

# 생태수문 과정을 고려한 도시 가로와 자투리 녹지의 디자인 대안

이도원\* · 이현정\* · 안상희\*\* · 최사라\*\* · 박찬열\*\*\*

## <目次>

I. 배경	V. 디자인 제안 사례
II. 경관의 표면 거칠기	VI. 장래 연구
III. 디자인 개선 방향	사사(辭謝)
IV. 기대 효과와 참고사항	

## I. 배 경

사람들의 의식주에 필요한 자원의 공급과 소비 과정은 필연적으로 토지 이용과 피복의 변화를 야기한다. 그런 까닭에 인구가 증가하고 문명이 발달하면서 지표표를 바꾸는 인간의 토지 이용 형태와 강도는 늘어났다. 이제 토지이용 변화는 에너지와 물질, 생물, 정보의 분포와 생태적 과정의 상호관계를 통해 생태계 서비스를 위협하는 수준에 이르렀다(이도원 2001, Foley 등 2005). 오늘날 일어나고 있는 생물 다양성 감소와 토양 오염 및 침식, 알베도와 미기후, 수문 과정, 수질 변화 등 우리가 당면하고 있는 거의 모든 환경문제는 토지이용과 피복 변화와 관련이 있다(Grimm 등 2008).

토지이용 형태는 기후와 지질, 토양, 생물을 포함하는 자연생태적 배경과 기술과 사회경제, 윤리를 포함하는 문화적인 현상의 차이에 따라 여러 가지 다른 특징을 보인다(이도원 2001, Foley 등 2005). 그러나 사람들의 접근이 상대적으로 쉽고, 안전을 확보할 수 있으며, 풍부한 자원을 얻기 쉬운 지역에서 개발 행위가 먼저 일어나는 것은 일반적이다. 우리나라에서는 전통적으로 흔히 배산임수의 지형을 선호하여 유역 안에 마을이 주로 자리를 잡았으나(이도원

\* 서울대학교 환경대학원 환경계획학과

\*\* 서울대학교 환경대학원 환경조경학과

\*\*\* 국립산림과학원 난대산림연구소

2004), 인구 증가와 집중으로 개발지역은 접근성이 상대적으로 어려운 공간으로 확장되고 있다. 경사지나 수렁과 같이 접근이 어렵거나 지반이 불안정한 지역을 개발할 수 있는 기술이 향상됨에 따라서 도시 유역에서 녹지 면적이 줄어들고 분포 양상에도 변화가 일어났다. 도시 발달 과정과 함께 나타난 이러한 토지이용 변화는 물과 공기의 침투가 어려운 지표 면적을 증대시키는 방향으로 진행된 것도 일반적인 경향이다.

이들테면 현재 서울의 전체 토지 면적에서 불투수성 면적 비율은 평균 49.3% 가량 된다(서울시정개발연구원 2003). 더구나 투수성 면적은 북한산, 도봉산, 관악산 등 유역 가장자리의 산지에 편중되고 도심의 불투수성 면적 비율은 훨씬 높다. 지표의 불투수성 면적이 10%를 넘으면 하천의 안정성과 어류 서식지의 질, 큰 나무 가지와 조각(large woody debris)의 양이 급격하게 저하되거나 적어지고(Booth 1991, Booth 등 1996), 불투수성 면적이 25%를 넘게 되면 생태적으로 지탱이 불가능한 하천이 된다(Schueler 1994). 이러한 현황만으로 서울의 거의 모든 하천이 열악한 상태라는 사실은 쉽게 짐작된다.

사람들의 잦은 방문으로 생기는 녹지의 토양 답압(compaction)은 불투수성 물질에 의한 포장과 정도의 차이는 있지만 도시의 배수와 수분보유능력을 저하시키는 또 다른 원인이다(Bray & Weil 2008). 답압의 영향을 받은 토양에서는 유기물 함량도 낮고 빈틈이 적기 때문에 공기와 수분이 보유되는 능력이 낮다. 지역에 따라 차이가 있지만 대체로 무기물질(점토, 미사, 모래 등)과 유기물, 공극(빈틈)이 각각 45%, 5%, 50%인 토양이 다져지면 75%, 2%, 24% 정도로 변하는 경우가 관찰된다(USDA-NRCS 2005). 답압으로 공극이 적어진 토양에서는 물의 침투와 배수가 줄어든다. 따라서 지표 유출수(surface runoff)가 증가되어 저지대의 홍수 빈도가 늘어날 가능성이 높아진다. 지표 유출수 증가는 또한 물질을 운반하는 능력의 강화로 비점오염원의 유입량도 증대시킨다(이도원 2001).

도시화된 유역의 생태수문 과정(ecohydrological process)은 자원의 자급자족 방식으로 생활이 이루어지던 유역과 큰 차이를 보인다. 예를 들면 우리나라 전통마을의 삶은 하나의 유역에서 내린 빗물을 최대한 이용하는 방식으로 이루어졌다(Lee & Park 2010). 이와 대조적으로 현대 도시는 다른 유역의 물을 끌어들이는 수자원 관리 방식으로 유지된다. 그리하여 전통사회와 비교할 때 현대사회에서는 물의 인위적인 수평 이동이 훨씬 많이 늘어나고, 불투수성 지표와 답압된 지역의 면적 증가로 수직적 연결이 차단되는 특징을 보인다.

도시형 토지이용은 여러 가지 자원의 공급과 폐기물 처리를 외부에 의존하는 방식으로 이루어지기 때문에 다른 지역의 환경을 변화시키는 중요한 원인이 된다(이도원 2001). 예를 들면 도시 유역에서 사용하는 자원의 채취 과정에 환경을 바꿀 뿐만 아니라 소비와 함께 발생하는 폐기물과 공원이나 주택지 녹지에서 사용한 비료, 반려동물의 분뇨는 영양소를 방출하는 공급원이다(Baker 등 2001, Groffman 등 2004). 그러나 아직 우리나라 도시 유역 수준에서 이러한 과정을 통해서 공급되고, 환경으로 방출되는 영양소 양을 분석한 자료는 흔하지 않고

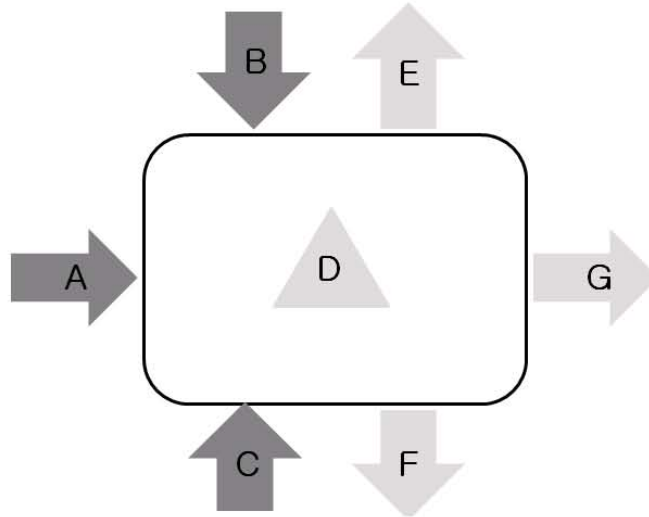
(Chang 2008), 특히 미세한 경관 요소 관리에 참고할 내용은 거의 없는 실정이다.

토지이용 변화는 유역의 수문과정뿐만 아니라 수질에도 커다란 영향을 끼친다. 미국의 928 개 하천 수질 자료에서 삼림과 농경지 면적의 상대적인 크기는 하천수의 질소 및 인의 농도 뿐만 아니라 질소:인의 비에도 영향을 주는 것으로 나타났다(Omernik 1977). 삼림면적이 줄어들고 농경지가 늘어날수록 육상생태계로부터 두 영양원소의 절대적인 유실량이 늘어났으며 질소:인의 농도비가 증가하여 농경 활동은 특히 질소 손실과 밀접한 관계가 있었음을 보여주었다. 우리나라 경안천과 탄천, 중랑천, 안양천, 북한강 본류지역 등 5개 하천의 23개 지점에서 측정된 수온과 BOD, COD, TN 양은 유역의 불투수성 지표면적과 상관관계를 보였다(최지용 2003). 이러한 결과로부터 유역의 토지 이용이 하천의 생태적 온전성(ecological integrity)을 결정하는 중요한 변수라는 사실을 확인할 수 있다(Roth 등 1996, Chapin 등 2009).

대기를 통해 다른 지역에서 이동하여 공급되는 물질도 적지 않다. 그러한 물질을 질소와 황에 국한하여 간략히 기술해보면 다음과 같다. 한국의 연간 습성침적 질소량은  $\text{NO}_3^-$  260eq  $\text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+$  500eq  $\text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ 로 합계 760eq  $\text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$  정도인 것으로 추정된다(Park & Lee 2002). 같은 연구에서 공간적으로는 많은 양의 질소 침적이 서울과 경기도 지역에 집중되어 있고 습성침적만으로도 최대 1290eq  $\text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$  (1.5g N  $\text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ )의 질소가 지표에 공급되는 현상을 보여주고 있다. 경기도 시화호에서 2000년과 2001년에 측정된 자료를 근거로 추정한 질소 침적은 1.7-3.3g N  $\text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 였으며, 평균 2.4g N  $\text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$  으로 매우 오염된 지역으로 판정된 미국 네바다 남부의 수준(2.0-3.5g N  $\text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ )과 비슷했다(이강웅 미발표 자료). 우리나라 황의 평균 침적량 4.7g S  $\text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 로 추정되었으며(Park 등 2000), 경기도 양평군 팔당호에서 측정된 침적량은 1.14g S  $\text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 의 값을 보였다(김영성과 진현철 2005). 도시의 불투수성 표면에 침적된 이러한 물질은 바람과 빗물에 의해 이동하여 이웃한 토양과 하천 생태계 변화를 유발할 것이다(Groffman 등 2004).

이러한 환경 악화 현상은 궁극적으로 원인을 제공하는 우리 삶의 변화를 통해서 개선되어야 할 사항이다(Chapin 등 2009). 그러나 바람직하지 않은 환경 변화는 이미 생태계와 인간의 삶을 위협할 정도로 누적되었다. 지금은 환경을 악화시킨 삶의 방식을 성찰하고 근본적인 해결책을 찾아 실천해야 할 뿐만 아니라 바뀐 환경을 개선하는 동시에 바람직하지 않은 영향을 완화시킬 방안을 동시에 강구해야 하는 상황이다.

요컨대 오늘날 도시 유역 또는 지역에는 외부로부터 인위적인 물질 공급이 과도하게 늘어나고 있다. 과도한 공급이 지속되면 궁극적으로 많은 물질이 외부로 방출된다. 방출되는 양은 다른 지역 또는 수자원이나 대기로 운반되는 부분을 말한다. 따라서 그림 1에서 자원 공급(A)과 대기 침적(B)에 의한 과도한 물질유입에 대응하여(C는 토양 풍화와 유기물 분해로 유역 자체에서 공급) 지하수나 하천을 통해 방출되는 양(F, G)을 줄이려면 저장량(D)을 늘이거나 분해하여 대기로 내보내는 양(E)을 증가시켜 한다. 바로 위의 문단에서 언급한 근본적인



〈그림 1〉 유역 또는 일정 지역의 물질 수지 과정. A 수평 유입(인간의 자원 유입과 자연 운반), B 대기 공급(침적과 광합성, 질소고정 등), C 토양과 지하수 공급(풍화와 지하수 용출 등), D 토양 흡착과 생물 흡수 동화, E 대기 휘발, F 지하 침투, G 수평 출력(인간의 폐기물 운반과 자연 운반).

해결책은 A와 B의 양을 줄이는 것이며, 완화할 수 있는 방법은 D와 E의 양을 증가시킴으로써 F와 G의 양을 줄이는 것이다.

이러한 배경으로 이 글에서 우리는 도시 녹지 구조를 바꿈으로써 환경을 개선하는(그림 3의 D와 E를 증가시키는) 디자인 원칙과 사례를 제시하고 실질적인 효과를 평가할 수 있는 연구를 제안한다. 내용은 수문학과 토양학, 경관생태학적 원리를 고려한 미세 지형과 소규모 공간에 제한한다. 포괄적인 고려사항과 큰 규모의 유역에서 시험할 수 있는 적용은 자료 부족으로 미래의 숙제로 남겨둔다. 제안하는 디자인 원칙은 가설적이고, 특수한 상황에서 유효하며 아주 먼 미래에 환경을 악화시킨 근본적인 원인을 근절하고 환경이 개선될 때 다시 수정해야 할 여지도 있다. 아래에서 제안하는 디자인 원칙이 주로 고려하는 경관의 표면 거칠기를 먼저 간단히 소개한다.

## II. 경관의 표면 거칠기

경관 구조의 이질성은 공간을 구성하는 여러 가지 다양한 요소의 물리적·화학적·생물적 특성에 의해서 구분된다. 그 중에서 표면 거칠기(surface roughness)는 경관의 이질성을 공간적으로 표현하고 기능을 이해하는 데 도움이 되는 물리적 특성이다. 경관의 표면 거칠기를 비교할 수 있는 하나의 변수로 중력방향으로 투사한 토지의 단위 면적당 공기에 노출된 구성 요소의 표면적으로 정의되는 표면적지수(surface area index)가 있다(이도원 2001). 정의에 의

하면 평지보다는 경사지의 표면적지수가 높다. 표면이 단순한 토지보다는 울퉁불퉁한 토지에서 표면적지수가 높다. 같은 평지라 하더라도 그 위에 건물이나 수목이 들어설수록 표면적지수는 증가한다.

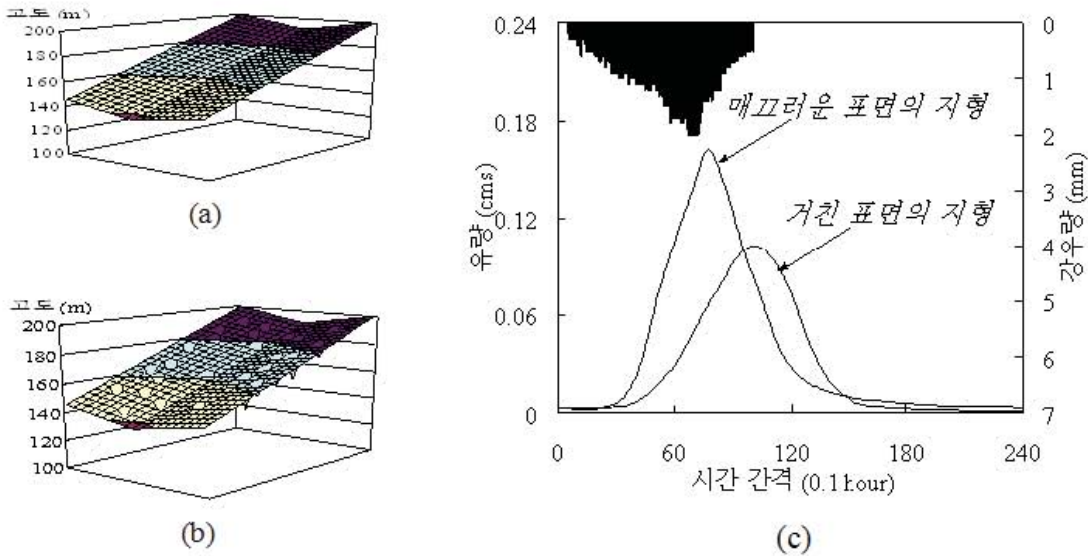
일반적으로 물과 공기를 포함하는 유체의 흐름뿐만 아니라 동물과 인간 운송수단의 이동은 표면 거칠기에 민감하게 반응한다. 거칠기가 큰 지역에서는 물과 바람, 동물, 사람의 이동에 대응하는 저항력과 마찰력이 높아 물질의 이동을 느리게 하고 생물을 끌어들이고 재생산할 잠재력이 높다. 이를테면 식생완충대는 인위적으로 표면 거칠기를 높여 오염물질의 소멸처(sink)가 되고, 증식된 생물들의 공급원(source)이 된다(이도원 2001).

경관 요소의 표면 거칠기가 높으면 유체 흐름이 감속되고 입자상 물질의 퇴적이 일어나며 생화학적 반응으로 물질의 분해와 동화가 높다. 모든 화학적·생물학적 반응은 표면에서 일어나기 때문에 표면이 넓을수록 반응의 잠재력은 증가하기 때문이다. 표면적지수 증가가 경관의 생화학 반응 속도에 끼치는 정량적 영향은 아직 분명하지 않지만, 적어도 유체의 체류와 반응 시간을 연장시킴으로써 생물과 토양에 의한 영양소 보유와 제거 능력을 높일 것으로 짐작된다. 이를테면 하천 가까이 있는 식생완충대나 생물타리는 표면적지수 증가에 의한 물리적인 과정과 생화학적 반응을 통해서 지표 및 지하 유출수에 포함되어 있는 부유물질과 영양소, 농약 등을 제거한다(Iversen 등 1993).

특히 생물의 표면적은 그 개체생물의 생존에 필요한 물질과 에너지가 교환되고 다른 생물들이 서식하는 기질이 된다(Whittaker & Woodwell 1967). 잎과 가지, 줄기 그리고 뿌리의 표면적은 기체 교환과 호흡률, 증발산, 열 교환, 빗물 분포, 영양소 용탈을 포함하는 여러 가지 기능적인 변수가 된다. 에너지합성 효율이 엽면적지수에 비례하며, 따라서 엽면적지수가 클수록 일차생산성(primary productivity)이 증가한다(Waring & Running 1998, Serrano 등 2000). 엽면적지수가 큰 수종으로 이루어진 숲에서는 비와 눈, 이슬의 차단이 증가하여 하천유출수량은 감소하는 경향을 보인다(Swank & Douglas 1974, Aston 1979, Waring & Running 1998). 하층 식생과 움푹 들어간 지역은 물질 보유와 유역 차원에서 물의 흐름을 지연시킴으로써 수문곡선의 최고값을 낮춘다(그림 2). 오목지역은 또한 물의 유속에너지를 감소시켜 토양과 영양소 유실을 방지할 가능성이 높다(이도원 2001). 동물들은 개방된 지역보다 수림의 밀도가 높고 하층식생과 낙엽 및 낙지의 축적량이 많은 곳에 더 풍부하다. 예를 들면 표면 거칠기는 숲의 하층식생의 밀도와 함수관계를 가지며, 거칠기가 높을수록 누적되는 낙엽량이 많을 뿐만 아니라, 서식하는 생물의 숫자도 늘어나는 경향이 있다(이도원 2001 논외 참고).

### III. 디자인 개선 방향

하나의 경관요소로 외부공간에서 수평적으로 운반되거나 대기로부터 지표면에 도달하는



〈그림 2〉 유역 차원에서 지형의 기복이 심한 경우 물의 흐름이 느려지고 수문곡선의 최고값이 낮아지는 경향을 보여주는 컴퓨터 모의실험 결과. 이도원 2001(이광수 그림).

과정으로 유입되는 물질의 운명은 4 가지로 나누어볼 수 있다. 첫째, 휘발이나 비산 과정에 의해 대기로 간다. 둘째, 물리적·화학적 과정에 의해 토양에 흡착되어 잔류한다. 셋째, 화학적·생물학적 과정으로 흡수되거나 분해된다. 넷째, 바람과 지표 유출수, 지하수에 의해 다른 장소로 운반된다.

이러한 물질의 운명은 특성에 따라 사람의 환경에 긍정적·부정적 영향을 끼친다. 앞에서 소개한 질소와 황은 대기로 되돌아가면 부정적인 작용을 하게 될 가능성도 있다(Pierzynski 등 2000, Brady & Weil 2008). 대기에서 산화되면 산성물질이 생성되어 산성비를 유발하는 등 다른 물질들과 반응하여 여러 가지 이차 환경오염물질이 된다. 토양에 흡착되어 영구히 고착되지 않는다면 물리적 힘에 의해 운반되거나 화학적·생물학적으로 변환되어 생태계의 물질 순환 과정에 포함된다. 수계로 이동하는 물질은 부영양화를 포함하는 부작용을 일으키기도 한다. 이러한 물질의 특성을 고려하면 대기에서 침적되는 질소와 황은 토양과 육상생물에 의해서 영양소로 이용되는 양이 많을수록 사람들에게 혜택이 된다.

앞에서 논의한 바와 같이 도시의 불투수성 지표는 토양과 육상생물에 의해 물질이 활용되는 과정을 차단함으로써 사람들에게 불리한 생지화학적 과정을 야기한다. 또한 불투수성 지표는 빗물의 토양 침투와 수분의 증발량을 줄이기 때문에 기온을 높이고 공기를 건조하게 만든다.

반면에 높은 토양 수분 보유력을 가진 경관 요소들을 도입하면 증발산의 증가로 도시의 이상 기온을 개선하고, 대기 중의 습도를 높여 쾌적한 환경을 유지한다. 식물의 증산과 지표와

토양 수분의 증발은 태양복사열을 조절하고 대기를 냉각시켜 쾌적성을 높여 주는 효과를 가진다(최일홍 2008). 따라서 도심을 녹화하는 것만으로도 2℃ 정도의 기온저하 효과를 얻을 수 있다는 연구결과(進士五十八 1992)도 있다. 또한 녹지는 토양과 생물의 표면적을 증가시켜 많은 양의 침적된 질소와 황을 흡착하고 생물 활동을 증가시켜 흡수하고 분해한다.

이러한 기능이 왕성하게 발휘되도록 하는 녹지의 조성 방식이 있다면 환경 개선 효과는 증대한다. 따라서 빗물을 발생하는 장소에서 최대한 활용하여 외부로 유출되는 양을 줄이는 녹지 디자인을 모색할 필요가 있다. 실제로 선진국에서는 자연형 배수를 중요한 계획요소로 고려하고 있다(Robinette 1984, Hellwet & Oltmanns 2000, Geiger & Dreiset 2001, Dominique 2002, Weltausstellung & Stadtteil Kronsberg 2004). 구체적으로 빗물이 지표면의 지형을 따라 높은 곳에서 낮은 곳으로 흘러가는 형식을 최대한 살리는 녹지 디자인 방식을 발굴하고 활용한다. 토양으로 물이 침투하여 저장되고,凹面에 의한 지표면 저류와 증발산으로 빗물이 자연적으로 소비되면서 하천의 홍수부담을 줄이며, 대기 냉각과 습도조절은 물론 생물의 서식환경 개선, 수질 정화 등의 효과를 최대한 발휘되는 디자인을 장려한다. 여기서 우리는 위에서 논의한 내용들을 함께 활용하여 녹지 디자인에 대한 몇 가지 원리와 참고사항을 제시하고, 서울 대학교와 가까운 지역에 있는 일부 녹지를 개선할 수 있는 대안을 소개한다.

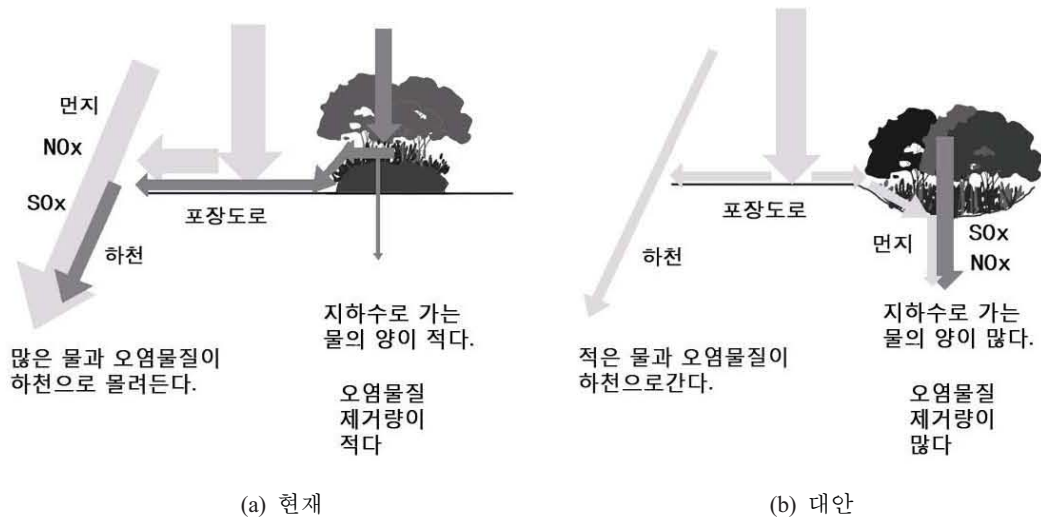
물의 흐름을 지연시키고, 오염물질과 토양 및 생물이 반응할 수 있는 표면적을 넓히기 위해 다음과 같은 사항들을 고려할 수 있다.

1. 경관 규모에서는 오목 지형을 증가시킨다.
  - 숲에는 작은 웅덩이를 많이 만든다.
  - 도로의 중앙분리대와 노변 녹지를 차도보다 낮춘다.
2. 오목 지형 내부의 표면 거칠기를 증가시킨다.
  - 표면적지수가 높은 경관 요소를 증가시킨다.
  - 표면적의 수직 다양성은 증가시킨다.

이러한 사항을 고려하여 도로의 중앙분리대를 개선할 때 얻을 수 있는 효과를 그림으로 표현해보면 다음과 같다(그림 3).

## VI. 기대 효과와 참고사항

먼저 제안한 디자인 대안이 증진시킬 가능성이 있는 생태수문학적 기능을 발표된 연구결과들을 근거로 논의한다. 그러나 이 대안이 만병통치약은 아니고 몇 가지 참고해야 할 사항



〈그림 3〉 현재 가로에 흔히 나타나는 녹지 띠와 디자인 변경으로 예상되는 녹지 띠의 생태수문 과정 비교.

이 있어 소개해둔다.

### 1. 상대적으로 많은 양의 물이 저지대 수로에 저장된다(그림 3).

- 토양 수분 유지 기간 연장 : 오목지대에서는 지표 유출수가 집중되고 오래 머물 뿐만 아니라 햇빛과 바람에 노출된 볼록지역보다 수분의 증발도 적다. 또한 유기물 축적과 생물 활동으로 형성된 토양 입단은 빈틈(pore)을 증가시킴으로써 수분보유능력이 높다(Brady & Weil 2008).
- 영양소 보유력 향상 : 유기물과 같은 미세 입자와 탄소, 질소, 인, 황 등의 영양소 축적으로 식물의 생산성이 높기 때문에 유기물이 축적된다(Brady & Weil 2008). 도시지역에서도 많은 양의 질소가 보유되고, 대부분 투수성 지표에서 토양과 식물, 미생물에 의해서 이루어졌다는 보고가 있다(Groffman 등 2004).
- 미생물과 무척추동물 활동 증가(Belnap 등 2005, Ludwig 등 2005) : 토양 수분 유지와 유기물 축적으로 미생물 활동이 증가한다. 식물의 새싹과 소형동물들을 먹이로 이용하는 새와 다른 척추동물 활동도 늘어난다.
- 오염물질 분해 증가 : 빗물에 씻겨온 입자와 화학물질이 낮은 식생대에 축적되면 미생물의 활동으로 분해된다. 이에 대한 실증적인 자료는 많지 않지만 관목을 심고, 토양을 나무 조각들로 덮은 정원의 오목지역으로 지붕의 빗물을 유도한 2년 동안의 실험에서 독성 물질의 99%를 제거했다는 보고로부터 유추할 수 있는 효과이다(Dietz & Clausen 2006).
- 지하 침투수 증가 : 유기물 축적과 미생물 활동에 의한 토양 입단(aggregate) 형성으로 생기는 작은 빈틈(pore)과 지렁이 활동으로 생긴 굵은 빈틈에 의해 토양수의 이동이 수월하



여 지하로 이동하는 빗물의 양이 늘어난다(Ludwig 등 2005). 2년 동안 392.5 톤의 물을 공급했을 때 95.4%가 지하수로 침투하고, 3.7%가 토양에 남았으며, 0.5%가 넘친 사례 보고가 있다(Dietz & Clausen 2006).

- 식물생산성 향상에 의한 이산화탄소 흡수 증가 : 수분과 영양소 이용도 증가는 식물의 광합성에 의한 생태계 수준의 생산성을 높임으로써 이산화탄소 흡수와 저장이 늘어난다.

2. 하천으로 이동하는 물의 양을 시간적으로 분산하여 홍수가 줄어들고 수자원을 오염시키는 오염물질의 양이 감소한다.

- 유역 규모에서 홍수빈도 감소 : 오목지형의 식생대에서 지하로 침투되는 물의 양이 증가하고, 토양의 수분보유력(water-holding capacity)이 향상되기 때문에 비가 올 때 발생하는 지표 유출수의 양이 적어진다(Brady & Weil 2008).
- 오염물질 유출 감소 : 토양에 흡착되고, 미생물에 의해서 분해되며, 식물과 동물에 의한 보유하는 물질과 기체 형태로 대기로 방출되는 양(예를 들면 탈질작용)이 늘어나기 때문에 수자원으로 이동하는 오염물질의 양이 줄어든다(이도원 2001, Dietz & Clausen 2006).
- 하천 유지 유량 지속시간 연장 : 강수기에 토양에 저장된 물이 꾸준히 흘러나와 하천에 물이 흐르는 기간이 늘어난다.

이렇게 제안한 디자인 대안으로부터 생태수문학적 효과를 기대할 수 있지만 적용하기 어려운 조건이 있는 지역에서는 특별한 배려가 필요하다. 이를테면 배수가 불량한 지역에서는 오목지역의 상대적으로 불량한 배수가 문제를 야기한다. 또한 눈이 많이 내리는 지역에서는 낮은 오목지형으로 염화칼슘이 집중되어 토양염화가 발생하는 피해가 생길 수 있다. 이러한 환경조건에서는 제안한 디자인 원칙을 피하거나 내습성과 내염성이 강한 식물종을 선택하여 이용하는 유연한 접근이 필요하다. 또한 자연과정에 의해서 쉽게 분해되지 않고 축적되는 중금속과 방사능 물질 등의 오염지역에서는 특별히 유의해야 한다. 땅 속으로 침투되는 물에 의해 지하수로 이동하면 복원하기 어려운 상황이 일어날 가능성도 있다.

## V. 디자인 제안 사례

위에 논의한 디자인 원칙을 바탕으로 개선할 여지가 있는 도시 녹지를 답사했다. 답사 대상은 저자들이 쉽게 접근할 수 있는 서울대학교와 가까운 공간에 제한했다. 개선의 여지가 있는 도로와 자투리 녹지에 대해 적용한 사례들은 다음과 같다.

### 사례 1 (가로수 보호틀)

#### 1) 위치 : 서울대학교 교내 가로수 보호틀



〈그림 4〉 가로수 보호틀

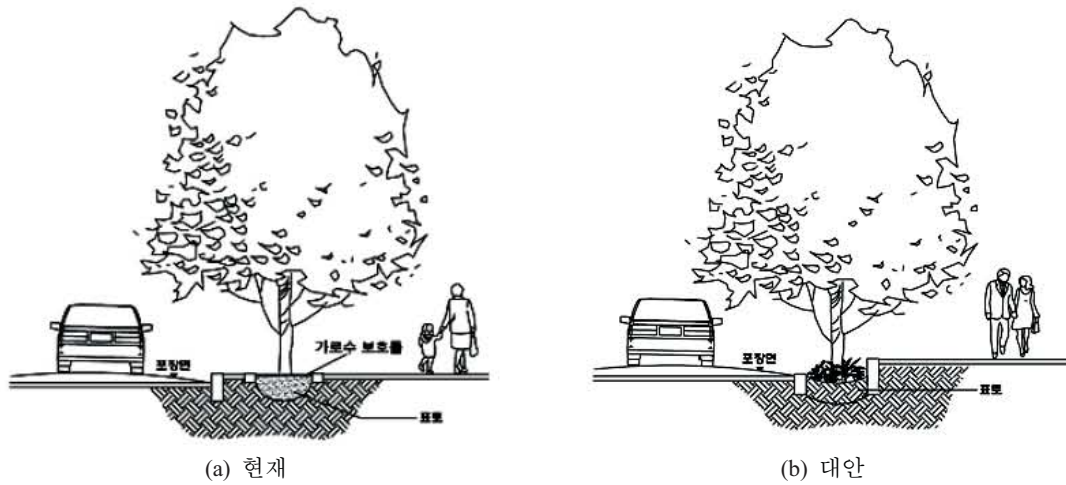
#### 2) 현황

우리나라 도시 곳곳의 가로수 아래 지면에는 대부분 보호틀이 설치되어 있다. 가로수 보호틀은 가로수의 생육영역을 확보하고 보행자 등으로부터 피해를 줄이기 위하여 수목 아래 지면에 보도 포장과 구분하여 설치하는 시설물을 말한다(서울특별시 2002). 보호틀 설치의 가로수 주변의 답압을 줄이는 효과는 있지만 가로수와 함께 하층식생을 결들이는 경우는 흔하지 않다. 지면의 높이는 대부분 보도와 거의 같거나 보토투를 하여 약간 높다. 따라서 지표 유출수가 그곳을 피해가기 때문에 토양의 수분 유지기간이 짧고 흙이 흘러내리기 쉬운 경우가 흔하다.

#### 3) 적용방안

빗물에 의한 수분과 먼지, 영양소의 공급을 높이기 위해 가로수를 심은 지대를 낮추고 오목지형으로 바꾸는 디자인이 가능하다. 아울러 가로수 보호틀 대신 하층식생을 결들이면 표면 거칠기가 증가한다. 이때 가로수의 하층식생으로는 지형이 오목지형일 때 빗물이 유입되므로, 배수불량 상황에 잘 견디고 겨울철 염화칼슘 피해에 대비하여 내염성 및 내습성이 강한 식물인 비비추와 맥문동 등을 식재하도록 제안한다.

4) 디자인 제안



〈그림 5〉 가로수 보호틀을 이용한 현재와 대안 디자인의 단면도 비교

5) 적용 효과

보도에 투수성이 높은 포장재료를 사용하거나 가로수 주위에 투수성이 높은 공간을 만들어 친환경적으로 바꿀 수 있다(이은희 1997). 제안된 디자인을 적용하면 수목 주위의 공간이 오목지형으로 되어 비가 올 경우 도로에 고이던 물이 자연스레 낮은 지형으로 스며들으로써 상대적으로 적은 물과 오염물질이 하천으로 흘러들어 가게 되고, 빗물에 씻겨온 입자와 화학물질이 이곳에 축적되어 오염물질의 분해가 증가된다. 또한 빗물에 의한 토양유실을 방지할 수 있고, 식물생산성과 이산화탄소 흡수가 증가하여 교내 환경개선에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

## 사례 2 (도로변 띠 녹지)

### 1) 위치 : 관악구 디자인 거리 도로변



〈그림 6〉 차도와 인도 사이에 있는 녹지 띠

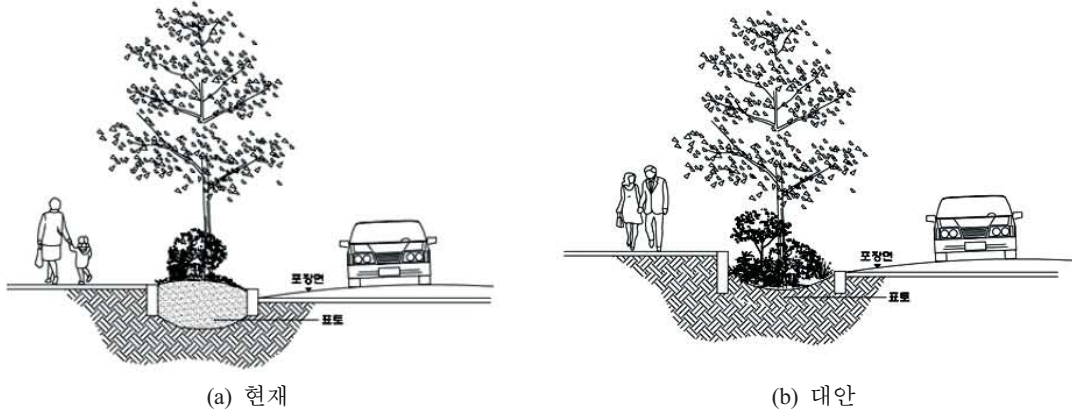
### 2) 현황

서울시 관악구 디자인거리 사업으로 서울대학교 뒷문 진입로를 따라 가로변과 중앙분리대에 녹지 띠가 조성되어 있다. 그림 6은 낙성대 부근의 도로변을 따라 차도보다 높게 만들어진 가로수와 녹지 띠를 찍은 사진이다. 하층관목을 드문드문 심어 덩불층의 피복률이 낮고 토양이 노출되어 있는 곳도 있다. 그런 까닭에 비가 오면 가로수 녹지의 흙이 지표 유출수에 의해 도로로 흘러나와 일부는 배수구를 통해 하천으로 유입되고 일부는 도로에 잔재하는 현상이 관찰된다.

### 3) 적용 방안

토양의 수분 유지와 증발산 양을 늘이는 디자인으로서 도로변 녹지를 보도와 차도보다 낮은 오목지형으로 바꾸는 방식을 고려한다. 인도 보호를 위해서 강건한 울타리를 곁들이거나 녹지의 차도 쪽에 배수구를 남기고 연석을 높이는 방법도 가능하다(Lovell & Johnson 2009a). 식재는 잎의 다층구조가 이루어지도록 가로수 아래에 하층 식생을 도입한다. 배수 문제와 겨울철에 도로에 뿌리는 염화칼슘 피해에 대비하여 내염성 및 내습성이 강한 산벚나무나 때죽나무, 모감주나무, 이팝나무 등을 심고, 화살나무와 좀작살나무, 계수나무, 칠엽수, 사철나무 등의 지표층을 덮는 덩불층을 다양하게 식재하는 것을 제안한다.

4) 디자인 제안



〈그림 7〉 차도와 인도 사이에 있는 녹지 띠의 현재 상태와 대안의 단면도 비교  
<http://www.ecotrust.org> 자료를 참고하여 다시 그림.

5) 적용 효과

오목지형을 많이 도입하면 경관의 표면 거칠기가 증가한다. 우기에 도로에 고여서 하천으로 바로 유입되던 빗물과 물질들은 오목지형의 녹지대로 흘러든다. 이러한 완충녹지에서는 오염된 빗물이 하천으로 흘러들어가기 전에 여과되는 기능이 높다(Lovell & Johnston 2009a, b). 또한 증가된 덩불층과 함께 하층식생이 다양해지면서 찾아오는 조류의 개체수와 종수가 증가하고, 도시생태계의 건강성 또한 향상될 것으로 예상된다.

사례 3 (중앙분리대 녹지)

1) 위치 : 관악구 디자인 거리 사업의 일환 - 낙성대 도로변



〈그림 8〉 차도의 중앙분리대

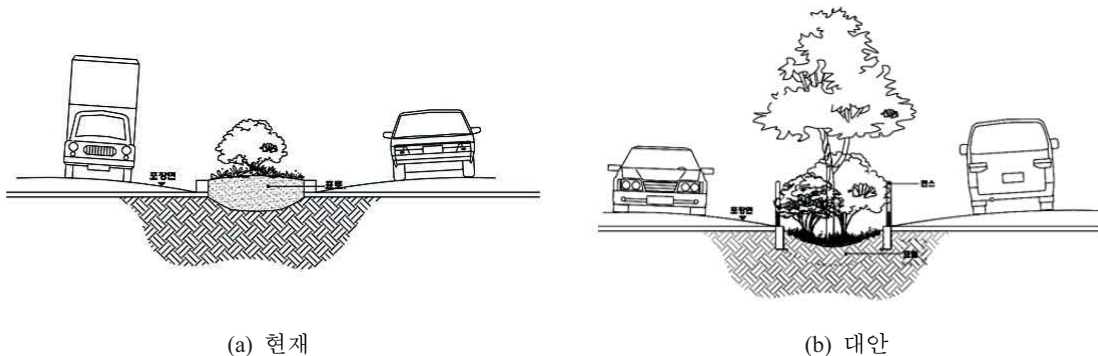
## 2) 현황

사례 2의 지역 가까운 곳에 도로보다 높게 성토한 중앙분리대 녹지가 있다. 도로보다 높아 도로의 지표 유출수가 접근할 수 없고, 제한된 식재에 의한 빈약한 표면적으로 노출된 지표에서 비가 올 경우 경계석 너머로 토양이 유출된다.

## 3) 적용방안

다른 사례와 마찬가지로 오목지형 조성과 식재로 경관 요소의 표면 거칠기를 높인다. 미세 지형을 바꾸고 식물을 심어 자연형 배수로를 만드는 방안을 강구한다. 중앙분리대의 높이를 차도보다 낮게 만들고, 나뭇잎 분포의 수직 다양성을 높이도록 다양한 식재를 심는다. 때죽나무와 모감주나무, 이팝나무, 화살나무, 좀작살나무, 사철나무, 비비추, 맥문동 등의 내습성과 내염성이 강한 식물을 활용하는 것이 적절하다. 또한 차량이 중앙분리대를 넘지 않도록 방호벽이나 펜스를 설치한다.

## 4) 디자인 제안



〈그림 9〉 도로의 중앙분리대 현재 상태와 제안 디자인의 단면도 비교

<http://www.ecotrust.org> 자료를 참고하여 다시 그림

## 5) 적용 효과

기존의 구조에서는 도로의 먼지와 화학물질을 씻어서 곧장 배수되던 물이 제안된 구조에서는 식물이 있는 오목지형으로 흘러들어 쌓이거나 머물러 토양과 미생물, 식물, 동물과 반응하는 시간이 증가한다. 따라서 토양수분의 유지기간이 길어지고, 오염물질은 토양에 흡착되거나 생물에 의해 흡수되고 제거되기 때문에 하천으로 운반되는 양이 줄어든다.

#### 사례 4 (로타리 중앙 녹지)

##### 1) 위치 : 서울대학교 정문 앞 도로 로타리 중앙 녹지



〈그림 10〉 경사지 로타리 중앙 녹지

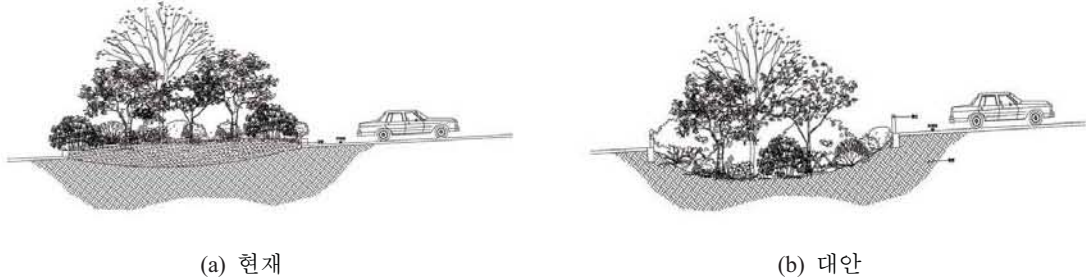
##### 2) 현황

서울대학교 정문 앞 도로의 로타리에 비교적 넓은 녹지 공간이 있다. 자투리 녹지로는 비교적 넓은 면적의 이 공간은 약간 경사진 곳에 있으나 복토를 하여 도로보다 높고, 경계석으로 지표 유출수가 녹지로 흘러들기 어려운 구조로 설계되어 있다. 이런 구조 때문에 지하수로 유입될 빗물의 양이 적고 또한 녹지를 흐르는 지표 유출수와 함께 토양 입자가 이웃한 포장도로를 거쳐 가까운 도림천으로 흘러드는 양이 늘어난다.

##### 3) 적용방안

이곳 중앙녹지대를 차도보다 낮추고 오목지형으로 만든다. 현재 다양한 수목이 식재되어 있으나 수분 유지와 겨울철 염화칼슘 영향을 고려하여 내습성과 내염성이 강한 산벚나무와 매죽나무, 모감주나무, 이팝나무, 화살나무, 좀작살나무, 계수나무, 칠엽수, 사철나무, 비비추, 맥문동 등의 식재를 계획한다. 차량과 사람의 접근을 방지하기 위해 펜스를 설치하고 새들이 찾아오는 기회를 높이도록 다양한 덩불층을 곁들일 필요가 있다.

## 4) 디자인 제안



(a) 현재 (b) 대안  
 <그림 11> 로터리 녹지 현재 상태와 제안 디자인의 단면도 비교

## 5) 적용 효과

제안된 디자인을 통해 우기에 도로에 고이던 물은 비스듬한 지형과 더불어 오목지형으로 변화된 중앙녹지로 자연스레 스며들게 된다. 이러한 자연형 배수방식에서는 빗물의 집수, 저류, 투수 과정으로 부유물질이 집적되며, 오염물질이 토양 입자에 흡착되고, 미생물과 식물에 의해 흡수되거나 분해되어 자연적으로 정화된다(최일홍 2008). 따라서 경관 수준에서 토양유실이 감소하고, 빗물과 함께 유입된 물질이 생물의 영양소로 전환된다. 하층식생의 증가로 새를 포함하는 생물의 종 수가 증가하여 도시 환경개선에 기여한다.

## 사례 5 (경사지 숲)

1) 위치 : 관악소방서 맞은 편 경사지 숲

## 2) 현황

관악소방서 맞은 편 경사지에는 관악산 숲의 한 부분이 뺏어내려 있다. 비교적 짧은 경사지 숲이지만 물길에 의해 작은 계곡이 형성되어 비가 오면 지표 유출수에 의해 토양이 침식되는 사실을 짐작할 수 있다. 근래에 숲 가꾸기 행사에 의해 아까시나무들을 잘라서 모아놓은 무더기가 여러 개 있다.

## 3) 적용방안

이 지역은 비가 올 때 빗물이 숲에 머무는 시간을 연장할 수 있는 가능성을 시험할 수 있는 여지를 지니고 있다. 작은 웅덩이를 적당한 숫자로 만들어 전체 표면적지수를 늘이고, 파인 계곡에 사방댐을 조성하여 물의 흐름을 저지하는 방식을 도입한다. 잘라서 모아놓은 아까시나무 줄기는 오히려 흩어놓으면 경사지를 따라 흘러가는 물의 속도를 더욱 줄일 수 있을 것이다.



4) 디자인 제안

현재 제안한 원칙은 비교적 단순하기 때문에 구체적인 디자인 제시는 생략한다. 경사지 숲의 표면적지수를 늘일 웅덩이와 사방댐의 공간 분포는 현장의 특성을 조사하여 조절할 필요가 있다. 현재는 버려진 공간이나 마찬가지로지만 생활공간과 가까운 위치에 있고 비교적 넓어 자연스럽게 주민들의 휴식행위가 일어나고 있다. 따라서 제안한 디자인 효과를 주민과 연구자들이 함께 검토하고, 환경교육의 기회를 가질 잠재력을 지니고 있다.

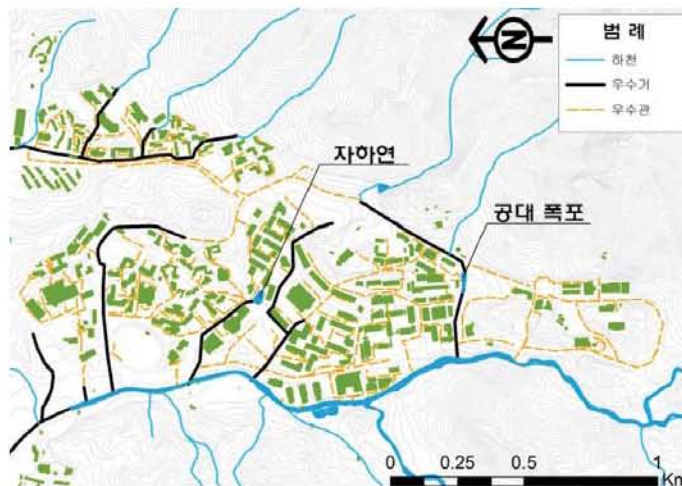
5) 적용 효과

웅덩이와 사방댐에 일시적으로 물이 고이면, 새를 포함하는 동물들에게 물을 공급하는 장소가 될 것이다. 비가 많은 계절에 일시적으로 생기지만 건조기에는 흔히 마르는 임시연못은 크기는 작지만 생물학적으로 역동적인 효과를 가진다. 자신의 생활사를 마치기 위해 그러한 임시연못을 절대적으로 필요로 하는 생물도 있다(Colburn 2004, Baldwin 2005에서 재인용). 이를 테면, 어떤 양서류는 임시연못에서만 번식을 한다. 또한, 이 임시연못은 다른 생물다양성을 증가시키는데, 노루(deers)와 딱새류(flycatchers, 날벌레 포식하는 조류), 뱀은 흔히 임시연못에서 먹이를 찾는다. 임시연못은 연못과 가까운 경사지 경관(upland-dominated landscapes)의 습지 식물과 무척추동물, 미생물 군집의 유지에도 영향을 준다.

숲 토양의 침식을 줄이고, 경사지 아래에 있는 도로와 상가로 흘러드는 토양과 유기물의 양을 줄일 수 있다. 비슷한 디자인을 관악산 숲의 여러 경사지에 배치하면 숲에서 물이 흘러나가는 시간이 지연되어 도림천이 고갈되는 시간을 줄이는 데도 기여할 것으로 예상된다.

사례 6 (서울대학교 교정 복개 하천)

1) 위치 : 서울대학교 교정 내



〈그림 12〉 서울대학교 우수거 분포

## 2) 현황

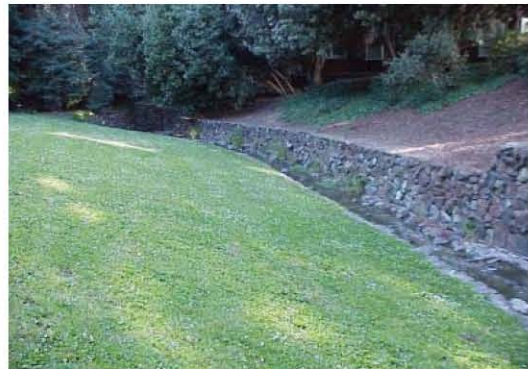
현재 서울대학교 교정 내에 존재하던 실개천은 수로가 다른 소유역으로 바뀌었을 뿐만 아니라(그림 12의 왼쪽 위 부분) 대부분 복개되어 우수거(渠)가 되었다. 자하연이나 공대의 폭포는 우수거나 우수관과 연결되어 있으며, 과거 물길의 흔적의 일부가 잔존할 뿐이다. 홍수를 막기 위해 우수를 빨리 서울대학교 밖으로 내보내는 것이 설계에서 우선되었기 때문에 수로는 직강화되었고 복개로 표면적지수가 크게 낮아졌다.



〈그림 13〉 서울대학교 내 우수거의 예

## 3) 적용방안

수로는 기본적으로 오목지형으로 최대한 자연 곡류를 유지하도록 복원한다. 거기에 습지식물이 자라도록 하면 식생완충대의 효과를 얻을 수 있다(이도원 2001). 미국 캘리포니아 대학 버클리 캠퍼스의 Strawberry Creek 복원 사례는 디자인에 참고가 될 것이다(그림 14). 기존의 암거와는 달리 하도의 바닥과 측면에는 자갈, 토양 등 자연 소재를 넣었으며, 식물들도 자라고 있다.



〈그림 14〉 미국 캘리포니아 대학 버클리 캠퍼스의 Strawberry Creek 복원 사례  
(<http://www.acme.com/jef/creeks/strawberry/>)

#### 4) 적용 효과

수로에 식물이 자라도록 하면 표면 거칠기가 증가하여 유속이 느려지고 침투유량이 감소하는 효과를 기대할 수 있다. 또한 이와 함께 수변지역에서도 지하로 침투되는 물이 증가하여 총 유출량이 감소하는 효과도 함께 나타날 것이다. 특히 수질에서 문제가 되는 초기우수를 여과하여 개선방안 적용 전에 아주 작은 강우에도 유출이 발생해 하천에 악영향을 주는 부분을 저감할 수 있다(이도원 2001, Chang 2008).

이상에서 생태수문 특성을 고려하여 디자인의 미세지형 조성에 대한 내용을 소개했다. 조류의 생태와 수평적 공간 특성의 관계를 고려한 식물 배식에 관한 내용은 앞으로 남겨진 과제다. 그러나 현재까지 연구한 내용으로 간단한 제안을 할 수 있어 소개하면 다음과 같다. 공원 가장자리는 피라칸사, 사철나무, 동백나무 등으로 밀식하여 인간의 접근을 막고 지면의 수분 유지를 위하여 고사목을 흩어두거나, 덩불층을 조성하는 디자인이 바람직하다.

대체로 우리나라 도시의 녹지는 과도한 이용으로 덩불층의 피복률이 낮고 지면이 노출되어 있다. 이로 인해 지면과 덩불층에서 먹이를 먹는 조류 종 수는 면적이 작은 도시숲 일수록 낮다(Park & Lee 2000). 도시에서 가로수보다 조류 종 수와 밀도는 수림대에서 높은 편이다(박찬열과 최명섭 2005). 그러므로 도시 녹지의 덩불층과 지면 디자인 개선으로 서식하는 새의 종수를 늘릴 수 있다. 덩불층과 지면에서 먹이를 이용하거나 둥지를 트는 조류에는 붉은머리오목눈이와 꿩, 지빠귀류 등이 포함된다. 도시에서 들개와 들고양이의 밀도 증가는 이 종류의 조류의 둥지 포식(nest predation)에 영향을 준다.

우리나라의 도시에서 번식기에 수행된 조류 조사(서울-Park and Lee 2000, 대구-박찬열과 최명섭, 부산-허위행 2005, 성남-Park 등 2005) 중 지빠귀류의 분포를 살펴보면, 면적이 작은 녹지보다는 면적이 큰 녹지에서 주로 나타났다. 대구지역에서 37헥타르 미만의 녹지에서는 번식하지 않았고, 서울지역에서 300 헥타르 이상인 녹지에서만 번식하는 것으로 확인되었다. 그렇지만, 부산 지역에서 11헥타르 규모인 동백공원에서 흰배지빠귀가 출현하였다. 동백공원에는 상록수종인 동백나무가 뺨뺨하게 생육하는데 인간의 접근이 어려운 나무 그들은 지빠귀류의 주요 먹이자원인 지렁이류의 서식지가 된다. 또한, 6헥타르 크기의 경기도 성남 녹지에서는 지빠귀류가 나타났다. 성남은 여수녹지와 개나리마을의 녹지공간으로서 최근 조성된 녹지이며 하층식생 밀도를 다량으로 유지하고 있었다. 서울시 동대문구에 위치한 홍릉숲의 경우 제한적 개방을 실시하고 있으며 41.5 헥타르 크기의 숲이지만, 흰배지빠귀와 호랑지빠귀의 번식을 확인하였다. 이와 같은 조사결과로부터 크기가 큰 숲일수록 유리하지만, 하층식생을 무성하게 유지하고 사람의 접근을 제한하면 지렁이류를 이용하는 지빠귀류의 서식을 유도할 수 있을 것으로 추측한다. 도시 녹지의 전체 조류 종 수 중 토양에서 먹이자원을 이용하는 조류의 비율을 도시생태계의 건강성 지수로 제기할 수 있는 지 향후 검토가 필요하다.



〈그림 15〉 새끼에게 먹일 지렁이를 물고 있는 호랑지빠귀  
(2008. 4.24, 홍릉수목원)

## VI. 장래 연구

이 글에서 녹지 구성에 고려할만한 원리를 수문학과 토양학, 생지화학, 조류생태학, 경관생태학 분야의 연구결과들을 검토하여 소개했다. 그 원리를 바탕으로 도시의 가로와 자투리땅에 나타나는 녹지들을 관찰하고, 개선할 수 있는 디자인 대안을 개념도로 제시했다. 제안한 디자인 대안을 매우 제한된 장소에서 적용할 수 있는 가능성을 제시하고 제한된 생태수문 과정과 조류생태학 분야의 연구결과로 기대 효과를 추론했던 내용에는 한계가 있다.

제시한 디자인 대안은 기존 연구 결과에 근거를 두고 추론 과정을 통해서 도출한 가설 수준이다. 특히 가설적 경관 기능에 바탕을 두고 있는 제안이기 때문에 실제적인 효과는 과학적 검증 과정이 필요하다. 그 과정은 학제적 연구 주제를 새롭게 발굴하고 조명하는 의미를 가지며, 조경 디자인 원칙을 탐구하는 데 참고가 되리라 본다.

조경 디자인 자체가 매우 포괄적인 사항들을 고려하는 실용적인 행위인 만큼 이 글에 제시한 내용은 거의 무한정한 주제들과 관계가 있다. 이 글을 작성하는 동안 가졌던 부가적인 문제의식과 추론 내용을 소개해보면 다음과 같다.

모든 녹지는 디자인 결과에 따라 토양 수분-유기물-미생물 활동(예, 토양호흡과 효소)-무척추동물(예, 지렁이)-소형포유동물과 새를 포함하는 생물들에 영향을 끼친다. 따라서 이러한 생태적 요소와 과정을 나타내는 변수는 도시녹지의 건강성을 평가하는 데 지표로 활용할 수 있는 잠재력을 지닌다. 앞에서 비교한 현재 상태와 대안 디자인을 이용하여 조성한 녹지의 토양 수분을 포함하는 물리적 변수와 생물학적 상태 및 과정을 비교하는 현장 비교는 흥미로운 연구주제가 된다.

작은 녹지들의 영향은 모여서 유역 규모의 수문과 생태 과정으로 표출된다. 따라서 도시 유역 수준에서 수행한 생태수문학적 특징의 비교 연구는 도시 환경 계획과 설계에 참고할 유익한 정보를 제공할 것이다. 그러나 아직 우리나라 도시 유역 수준에서 수문 특성과 영양소 방출을 포함하는 연구 자료가 거의 없고(Chang 2008), 특히 미세한 경관 요소 관리에 참고할 내용은 거의 없는 실정이다. 특히 14세기 말부터 이미 유역 단위로 토지 이용 계획이 이루어진 대표적인 사례인 청계천 유역과 1970년대 이후 토지 이용 변화가 빠르게 일어난 도림천 유역은 세계 어디에서도 쉽게 만나기 어려운 도시유역 생태계 연구대상임에도 불구하고 방치되고 있다.

유역 규모의 현장 연구에는 전문인력과 비용, 시간이 많이 소요되는 만큼 제한적인 자료를 바탕으로 모형 연구로부터 출발하는 것이 바람직하다. 이를테면 이미 많이 활용되고 있는 수문 모형에서 제시한 디자인 대안에 의한 거칠기 계수(Manning's roughness coefficient) 차이를 보정하는 변화 추이를 검토해 볼 수도 있다. 그러기 위해서는 먼저 해상력의 차이 문제를 극복해야 한다. 디자인 대안으로 여러 개의 녹지를 도시 유역에 마련하면 미세한 공간 규모에서 생태수문학적 과정의 변화가 일어나는 반면에 현재 개발된 대부분의 도시 수문 모형들은 주로 거친 공간 해상력(coarse spatial resolution)으로 분석하고 있다. 예를 들어 도시의 하천과 하수도 체계의 유량과 수질을 모의하는데 널리 적용된 SWMM(Storm Water Management Model)에서는 하위수준의 배수구역 단위로 입력 자료와 매개변수를 요구하며, 그 단위는 위에서 소개한 디자인 공간 규모보다 훨씬 크다(Rossman 2007). 따라서 미세한 공간 해상력으로 물의 흐름 방향과 양, 수질을 모의할 수 있는 모형 발굴과 함께 현장 조사는 우리 앞에 남겨진 과제이기도 하다.

### 사사(辭謝)

이 글은 이도원이 전체구성을 제안하고, 공저자들이 내용을 나누어 준비한 다음 재구성하는 방식으로 작성되었다. 내용 일부는 국립산림과학연구원 산림생태연구과의 “도시화 및 인간간섭 산림녹지의 Biotop 계량화 및 관리 방안” 연구과제의 지원으로 도출되었다. 글을 작성하는 데 필요한 여러 참고문헌을 찾아서 보내주고, 초고에 대해 건설적인 의견을 제안해준 캘리포니아대학교 버클리 캠퍼스의 류영렬에게 특별히 감사한다.

### 참고문헌

- 김영성과 진현철, 2005, 팔당호로의 질소와 황 성분 침적 측정, 한국대기환경학회지 21:39-48.  
박찬열과 최명섭, 2005, 대구시 도시숲과 가로경관의 조류군집 비교, 한국환경생태학회지

- 19(4):367-374.
- 서울시정개발연구원, 2003, 서울시 물순환 기본계획 연구 보고서, 서울시정개발연구원.
- 서울특별시, 2002, 서울특별시가로수조성및관리조례, 서울특별시.
- 신준환, 주린원, 이경학, 김경하, 임중환, 이성연, 성주환, 박찬열, 양희문, 2003, 지속가능 발전시대의 산림관리 방행, 임업연구원, 502쪽.
- 이도원, 2001, 경관생태학, 서울대학교출판부, 서울.
- 이도원, 2004, 전통 마을 경관 요소의 생태적 의미. 서울대학교출판부, 서울.
- 이은희, 1997, 생태학적 측면에서 고찰한 빗물순환체계와 도시화와의 관계, 한국조경학회지 24(4): 123-131.
- 최일홍, 2008, 물순환 시스템 개선을 위한 조경계획 및 설계기법, 생태조경계획 및 설계, 기문당, 서울.
- 최지용과 장수환, 2003, 유역관리 효율화를 위한 불투수면 지표 개발과 적용 I, 한국환경정책평가연구원.
- 허위행, 2005, 부산시 도시림의 식생구조 및 경관인자와 번식기 조류군집과의 관계, 서울대학교 농학박사학위논문, 169쪽.
- 進士五十八, 1992, 屋上緑化のビヅョソと新技術, Japan Landscape 24, プロセスア?キテクチュア, 東京.
- Aston, A.R. 1979. Rainfall interception by eight small trees. *Journal of Hydrology* 42: 383-396.
- Baker, L.A., D. Hope, Y. Xu, J. Edmonds, L. Lauver. 2001. Nitrogen balance for the central Arizona-Phoenix (CAP) ecosystems. *Ecosystems* 4: 582-602.
- Baldwin, R.F. 2005. Vernal pools: critical habitat. *Front. Ecol. Environ.* 3: 471.
- Belnap, J., J.R. Welter, N.B. Grimm, N. Barger, and J.A. Ludwig. 2005. Linkages between microbial and hydrological processes in arid and semiarid watersheds. *Ecology* 86: 298-307.
- Booth, D. 1991. Urbanization and the natural drainage system-impacts, solutions and prognoses. *Northwest Environmental Journal.* 7(1): 93-118.
- Booth, D., D. Montgomery, and J. Bethel. 1996. Large woody debris in the urban streams of the Pacific Northwest. In *Effects of Watershed development and Management on Aquatic Systems. Engineering Foundation Conference Proceedings.* Snowbird, UT. August 4-9, 1996. pp. 178-197.
- Brady, N., and R.R. Weil. 2008. *The Nature and Properties of Soils*, 14th ed. MacMillan Publishing Company, New York.
- Chang, H. 2008. Spatial analysis of water quality trend in the Han River basin, South Korea. *Water Research* 42:3285-3304.

- Chapin, F.S., III, G.P. Kofinas, and C. Folke (eds.) 2009. Principles of Ecosystem Stewardship: Resilience-Based Natural Resource Management in a Changing World. Springer, New York.
- Colburn, E.A. 2004. Vernal Pools: Natural History and Conservation. Woodward Publishing Company, Blacksburg, VA.
- Dietz, M.E., and J.C. Clausen. 2006. Saturation to improve pollutant. *Environmental Science & Technology*. 40: 1335-1340.
- Dominique, G.M. 2002. Sustainable Architecture and Urbanism. Birkhauser, Basel
- Foley, J.A., and others. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309: 570-574.
- Geiger, W. and H. Dreiseit. 2001. Neue Wege für das Regenwasser. Oldenbourg, München.
- Grimm, N.B., S.H. Faeth, N.E. Golubiewski, C.L. Redman, J. Wu, X. Bei, and J.M. Briggs. 2008. Global change and the ecology of cities. *Science* 319: 756-760.
- Groffman, P.M., N.L. Law, K.T. Belt, L.E. Band, and G.T. Fisher. 2004. Nitrogen fluxes and retention in urban watershed ecosystems. *Ecosystems* 7: 393-403.
- Hellwet, U., and J. Oltmanns. 2000. Wasser in Der Stadt: Perspektiven Einer Neuen Urbanitat. Transit Buchverlag, Berlin.
- Iversen, T.M., B. Kronvang, B.L. Madsen, P. Markmann and M.B. Nielsen. 1993. Reestablishment of Danish streams: restoration and maintenance measures. *Aquatic Conservation of Marine Freshwater Ecosystem* 3: 73-92.
- Lee J. G. and J. P. Heaney. 2003. Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 129(5): 419-426.
- Lookingbill, T.R., N.E. Goldenberg, and B.H. Williams. 2004. Understorey species as soil moisture indicators in Oregon's Western Cascades-old-growth forest. *Northwest Science* 78: 214-224.
- Lovell, S.T. and D.M. Johnston 2009b. Creating multifunctional landscapes: how can the field ecology inform the design of the landscape? *Front. Ecol. Environ.* 7: 212-220.
- Lovell, S.T. and D.M. Johnston. 2009a. Designing landscapes for performance based on emerging principles in landscape ecology. *Ecology & Society*14(1): 44.
- Ludwig, J.A., P. B.P. Wilcox, D.D. Breshears, D.J. Tongway, and A.C. Imeson. 2005. Vegetation patches and runoff-erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes. *Ecology* 86: 288-297.
- Omernik, J.M. 1977. Nonpoint source - stream nutrient level relationships: A nationwide study. EPA/600/2-77/105 (151p.) US Environmental Protection Agency, Corvallis, OR.
- Park, C.-R. and W.-S. Lee. 2000. Relationship between species composition and area in breeding birds of urban woods in Seoul, Korea. *Landscape and Urban Planning* 51: 29-36.

- Park, S., and Y.-H. Lee. 2002. Spatial distribution of wet deposition of nitrogen in South Korea. *Atmospheric Environment* 36: 619-628.
- Park, S., H.-J. In, S.-W. Kim, and Y.-H. Lee. 2000. Estimation of sulfur deposition in South Korea. *Atmospheric Environment* 34: 3259-3269.
- Pierzynski, G.M., J.T. Sims, and G.F. Vance. 2000. *Soils and Environmental Quality*, 2nd ed.. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Robinette, G.O. 1984. *Water Conservation in Landscape Design and Management*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Rossman L.A. 2007. *Stormwater Management Model User's Manual, Version 5.0*. U.S. Environmental Research Agency. EPA/600/R-05/040.
- Roth, N.E., J.D. Allan and D.L. Erickson. 1996. Landscape influences on stream biotic integrity assessed at multiple spatial scale. *Landscape Ecology* 11: 141-156.
- Schröder, B. 2006. Pattern, process, and function in landscape ecology and catchment hydrology - how can quantitative landscape ecology support predictions in ungauged basins?. *Hydrology and Earth System Science* 10: 967-979.
- Schueler, T. 1994. The Importance of Imperviousness. *Watershed Protection Techniques* 1(3): 100-111. Center for Watershed Protection.
- Serrano, L., J.A. Gamon, and J. Penuelas. 2000. Estimation of canopy photosynthetic and nonphotosynthetic components from spectral transmittance. *Ecology* 81: 2149-3162.
- Swank, W.T. and J.E. Douglas. 1974. Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine. *Science* 185: 857-859.
- USDA-NRCS (U.S. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service). 2005. *Urban Soil Primer*. USDA-NRCS.
- Waring, R.H. and S.W. Running. 1998. *Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scale*. 2nd ed., Academic Press, San Diego, CA. 370p.
- Weltausstellung and Stadtteil Kronsberg. 2004. *Der stadtebauliche Rahmen für die EXPO 2000 in Hannover*, Dtsch./Engl., LHH Baudezernat. Planungsgruppe Weltausstellung, Hannover 1999.
- Whittaker, R.H. and G.M. Woodwell. 1967. Surface area relations of woody plants and forest communities. *American Journal of Botany* 54: 931-939.