생태네트워크로서의 토양네트워크(Gold Network) 제안

이동근¹⁾ · 이호철²⁾ · 김은영³⁾ · 송원경³⁾ · 김영자⁴⁾ · 황상연⁵⁾

¹⁾ 서울대학교 조경·지역시스템공학부 · ²⁾ (주)포이엔 · ³⁾ 한국환경정책·평가연구원

⁴⁾ 한국환경산업기술원 · ⁵⁾ 환경부 자연보전국

Introduction of Soil Network(Gold Network) as one of the Ecological Network

Lee, Dong-Kun¹⁾ · Lee, Hochul²⁾ · Kim, Eunyoung³⁾

Song, Wonkyong³⁾ · Kim, Young Ja⁴⁾ and Hwang Sangyeon⁵⁾

¹⁾ Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University,

²⁾ 4EN, Inc., ³⁾ Korea Environment Institute, ⁴⁾ Korea Environmental Industry & Technology Institute,

⁵⁾ Nature Conservation Bureau, Ministry of Environment.

ABSTRACT

Lately, besides promoting the biodiversity of the natural ecosystems, there is a demand for climate change mitigation features that will reduce greenhouse gases and prevent disasters that will bring damages such as torrential rains. However, there was not a lot of discussion on the soils that are key in these features. Therefore, this paper proposes a network (Gold Network) as an alternative that will solve the problem that was filed earlier by figuring out how to compose the soil environment. First, in order to maximize the ecological status and value of the soil, a soil network can be proposed through the vertical and horizontal connections of the fragmented soil. Second, there is a need to understand and research the organic system of the ecosystems as well as the complex perspective of the ecosystem services, not only the fragmentary perspectives of the soil remediation, planting improvements or the other existing elements. Third, there is a need to apply the integrated

First author : Lee, Dong-Kun, Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University,

Tel : +82-2-880-4875, E-mail : dklee7@snu.ac.kr

Corresponding author : Lee, Hochul, 4EN, Inc.,

Tel : +82-2-391-2575, E-mail : eochul@gmail.com

Received : 4 February, 2013. **Revised** : 22 February, 2013. **Accepted** : 22 February, 2013.

perspective of the Landscape Ecology, Ecological Engineering and Restoration Ecology for the connectivity of the soil (network) due to it being in the execution of the soil network. If a soil network was to be built, a fundamental ecological network would be realized to not only promote biodiversity but also to prepare effective adaptation to climate change.

Key Words : *Ecological restoration, Biodiversity, Climate change adaptation and mitigation, Carbon storage, Water balance, Landscape ecology*

I. 서 론

1992년 리우정상회담에서 지속가능한 개발(ESSD)과 생물다양성협약 등으로 많은 국가와 지역에서 생물다양성 증진을 위한 노력들을 하고 있다. 우리나라에서도 이와 관련된 많은 정책, 계획이 시행되었으며 특히 1995년 환경부의 전국 그린네트워크 구상은 생태계나 녹지를 단독으로 존재하여 얻는 가치보다 연결을 통해 보다 궁극적인 생물다양성 등의 해결을 시도하였다는 점에서 진일보하였다고 평가받고 있다. 최근에는 국토생태네트워크의 관점에서 백두대간 연결을 위해 이러한 개념이 적용되고 있으며 동북아생태네트워크까지 제안되고 있다. 또한 도로 등이 조성될 때 개발사업의 영향으로 단절되는 주요 생물서식공간을 연결하는 생태통로가 조성되는 사례는 많이 소개가 되고 있다. 더구나 그린네트워크는 물론이고 물의 연결을 강조하는 블루네트워크, 바람통로를 의미하는 화이트네트워크 등은 택지나 도시개발 계획 수립시 자주 사용되는 주요 개념으로 자리매김하고 있다.

그러나 정책이나 사업을 실시함에 있어 생태계의 관리는 생태면적을 몇 % 향상, 대체습지 몇 개 조성 등과 같은 정해진 지표에 의해 평가되고 있어 많은 부작용을 생기고 있다. 예를 들면 생태면적을 강조하여 일정면적 이상의 투수면적 확보를 강조하면 지표면에 보이는 투수만으로 평가되어 토양까지 실제 투수가 되는지

나아가 시간의 경과 후에도 투수기능이 유지되는지는 중요하지 않게 된다. 또한, 최근 우리는 자연생태계로부터 생물다양성 증진이라는 기본적인 기능이외에도 집중호우 등 기후변화에 의한 재해가 증가하고 있어 이러한 재해로부터 피해를 줄일 수 있는 재해방지를 포함하는 기후변화 적응기능은 물론이고 온실효과가스를 줄일 수 기후변화 완화기능까지 요구하고 있는 실정이다.

즉 지금까지 생태계 보전을 위해 친환경적 도시(택지)건설을 위해 수치중심의 눈에 보이는 정책 혹은 계획보다 그 장소에서 진정으로 필요로 하는 기능이 유지될 수 있는지, 어떠한 기능이 우선적으로 요구되는지를 잘 이해하여야 한다. 그러나 이러한 기능에 핵심이 되는 토양에 대해서는 그 동안 많은 논의가 되지 못하였다. 환경부에서도 오염토양이라는 관점에서는 정책이 입안되고 관심을 갖고 있지만 원래 갖고 있는 토양의 기능과 역할에 대해서는 일부

Figure 1. Difference in perspective between soil patch and soil network (Gold Network).

에서 기술개발 등을 통해 제안되고 있지만 아직 전반적인 논의는 전무한 실정이다.

따라서 본고에서는 그동안 중요성에 비추어 볼 때 많은 논의가 되지 못하였던 토양에 대해 일반적인 기능을 이해하고 어떻게 토양이 조성 되면 앞에서 제기한 문제 해결을 위해 토양관리차원에서 네트워크 개념을 결합시킨 토양네트워크(Gold Network)를 제안하고자 한다.

II. 미래 환경의 전망 및 토양 네트워크의 필요성

최근 전 세계적으로 이슈가 되고 있는 분야는 생물다양성과 기후변화이다. 생물다양성은 육상·해양 및 그 밖의 수중생태계와 이들 생태계가 부분을 이루는 복합생태계 등 모든 분야의 생물체간의 변이성을 말하며, 이는 종내의 다양성, 종간의 다양성 및 생태계의 다양성을 포함한다. 이러한 생물다양성은 기후변화, 외래종 침입, 생물다양성 보전체계 미흡으로 위협받고 있다(Republic of Korea, 2009). 기후변화는 극단적인 기후현상의 빈도와 강도의 증가로 인한 단기적인 환경변화뿐만 아니라 장기간에 걸친 온도 상승, 강수량의 변화, 해수면 상승 등을 유발하며 지구의 평균기온 상승, 해수온도 상승 등을 초래하고 있다. 이러한 기후변화 영향은 생태계 변화를 초래하게 되며 특히, 강수량의 변화는 토양 유실과 함께 식물 및 미생물의 기반인 토양생태계의 변화가 불가피하다.

우리나라는 전 국토의 64%가 산지로 구성되어 있어 여름철 태풍이나 장마에 의한 집중호우로 인하여 산사태가 빈번하게 발생한다. 산사태는 토양함수량이 일정기준 이상을 초과하면 발생하게 되는 것으로 재난 및 안전관리기본법 제38조에 의하면 연속강우량 200mm 이상, 시우량 30mm 이상 혹은 일강우량이 150mm 이상일 때 산사태경보를 발령한다. 이와 같이 산사태는 여름철 집중호우 및 태풍 등에 의해 발

생하게 되며 최근 기후변화에 따른 기상이변으로 발생이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 산사태는 기상, 지형, 지질, 토양, 식생 등의 자연지리적인 요소들이 상호작용하여 발생한다(Jang & Chung, 2007). 이와 같이 기후변화는 단순히 기온상승 및 강수량 증가 외에 산사태로 인한 토양유실을 초래하게 된다.

이러한 기후변화는 앞서 제시한 산사태를 비롯하여 산불 등과 같은 재해 증가와 생태계 교란 등 우리나라 산림에 심각한 위협요인으로 대두되고 있다. 특히, 봄철 건조일수 증가로 전국 연평균 산불건수는 1980년대 3배, 산사태는 1970년대의 3배가량 증가하고 있으며, 건조일수 증가로 최근 10년간 30ha 이상 대형 산불이 49건 발생하였다. 또한, 집중호우 빈발 등으로 1970년대에 비해 2000년대에는 산사태 발생면적과 복구비가 연평균 3배가량 증가하였고, 산림병해충 발생은 2004년까지 지속적으로 감소하였으나 2005년부터 이상기후로 인해 증가추세로 전환되었으며 그 확산속도가 빨라졌다(Republic of Korea, 2009). 이러한 이상기후로 인한 산사태, 산불, 산림병해충 등은 야생동·식물의 서식지인 토양을 훼손하여 생물다양성까지 위협하게 된다.

향후 토양 보전 및 관리는 다가오는 불확실한 미래 환경에 대응하기 위한 중요한 요소이다. 특히, 극한 기후 등 기후변화에 적응할 수 있는 토양환경 조성뿐만 아니라 생물다양성 증진을 위해 토양의 기능을 강화할 수 있는 전략 수립이 필요하다. 본 고에서는 이러한 전략 중에 하나로써 토양생태네트워크를 제안하고자 한다. 토양생태네트워크는 식생의 근원이 되는 토양에서부터 네트워크를 실현하여 식생을 비롯하여 토양생물까지 네트워크화하여 토양이 가지는 기능을 극대화하여 기후변화 및 생물다양성 위협에 대응하여야 할 것이다. 여기에는 그동안 중요시되어온 토양오염복원은 물론이고, 유전자자원까지 포함한 생물다양성, 탄소저

장, 경관의 가치, 생태복원, 수자원관리 등까지 개념이 확대된다(Figure 1).

III. 토양이 갖는 기능 및 가치

토양의 사전적 의미는 바위(암석)가 분해되어 지구의 외각을 이루는 가루이며, 학문적인 의미로는 암석이 풍화작용(물리적 화학적 생물학적)을 받아 부스러지고 분해된 물질을 모재라 하고, 이 모재가 다시 토양생성 작용을 받아 토양 층위가 분화됨으로써 생성된 물질을 비로소 토양이라 한다(Choi et al., 1998). 다시 말해, 지각을 구성하는 암석의 풍화산물과 이에 분해되어가는 유기물이 섞여지고 기후, 생물들의 작용을 받아 변화되며 그 변화는 항상 환경조건과 평행을 이루기 위해 계속되고 있다. 따라서 토양은 일정한 토양단면의 형태를 이루는 자연체로서 지구표면을 덮고 있으며, 알맞은 양의 공기와 물이 들어있는 때에는 기계적으로 식물을 지지하고 양분의 일부를 공급하여 식물이 자라게 하는 곳이라고 할 수 있다. 특히, 표토는 양분이 많은 표면의 흙으로서 토양 속에는 식물이 자라는 데 필요한 물질이나 공기, 물, 미생물 등이 함유되어 있다(Ministry of Environment, 2001).

이러한 토양은 동·식물들에게 삶의 터전을 제공하고 식물을 지지하거나 영양분을 공급하는 등 다양한 기능을 수행한다. Brady and Weil(2009)는 토양의 기능을 식물생장 배지, 물 공급 및 수질 조정자, 원자재 재활용자, 대기성분 조정자, 토양생물 서식지, 공학적 매체 등 6가지 중요한 생태계 역할로 분류한 바 있다. 식물뿌리의 배지로서 토양은 모든 식물에 필수적인 양분원소들을 공급하며, 토양의 성질에 따라 식생의 특성이 결정되기도 한다. 또한 간접적으로 식생이 제공할 수 있는 인간을 포함한 동물의 종류와 수를 결정하므로 생물다양성과 밀접한 관련성이 있다.

수질 개선은 강, 호수, 강 하구, 그리고 지하대수층 대부분이 토양을 통하여 이동 혹은 토양표면 위로 흐르면서 이루어진다. 토양이 빗물을 스며들게 한다면 상당량의 빗물은 토양층들을 통하여 지하수로 느리게 스며들 수 있으며 결국 근본적 흐름인 강으로 유입되는 데 수개월 혹은 수년의 기간이 소요된다. 토양의 깊이가 빗물이 침투할 수 없을 정도로 얇거나 불투수성일 경우 빗물이 토양으로 침투하지 못하고 강으로 빠르게 유입되는 경우에는 토양을 통한 수질 개선 효과를 볼 수 없다.

또한, 토양은 중요한 지구 화학적 순환과정에서 중추적인 역할을 한다. 토양은 다량의 유기성폐기물을 동화시키는 능력을 가지고 있기 때문에 그것을 유익한 부식으로 변화시키고 폐기물에 함유된 무기 영양소들을 식물과 동물이 흡수 이용할 수 있는 형태로 전화시키고 또한 탄산가스 형태로 탄소를 대기 중으로 환원시킬 뿐 아니라 탄산가스는 다시 식물의 광합성 작용을 통하여 살아 있는 미생물의 일부가 되기도 한다. 뿐만 아니라 토양은 토양 유기물로서 이산화탄소를 축적할 수 있으므로 온실효과에 의한 지구변화에 중요한 영향을 미친다. IPCC(2007)에 의하면 토양($2400 \times 10^{15} \text{g}$)은 대기($760 \times 10^{15} \text{g}$)와 식생($550 \times 10^{15} \text{g}$)에 있는 탄소를 합한 것보다 거의 2배 정도 더 많은 탄소를 갖고 있다고 보고되고 있다.

그 밖에 토양은 오래된 숲이나 강 하구 포구보다 더 복잡하고 다양한 생태계를 가지고 있다. 소량의 토양에 포식자, 먹이생산자, 소비자, 기생 동식물이 존재할 수 있다. 토양은 매우 다양한 서식환경을 갖고 있고 있는데 예를 들면 물로 채워져 있는 공극에는 선형동물, 규조류, 윤충 등의 생명체가 존재한다. 따라서 토양은 지구 대부분의 유전적 다양성에 대한 은신처를 제공해 주며 공기, 물과 같이 토양은 거대한 생태계의 중요한 구성원이다. 이러한 토양의 기능이 향후 급변하는 미래 환경에 대응하는데 중

요한 역할을 수행할 것으로 판단된다.

IV. 토양네트워크가 가져야 할 역할

1. 생태복원의 기반으로 토양네트워크

생태복원은 훼손된 생태계의 구성요소들의 기능을 극대화하는 것과 동시에 구성요소를 기반으로 생존하는 생물의 종다양성 증진을 목표로 하고 있다. 이러한 구성요소 가운데 토양에 관심을 기울이는 것은 사실 상당히 늦은 감이 있다. UNEP는 토양을 ‘지구상에서 알려지지 않은 생명이 가장 많은 원천’으로 선언했으며 FAO와 OECD는 토양생태다양성의 지속가능성에 대한 개념을 지속적으로 강조해오고 있다 (FAO, 2003; OECD, 2004). 토양에는 무수히 많은 생명체들이 살고 있는데, 코넬대의 생태학자 Pimentel(1995)는 토양 생태질이 좋은 흙 1ha(25 에이커)에는 평균 1,000kg의 지렁이, 1,000kg의 절지동물, 150kg의 원생동물, 150kg의 조류, 1,700kg의 박테리아, 2,700kg의 균류가 살고 있다고 주장하고 있다.

산업화와 농경활동으로 인한 생태계 훼손이 심각한 현 시점에서 토양에 대한 관심을 기울이는 것은 토양이 생물의 서식 기반임과 동시에 토양 및 토양 내 생물들이 분해자이자 생산자로서 전 지구적 물질순환에 절대적인 역할과 기능을 하고 있기 때문이다. 이와 더불어 지금까지 실행되어진 식생 위주 또는 생물종의 인위적인 도입을 통한 Top-down 방식의 생태복원이 복원대상지에 한정적이고 단편적인 생태복원 효과를 보이고 있다는 위기감이 확산되고 있기 때문이기도 하다. 실제로 건설, 토목사업 등 국토개발사업의 환경영향평가에서 토양생태조사가 이루어지지 않고 있으며, 환경산업에서의 토양생태조사 역시 피상적이고 형식적으로 이루어져 왔다. 이는 곧 실제 대상지의 토양 조건이 반영되지 못한 것이며 토양에서부터 시작되고 발현되는 생명과 물질 순환의 시스템이

외면되거나 충분히 고려되지 않은 것이다. 결국 생태계 기반인 토양의 기능을 반영하지 않은 식생 위주의 육상생태계는 그 복원범위가 한정적이고, 종(種)친화적이며 지속가능한 생태복원으로서 기능할 수 있는가에 대한 의문이 드는 것이다.

동식물상을 포함한 육상생태계의 복원의 경우, 동식물상의 서식 기반으로 토양을 중심으로 한 Bottom-up 방식의 생태복원이 연구되어지고 실행되어야 한다. 생태계의 기반이자 생물종의 보고인 토양을 전제한 생태복원을 통해 시공간적으로 확장되고 파급효과가 큰 복원 효과를 기대할 수 있을 것이다. 즉, 생태복원 대상지의 지상부 녹화, 목표생물종 도입에 앞서 수문환경을 고려한 지하부의 토양생태질 조사, 토양생물상 조사, 그리고 인근 지형, 지질을 감안한 토양패치의 연결성 강화를 위한 생태계기능평가 등을 선행하여 사업 이후 대상지에서 목표로 한 생태복원효과를 유도함은 물론 수문환경을 포함한 지하부의 생태복원과 인근 생태계로 생태전이, 유전적 교류 기회 확대 등 그 효과를 확장하는 것이다. 또한 이러한 노력이 대상지의 시공간적 범위를 넘어서 지속가능한 생태복원으로서 확산되기 위해서는 생태네트워크 개념을 도입한 토양네트워크를 구축, 물질순환을 위한 생태축의 역할을 부여하고 이를 기능하도록 해야 한다(Figure 2).

Figure 2. Comparison Top-down with Bottom-up method for ecological restoration.

2. 탄소저감원으로서 토양네트워크

지구온난화와 기후변화의 대응 전략 중 하나로 탄소 저감이 대두되고 있으며 이의 달성을 위한 다양한 연구와 방안들이 실행되고 있다. 이 가운데 탄소의 흡수원(carbon sink)으로서 토양의 가치가 주목받고 있다. 토양은 대기보다 세 배나 많은 탄소를 머금고 있으며, 모든 살아 있는 동식물이 지니고 있는 탄소에 비해 네 배가 많다(Lal, 1999). 이는 토양이 탄소 저장고로서의 역할뿐 아니라 탄소의 흡수, 저감원으로서 기후변화에 미치는 역할 및 영향이 매우 크다는 것을 시사한다. 작금의 지구온난화, 기후변화가 산업화, 농경활동으로 화석연료의 채굴과 연소, 경작을 통한 토양교란과 메탄가스 발생 등에서 기인하는 것이라면, 역설적으로 인간의 기후변화 대응 노력과 생태계 기능 증진을 통해 유동적인 탄소를 지중에 저장함으로써 탄소의 저감을 이루는 것도 가능하다 하겠다.

지구상의 대부분의 호흡활동은 토양에서 일어나며 토양호흡은 유기잔류물의 분해, 뿌리 호흡, 그리고 토양유기물의 느린 분해를 나타낸다. 18세기에 시작된 토지의 개간 및 경작은 이러한 토양호흡을 가속화하였으며 1950년대까지 대기권 CO₂ 축적의 가장 큰 요인이 되었다(Post et al., 1990). 온대기후 지방의 자연 생태계가 농경지로 변하면 탄소 함유율은 60%까지 떨어지고 심하게 침식된 토양은 70~80%까지 원래 토양에 포함된 유기탄소를 상실한 것으로 추정된다는 연구결과(Lal et al., 2004)도 발표되었다. 또한 산업화에 의한 국토개발 역시 탄소저장능을 저하하는 큰 원인인데 이는 표토의 유실, 토양층 황폐화 등의 직접적인 원인을 들 수 있다.

더 큰 문제는 교란되고 유실된 표토나 토양 내 유기탄소 함유율은 개발사업이나 경작활동을 그만두더라도 단기간에 복원되지 않는다는 데 있다. 흙 속의 유기 탄소 함유율이 정상으로 돌아오려면 수십 년, 수백 년이 걸리며, 표토층

2~3cm이 생성되기 위해서는 100~300년이 소요된다고 한다. 인간 활동으로 황폐해진 땅에 식물의 잔존물, 뿌리 방출물, 부엽토, 생명체들이 뒤섞인 자연의 생태계가 돌아오기에는 그만큼 시간이 걸린다. 또한 산림, 농경지가 아닌 도시화지역의 경우, 이러한 표토, 유기물 관리가 쉽지 않은 특징이 있다. 게다가 개발사업으로 인한 토양의 파편화, 인공구조물에 의한 피복, 지하공간의 단절로 토양의 탄소저장능은 물론 탄소를 중심으로 한 물질순환 기능을 상실하게 된다.

토양을 이용한 탄소저감은 토양호흡 안정화, 탄소 격리를 통한 저장능 향상과 궤를 같이 하며, 이를 극대화함으로써 작금의 기후변화, 지구온난화를 개선할 수 있다. 구체적인 토양관리 방안으로는 토지 피복, 토양유기탄소 축적, 토양생태계 구축을 통한 물질순환 안정화, 토양패치간의 연결 등을 들 수 있다. 토양네트워크는 생태네트워크 개념을 도입한 새로운 토양관리 방안으로서 단절된 토양패치간의 연결성을 높여 상대적으로 낮은 토양저감효과를 개선하거나, 토양패치의 규모 확장을 통한 탄소저장능 극대화 등의 개념을 포함한다. 토양네트워크를 구축하기 위해서는 대기-식생-토양-수문의 수직적 연결 뿐 만 아니라 토지이용별 토양패치간의 수평적 연결도 중요하다. 탄소저감원으로서 토양네트워크의 역할은 토양의 수직, 수평적 연결을 통한 토지 피복, 토양유기탄소 축적, 물질순환 안정화를 위한 골격을 구축하는데 있다.

3. 기후변화적응대책의 기반이 되는 토양네트워크

지구온난화 및 기후변화에 따라 이상기후현상이 증가하면서 집중호우, 폭설 등의 규모와 빈도가 증가하고 있으며 특히 도시화지역의 경우 도시열섬 등 이상기후현상을 가속화하여 매년 거대한 규모의 생태계 파괴와 인명, 재산 손실 등이 발생하고 있다. 이는 산업화에 따른 불

투수층의 확대, 토양 경화로 인한 수분 침투 억제 등에 기인한 것이며 특히 우리나라는 경사가 급한 산악 지형이 많고 토양 분포면적이 넓지 않고 토심이 얇은 특성으로 인해 홍수와 범람 등 기후변화로 인한 수문학적 재해에 취약한 특성을 나타내고 있다.

이러한 위험을 저감하기 위해 수계와 유역관리 분야에서는 기존의 하천을 의존하는 선적인 개념에서 벗어나 홍수량을 유역별로 할당하여 상류에 위치한 다목적댐, 산지, 농경지와 중류에 위치한 유수지, 저류지, 우수침투시설, 하류에 위치한 습지, 농경지 및 유흥지를 통합하여 홍수량을 저감시키는 면적인 개념으로 전환되고 있다(Ministry of Construction and Transportation, 2004). 하지만 도시화지역으로 한정된 국지적 관점에서 볼 때 도시 홍수, 범람과 같은 수문학적 재해는 스케일적으로 벗어난 측면이 있고 특히 서울, 부산 등 대도시의 경우 하수관거 시설의 노후, 처리용량 초과 등으로 기후변화 적응에 한계를 나타내고 있다. 이에 인공습지, 빗물정원, 식생수로 등 자연형 처리시설들의 필요성이 대두되고 있으나 설치율이 낮고 거점별 설치로 인해 그 효율이 불명확하다는 단점이 있다. 즉, 자연형 처리시설들을 하나로 연계시킬 네트워크 개념의 수계 관리체계가 부재한 것이다.

토양은 대기, 식생, 지표수계, 지하수계를 잇는 접면으로서 물의 이동경로를 이루는 가장 중요한 매질의 역할을 수행한다. 이러한 토양의 역할은 지구환경에 여러 가지 영향을 끼치는데 특히 토양에 존재하는 물인 토양수분은 미생물이나 식물체 등의 에너지원인 동시에 침투, 증발산 등을 통해 수자원이나 기상현상에도 직접적인 영향을 미친다. 토양과 수문현상을 이해하는데 중요한 요소는 침투와 투수로 볼 수 있으며 토양수분 함량과 매트릭 포텐셜로 설명되는 토양으로 유입된 물은 일정한 패턴에 의해 모양을 변화시켜가며 순환계에 참여하게 되는데

Figure 3. Cases of soil network in Hannover, Germany (left), Tokyo, Japan (right).

이를 물수지라고 표현한다. 도시화지역에서 빈번히 발생하는 수문학적 재해는 이러한 물수지의 불균형에서 기인하는 것으로 토양으로의 수분 침투, 투수를 극대화하여 이러한 문제점을 개선할 수 있다. 즉, 토양의 수분저장 및 저류기능을 극대화하고, 지하수면으로 이동, 수문의 저장고이자 통로로서 기능하게 하여 도시화지역의 물 수지를 안정화하는 것이다. 이때 기존의 하수관거시스템과의 연계가 필수적이며 저류조, 빗물정원 등 자연담수·배수시스템을 활용시 거점별 적용이 아닌, 하천차수 개념을 도입한 토양네트워크가 구성되어야 한다. 이러한 토양네트워크 구축을 위해서는 지상부의 빗물집수-처리-저류-침투-활용의 시스템과 지하부의 토양수분 이동-저장-지하수면 연결의 시스템에 대한 고려가 필요하다.

Figure 3은 독일(왼쪽)과 일본(오른쪽)의 사례로 실제 토양의 연결을 통해 수분침투, 투수 및 저장능력을 극대화하고 있는 사례이다. 일본의 사례는 수목밀이 토양으로 다 연결되어 있다.

V. 네트워크의 필요성

현재 네트워크란 용어는 통신, 방송 등 여러 분야에서 사용되고 있다. 흔히 네트워크란 각 지역에 흩어져 있는 방송국이 마치 그물처럼 연결되어 전국적으로 같은 방송을 전달할 수 있게 만들어진 형태 “방송망”을 일컫는 방송용어로 많이 사용된다(Doopedia Doosan Encyclopedia,

2013). 사회학에서는 70년대 후반부터 사람들을 연결시키고 사회학적 지위나 집단이나 조직을 연결시키는 관계의 묶음으로 정의하고 네트워크에서는 개인적인 경험이나 행동, 성과 등이 어떤 네트워크에 위치하느냐에 따라 달라진다고 보고 있다. 네트워크에서 중심에 있을수록 해당 조직 또는 시스템 환경에서 더 큰 영향력을 가질 수 있다.

최근 환경 분야에서 새롭게 대두되고 있는 생태네트워크(ecological network)는 생태계 보전·관리 분야에 네트워크의 고유 개념을 적용하여 구조와 기능을 고려한 생태계 향상을 도모하고 있다. 일반적으로 생태네트워크는 생태계 전반에 걸친 통합 네트워크를 의미하며 구체적으로 녹지 분야의 그린네트워크(Green Network), 수생태계 분야의 블루네트워크(Blue Network), 바람길 등의 화이트네트워크(White Network) 등으로 구분될 수 있다.

그린네트워크는 생태계 보전과 생물다양성 증진을 위해 산지, 하천, 도심에 이르기까지 동식물의 생태공간을 체계적으로 구축하는 것을 의미한다. 그린네트워크는 하천축이나 도로축 등을 중심으로 녹지 및 생물자원을 유기적으로 연결할 수 있도록 구성하고, 녹지를 중심으로 도시에 생물을 끌어들이어 도시민들에게 자연과 접할 수 있는 기회를 제공하는 역할을 한다. 또한 도시주변의 주요한 산지와 산림을 생물종의 저장공간 또는 유전자 공급원으로 삼고, 도시 내 소규모의 산과 공원 또는 농촌지역의 농장과 습지 등을 거점으로 하여 도시에 조성된 녹지나 하천, 정원, 가로수 등을 연계해 생태통로(eco-bridge, eco-corridor)를 만드는 방식으로 전개된다(Doopedia Doosan Encyclopedia, 2013). 환경부를 중심으로 추진된 광역생태축(Ministry of Environment, 2007), 지자체 차원에서 구축되고 있는 대부분의 생태네트워크는 그린네트워크와 유사한 개념으로서 산림축과 하천축, 야생동물축의 상호 보완적 적용이 더 요구된다

(Jeon et al., 2010).

블루네트워크는 수공간 체계를 연결 대상으로 하는 네트워크 개념으로서 하천, 호소, 습지 등을 중심으로 네트워크를 구현하는 방식이다. 우리나라는 국가환경종합계획(2006~2015) 등을 통해 산림, 하천, 습지·갯벌 등 생태네트워크 구성요소별 관리 강화, 수변생태벨트 조성 등 관련 내용을 국가 정책으로 추진하고 있다(Ministry of Environment, 2005). 블루네트워크는 일반적으로 그린네트워크에 비해 연결성이 우수하고 이질적이며 추이대로서의 생태적 기능이 풍부하여 생물다양성 향상에 중요한 역할을 수행하고 있다. 그러나 수변지역을 중심으로 개발지역이 확장되면서 블루네트워크가 단절되거나 수변녹지가 훼손되는 문제점이 야기되고 있는 상황이다. 따라서 블루네트워크 구성을 통해 하천 및 하천변 생태계의 연결성을 확보하는 노력이 필요하다.

화이트네트워크는 스케일에 따라 그 개념을 폭넓게 적용시킬 수 있다. 지리적으로 한반도는 중위도 온대성 기후대에 위치하여 겨울에 북서풍, 여름에는 남서풍이 강하며 계절에 따른 풍계가 뚜렷하다(Korea Meteorological Administration, 2011). 이에 따라 봄철을 중심으로 황사 등 중국의 대기오염으로 인한 계절적 피해에 노출되어 있다. 또한 급격한 산업화와 도시화로 인한 대기오염과 대기순환 저하로 도시지역의 대기질이 저하되는 문제점이 발생되었다. 따라서 국지적 또는 지역적 대기순환을 고려한 화이트네트워크의 필요성이 점차 중요하게 인식되고 있는 상황이다. 최근 화이트네트워크가 도시지역의 열섬현상 완화 등에도 효과적일 수 있다는 연구가 소개되면서(Kim et al., 2004; Cha et al., 2007), 그린네트워크와 블루네트워크를 통한 화이트네트워크 구축 계획이 도시계획 차원에서 중요한 전략으로 부각되고 있다.

네트워크의 중요성은 독립적으로 존재하는 생태계 구성 요소들이 구조적 또는 기능적으로

연결될 경우 그 생태적 기능이 강화될 수 있다는 데 있다. 반면에 고립된 생태계 요소들은 단절 및 파편화로 인해 기능이 저하되어 본래의 역할을 수행할 수 없게 될 수 있다. 이러한 개념은 경관생태학과 보전생물학에서 폭넓게 활용되고 있으며 특히 야생동·식물 서식지 관리에 코리더 또는 경관 연결성의 개념으로 적용되고 있다. 경관 연결성은 중 공급원 패치 사이에서 이동을 용이하게 하거나 방해하는 경관의 정도, 경관구조에 따른 개체의 이동 반응과 패치의 공간적 접촉을 유발하는 서식지 패치간의 기능적 관계로 정의되며(Taylor et al., 1993; With et al., 1997), 일반적으로 경관 연결성에는 구조적, 기능적 측면을 모두 고려하여 측정되는 것이 바람직하다(Song et al., 2012). 이러한 맥락에서 생태계가 연결되지 못하고 파편화되면 야생동·식물의 생존 가능성은 크게 줄어들게 되므로 이들의 이동성을 고려한 서식지 연결은 개체군 보전에서 매우 중요한 것으로 판단된다. 연결성 측정은 생태학 분야에서 메타개체군 분야의 발전에 기여했으며(Hanski, 1999), 메타개체군 및 보전생물학의 발전을 통해 고립된 서식지 관리 연구에서 네트워크의 중요성이 크게 부각되었다(Molofsky and Ferdy, 2005). 연결성 측정은 수학적 개념으로 출발한 그래프이론(graph theory)을 통해 생태계 분야에서 폭넓게 적용되고 있으며, 경관 투과성(landscape permeability) 개념이 이에 더해지면서 생태네트워크의 중요한 방법론으로 자리매김하고 있다(Fall et al., 2007; Urban et al., 2009). 최근에는 연결지역(connectivity zone)의 개념이 더해져

토지이용에 직접 적용할 수 있는 연결성 측정 개념이 소개되고 있다(Figure 4)(Zetterberg et al., 2010).

도시화로 인해 단절·파편화된 생태계에서 서식지 및 생태계의 기능을 효과적으로 유지하기 위해 다양한 생태네트워크 전략이 시도되면서 생태네트워크 구축을 통한 연결성 향상 기능을 극대화할 수 있는 입지 선정이 하나의 연구 분야로 떠오르고 있다. 이 문제는 생태계 구성 요소의 내부적 요인(크기, 형태, 질 등) 및 외부적 요인(연결성, 주변 토지이용 등)을 고려하여 종합적으로 판단되어야 한다. 도시지역과 같이 인위적인 토지이용으로 인해 자연생태계가 고립된 지역에서는 연결성 향상을 통한 생태적 기능 유지·향상 방안이 보다 쉬운 계획적 접근 방법이므로 생태네트워크 개념 도입은 도시생태계 관리 차원에서 매우 중요하다. 도시 및 지역에 있어서 일정한 틀이 없이 생물서식공간이 조성될 경우에는 이러한 공간들 간의 유기성이 떨어져 도시지역의 생물다양성을 증진시키는데 한계를 가져온다. 따라서 다양한 유형의 생물서식공간이 조성되기에 앞서서 도시 전체의 공간계획시 생태네트워크의 모형을 적용시켜 꼭 필요한 공간에 생물서식공간이 조성되도록 할 필요가 있다. 즉, 불필요한 생물서식공간의 조성으로 인한 경제적 손실비용을 최소화하기 위해서 또는 최소의 비용으로 최대의 생태적 효과를 구현하는 차원에서 생태네트워크의 중요성은 높다고 할 수 있다.

예를 들면, 녹지네트워크의 경우 잘 연결된 녹지는 고립된 녹지보다 우수한 생태적 기능을 유지할 가능성이 높다. 즉 개별녹지는 한 지점에 고정되어 있으나 녹지들 사이의 구조적 또는 기능적 네트워크를 통해 동·식물, 미생물 등의 생태적 요소 및 에너지와 물질 등에 의한 흐름·순환·여과 및 교환에 의한 다양한 메커니즘이 생겨날 수 있는 것이다. 이러한 개념을 확장하여 도시에 존재하고 있는 녹지와 그 기

Figure 4. Three representations of networks (Zetterberg et al., 2010).

반 환경을 망(網)형태의 구조로 연결함으로써 녹지의 생태적 기능이 극대화될 수 있는 지점을 선정하고 우선순위를 도출하여 네트워크를 구축하는 것이 가능하다. 이러한 생태네트워크 요소들은 기본적으로 토양환경에 바탕을 두고 형성된다. 따라서 생태네트워크의 기반이 토양 환경이므로 토양환경의 기능을 극대화함으로써 생태계 기능 향상을 유도할 수 있다. 토양은 입체적으로 연결되어있으므로 그 구조(공극 형태, 특성 등)에 따라 미생물을 포함한 다양한 야생동물의 서식공간 및 이동통로의 역할을 수행한다. 즉, 토양 네트워크는 멀리 떨어진 토양 사이에서 미생물의 이동을 위한 교량 역할을 수행할 수 있을지 모른다(Pérez-Reche et al., 2012). 이러한 맥락에서 토양의 생태적 기능을 회복시키기 위해서는 각각의 공간들이 서로 유기적으로 연계될 수 있도록 만들어야 하는데, 이것을 토양네트워크(Gold Network)라 정의하고자 한다.

VI. 토양네트워크의 제안

최근에 사용되고 있는 생태네트워크, 그린네

트워크, 블루네트워크, 화이트네트워크 등은 이제 우리에게 매우 친숙한 용어이고 환경관련 계획에 빠짐없이 등장하고 있다. 그러나 앞서 논의 한 것처럼 생태계의 중요한 구성요소인 토양의 역할과 기능을 충분히 반영하고 있지 못하며, 작금의 다양한 환경, 생태적 문제에 있어 근본적인 해결방안으로서 한계점을 지니고 있다.

본고에서는 토양을 이러한 문제의 대안으로서 그 가치와 역할을 조명하고, 실행방안으로서 토양네트워크(Gold Network)를 제안하고자 한다(Table 1). 토양네트워크는 연결성 개념을 도입, 단절되고 파편화된 토양패치를 유기적으로 상호 연결하여 생태복원, 탄소저감, 기후변화대응 등의 역할을 수행하는 생태네트워크이다. 토양패치를 중심으로 토양생물종 도입, 육상생물종 유입, 탄소의 흡수, 저감능 향상, 우수의 침투, 투수성 개선 등의 생태계 기능 증진을 유도하고 이러한 토양패치들을 수직적, 수평적으로 연결(networking)하여 생태계 기능 증진 효과를 보다 효율적으로 보완, 전이, 확장시키고자 한다. 특히 기존 환경산업 수행시 사업 대상지의 한정적 적용범위에 따른 지상부 위주의 단편적

Table 1. Concepts on micro and macro scale of soil network.

Scale	Concept	Objects
Micro		Artificial ground, Roads, Traffic facilities, Underground structures
Macro		Urban area, Industrial area

Table 2. Practices for soil networking.

Agenda	Action	Item
Ecological restoration	Improving soil quality, Nonpoint source reduction, Soil restoration, Soil management	<ul style="list-style-type: none"> • Topsoil conservation and management • Rhizosphere ecosystems restoration • Soil aggregation (Soil structure, soil fertility)
Enhancing biodiversity	Introducing soil organisms → Incoming organisms on the ground → Building a food chain	<ul style="list-style-type: none"> • Soil seed bank(Buried seed) • Soil biology, organism • Soil microorganism
Climate change adaptation and mitigation	Carbon storage of soil, Water balance, Soil carbon sequestration, Soil respiration	<ul style="list-style-type: none"> • Topsoil conservation and management • Rainwater infiltration, percolation • Soil carbon, Soil organic carbon

인 기대효과에 비해 지상-지하부의 네트워킹, 즉 대기-식생-토양-수문의 수직, 수평적 연결을 통해 보다 유기적이고 생태계 친화적인 기능 증진 효과를 기대할 수 있을 것이다.

이와 관련하여 본 고에서는 다음과 같은 토양네트워크의 방향을 제시하고자 한다. 첫째, 생태계 기반이자 근원으로서 토양의 가치를 인식하고, 기후변화 대응, 생물다양성 증진, 생태복원 등을 포함한 생태계서비스 향상을 위한 조절인자/기작으로서 토양을 우선순위로 설정하는 것이 중요하다. 따라서 이러한 토양의 생태적 지위와 가치를 극대화하기 위해서, 파편화된 토양의 수직적 연결, 수평적 연결을 통한 토양네트워크를 제안한다.

둘째, 토양에 대한 접근에 있어 토양오염 복원, 식재지 개량 등 기존의 단편적 관점이 아니라 생태계서비스의 복합적 관점과 생태계의 유기적 체계를 이해하고 연구하는 것이 필요하다.

셋째, 토양네트워크를 실행함에 있어서 토양의 연결성(네트워크)을 위해 경관생태학, 생태공학, 복원생태학 개념의 도입이 필요하다. 예를 들면 토지모자이크, 서식지 파편화, 하천차수 등의 개념 도입이 중요하다. 또한 환경정책 반영, 보급을 위해 생태계서비스 개념을 도입이 필요하다.

토양은 생물종의 보고이자 서식기반이며 탄소를 포함한 모든 물질 순환의 조절자로서 그

가치와 영향력을 인지하고 현재 보다 더 많은 관심과 연구가 이뤄져야 한다. 이를 위해서는 기존의 그린네트워크, 블루네트워크, 화이트네트워크의 구성요소가 아니라 각 생태네트워크를 연결하는 중심축으로서 토양을 연구하고 토양네트워크를 구축하는 것이 필요한 시점이라 판단된다. 또한 토양네트워크를 통해 특히 도시화, 산업화가 진행되어 서식지의 파괴, 수문환경의 교란, 물, 탄소 등 물질순환의 불균형이 나타나는 대상지의 다양한 환경, 생태적 문제를 해결할 수 있을 것이라 판단된다(Table 2).

감사의 글

본 연구는 2012년도 환경부 차세대 에코이노베이션 기술 개발사업(과제번호(1) : 416-111-014, 과제번호(2) : 2012000210003)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 (주)현우그린 남상준 대표, 에코앤바이오(주) 장성완 대표, (주)에코탐 최경영 대표의 도움을 받아 작성되었습니다.

참 고 문 헌

- Brady, N. C. and R. R. Weil. 2009. Elements of the Nature and Properties of Soils. 3rd Edition. Prentice Hall.
- Cha, J. G. · E. H. Jung · J. W. Ryu · D. W. Kim.

2007. Constructing a Green Network and Wind Corridor to Alleviate the Urban Heat-Island. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 10(1) : 102-112. (in Korean with English summary)
- Choi, B. S. · J. H. Kim · D. H. Lee. 1998. *Soil Pollution*. Dong Hwa Technology Publishing Co. (in Korean)
- Copley, J. 2000. Ecology goes underground *Nature* 406: 452-454.
- Doopedia Doosan Encyclopedia. 2013.
- Fall, A. · M-J. Fortin · M. Manseau · D. O'Brien. 2007. Spatial graphs: Principles and applications for habitat connectivity. *Ecosystems* 10 : 448-461.
- Hanski, I. 1999. Metapopulation dynamics. *Nature* 396 : 41-49.
- IPCC. 2007. 『Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change』 Cambridge University Press.
- Jang, D. H. · C. F. Chung. 2007. Development of Forest Risk Assessment Analysis Model for Landslide Disaster. *Journal of the Korean Geomorphological Association* 14(4): 57-67. (in Korean with English summary)
- Jeon, S. W. · J. Y. Chun · H. C. Seong, W. K. Song, J. H. Park. 2010. A Study on the Setting Criteria and Management Area for the National Ecological Network. *J. Korean Env. Res. Tech.* 13(5) : 154-171. (in Korean with English summary)
- Kim, S. B. · Y. H. Jung · Y. B. Kim. 2004. A Study on An Installment of Cool Corridors Reducing Urban Heat Island Phenomenon in Daegu, Korea. *Journal of Nakdong River Environmental Research Institute* 9(1) : 143-156. (in Korean with English summary)
- Korea Meteorological Administration, ROK. 2011. *Annual Report 2011*. (in Korean)
- Lal, R et al. 2004. Managing soil carbon *Science* 304: 393; and Lal, P 2004 Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security *Science* 304: 1623-1627.
- Lal, R. 1999. World soils and the greenhouse effect The International Geosphere-Biosphere Programme(IGBP), *Global Change Newsletter* 37: 4-5.
- Ministry of Construction and Transpotation, ROK. 2004. *Flood control project improvement plan*. (in Korean)
- Ministry of Environment, ROK. 2001. *A Study on the Conservation of Surface Soil and Erosion Control*. (in Korean)
- Ministry of Environment, ROK. 2005. *National Environmental Comprehensive Plan(2006~2015)*. (in Korean)
- Ministry of Environment, ROK. 2007. *A Study for Planning the National Ecological Network*. (in Korean)
- Molofsky, J. · J-B. Ferdy. 2005. Extinction dynamics in experimental metapopulations. *PNAS* 102(10) : 3726-3731.
- Pérez-Reche, F. J. · S. N. Taraskin · W. Otten · M. P. Viana · L da F. Costa, C. A. Gilligan. 2012. Prominent effect of soil network heterogeneity on microbial invasion. *Phys. Rev. Lett.* 109(9) : 1-6.
- Pimentel, D et al. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits *Science* 267: 1117-1123.
- Republic of Korea. 2009. *Fourth National Report to the Convention on Biological Diversity*.
- Song, W. K. · E. Y. Kim · D. K. Lee. 2012.

- Measuring Connectivity in Heterogenous Landscapes: a Review and Application : Journal of Environmental Impact Assessment 21(3) : 391-407. (in Korean with English summary)
- Urban, D. L. · E. S. Minor · E. A. Treml · R. S. Schick. 2009. Graph models of habitat mosaics. Ecology Letters 12(3) : 260-273.
- Zetterberg, A. · U. M. Mörtberg · B. Balfors. 2010. Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design. Landscape and Urban Planning 95 : 181-191.