연자원의 효율적 관리와 모니터링, 그리고 다양한 환경문제의 해결방안을 제시하기 위해서 유역환경평가 및 생태계 평가모델에 관한 연구를 활발히 추진하고 있다. 물론, 국내적으로도 환경부를 중심으로 주요 4대강의 물관리종합대책, 오염총량관리제, 그리고 수변구역 지정 및 관리 등 유역관리제도를 활발히 추진하고 있지만, 아직까지 유역단위의 인간활동규모와 자연환경상태를 통합적으로 평가하기 위한 실증적 연구사례는 미흡한 실정이라 판단된다.

본 연구는 문헌조사를 토대로 인간활동을 포함한 자연환경 등의 유역환경을 통합적·정량적으로 평가하기 위한 잠재적 지표를 제시하고, 실증적 사례연구로서 최근 오염총량관리제를 비롯한 수변구역의 지정·관리 등 유역관리제도가 활발

히 추진되고 있는 낙동강 중류 지역을 대상으로 GIS 및 원격탐사기법을 활용하여 데이터베이스의 구축 및 유역환경평가를 실시하고, 최종적으로 서로 유사한 환경특성을 가지는 소유역의 유형화를 통해서 낙동강 유역의 효율적인 관리방안을 모색하고자 한다.

## II. 대상지 및 연구방법

### 1. 대상지 개요

연구대상지는 행정구역상 대구시와 경상북도 영천시, 경산시, 칠곡군 등을 포함하고, 유역면적은 2,577km<sup>2</sup>로 낙동강 유역(23,326km<sup>2</sup>)의 11% 정도에 해당한다. 소유역은 환경부 배수구역도를 기준으로 구분하였다. 소유역 명칭은 Figure 1에

제시되어 있으며, 공간적으로 W01~W19는 금호강 본류 및 그 지류에, 그리고 W20~W24는 금호강 합류후의 낙동강 본류 및 그 지류 유역에 분포하고 있다. 낙동강 중류지역은 1970년대부터 금호강 중·하류를 중심으로 산업화 및 도시화가 급속하게 진행되면서 생활하수, 농업폐수, 산업폐수의 유입이 점차 증가함에 따라 하천생태계가 크게 훼손되었다. 특히, 금호강 하류지역은 대구시에 밀집해 있는 주거지역과 공장 등에서 발생하는 각종 오·폐수의 유입으로 거의 회생불능의 상태로 변하게 되었다. 급기야 1984년 금호강 하류에 위치한 강창교 지점의 생물학적 산소요구량(BOD)은 무려 111mg/l로 전국에서 가장 오염된 강으로 변하여 물고기 폐사사구가 빈번하게 되어 금호강은 그야말로 오염의 대명사로 낙인찍히게 되었다(대구지방환경청, 2000). 정부는 금호강의

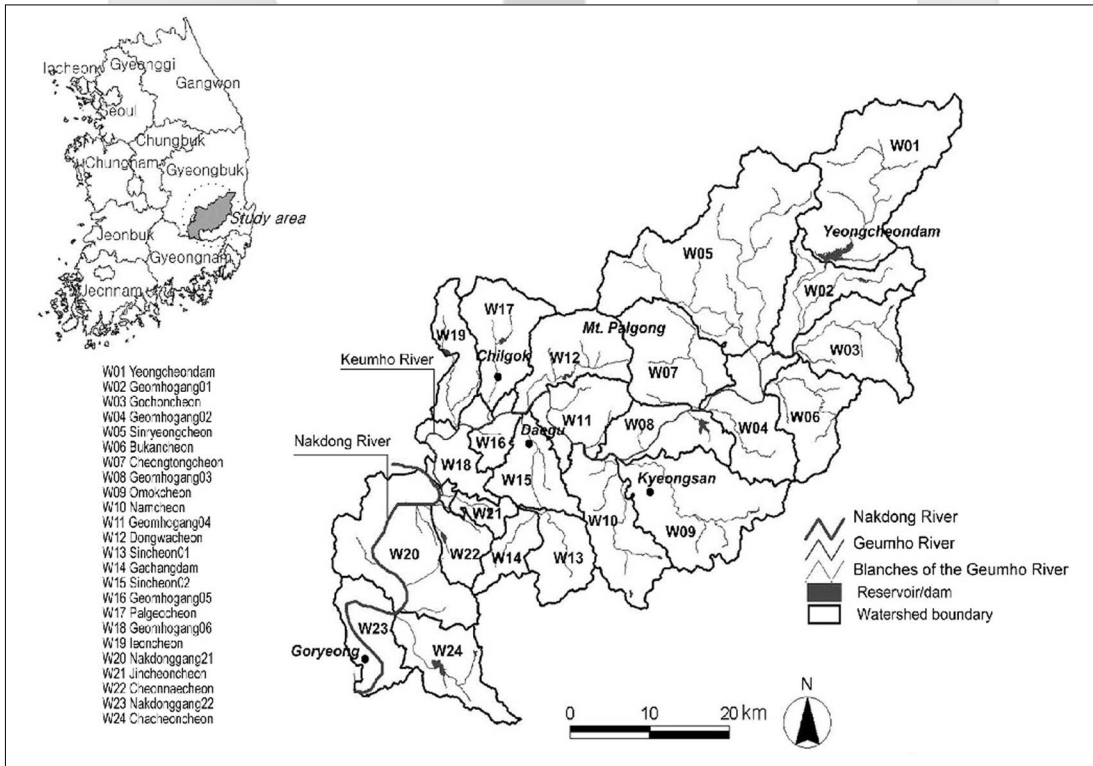


Figure 1. Geographical location of the study area

수질개선을 위해서 대규모 환경기초시설을 설치하는 등 지속적인 투자와 노력을 다하고 있으나, 금호강 합류이후의 낙동강 수질은 지난 10년 동안 수질환경기준 III 등급 이하에 불과한 실정이다(낙동강유역환경청, 2002). 이에, 낙동강을 비롯한 주요 4대강 수계를 중심으로 오염총량관리제도, 수변구역 지정 등 물관리종합대책을 수립하기에 이르렀다. 오염총량관리제는 용수이용 목적에 맞게 목표수질을 설정하고, 해당 수계의 배수구역에서 배출되는 오염부하 총량을 규제하기 위한 유역관리의 일환이라 하겠다. 따라서 오염총량관리제가 실시되고 있는 낙동강 유역은 구간별 목표수질을 달성하기 위해서 최대 오염부하를 가지는 금호강 유역을 중심으로 한 통합적 유역환경관리가 우선적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 2. 지표선정

유역환경을 모니터링하고 평가하기 위한 지표 개발은 다양한 문헌(EPA, 1995, 1997; Walker and Reuter, 1996; Hamblin, 1998; Zandbergen, 1998; Heggem *et al.*, 2000)에서 확인할 수 있다. 미국 환경청은 EMAP(Environmental Monitoring and Assessment Program)라는 프로그램을 통해서 유역 또는 국가적 차원의 생태자원을 모니터링하기 위한 지표를 개발하였다. 지표의 범주는 크게 (1) 유역 온전성(watershed integrity), (2) 경관 안정성(landscape stability)과 복원력(resilience), 그리고 (3) 생물다양성(biodiversity)으로 구분하고 있다(EPA, 1995). 본 연구는 EPA(1995)와 다른 관련문헌(Walker and Reuter, 1996; EPA, 1997; Zandbergen, 1998; Heggem *et al.*, 2000)을 참조하여 Table 1과 같이 낙동강 중류지역의 유역환경 평가에 적용할 27개의 지표를 선정하였다. 지표는 평가목적에 따라 인간활동규모와 자연환경상태로 크게 양분할 수 있는데, 먼저 인간활동규모는 도

시지역 면적률, 농업지역 면적률, 도로 면적률, 불투수성 포장률 등과 같이 인간에 의한 토지이용 정도를 나타내는 지표와 하천에 인접한 수변구역의 토지이용정도, 토양침식위험도, 인구밀도, 농약 및 비료사용량, 그리고 BOD, T-N, T-P의 배출부하량으로 구성되어 있다(Table 1). 자연환경상태는 유역 및 수변구역에 분포하는 산림지역 면적률, 정규식생지수(NDVI)에 의한 식생활력도, 그리고 산림 패취(patch)의 구조적 패턴에 관한 지표로 구성되어 있다. 최근 들어 경관생태학 분야에서는 유역을 구성하는 산림, 하천, 경작지 등 경관요소들의 크기, 수, 형태, 밀도 등의 구조적 패턴이 환경문제에 어떠한 영향을 미치는가를 규명하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(Tinker *et al.*, 1998; Herzog *et al.*, 2001). 본 연구는 McGarigal *et al.*(1995) 등이 개발한 최대패취지수, 패취밀도, 가장자리밀도, 핵심구역 면적률 등의 지표를 사용하였다.

## 3. 데이터베이스 구축

유역환경평가를 위한 데이터베이스는 Table 2에 제시된 공간 및 속성자료를 토대로 구축하였다. 공간자료는 국토지리정보원에 제작한 축척 1:25,000의 수치토지이용도 및 지형도, 농업과학기술원에 제작한 축척 1:25,000의 수치정밀토양도, 그리고 1999년 5월 7일 촬영된 Landsat TM 영상 등으로 대상지의 24개 소유역에 대한 지표별 정보를 생성하기 위해서 활용하였다. 토지이용도(Figure 2a)는 소유역 단위의 토지이용형태별 면적률을 산출하거나, 산림 패취자료를 생성하는데 활용하였다. 산림 패취의 구조적 패턴은 경관분석용 소프트웨어인 FRAGSTATS 2.0으로 분석하였다. DEM(Digital Elevation Model)은 지형분석을 위한 고도 및 경사분포도(Figure 2c, 2d)를 작성하기 위한 것으로 GIS용 소프트웨어인 ArcInfo 8.1 및 ArcView 3.0(ESRI Inc., 1999)을 사용하였다.

Table 1. Description of the potential indicators used in watershed environmental assessment

Category	Indicator	Sources				
		A	B	C	D	E
Human activities	Percentage of watershed with urban land			○	○	○
	Percentage of watershed with impervious cover				○	
	Percentage of watershed with roads		○	○	○	○
	Percentage of watershed with agricultural land		○	○		○
	Percentage of watershed with agricultural land on slopes >7%		○	○		
	Percentage of watershed with potential soil loss <sup>a</sup> > 10ton/ha/yr	○	○	○	○	
	Percentage of agricultural land within 30m of streams			○		
	Percentage of impervious cover within 30m of streams					
	Percentage of roads within 30m of streams			○		
	Population density	○		○		
	Amount of used fertilizer and pesticides (kg/km <sup>2</sup> /yr)				○	
	Discharged BOD loads (kg/km <sup>2</sup> /yr)				○	
	Discharged Total Nitrogen loads (kg/km <sup>2</sup> /yr)				○	○
	Discharged Total Phosphorus loads (kg/km <sup>2</sup> /yr)				○	○
Natural environment conditions	Percentage of watershed with forest		○	○		○
	Percentage of forest within 30m of streams		○	○	○	
	Vegetation greenness (NDVI <sup>b</sup> )			○		
	NDVI on slopes >15%			○		
	Mean slope of watershed (%)	○		○	○	
	Mean elevation of watershed (m)	○		○	○	
	Largest patch index <sup>c</sup>	○		○		○
	Patch density (number/100ha)	○				
	Edge density (m/ha)			○		
	Mean shape index	○				
	Core area percentage of landscape	○		○		
	Interspersion and Juxtaposition Index	○				
Fragmentation index	○		○			

A: EPA(1995), B: Walker and Reuter(1996), C: EPA(1997), D: Zandbergen(1998), E: Heggem *et al.*(2000)

<sup>a</sup> Potential soil loss will be calculated using the RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation) model

<sup>b</sup> NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) is an indicator of surface greenness or vegetation

<sup>c</sup> Complete description of FRAGSTATS metrics are given in McGarigal and Marks(1995).

Table 2. List of spatial and attributive data for watershed environmental assessment

Data	Content	Scale
Land use map	land use types, forest patches	1:25,000
Detailed soil map	soil texture	1:25,000
Topographic map	roads, streams, watershed boundaries	1:25,000
DEM	slope, elevation, slope length	10m cell
Landsat TM imagery	NDVI, Land cover classification	30m cell
Soil loss	estimated using RUSLE Model	10m cell
Precipitation (1990~2001)	Point locations and tables of attributes	-
Population census (2000)	Census data for counties overlapping in extent with watershed	-
Pollutant source survey (2000)	pollutant loading, fertilizer & pesticides	-

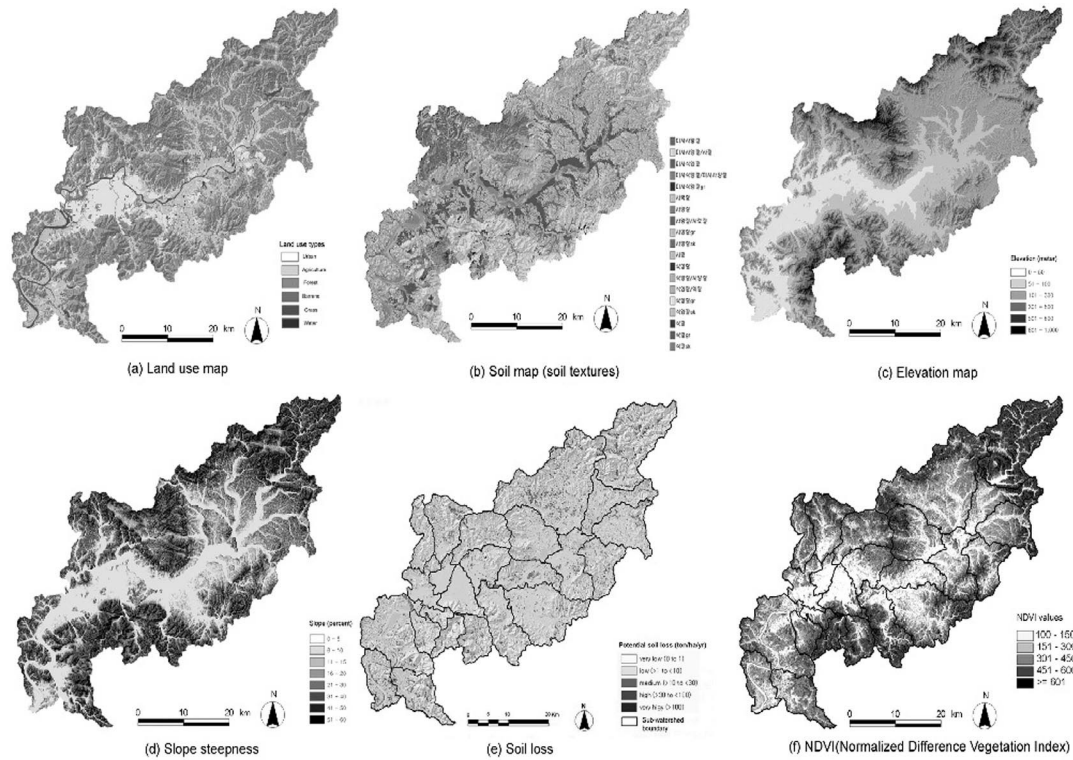


Figure 2. Maps of spatial data for watershed environmental assessment

DEM은 수치지형도에서 10m 간격으로 등고선 레이어를 추출하여 불규칙삼각망(Triangulated Irregular Network)을 생성한 후, 이를 10m 셀 크기의 격자형 자료형태로 변환한 것이다. Landsat TM 영상의 근적외선 밴드와 적색 밴드는 식생 활력도 평가를 위한 NDVI 분포도(Figure 2f)를 작성하는데 활용하였다. 영상자료의 기하보정 등과 같은 전처리과정과 NDVI 산출은 IMAGINE 8.4(ERDAS Inc., 1999)에서 수행하였다. 토양침식 위험도는 Renard *et al.* (1996)의 RUSLE로 산출된 토양유실량(Figure 2e)을 토대로 평가하였다. 토양유실량은 강우침식(R), 토양침식(K), 지형(LS), 식생피복(C), 침식조절(P)의 5개 인자를 이용하며, 각 인자별 주제도는 토지이용도, 정밀 토양도, 경사도, 경사길이 자료를 활용하여 10m 셀 크기로 작성하였다(박경훈, 2003).

오염원현황은 대구지방환경청의 2000년도 조사 자료로 행정구역 및 배수구역 단위로 산출된 하수처리 및 미처리 인구수, 생활하수발생량, 산업 폐수 배출업소수, 가축사육두수 등의 점오염원과 오염물질 배출부하량 등으로 구성되어 있다. 월 평균 강수량은 1990~2001년까지 기상청 및 한국수자원공사의 기상관측소에서 측정한 자료를 수집하여 Microsoft사의 Excel 프로그램을 사용하여 데이터베이스화하였다. 지표별 평가는 소유역 단위에서 실시하였고, 최종적인 평가결과는 Excel 파일로 작성하여 5개 등급으로 구분한 평가지도의 제작과 유형화를 위한 통계분석용 자료로 활용하였다. 유사한 환경특성을 가지는 소유역의 유형화 작업은 SPSS 11.0(SPSS Institute Inc., 2001)의 계층적 군집분석으로 수행하였다. 군집분석은 변수의 측정단위를 고려해야 하는데, 도시

지역 면적률(%), 인구밀도(명/km<sup>2</sup>), 가장자리 밀도(m/10ha) 등과 같이 측정단위가 서로 상이한 경우는 변수들의 변량 크기에 따른 영향력을 제거하기 위한 표준화를 우선적으로 실시할 필요성이 있다. 따라서, 각 변수 개개의 실측치와 평균치와의 편차를 표준편차로 나눈 값인 Z-score로 표준화하여 군집분석을 위한 입력자료로 사용하였다. 군집분석은 Ward법에 의한 군집화와 제곱유클리디언거리(Squared Euclidean distance)에 의한 유형간 유사성 측정법을 선택하였다(노형진, 2001).

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 유역환경평가

낙동강 중류지역의 24개 소유역을 대상으로 인간활동규모 및 자연환경상태(Table 1참조)를 평가한 결과는 Table 3과 같고, 이 결과는 5개 등급으로 구분된 지표별 평가지도(Figure 3)를 작성하는데 활용하였다.

인간활동 관련지표를 평가한 결과에 따르면, 도시지역 면적률(X1, Figure 3a), 불투수성 포장률(X2), 그리고 도로 면적률(X3)과 같은 도시적 토지이용강도와 인구밀도(X10)는 대구시가 위치하고 있는 금호강 하류의 소유역(W11, W15, W16, W18)이 상당히 높게 나타났다. 따라서 생활하수, 공장폐수 등 점오염원을 중심으로 수질관리 및 도시지역의 투수성 포장률 증대를 위한 토지이용 계획 등을 고려해야 할 것으로 판단된다.

농업활동을 위한 토지이용은 논, 밭, 과수원 등의 농업지역 면적률(X4) 지표에 의해서 평가되었는데, 분석결과에 따르면 금호강 중류(W04, W08, W09)와 낙동강 본류(W23, W24)에 분포하는 소유역의 면적률이 30% 이상으로 매우 높게 나타났다(Figure 3b). 그리고 소유역(W04, W09, W23)은 농약 및 비료 사용량(X11)도 연간 16~18ton

/km<sup>2</sup> 이상으로 많이 나타났다. 경사지에 분포하는 농경지 면적률(X5)과 토양유실량 10ton/ha/yr 이상인 지역의 면적률(X6)은 금호강 중류와 낙동강 본류에 분포하는 소유역을 중심으로 높게 나타났다(Figure 3d).

하천 경계에서 30m 이내에 해당하는 수변구역의 토지이용패턴별 구성비(X7, X8, X9)는 Table 3에서 보는 바와 같이 농업지역 면적률이 평균 52% 정도로 가장 높게 나타났다. 더욱이, 도시적 토지이용강도가 높은 금호강 하류 지역을 제외하면, 수변구역의 70% 정도가 농업지역으로 이용되고 있음을 확인할 수 있었다. 이와는 달리, 유역에서 배출되는 각종 오염물질이 하천으로 직접 유입되는 것을 차단하거나, 여과기능을 담당할 수 있는 수변구역의 산림 면적률(X16)은 평균 14% 정도에 불과한 것으로 평가되었다.

유역의 자연성 정도를 나타내는 산림지역은 전체 소유역을 기준으로 평균 60% 정도의 면적률(X15)을 유지하는 것으로 나타났는데, 상위 4개의 소유역(W01, W13, W14, W19)은 77%의 면적률을 가지는 반면에 금호강 중·하류에 분포하는 소유역(W08, W11, W15)은 41% 이하로 상당한 격차를 가지는 것으로 평가되었다. 산림패취의 구조적 패턴은 최대패취지수(X17), 패취밀도(X18)와 가장자리밀도(X19), 평균형태지수(X20), 핵심구역면적률(X21), 그리고 패취들간의 산재도 및 접촉도(X22)를 평가한 결과이며, 이를 종합하여 파편화 지수(X23)를 산출하였다. 파편화 지수는 그 값이 낮을수록 보다 많이 파편화되었음을 나타내도록 설정하였다. 분석결과에 따르면, 산림면적률이 높게 나타난 가창댐유역(W13)과 인접한 신천01유역(W14), 그리고 금호강 상류의 신령천유역(W05) 등은 파편화 정도가 낮고, 낙동강 본류에 분포하는 소유역(W21, W23, W24)과 대구시에 인접한 소유역(W11, W15, W16, W18)은 높은 것으로 평가되었다. 지형적 특성은 산림면적률이 높은 소유역을 중심으로 평균 경사도

Table 3. Indicator values obtained for all watersheds. Bold indicates the top fourth highest values for each indicator

Water-shed	Indicators																										
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27
w01	1.6	0.4	1.1	11.6	7.0	7.8	54.8	14.1	13.0	18	1.4	3.9	1.0	0.1	84.0	27.2	16.0	0.20	24.4	1.9	73.4	60.4	1.6	506	477	49.8	402
w02	4.6	2.0	1.4	26.7	5.0	6.3	73.3	7.9	5.1	60	17.7	8.3	1.9	0.2	63.7	13.4	19.5	0.41	31.4	2.3	49.9	72.4	0.0	386	308	29.7	206
w03	4.3	0.9	0.7	20.5	5.6	6.3	74.2	6.4	3.5	68	6.3	12.5	3.0	0.4	71.6	15.0	30.4	0.39	43.9	2.2	54.1	67.2	1.0	382	302	28.8	181
w04	9.1	4.1	1.3	36.4	5.0	7.1	73.8	13.2	2.4	505	17.1	24.4	6.0	0.9	46.8	6.4	29.0	0.78	49.2	2.2	29.8	60.0	1.0	330	232	19.8	136
w05	3.1	0.9	1.4	24.4	9.3	10.5	68.5	12.1	7.6	83	7.5	11.0	2.3	0.3	69.9	17.7	23.9	0.34	41.5	2.2	53.7	65.1	2.5	385	323	34.8	274
w06	11.5	2.1	1.1	27.5	7.6	9.1	78.4	11.4	2.1	129	6.7	14.4	4.1	0.6	56.0	6.0	18.4	0.81	50.3	2.1	37.9	73.2	1.0	368	281	25.0	170
w07	6.6	1.9	1.1	28.0	3.0	4.0	59.4	19.7	3.9	180	14.8	23.7	5.1	0.8	60.5	9.9	30.3	0.45	42.8	2.2	44.8	67.4	1.0	389	320	29.0	236
w08	17.7	10.7	2.5	39.9	4.3	10.4	75.4	12.2	3.9	839	14.0	54.4	9.7	1.8	32.0	4.9	22.8	0.98	31.0	1.9	21.5	60.1	-1.7	298	178	13.6	102
w09	8.5	3.6	1.3	37.7	3.8	4.4	74.3	13.8	2.8	317	15.9	18.4	5.4	0.7	48.2	8.0	29.4	0.71	42.4	1.9	33.0	61.0	0.8	358	274	24.5	156
w10	14.3	7.8	2.0	15.0	1.7	3.1	45.3	31.8	5.8	511	8.6	35.4	6.9	1.3	66.1	13.5	60.7	0.23	26.7	2.0	55.1	72.4	0.9	438	397	36.5	231
w11	33.5	25.9	4.5	18.6	1.7	5.8	36.0	25.5	7.6	3853	2.7	77.4	21.2	3.9	41.4	12.4	38.3	0.28	25.7	2.3	31.3	58.2	-1.5	338	257	21.5	136
w12	6.6	2.9	1.5	14.4	4.9	5.2	47.5	21.7	12.5	99	3.3	12.5	3.2	0.4	74.3	22.5	30.7	0.44	38.6	2.1	59.3	71.0	1.0	383	336	37.1	328
w13	4.2	1.0	0.4	13.9	7.8	8.8	55.4	19.9	4.0	134	0.3	13.0	2.4	0.3	78.6	18.9	76.1	0.12	27.0	2.3	66.1	79.6	1.6	459	425	41.7	374
w14	1.2	0.1	0.3	3.2	2.6	2.6	33.0	14.0	9.6	28	0.1	3.9	0.8	0.1	93.2	42.9	93.2	0.02	15.4	4.3	83.5	76.3	3.2	516	499	54.0	495
w15	62.3	57.0	11.5	1.5	0.9	1.0	1.2	49.8	22.4	12759	0.2	185.2	58.0	11.4	32.8	4.6	14.8	0.38	13.8	1.6	26.6	47.5	-4.0	390	346	17.8	135
w16	67.9	67.7	12.9	2.2	0.8	1.6	9.6	29.3	20.2	14819	1.7	286.0	141.6	17.2	20.9	0.0	14.3	0.58	12.5	1.8	15.2	58.6	-4.6	295	213	9.0	53
w17	13.2	8.6	3.1	14.0	6.8	9.3	34.4	43.1	15.2	1469	8.0	27.5	8.3	1.5	67.4	12.8	22.9	0.45	32.1	1.8	54.1	80.2	0.1	397	352	33.7	241
w18	37.1	33.8	7.6	14.4	1.6	4.9	32.2	14.6	7.1	3876	8.2	99.8	38.1	4.9	36.0	5.6	9.2	0.46	20.2	1.7	27.2	60.7	-3.3	313	229	15.6	61
w19	3.0	2.3	0.9	14.5	5.6	6.0	76.0	4.9	2.2	58	11.1	6.0	1.7	0.2	77.1	14.3	61.9	0.17	38.0	2.7	60.1	83.9	2.2	378	330	32.4	179
w20	7.4	5.3	1.3	26.9	6.2	8.4	53.9	17.8	6.4	733	13.7	28.7	6.8	1.1	55.4	8.8	20.0	0.21	27.8	2.2	44.3	78.1	-0.1	343	261	25.7	137
w21	26.6	21.8	4.9	11.4	3.4	4.5	23.1	60.0	34.2	8068	5.6	152.0	39.4	7.8	58.5	10.4	55.8	0.58	16.5	1.9	49.1	78.7	-1.8	410	374	32.1	207
w22	5.1	3.5	0.7	16.8	7.6	6.9	46.4	10.5	3.0	230	11.1	22.6	3.8	0.6	72.6	26.8	71.8	0.15	22.0	2.2	61.8	85.3	0.6	392	351	37.1	263
w23	3.4	3.8	0.7	36.2	9.8	14.8	68.3	4.2	3.0	258	16.2	40.0	6.6	1.0	48.9	15.6	16.3	1.00	36.8	1.8	35.0	69.7	-0.9	320	223	22.6	65
w24	4.4	2.7	1.1	31.2	9.5	10.2	62.6	8.9	3.5	106	7.8	17.1	3.1	0.6	58.8	16.4	25.8	0.50	29.6	1.8	46.7	70.5	-0.7	358	285	31.7	210
Mean	14.9	11.3	2.7	20.3	5.1	6.6	52.4	19.5	8.4	2050	8.3	49.1	15.9	2.4	58.9	13.9	34.6	0.4	30.8	2.2	46.4	69.1	0.0	381	316	29.3	207
Min.	1.2	0.1	0.3	1.5	0.8	1.0	1.2	4.2	2.1	18.0	0.1	3.9	0.8	0.1	20.9	0.0	9.2	0.0	12.5	1.7	15.2	47.5	-4.6	295	178	9.0	53
Max.	67.9	67.7	12.9	39.9	9.8	14.8	78.4	60.0	34.2	14819	17.7	286.0	141.6	17.2	93.2	42.9	93.2	1.0	50.3	4.3	83.5	85.3	3.2	516	499	54.0	495

X1 :%urban land, X2 :%impervious cover, X3 :%roads, X4 :%agricultural land on slopes, X5 :%agricultural land on slopes, X6 :%potential soil loss X7 :%agricultural land within riparian, X8 :%impervious cover within riparian, X9 :%roads within riparian, X10 :population density, X11 :fertilizer&pesticides, X12 :BOD loads, X13 :T-N loads, X14 :discharged T-P loads, X15 :%forest, X16 :%forest within riparian, X17 :largest patch index, X18 :patch density, X19 :edge density, X20 :mean shape index, X21 :%core area, X22 :interspersions&juxtaposition Index, X23 :fragmentation index, X24 :NDVI, X25 :NDVI on slopes>15%, X226 :mean slope, X27 :mean elevation

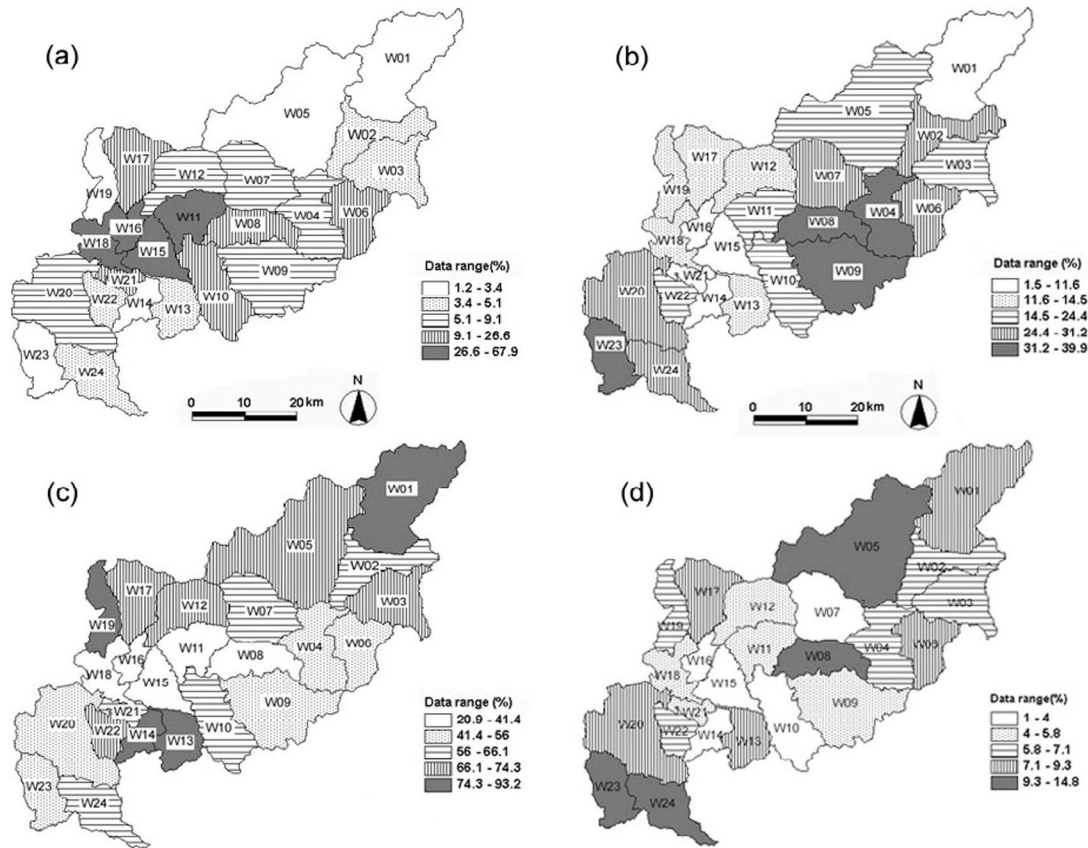


Figure 3. The Maps of watershed environmental assessment (a) percentage of watershed with urban (b) Percentage of watershed with agriculture (c) percentage of watershed with forest (d) Percentage of watershed with potential soil loss<sup>3</sup>>10ton/ha/yr

(X26)가 급하고, 평균 고도(X27)가 높은 것으로 나타났다.

## 2. 유형화 및 유역관리방안

유사한 환경특성을 가지는 소유역의 유형화를 위해서 군집분석을 실시하여 Figure 4와 같이 5개 유형으로 군집화하였다. 제 I유형은 대구시의 중심을 남북방향으로 관통하여 흐르고 있는 신천 상류지역에 분포하는 가창댐유역(W14)이 단독으로 포함되었다. 제 II유형은 금호강 최상류의 영천댐유역(W01), 금호강 중·하류의 소유역(W10,

W12, W13, W17, W19), 그리고 낙동강 본류의 천내천유역(W22)이 포함되었다. 가장 많은 소유역을 포함하는 제 III유형은 금호강 중·상류(W02~W09)와 낙동강 본류(W20, W23, W24) 지역에 폭넓게 분포하였다. 제IV유형은 금호강 하류에 분포하는 금호강 04유역(W11)과 금호강 06유역(W18), 그리고 진천천 유역(W21)으로 나타났다. 마지막으로 제 V유형은 대구시 중심에 위치한 신천 02유역(W15)과 금호강 05유역(W16)이 포함되었다.

유형별 환경특성을 재해석하고, 이에 따른 효율적 유역관리방안을 제시하기 위해서 Table 4와

Table 4. Mean values of indicators by each cluster

Classes	Indicators																										
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27
Class I	1.2	0.1	0.1	3.2	2.6	2.6	33.0	14.0	9.6	28	0.1	3.9	0.8	0.1	93.2	42.9	516	499	54	495	93.2	0.0	15.4	4.3	83.5	76.3	3.2
Class II	6.9	3.8	1.4	14.3	5.9	6.7	51.4	20.9	8.0	359	6.3	17.3	3.9	0.6	74.3	19.4	422	381	38	288	48.6	0.3	29.8	2.2	61.4	76.1	1.1
Class III	7.3	3.5	1.3	30.5	6.3	8.3	69.3	11.6	4.0	298	12.5	23.0	4.9	0.8	55.6	11.1	356	272	25	170	24.2	0.6	38.8	2.1	41.0	67.7	0.4
Class IV	32.4	27.2	5.7	14.8	2.2	5.1	30.4	33.4	16.3	5265	5.5	109.7	32.9	5.5	45.3	9.5	354	287	23	135	34.4	0.4	20.8	2.0	35.9	65.9	-2.2
Class V	65.1	62.4	12.2	1.9	0.9	1.3	5.4	39.6	21.3	13789	1.0	235.6	99.8	14.3	26.9	2.3	342	280	13	94	14.6	0.5	13.2	1.8	20.9	53.1	-4.3

X1:%urban land, X2:%impervious cover, X3:%roads, X4:%agricultural land, X5:%agricultural land on slopes, X6:%potential soil loss X7:%agricultural land within riparian, X8:%impervious cover within riparian, X9:%roads within riparian, X10:population density, X11:fertilizer&pesticides, X12:BOD loads, X13:T-N loads, X14:discharged T-P loads, X15:%forest, X16:%forest within riparian, X17:largest patch index, X18:patch density, X19:edge density, X20:mean shape index, X21:%core area, X22:interspersions&juxtaposition Index, X23:fragmentation index, X24:NDVI, X25:NDVI on slopes>15%, X26:mean slope, X27:mean elevation

같이 각 지표의 유형별 평균값을 산출하였다. 또한, 유형별 환경특성은 평균값의 대·소에 따라 순차적으로 5개 등급으로 구분하였다(Figure 5).

제 I유형은 지역의 대부분이 산림으로 구성(93%)되어 있을 뿐만 아니라, 구조적 안정성 및 양호한 생육상태 그리고 높은 활력도를 유지하고 있는 것으로 평가되었다(Table 4, Figure 1a 참조). 이처럼 전형적인「산지형 구역」의 특성을 가지는 제 I유형은 산림의 다양한 환경생태적 기능을 지속적으로 유지시키기 위한 구역관리정책이 고려되어야 할 것이다. 아울러 산불발생지역, 급경사지의 절개사면 등의 환경민감지역은 산사태와 같은 재해발생을 사전에 예방하기 위한 지속적인 모니터링 및 복원사업이 추진되어야 할 것으로 판단된다.

한편, 수변구역은 논·밭 등의 농경지를 비롯한 도로 등의 불투수성 포장면이 47% 정도를 차지하는 것으로 나타났다. 이처럼 하천에 인접한 수변구역내의 농경지 또는 도로에서 발생하는 각종 오염물질이 하천으로 직접 유입될 경우에는 유역규모에서의 환경압력에 비해 더욱 가중된 영향을 미칠 수 있다. 따라서 현장조사를 토대로 수변구역의 토지이용에 따른 환경오염의 위험성이 높은 지역을 규명하여 수변구역의 개발규제 및 완충수림대 조성 등의 대책이 모색되어야 할 것으로 판단된다.

제 II유형은 산지형 구역의 환경특성과 유사하게 산림 면적률, 구조적 안정성, 식생활력도 등에 관련된 지표들이 4등급으로 높게 나타났고, 동시에 유역 및 수변구역 그리고 급경사지의 농업지역 면적률도 4등급으로 높게 평가되었다. 이에 반해, 도시화 정도를 반영하는 지표들은 낮은 등급을 가지는 것으로 나타나, 제 II유형은「산지·농지 혼합형 구역」의 특성을 가진다고 할 수 있다. 산지·농지 혼합형 구역은 금호강 상류의 영천댐 유역(W01)을 제외하면 대부분이 대구시 외곽에 분포하고 있기 때문에(Figure 4), 시가지확산에

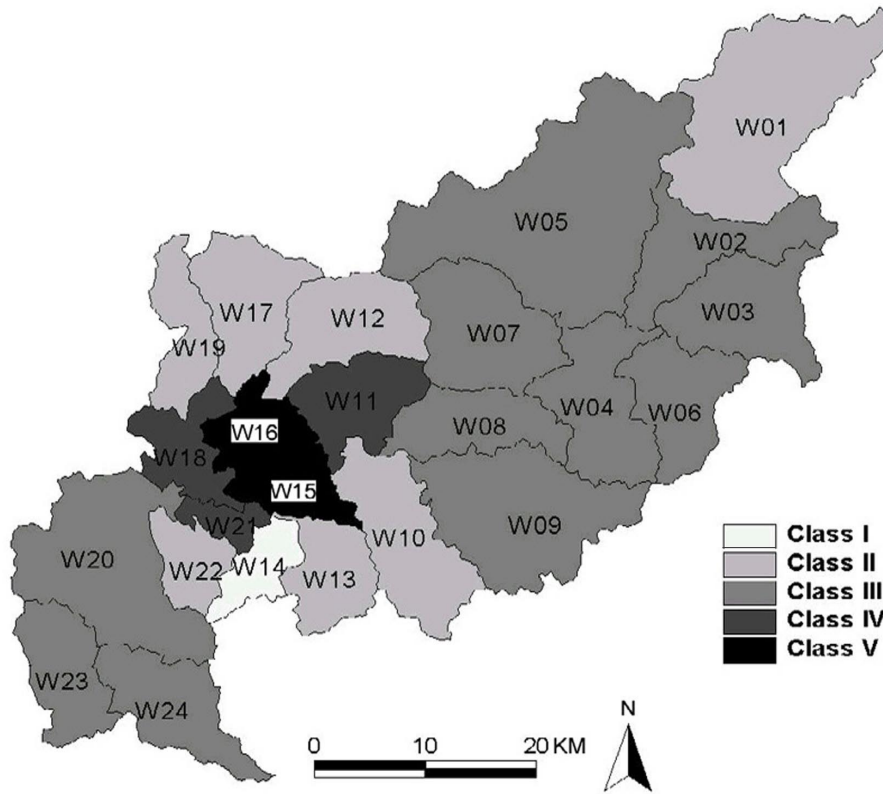


Figure 4. Watershed groups from cluster analysis

따른 개발압력이 가중될 것으로 판단된다. 특히, 대구시에 인접한 경산시와 칠곡군에 위치하고 있는 남천유역(W10)과 팔거천유역(W17)은 농업 및 도시지역 면적률이 14~15% 정도로 제 II유형의 다른 소유역에 비해 상당히 높게 나타났다 (Table 3). 이는 최근 들어 대구시 근교지역을 중심으로 추진되고 있는 대규모 택지조성사업에 기인한 결과라 사료된다.

제 III유형은 농업지역 면적률이 30%로 가장 높고, 그 외 농약 및 비료사용량, 토양유실량 등 농업활동과 관련된 지표들의 평가등급도 다른 유형에 비해 높게 나타나「농지형 유역」으로 구분하였다(Figure 5). 이러한 농지형 유역은 시비, 살충제, 제초제 등과 같은 농업용 화학물질의 과도한 사용과 축산폐수 등이 주된 오염원으로 작용할

가능성이 높고, 토양침식의 위험성도 높은 환경 특성을 가지고 있다. 더욱이, 최근에는 농업생산의 제고를 위한 집약적 영농체제와 점진적으로 증가되고 있는 농업용 화학물질의 사용은 유역생태계의 건전성에 대한 심각한 위협요소로 인식되고 있다. 따라서 농지형 유역은 환경농법에 의한 비점오염원의 저감대책과 함께 토양침식으로 인해 질소나 인산 같은 영양염류와 농약성분이 침식퇴적물에 흡착되어 하천으로 유입되는 것을 사전에 차단하기 위한 유역관리방안을 고려해야 할 것으로 판단된다.

제 IV형은 도시지역의 면적률과 불투수성 면적률, 그리고 인구밀도 등이 산지 또는 농지형 유역들과 뚜렷한 격차를 보이고, 오염물질 배출부하량도 매우 높은 것으로 평가되었다(Table 4). 또

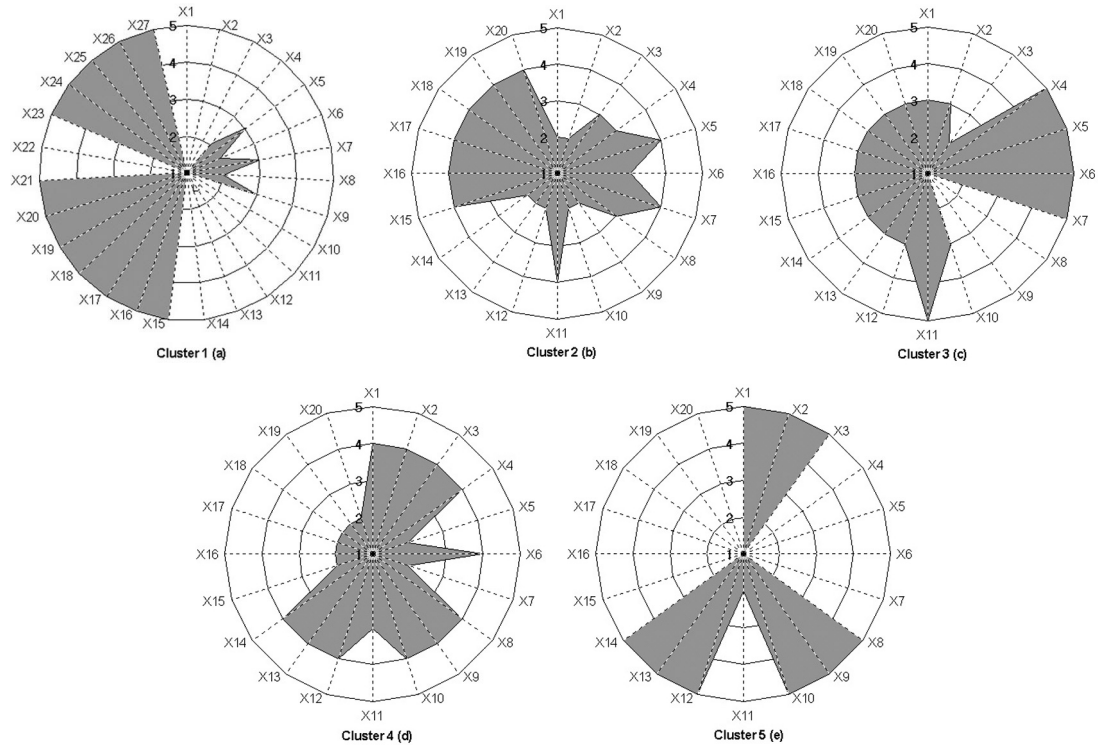


Figure 5. Relative ranking of watershed environmental indicator values

한 농업지역 면적률(X4)도「농지형 유역」다음으로 높다는 점을 고려해 볼 때, 신시가지 조성과 같이 도시화가 진행되고 있는(박인환과 장갑수, 2002) 「준도시형 유역」의 특성을 가진다고 할 수 있다. 특히, 대구시 달서구에 위치하는 금호강06 유역(W18)과 진천천 유역(W21)은 1980년대부터 대규모 산업단지 및 주택단지 조성을 위해 농업지역을 도시지역으로 개발하고 있다. 또한, 이들 소유역은 Figure 4에서 보는 바와 같이 공간적으로 낙동강 본류에 인접하여 분포하고 있기 때문에, 유역에서 배출되는 각종 오염물질은 낙동강 수질에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 생활하수, 산업폐수 등의 점오염원과 광범위한 비점오염원에서 배출되는 각종 오염물질이 금호강으로 유입되는 것을 차단 또는 여과하기 위해서 환경기초시설의 확대설치와 완충수림대 및 습지조성

등의 친환경적 유역관리정책을 고려해야 할 것으로 판단된다.

제 V유형은 유역의 65% 정도가 주거, 상업, 공업 등의 도시지역으로 개발한 상태이며, 인구밀도도 다른 유형의 소유역과 비교하여 현격한 차이를 보이고 있기 때문에, 「도시밀집형 유역」의 환경특성을 가졌다고 볼 수 있다. 이러한 도시밀집형 유역은 생활하수와 산업폐수 등과 같은 점오염원에서 배출되는 오염물질을 최소화하기 위한 노력이 우선적으로 요구된다고 하겠다. 또한, 콘크리트 등의 불투수성 포장면(63%)은 집중호우시 표면유출량을 급격히 증가시켜 하천 범람의 주된 요인이 될 뿐만 아니라, 지표면에 집적된 각종 오염물질이 강우 유출수와 함께 하천으로 유입되면서 하천생태계에 부정적 영향을 미치게 된다. 따라서, 도시밀집형은 투수성 확보를 위해서

도심지내의 대형노상주차장, 건물옥상, 차도 및 보도 등의 공간에 투수성 포장재를 적극적으로 사용할 필요성이 있으며, 동시에 강우유출을 줄이기 위한 옥상녹화, 벽면녹화, 자투리 공간의 도시텃밭 조성 등의 녹지정책이 적극적으로 추진되어야 할 것으로 판단된다. 이러한 방안들을 유역 관리에 실제 적용하기 위해서는 도시계획의 수립 단계에서부터 장기적인 안목을 가지고 추진해야 하고, 불투수성 포장률을 줄이기 위한 인센티브 제도의 도입, 지구단위계획에서의 계획지표로서 불투수성 포장률의 한계설정 등의 제도적 장치도 마련해야 할 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

오늘날의 많은 환경문제가 광역적 차원에서 다양한 요인들에 의해서 발생됨에 따라, 자연생태계의 물순환 원리를 고려한 유역단위의 통합환경평가 및 관리방안의 중요성이 강조되고 있다. 이러한 관점에서 본 연구는 낙동강 중류지역을 대상으로 유역환경평가를 위한 지표개발 및 적용, 그리고 평가결과를 토대로 유형화 및 유역관리방안을 제시하였다. 평가지표는 인간활동규모와 자연환경상태를 파악할 수 있도록 토지이용패턴, 산림경관구조, 식생활력도, 토양침식위험도, 오염물질 배출부하량, 지형조건 등을 선정하였고, 대상지 전체에 대한 데이터베이스는 GIS 및 원격탐사기법을 활용하여 구축하였다. 유역환경평가는 낙동강 중류지역의 24개 소유역을 대상으로 이루어졌으며, 분석결과에 따르면 도시화 정도를 반영하는 도시지역 면적률, 불투수성 포장률 등은 금호강 하류에 분포하는 소유역을 중심으로 높게 나타났고, 이들 지역은 오염물질 배출부하량도 상당히 높은 것으로 평가되었다. 농업지역 면적률, 농약 및 비료사용량 등 농업활동규모와 토양침식의 잠재적 위험도는 금호강 중류와 낙동강 분류에 분포하는 소유역을 중심으로 높게 평가되

었다. 수변구역은 금호강 하류의 소유역을 제외하면 50% 이상이 농업지역으로 구성되어 있고, 유역규모에서 배출되는 오염물질의 차단 또는 여과기능을 담당할 수 있는 수변식생 면적률은 평균 14% 정도에 불과한 것으로 평가되었다. 그리고 유역의 자연성 정도를 나타내는 산림 면적률은 평균 60% 정도로 양호한 수준을 보였으나, 금호강 중·하류에 분포하는 소유역은 41% 이하로 낮고 구조적으로도 파편화 양상이 두드러진 것으로 평가되었다.

유사한 환경특성을 가지는 소유역의 유형화는 군집분석에 의해서 효과적으로 수행할 수 있었다. 분석결과를 요약하면, 제 I, II유형은 산림 면적률이 74% 이상으로 인간활동에 따른 환경압력이 미미한 상태이므로, 현존하는 산림의 환경생태적 기능을 지속적으로 유지하기 위한 노력이 중점적으로 요구된다고 하겠다. 이와 함께, 경사지에 분포하는 농업지역에서의 토양침식방지, 수변구역의 관리, 그리고 대도시에 인접한 산림지역의 난개발 방지 및 유역규모에서의 환경용량을 고려한 토지이용계획수립이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

제 III유형은 농업활동이 가장 활발한 유역으로 토양침식과 과도한 농약 및 비료사용에 따른 환경오염이 우려되기 때문에 환경농법의 확대적용과 토양침식의 발생위험도가 높은 지역을 중심으로 오염물질이 침식퇴적물에 흡착되어 하천으로 유입되는 것을 예방하기 위한 방안이 요구된다고 하겠다. 제 IV, V유형은 유역의 32% 이상이 도시지역으로 개발된 상태이며, 현재에도 도시외곽의 농업지역을 중심으로 신시가지 조성 등의 개발사업이 지속적으로 이루어지고 있어, 도시 및 농업지역에서의 오염원 관리를 동시에 추진할 필요성이 있을 것으로 판단된다. 또한 도시지역에서 배출되는 오염물질에 대한 유역생태계의 자연적 정화능력과 원활한 물순환기능의 회복을 위해서, 도심지내의 투수성 포장면 확대, 건물 옥상이나

벽면 등의 녹화사업을 통한 도시녹지를 증진 등과 같은 도시환경계획이 적극적으로 추진되어야 할 것으로 판단된다.

이상의 연구결과는 낙동강 유역의 오염총량관리계획에서 제시하고 있는 각 하천의 구간별 목표수질을 달성하고, 이를 지속적으로 유지하기 위한 유역관리계획에 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다. 특히 오염총량관리제의 최소 단위인 소유역 규모에서의 환경평가와 이를 토대로 한 유형화는 하천 수질 및 유역환경의 건전성에 부정적 영향을 미칠 수 있는 압력요인을 효과적으로 규명함과 동시에 유형별 또는 소유역별 중점관리목표와 기본방향을 설정하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 향후에는 유역단위의 환경특성이 하천 생태계의 질에 어떠한 영향을 미치는가를 정량적으로 평가·예측하기 위한 모델 개발이 이루어져야 할 것이며, 이를 위해서 유역 규모에서의 증발산량, 토양수분 등 수문학적 구성요소에 대한 시간적, 공간적 변화패턴을 파악하기 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 사사

본 연구는 삼성물산(건설부문)에서 경북대학교에 지원한 발전기금에 의한 연구비로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드리며, 귀사의 무궁한 발전을 기원합니다.

## 참고문헌

김종원, 2000, 하천유역별 통합 물관리체계 연구, 국토연구원 연구보고서.  
 낙동강유역환경청, 2002, 낙동강유역 환경지도: 물관리 부문 중심으로.  
 노형진, 2001, 한글 SPSS 10.0에 의한 조사방법 및 통계분석, 형설출판사.  
 대구지방환경청, 2000, 금호강의 어제와 오늘 그

리고 미래.

박경훈, 2003, GIS 및 RUSLE 기법을 활용한 금호강 유역의 토양침식위험도 평가, 한국지리정보학회지, 6(4), 24-36.  
 박인환, 장갑수, 2002, 대도시 주변지역의 토지이용변화: 대구광역시를 중심으로, 한국조경학회지, 30(1), 1-10.  
 이창희, 이병국, 최지용, 김은정, 1999, 물자원의 효율적 이용을 위한 유역관리방안: 낙동강 수계관리를 중심으로, 한국환경정책·평가연구원 연구보고서.  
 정성관, 박경훈, 2000, 지리정보시스템을 이용한 낙동강 유역권의 광역환경분석, 한국지리정보학회지, 3(1), 12-22.  
 조용현, 1997, 생태적 복원을 위한 중소하천 자연도 평가방법 개발, 서울대학교 환경대학원 박사학위청구논문.  
 Environmental Protection Agency(EPA), 1995, Mid-Atlantic landscape indicators project plan, Environmental Monitoring Assessment Program, EPA/620/R-95/003.  
 Environmental Protection Agency(EPA), 1997, An ecological assessment of the United States Mid-Atlantic Region: A landscape atlas, EPA/600/R-97/130.  
 European Environment Agency(EEA), 1998, Computer-based models in integrated environmental assessment, 300/SER/9600182.  
 Hamblin, A., 1998, Environmental indicators for national state of the environment reporting: The Land. Australia: State of the Environment.  
 Heggem, D.T., Edmonds, C.M., Neale, A.C., Bice, L. and Jones, K.B., 2000, A landscape ecology assessment of the Tensas River basin, Environmental Monitoring and Assessment, 64, 42-54.

- Herzog, F., Lausch, A., Müller, E., Thulke, H.E., Steinhardt, U. and Lehmann, S., 2001, Landscape metrics for assessment of landscape destruction and rehabilitation, *Environmental Management*, 27(1), 91-107.
- Hunsaker, C.T., Graham, R.L., Suter, G.W., O'Neill, R.V., Barnhouse, L.W. and Gardner, R.H., 1990, Assessing ecological risk on a regional scale, *Environmental Management*, 14(3), 325-332.
- Jone, K.B., Neale, A.C., Nash, M.S., Remortel, R.D.V., Wickham, J.D., Riitters, K.H. and O'Neill, R.V., 2001, Predicting nutrient and sediment loadings to streams from landscape metrics: A multiple watershed study from United States Mid-Atlantic Region, *Landscape Ecology*, 16, 301-312.
- McGarigal, K. and Marks, B.J., 1995, FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure, USDA Forest Service, General technical report PNW-GTR-351, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon.
- O'Neil, R.V., Hunsaker, C.T., Jones, K.B., Riitters, K.H., Wickham, J.D., Schwarz, P.M., Goodman, I.A., Jackson, B.L. and Baillargeon, W.S., 1997, Monitoring environmental quality at the landscape scale, *Bioscience*, 47(3), 513-519.
- Rattan, L., 2000, Integrated watershed management in the global ecosystem, CRC Press, Washington, D.C.
- Reimold, R.J., 1998, Watershed management, McGraw-Hill.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. and Yoder, D.C., 1996, Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE), USAD Agriculture Handbook Number 703.
- Riitters, K.H., O'Neil, R.V., Hunsacker, C.L., Wickham, J.D., Yankee, D.H., Timmins, S.P., Jones, K.B. and Jackson, B.L., 1995, A factor analysis of landscape pattern and structure metrics, *Landscape Ecology*, 10(1), 23-29.
- Tinker, D.B., Resor, C.A.C., Beauvais, G.P., Kipfmueller, K.F., Fernandes, C.I. and Baker, W.L., 1998, Watershed analysis of forest fragmentation by clearcuts and roads in a Wyoming forest, *Landscape Ecology*, 13, 149-165.
- Walker, J. and Reuter, D.G., 1996, Indicators of catchment health: A technical perspective, CSIRO Publishing, Melbourne, Australia.
- Wickham, J.D., K.B., O'Neill, R.V., Tankersley, R.D. and Smith, E.R., 1999, An integrated environmental assessment of the US Mid-Atlantic region, *Environmental Management*, 24(4), 553-560.
- Zandbergen, P.A., 1998, Urban watershed ecological risk assessment using GIS: a case study of the Brunette River watershed in British Columbia, Canada, *Journal of Hazardous Materials*, 61, 163-173.