FRAGSTATS 모델을 이용한 갑천 유역의 불투수면 변화에 따른 경관 구조 분석

Analysis of Landscape Structure on the Impervious Cover of the Gap-Stream Watershed using FRAGSTATS

최진영* · 강문성**† · 배승종*** · 김학관*** · 정세웅****

Choi, Jin Young · Kang, Moon Seong · Bae, Seung Jong · Kim, Hak Kwan · Chung, Se Woong

ABSTRACT

An impervious cover in the watershed management has been used as effective indicators. It is a very useful barometer to measure the impacts of watershed development on aquatic systems. Hence, it is necessary to survey the impervious cover of a watershed and to develop an impervious cover model (ICM) for supporting best management practices. The main objectives of this study were to investigate the spatial patterns of the impervious cover, to calculate landscape indices using FRAGSTATS, and to develop an ICM in the Gap-stream watershed and its six sub-watersheds. The results showed that the impervious cover of the Gap-stream watershed increased from 4.9 % in 1975 to more than 11.2 % in 2000, the number of impervious cover fragments increased from 662 to 3,578, and the landscape shape index increased from 27.0796 to 91.1982. Fragmentation was severe within the Yudeungcheon downstream and the Gapcheon downstream of six sub-watersheds. This paper presented the results derived landscape indices to define landscape patterns and structure for the Gap-stream watershed. Our results indicate that altered land use might be influenced changes in landscape structure.

Keywords: FRAGSTATS; Gap-stream; impervious cover; landscape structure

1. 서 론

불투수면은 도시개발, 토지이용변화 등에 의한 하천환경의 변화를 설명하는 데 있어서 유용한 지표로 인식되어져 왔다. 불투수면은 일반적으로 도시화 과정에서 형성된 도로, 주차장, 보도, 건물 지붕 등을 포함하는 면으로서 물이 잘 침투하지 않는 면으로 정의된다 (Han River Watershed Management Committee, 2007a; Schueler, 1994). 빗물은 유역에 강하하여 일부는 지표유출로 하천에 도달하고 일부는 토양, 웅덩이, 식생 등에 저류되어 다시 지하수를 거쳐 하천으로 유입되거나 증발하여 빗물로 떨어지는 순환을 반복한다. 그러나 도시화가 진행되면서 아스팔트 도로와 포장도로가 증가함에 따라 지표면에 내린 강

우가 토양 등을 통해 지하수로 저장되지 않고 지표면으로 유출되는 양이 증가하였다. 이로 인해 도시하천은 건천화 현상을 보이고 침수피해는 늘어가는 등 물순환에 장애가 발생하게 되었다 (Choi and Jang, 2003; Han River Watershed Management Committee, 2007a). 따라서 불투수면의 증가는 유역의 물순환에 많은 영향을 주는 인자로 평가되며, 유역 전체면적 중 불투수면 면적이 차지하는 비율을 지표 모델로 개발하여 유역의 특성에 맞는 관리전략을 수립하는 연구가 필요하다.

최근에는 공간정보 분석 기술이 발달함에 따라 유역 내 불투수면을 보다 쉽고 빠르게 확인할 수 있게 되었고, 유역관리에 대한 관심이 높아지면서 불투수면과 유출특성, 생태계, 물환경과의 상호관계 해석 등에 관한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 특히, Galli (1991)와 Schueler (1994) 이후 많은 유역 연구에서 토지피복 변화에 의한 유출량 변화, 투수면과 불투수면의 증가에 의한 생태계, 수온, 수질변화 등이 주를 이루고 있다 (Jang, 2008). Jung et al. (2002)은 토지이용변화에 따른 경산시의 경관 구조 분석을 통해 대규모의 면적을 차지하던 산림 주변에서의 인위적인 개발이나 농경지 개간으로 경관조각이 파편화 (Fragmentation)된 것으로 나타났고, 산림 주변의 파복형태 변화에 따라 산림생태계에 영향을 주었다고 보고하였다. 국외에서도 Johnson and Patil (2006)은 건전한 유역생태

* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부

** 서울대학교 조경·지역시스템공학부, 농업생명과학연구원 겸임연구원

*** 서울대학교 농업생명과학연구원

**** 충북대학교 환경공학과

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4582

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

2010년 5월 4일 투고

2010년 5월 31일 심사완료

2010년 7월 12일 게재확정

Table 1 Analysis of landscape indices for FRAGSTATS (FRAGSTATS Manual, 1995)¹⁾

Metrics	Index	Description	Unit
Area/density/edge	LPI (Largest Patch Index)	Area of the largest patch in each class, expressed as a percentage of total landscape area	%
	NP (Number of Patches)	Total number of patches in a class	None
	PD (Patch Density)	Number of patches per unit area	No./100ha
	TE (Total Edge)	Sum of length of all edge segments for the class	m
	ED (Edge Density)	Sum of length of all edge segments for the class, divided by total landscape area	m/ha
Patch shape	LSI (Landscape Shape Index)	Average complexity of patch shape for a class	None
Core area	CPLAND (Core Area Percentage of Landscape)	Sum of the core areas of each patch of the corresponding patch type, divided by total landscape area, multiplied by 100	%

계를 확보하기 위해 유역 내에 분포하는 토지이용 패턴 및 수변구역의 위치와 너비에 따른 수질변화 정도 등을 분석하는 등 경관 지수를 이용한 경관 구조 분석 및 산림파편화 관련 연구들이 다양하게 진행되고 있다.

오랜 기간 동안 자연스럽게 배치된 경관의 공간적인 요소는 인구 증가와 토지이용의 변화로 인해 구조적으로 많이 변화되고 있지만 오늘날 토지피복변화로 인해 발생하는 유역생태계 변화 분석 등은 시·공간적 제약으로 인해 명확하게 이루어지지 못하고 있다. 따라서 유역을 기본단위로 하여 인간활동에 의해 토지이용의 파편화가 어느 정도 발생하고 있는가를 파악하는 것이 중요하다. 이를 토대로 파편화에 따른 영향을 최소화하거나 사전에 예방할 수 있는 대책을 수립하고, 원상태로 복원할 수 있는 방안을 제시할 수 있을 것이다 (Heo et al., 2007).

본 연구의 목적은 갑천 유역에서의 불투수면 변화에 따른 경관구조를 분석하기 위하여, 1) 갑천 유역의 25년간 5년 주기 시계열 불투수면 변화를 조사 분석하고, 2) 경관분석 프로그램인 FRAGSTATS를 이용하여 대상유역의 과거 토지이용 변화에 따른 경관 지수를 산정하여 분석하며, 3) 불투수면 변화, 수질, 경관지수에 따른 불투수면 지표 모델 (Impervious Cover Model, ICM)을 평가함으로써, 향후 도시개발사업 계획 수립 시 경관 생태적 영향을 고려한 토지이용 관리방안을 모색하는 데 기초자료를 제공하는 데 있다.

II. 연구 방법

1. 대상유역

본 연구에서는 불투수면 변화에 따른 경관 구조 분석을 위한 대상유역으로 금강유역의 중류에 해당되는 갑천 (甲川) 유역을 선정하였다. 갑천 유역은 지난 30여 년간 유역의 토지피복변화가 많이 진행되어 불투수면 변화가 극심할 것으로 예상되는 유역이다. 대상유역은 유역면적이 648.98 km²이고, 금강본류인

대청댐 상류유역과 접해있으며, 총 유로연장은 62.8 km이며 그중에서 직할하천 구간은 35.6 km이다. 갑천 유역은 수자원 단위권역의 대권역인 금강권역의 중권역 32개 권역 중 1개 권역이며, 수자원 단위권역은 ① 갑천 상류, ② 갑천 하류, ③ 유성수위표, ④ 유등천 상류, ⑤ 유등천 하류, ⑥ 대전천, 6개 권역으로 구성되어 있다.

2. 경관 지수 선정

FRAGSTATS는 McGarigal and Marks (1995)가 개발한 경관 구조 해석프로그램으로 경관 구조에 관한 많은 지표산출 (매트릭스 형식)과 지표의 해석으로부터 경관의 정량적 평가가 가능하며, 주어진 공간 내에서 조각들의 지역적인 범위와 공간적인 구성을 정량적인 수치자료로 제공한다. 이 프로그램은 분석하려는 경관의 규모에 제한이 없기 때문에 원하는 해상도에 대한 분석이 가능하다 (Heo et al., 2007; MOST, 2003). FRAGSTATS에서 계산되는 지수들은 많고 복잡하므로 분석 효율을 높이기 위해서는 지표의 선정 시 신중한 선택이 요구된다.

본 연구에서는 같은 피복유형을 갖는 패치 전체를 의미하는 클래스 (class) 수준의 분석을 수행하였다. 패치 (patch) 수준 지수는 개별적 조각에 대해 지수를 산출하고 경관 (landscape) 수준 지수는 토지유형에 상관없이 유역내 모든 토지피복에 대한 경관 지수를 산출하기 때문에 (Jang, 2008), 본 연구와 같이 불투수면에 대한 경관 지수 산출에는 적합하지 않다. 클래스 수준 지수는 면적/밀도, 가장자리, 모양, 중심지, 고립/접근, 대조, 접촉/산포, 연결성 등으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 Johnson and Patil (2006) 등의 연구를 참고하여 파편화, 경관의 비구조적 변화 등을 잘 나타낼 수 있는 경관 지수 16개 항목을 선정한 후, 피어슨 상관분석 (pearson correlation

¹⁾ Landscape indices were chosen by reference to the Johnson and Patil (2006)

analysis)을 통하여 최종적으로 7개의 경관지수를 선정하였다. 갑천 유역에 대해 1975년부터 2000년까지 토지이용변화에 따른 파편화 정도를 정량적으로 분석하기 위해서, 본 연구에서는 면적, 밀도, 가장자리, 형태, 핵심구역 등을 고려할 수 있는 LPI (Largest Patch Index), NP (Number of Patches), PD (Patch Density), TE (Total Edge), ED (Edge Density), LSI (Landscape Shape Index), 그리고 CPLAND (Core Area Percentage of Landscape) 등의 7개 주요 지표를 선정하였다. Table 1은 본 연구에서 선정된 주요 경관지수의 특성을 나타내고 있다.

3. 토지피복분류

FRAGSTATS 모델을 이용하여 경관 구조를 평가하기 위해서는 경관 요소로서 토지피복 또는 토지이용의 선정 및 분류가 선행되어야 한다. 이를 위해 국가수자원관리정보시스템 (WAMIS)에서 제공하는 8개 항목 (수역, 시가지지역, 나지, 습지, 초지, 산림, 농경지, 밭)으로 분류된 갑천 유역의 1975년~2000년 토지피복도를 이용하였다. 불투수면 비율 변화에 따른 경관 지수의 시계열 변화를 분석하기 위해서 토지피복을 불투수면과 투수면으로 재분류하였다. 본 연구에서는 불투수면을 시가지지역으로, 투수면을 수역과 시가지지역을 제외한 6개 토지피복을 분류하였으며, 수역은 수역으로 구분하였다 (Geum River Environment Research Center, 2009).

4. 불투수면 모델 (ICM)

유역관리에서 불투수면을 지표로 한 연구는 1990년대부터 활발하게 이루어졌다. 이후 불투수면과 하천질 지표 사이에 강한 상관관계가 있음이 과학적으로 규명되기 시작하였고, 관련 연구들을 통합하여 불투수면 모델 (Impervious Cover Model, 이하 ICM)이 개발되었다 (CWP, 1998). Fig. 1과 같이, ICM

Fig. 1 Impervious cover model (CWP, 2003)

은 불투수면의 비율에 따라 수환경의 상태를 구분함으로써 개략적인 하천상태를 평가할 수 있다. ICM에서는 유역의 불투수면 비율이 10 %를 초과하면 하천상태가 악화되기 시작하며, 25 %를 넘으면 심각한 악화가 예상되는 것으로 평가되어진다. 불투수면 모델은 많은 지역의 유역계획, 하천 분류, 토지이용 규제에 큰 영향을 끼쳤고 유역환경관리에 널리 적용되고 있다. 하지만 모델에서 제시하고 있는 10 %, 25 %라는 임계수치가 불투수면과 하천질 지표간의 통계적 편차로 인해 정확한 구분점이 아니라 그 범위의 불투수면 비율에서의 일반적인 변화를 반영한 값이라는 점을 인식해야 한다 (Choi and Jang, 2003). 본 연구에서는 유역에서의 불투수면 비율 증가에 따른 생물종 다양성, 수질 영향 관계를 불투수면 모델을 통해 고찰해보고자 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 갑천 유역의 불투수면 변화

WAMIS에서 제공하는 8개 항목으로 분류된 Landsat 토지피복도를 이용하여 1975년에서 2000년까지의 토지피복변화를 분석하였다. 이중 수역, 시가지지역을 제외한 6개 토지피복을 투수면으로, 시가지지역을 불투수면으로, 수역은 수역으로 구분하였다. Fig. 2와 Table 2는 각각 갑천 유역의 토지피복변화 결과를 보여주고 있다. Fig. 2에서와 같이, 대상유역의 불투수면은 점점 증가하는 경향을, 투수면은 점점 감소하는 경향을 나타내고 있다. Table 2에서와 같이, 갑천 유역의 시가지지역은 1975년 31.92 km²에서 2000년 72.64 km²로 2배 이상 증가하였다. 농경지는 점차 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였으며 산림은 69.1 %에서 60.5 %로 감소하여 산림지역이 대부분 시가지지역으로 전환되었음을 알 수 있었다. 갑천 유역은 대전광역시, 충청남도, 충청북도, 전라북도 등 4개의 행정구역에 걸쳐서 대전광역시의 5개 구, 충청남도 3개시 2개 군, 충청

Fig. 2 The impervious, pervious cover area of the Gap-stream watershed by wamis in 1975~2000

남도 3개시 2개 군, 충청북도는 옥천군 등 1개 군, 전라북도는 완주군 등 1개 군에 걸쳐있고, 그 중 대전광역시 유성구가 22.08 %로 가장 많은 면적을 차지하고 있다. 대전광역시의 경우 1998년에 정부대전청사 (통계청·조달청을 비롯한 10개의 정부기관이 이전)가 개통됨으로써 대전이 행정도시로 자리하게 되는 등 각종 도시개발이 분지 안에 집중적으로 이루어졌고, 갑천을 따라 배후지역으로 확산되면서 도시화가 진행된 것으로 조사되었다 (Daejeon Metropolitan City).

Table 3은 갑천 유역의 표준유역별 불투수면 면적 변화를 나타내고 있다. Table 3에서와 같이, 갑천 상류, 갑천 하류, 그리고 유등천 하류 등에서 인위적인 개발과 토지이용 변화가

Table 2 Changes of land cover in the Gap-stream watershed in 1975~2000 (unit: km²)

Classification	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Water	1.41 (0.2%)	0.77 (0.1%)	7.43 (1.1%)	6.90 (1.1%)	7.22 (1.1%)	6.96 (1.1%)
Urban	31.92 (4.9%)	37.14 (5.7%)	39.59 (6.1%)	56.63 (8.7%)	66.19 (10.2%)	72.64 (11.2%)
Barren	13.25 (2.0%)	23.42 (3.6%)	16.24 (2.5%)	17.67 (2.7%)	15.44 (2.4%)	7.55 (1.2%)
Wetland	3.58 (0.6%)	1.07 (0.2%)	0.02 (0.0%)	0.00 (0.0%)	0.39 (0.1%)	0.01 (0.0%)
Pasture	17.46 (2.7%)	14.06 (2.2%)	11.98 (1.8%)	35.71 (5.5%)	20.70 (3.2%)	25.07 (3.9%)
Forest	448.67 (69.1%)	451.24 (69.5%)	438.39 (67.6%)	407.14 (62.7%)	401.81 (61.9%)	392.90 (60.5%)
Paddy	132.69 (20.4%)	121.28 (18.7%)	124.42 (19.2%)	67.43 (10.4%)	88.10 (13.6%)	110.05 (17.0%)
Upland	0.00 (0.0%)	0.00 (0.0%)	10.91 (1.7%)	57.50 (8.9%)	49.13 (7.6%)	33.80 (5.2%)
Total	648.98	648.98	648.98	648.98	648.98	648.98

Table 3 Impervious cover areas, ratios of Gap-stream subwatersheds in 1975~2000 (unit: km²)

Classification	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Gapcheon upstream	0.52 (0.33%)	1.18 (0.76%)	0.82 (0.52%)	1.05 (0.67%)	2.89 (1.85%)	5.99 (3.82%)
Gapcheon downstream	4.11 (3.83%)	6.21 (5.79%)	5.82 (5.42%)	11.13 (10.38%)	15.92 (14.84%)	17.69 (16.49%)
Yuseong watermark	2.92 (3.11%)	2.64 (2.8%)	1.81 (1.92%)	4.94 (5.25%)	3.54 (3.76%)	6.43 (6.83%)
Yudeungcheon upstream	0.18 (0.12%)	0.23 (0.16%)	1.29 (0.91%)	1.98 (1.40%)	1.46 (1.03%)	1.40 (0.99%)
Yudeungcheon downstream	12.88 (21.76%)	11.61 (19.6%)	18.88 (23.43%)	20.75 (35.05%)	22.28 (37.63%)	20.10 (33.95%)
Daejeoncheon	11.37 (12.72%)	13.94 (15.6%)	17.15 (19.20%)	19.66 (22.01%)	19.68 (22.03%)	16.29 (18.24%)

많이 일어났음을 알 수 있다. 시가화지역의 비율이 가장 높은 표준유역은 유등천 하류로, 1975년과 2000년의 불투수면 비율이 각각 21.76 %, 33.95 %로 분석되었다. 이에 반해 유등천 상류는 1975년 불투수면이 0.12 %에서 2000년 0.99 %로 다른 표준유역에 비해 시가화지역의 비율이 가장 낮게 나타났다. 이는 대덕연구단지, 정부청사 등이 위치한 유등천 하류, 갑천 하류 근처에서 활발한 토지이용 변화가 일어났기 때문으로 보인다.

2. 경관 지수 산출 및 불투수면과의 관계

갑천 유역과 유역 내 6개 표준유역에 대하여 WAMIS에서 제공하는 1975년부터 2000년까지의 토지피복도를 활용하여 경관 지수를 산출하였고, 그 결과는 Table 4에서와 같다.

최대 패치 면적 비율을 나타내는 LPI의 경우 1995년과 2000년 결과에서는 다소 감소한 것으로 나타났지만 1975년부터 1995까지는 증가 경향을 확인할 수 있었다. LPI는 가장 큰 패치가 소유역에서 차지하는 비율을 측정한 지수로서, 불투수 지역의 LPI 값이 커졌다는 것은 도시화가 집중적으로 이루어져 불투수면이 연속적으로 집약되었다는 것을 의미한다. NP는 경관에서 패치의 총 개수 및 각 클래스 개개에 대한 패치의 수를 나타내는 지수로서 파편화 정도를 나타내며, 같은 면적일 때 패치의 수가 많은 경우가 파편화 정도가 높다는 것을 의미한다. NP는 1975년 662에서 2000년 3,578로 약 5배가 증가하였는데, 특히 1980년에서 1985년 사이 크게 증가하였다. 이는 1980년대 급격한 도시화와 토지개발 등으로 인한 토지이용 변화로 파편화가 많이 진행되었기 때문으로 보인다. 패치의 밀도를 나타내는 PD는 같은 면적이라도 패치의 수에 따라 밀도가 달라지므로 패치의 연결성 또는 쪼개짐 정도를 측정할 수 있는데, 그 값이 클수록 구조적으로 불안정한 상태라 할 수 있다. PD는 전체 면적으로 패치 수를 나누어 계산하므로 패치 수의 증가로 인해 패치 밀도도 증가하였다. TE는 해당 유형 조각의 총 길이를 나타내는 지수로서, 같은 유역에서 패치 유

Table 4 Landscape indices of the Gap-stream watershed according to the impervious cover in 1975~2000

Classification	LPI (%)	NP	PD (#/100ha)	TE (m)	ED (m/ha)	LSI	CPLAND (%)
1975	3.163	662	1.0201	612,060	9.4312	27.0796	0.88
1980	3.3011	407	0.6271	537,000	8.2746	22.4586	1.62
1985	4.5716	2,272	3.5009	1,093,650	16.852	42.8122	6.19
1990	6.6615	2,651	4.0849	1,410,090	21.728	45.7665	2.96
1995	7.3668	2,649	4.0818	1,732,590	26.6973	53.4584	2.09
2000	6.1922	3,578	5.5133	3,006,810	46.3318	91.1982	0.06

Fig. 3 Scatter plots and linear regression analysis of landscape indices in the Gap-stream watershed (1975~2000)

Fig. 4 Landscape indices of each watershed in the Gap-stream watershed (1975~2000)

형에 따른 총 가장자리 길이의 변화는 패치의 수 (NP)와 밀도 (PD) 변화와 관련이 있다. TE는 1975년 612,060 m에서 2000년 3,006,810 m로 크게 증가하여 시가지지역 패치 개수의 증가로 총 가장자리 길이가 증가하였음을 의미한다. 가장자리 밀도 ED는 해당 조각 유형의 모든 가장자리 길이 합을 총 경관 면적으로 나눈 지수로서, TE의 증가와 함께 증가하였다. LSI는 경관 형태지수로서 패치 모양의 복잡성을 기준으로 경관의 형태를 정량화한 것으로서 이 값이 커진다는 것은 패치의 모양이 점점 비규칙적으로 변한다는 것을 의미하는데, 1975년 대비 2000년의 LSI 값이 크게 증가하여 복잡성이 커졌음을 알 수 있다.

CPLAND는 경관 내에서 가장 핵심이 되는 지역의 면적률을 나타내는 지수로, 여기에서 말하는 핵심 지역은 생물종이 외부로부터의 격리를 필요로 하는 임계면적을 말한다. 시계열 변화에서 불투수지역의 핵심지역 면적률은 1975년에서 1985년 증가하다가 이후 6.19 %에서 0.06 %까지 감소하여 시가지지역 클래스 내의 핵심면적이 감소하였음을 알 수 있다.

Fig. 3은 1975년부터 2000년까지 연도별 갑천 유역내 산림 클래스와 불투수면 클래스의 경관 지수 결과를 보여주고 있다. 1975년부터 2000년까지 도시화가 많이 진행되면서 토지의 파

편화가 많이 일어났고, 패치 수가 증가하면서 패치의 총 가장자리 길이가 증가하였다. 특히, 산림 지역에서는 패치 크기가 줄고 파편화 경향이 두드러지게 나타났으며, 불투수 지역에서는 파편화와 형태의 복잡성이 두드러졌다.

갑천 유역의 6개 표준유역별 경관 구조 변화 영향을 알아보기 위해 불투수면 비율과 높은 상관도를 나타낸 LPI를 이용, NP와 PD는 둘 다 패치의 수가 결정인자이므로 둘 중 NP를, TE와 ED는 둘 다 가장자리 길이가 결정인자이므로 둘 중 TE를, 그리고 경관형태지수로서 LSI 지수를 이용하였다.

Fig. 4는 갑천 유역의 6개 표준유역별로 1975년부터 2000년까지 5년 단위 경관 지수를 산출한 결과를 나타낸 것이다. 4개의 경관 지수 결과에서 보듯이 갑천 하류와 유등천 하류에서의 변동폭이 두드러지게 나타났다. 특히 갑천 하류의 경우 NP, TE, LSI 지수에서 증가 경향이 크게 나타나 시가지지역 패치의 쪼개짐, 복잡성이 표준유역 가운데 가장 크게 나타난 것으로 파악되었다. 유등천 하류에서는 1985년과 1995년 사이에 LPI가 크게 증가하여 도시화가 집중적으로 이루어졌음을 알 수 있었다. 각 경관 지수들의 분석 결과를 종합해볼 때 갑천 하류와 유등천 하류 유역에서 도시화가 많이 진행된 반면에 유등천 상류와 대전천 유역은 토지이용변화가 크지 않았음

을 알 수 있다.

3. 불투수면 모델 (ICM) 적용

불투수면 비율과 수리·수문 영향, 수질 영향, 수생태계 영향에 관해서는 Han River Watershed Management Committee (2007b) 외에 기존의 많은 연구에서 그 연관성을 분석하였다. 유역 내 도로와 주차장과 같은 불투수면에 축적된 비점오염원은 강우 시 고농도의 오염물질이 수계로 유출되는 원인이 되어 하천 수질을 악화시키게 된다. 수생태계 건강성은 유역 질의 강력한 환경 지표로서 Schueler and Galli (1992)는 불투수면과 저서무척추동물 다양성의 일반적인 관계 모델을 제시하기도 하였다.

본 연구에서는 앞서 분석한 경관 지수중에서 생물종 다양성과 관련이 깊은 CPLAND²⁾를 생물종 다양성 지표로 선정하고자 하였다. 그러나 갑천 유역이라는 경관 차원에서 불투수면 비율과 생물종 다양성 경관 지수를 함께 도시하기 위해 Patch, Class, Landscape 중에서 Landscape 수준에서 지수를 산출하였고, CPLAND는 Landscape에서는 산출될 수 없기 때문에 의미가 유의한 TCA (Total core area)를 대신 선정하였다. 또한, 수질자료로서 환경부 물환경정보시스템에서 제공하는 갑천 유역의 수질측정지점 (봉곡교, 갑천2, 침산교, 갑천5-1)에서의 수질자료와 불투수면 비율과의 관계를 통해 BOD를 수질 지표로서 선정하여 불투수면 모델 연관성을 검토하였다. Table 5는 갑천 유역의 수질측정지점에서의 수질항목별 상관방정식과 결정계수를 나타내고 있다.

Fig. 5와 같이 불투수면 비율-수질 자료 (BOD), 불투수면 비율-생물종 다양성 관련 경관 지수 (TCA)와의 관계를 통해 불투수면 모델 (ICM) 연관성을 검토하였다. 먼저 수질과의 관계에서는 불투수면 비율이 10 % 이하인 안정적인 하천 구간에서 BOD가 Class 2 ~ 3 수준에 해당하였다. 하지만 불투수면 비율이 15 %만 넘어가도 BOD가 class 5 수준에 가까워지면서 하천 질이 '나쁨' 상태가 되었다. 경관 지수 중 생물종 다양성 관련 TCA와의 관계에서는 불투수면 비율이 0 ~ 25 % 구간에서는 TCA 값이 10,589 ha에서 점차 감소하다가 25 %를 초과하면서 1,500 ha 이하로 좋지 않은 상태로 진행되었다. 이는 도시화와 인위적인 개발로 인해 경관에서 불투수면 면적이 차지하는 비율이 커지면서 생물종이 외부로부터의 격리를 필요로 하는 임계면적이 점차 감소하였음을 나타낸다. 실제로

Table 5 Water quality results of the Gap-stream watershed

Classification	Correlation Equation	R ²
Stream Temperature (°C)	$y = 0.1664x + 14.145$	0.50
BOD (mg/L)	$y = 0.2712x - 0.033$	0.76
SS (mg/L)	$y = 0.3726x + 1.7761$	0.55
COD (mg/L)	$y = 0.4756x - 0.15$	0.82
TN (mg/L)	$y = 0.786x - 2.8582$	0.81
TP (mg/L)	$y = 0.0381x - 0.1778$	0.68

Fig. 5 Impervious cover model correlation from water quality (BOD)³⁾, landscape index (TCA)

Klein (1979)은 Maryland 주에 있는 도시하천에서 저서무척추동물들의 종 다양성이 급격히 줄어드는 것을 발견하였고, 종 다양성은 유역의 불투수면이 10 ~ 15 %를 초과할 때 '나쁨' 상태가 된다고 보고한 바 있다. 갑천 유역은 2000년 불투수면 비율이 11.2 %로 하천 상태가 Impacted (손상하천) 범위에 해당하여 유역의 상태가 나빠지는 단계에 있다. 이 구간에서 유역은 불투수면 비율에 민감하게 반응하므로 집중적인 유역관리를 통해 효율적으로 유역상태를 개선시킬 수 있을 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 갑천 유역을 대상으로 1975년부터 2000년까지의 토지피복상태에 따른 불투수면과 투수면을 재분류하여 경관분석 프로그램인 FRAGSTATS를 이용하여 경관 지수를 산정하여 경관 구조 변화를 분석하였고, 갑천 유역의 6개 표준 유역에 대해서도 정량적으로 분석하였다. 경관 지수 산출 결과와 불투수면과의 상관관계를 분석하였고, 경관 지표 (TCA)와 수질지표 (BOD)를 이용하여 불투수면 모델에 적용하여 평가하였다.

²⁾ Ortega Huerta (2007)은 경관 지수중에서 CPLAND (Core Area Percentage of Landscape), AI (Aggregation Index)를 이용하여 산림 파편화와 조류 (birds)와 포유류 (mammals) 분포, 생물종 다양성 영향을 분석한 바 있다.

³⁾ BOD Level Standards Enforcement Decree of the Ministry of Environment Environmental Quality Standards (Article 2 related) will be followed.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 갑천 유역을 대상으로 WAMIS 토지피복도를 이용하여 1975년부터 2000년까지의 토지피복변화를 분석한 결과 불투수면 비율은 1975년 4.9 %에서 2000년 11.2 %까지 2배 이상 증가하였다.

2. 갑천 유역과 6개 표준유역에 대하여 1975년부터 2000년까지의 경관 구조 분석을 위해 FRAGSTATS 경관 지수를 선정하여 경관 지수를 산출하여 결과를 분석하였으며, 그 결과 과거에 비해 시가지지역 패치수가 증가하는 등 경관의 형태가 비구조적으로 변화하였다. 표준유역 중에서는 갑천 하류와 유등천 하류 유역이 다른 표준유역에 비해 가장 높은 파편화를 보여 도시화가 가장 많이 이루어졌음을 알 수 있었다.

3. 불투수면 모델 적용에서는 갑천 유역의 수질자료 중 BOD를 수질지표로, 경관 지수 중 TCA를 생물종 다양성 지표로 이용하였다. 그 결과 불투수면 비율 10 % 이하에서는 수질이나 생물종 다양성이 양호하였으나 15 %를 넘으면서 상태가 나빠짐을 확인할 수 있었다. 유등천 하류와 같이 도시화율이 25 %를 넘어서 손상하천으로 하천 질이 악화되면 수질과 경관 생태학적 변화에 악영향을 끼치게 되므로 지속적인 관리와 대안 마련이 필요할 것이다.

기존의 불투수면 관련 연구와 본 연구의 차별성은 유역의 불투수면 비율만을 유역관리지표로서 활용하는 것 뿐만 아니라 불투수면 개별 조각 (패치)의 개수, 밀도, 비율, 가장자리 길이, 형태 등을 분석한 경관 지수를 산출하고, 이러한 결과와 취득한 수질자료를 바탕으로 ICM 모델을 제시하고 검토한 것이다. 본 연구에서 ICM 모델의 적용시 제한 요소를 극복하기에는 한계가 있다. 또한, 다양한 경관 지수중에서 특정 지표를 생물종 다양성 지표로서 불투수면 모델에 적용하여 의미 있는 결론을 내리는 데는 무리가 있는 것으로 사료된다. 따라서 향후 이에 대한 추가적인 연구를 통하여 검증이 필요할 것으로 판단된다. 하지만 본 연구를 통해 유역의 토지이용계획에 경관생태학적 불투수면 관리를 위한 기초정보를 제공하며, 향후 하천 개발 전, 후의 효과 평가나 각종 도시개발사업 계획 시 수생태적 지표를 개발하여 이를 유역관리에 활용해야 한다는 인식을 새롭게 한 점에서 그 의의가 있다고 하겠다. 특히 갑천 유역은 4대강 사업이 추진되고 있는 금강 유역의 중류에 해당하며 도시화가 많이 진행되고 있으므로 추후 많은 연구를 통해 객관화된 경관 지수를 개발하여 경관 생태기준을 마련함으로써 유역에 적용할 수 있을 것이다. 또한, 국내 유역 특성을 고려한 불투수면 지표 모델 연구를 통하여 불투수면 저감방안 수립 및 유역관리 등에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 금강수계위원회 환경기초조사사업 연구비지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Center for Watershed Protection (CWP), 1998. Nutrient Loading from Conventional and Innovative Site Development. Prepared for the Chesapeake Research Consortium, Annapolis, MD.
2. Center for Watershed Protection (CWP), 2003. Impacts of Impervious Cover on Aquatic Systems. Watershed Protection Research Monograph No. 1.
3. Choi, J. Y., and S. H. Jang, 2003. The Development of Imperviousness Index for Effective Watershed Management I. Korea Environment Institute (in Korean).
4. Daejeon Metropolitan City, <http://www.metro.daejeon.kr/>
5. FRAGSTATS Manual (1995), <http://www.umass.edu/landeco/research/FRAGSTATS/FRAGSTATS.html>
6. Galli, J., 1991, Thermal Impacts Associated With Urbanization and Stormwater Management Best Management Practices. Metropolitan Washington Council of Governments. Maryland Department of Environment. Washington, D.C. 188.
7. Geum River Environment Research Center, 2009. A research on the investigation and management of watershed imperviousness: Geum River Basin. Geum River Watershed Management Committee (in Korean).
8. Han River Watershed Management Committee, 2007a. A research on investigation and management of watershed imperviousness (in Korean).
9. Han River Watershed Management Committee, 2007b. The Fundamental study on Land use Plan with Precautionary Approach (in Korean).
10. Heo, S. G., K. S. Kim, J. H. Ahn, J. S. Yoon, K. J. Lim, J. D. Choi, Y. C. Shin, and C. W. Lyoo, 2007. Landscape Analysis of the Forest Fragmentations at Doam-Dam Watershed using the FRAGSTATS Model. *The Korean Association of Geographic Information Studies* 10(1): 10-21 (in Korean).
11. Jang, S. H., 2008. A Study on a Landscape Structure as a Change of Impervious Cover Rate in the Osan-

- cheon Watershed. *Environmental Impact Assessment* 17(5): 289-297 (in Korean).
12. Johnson, G. D. and G. P. Patil, 2006. Landscape pattern analysis for assessing ecosystem condition. PA, USA: Springer.
13. Jung, S. G., J. H. Oh, and K. H. Park, 2002. The Analysis of Landscape Structure due to the Landcover Change. *The Korean Association of Geographic Information Studies* 5(3): 9-18 (in Korean).
14. Klein, R. 1979. Urbanization and Stream Quality Impairment. American Water Resources Association. *Water Resources Bulletin* 15(4)
15. McGarigal, K and B. Mark. 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.
16. Ministry of Science and Technology, Korea (MOST), 2003. Development of Diagnosis System for Water Resource Management in Small Watersheds Based on Landscape Ecology (in Korean).
17. Ortega Huerta, M. A., 2007. Fragmentation patterns and implications for biodiversity conservation in three biosphere reserves and surrounding regional environments, northeastern Mexico. *Biological Conservation* 134(1): 83-95.
18. Schueler, T. R., and J. Galli, 1992. Environmental impacts of stormwater ponds. In *Watershed restoration sourcebook*. Washington, DC: Metropolitan Washington Council of Governments.
19. Schueler, T., 1994. The importance of imperviousness. *Watershed Protection Techniques* 1(3): 100-111.
20. WAMIS <http://www.wamis.go.kr>