

훼손된 생태계의 복원을 통한 생태계 서비스의 회복: 채탄쓰레기 매립지 복원지의 사례

오 우 석^{1,a} · 이 창 석^{2,*}

¹서울여자대학교 대학원 생물학과, ²서울여자대학교 생명환경공학과

Recovery of Ecosystem Service Functions through Ecological Restoration Practice: A Case Study of Coal Mine Spoils, Samcheok, Central Eastern Korea

Woo Seok Oh^{1,a} and Chang Seok Lee^{2,*}

¹Department Biology, Graduate School, Seoul Women's University, Seoul 139-774, Korea

²Department Bio and Environmental Technology, Seoul Women's University,
Seoul 139-774, Korea

Abstract - Ecological restoration is regarded as a major strategy for preventing biodiversity loss and thereby enhancing ecosystem service. This study was performed to evaluate ecosystem service value that the restored ecosystem provides. Ecosystem service was evaluated for provisioning and regulating services. The former service was evaluated by comparing similarities in a viewpoint of floristic composition to the reference site between the restored and the unrestored sites. Species composition of the restored site was found to be more similar to the reference site than that of the unrestored site and thereby restoration practice contributed for enhancing the provisioning service. Regulating service was evaluated based on microclimate control, soil amelioration, and improvement of water holding capacity. The value of ecosystem services in terms of microclimate control, soil amelioration, and improvement of water holding capacity was higher in the restored site than in the unrestored site. In consequence, ecological restoration of coal mine spoils contributed for enhancing the ecosystem service value of the corresponding site and thereby is rewarding the cost invested for restoration.

Key words : coal mine spoils, ecosystem function, ecosystem service, restoration, Sørensen's similarity index

서 론

생태계 서비스 개념의 시작은 1970년대로 거슬러 올라

가지만 1990년대에 과학문헌에서 본격적으로 언급되기 시작하였다 (De Groot 1992; Costanza *et al.* 1997; Daily 1997). 생태계의 기능은 생태계 서비스 공급을 위한 기본이 되며, “인간이 직·간접적으로 필요로 하며 만족해하는 상품과 서비스를 제공하는 생태계의 능력”이라고 할 수 있다 (De Groot 1992, 2010). 인위적 활동으로 인한 환경훼손은 생태계의 정상적인 기능 감소의 원인이 되

^aCurrent affiliation: National Institute of Ecology

* Corresponding author: Chang Seok Lee, Tel. 02-970-5666, Fax. 02-970-5822, E-mail. leecs@swu.ac.kr

며, 생태계 서비스 공급의 감소를 가져 온다(Halpern *et al.* 2008; Butchart *et al.* 2010; Secretariat of the Convention on Biological Diversity 2010). 이러한 영향으로 인한 생태계 변화와 생물 다양성 감소는 국지적 수준, 지방수준, 국가수준 및 전 지구적 수준으로 매우 빠르게 일어나고 있다(Perrings *et al.* 2011). 생태적 복원은 생물다양성 감소를 완화시키고 동시에 생태계 서비스 공급을 증가시키기 위한 주요 전략으로 인식되고 있다(Bullock *et al.* 2011).

대표적인 인위적 활동 중 하나로서 채광(mining)은 자연적으로 형성된 광물을 생성장소로부터 사람이 필요로 하는 곳으로 이동시키는 것을 목표로 하는 과정 또는 활동으로 규정할 수 있다(Paone *et al.* 1978). 전 세계적으로 대체에너지의 개발로 인해 석탄 생산량이 감소하고 있다. 따라서 채탄쓰레기 매립지 면적이 줄어드는 경향이 있다. 하지만 2011년 동일본 대지진으로 인한 후쿠시마 원전 참사 이후 핵 에너지에 의존하던 각국의 에너지 정책이 화력발전 등으로 회귀하면서, 석탄광산에 대한 관심이 다시 높아지고 있다(Larondelle and Haase 2012). 따라서 채탄쓰레기 매립지는 앞으로 다시 늘어날 가능성이 있는 문제이다. 우리나라에는 석탄, 시멘트, 아연 등 지하자원을 캐내는 과정에서 발생한 채광쓰레기 매립지가 넓은 면적으로 산재하고 있는데(Im 2007), 그 중 채탄쓰레기 매립지(coal mine spoils)가 특히 넓은 면적을 차지하고 있다(Cho *et al.* 1995).

석탄은 가장 중요한 지하자원 중 하나로서 전력, 열, 산업, 이동수단 등에 공급되는 에너지의 중요한 근원이다. 그러나 이러한 중요성에도 불구하고 채탄과정에서 생기는 채탄쓰레기 매립지는 해당 지역 생태계에 심각한 교란을 야기한다(Wong 2003; Li 2006). 이러한 채탄쓰레기 매립지는 식생으로 피복되지 못하면 외관상으로도 바람직해 보이지 않을 뿐만 아니라 주변의 하천을 오염시키고 인접한 주거지와 농경지도 오염시키며 지역의 경관에 전반적인 악영향을 미치게 된다(Bradshaw and Chadwick 1980; Yang *et al.* 1993; Cho *et al.* 1995; Slonecker and Benger 2001; Shrestha and Lal 2006; Lee *et al.* 2007, 2008; Vymazal and Sklenicka 2012). 또한 채탄쓰레기 기질은 영양물질이 결핍되어 있고 산성화되어 있으며, 토양 수분 함유량이 빈약하고, 중금속함유량은 생물학적으로 견딜 수 있는 수준을 넘어서는 것이어서 식물의 생장과 미생물 군집의 발달을 제한한다(Down 1975a, b; Adriano 2001; Palumbo *et al.* 2004; Šourková *et al.* 2005; Huttermann *et al.* 2009). 따라서 중금속 독성이 심한 곳에서는 100년이 경과했음에도 불구하고 파편화된 식생이 산재된 형태로만 존재한다(Bradshaw 1984).

이러한 채탄쓰레기 매립지는 빠르게 식생을 정착시키는 것이 바람직하기 때문에 그것을 위한 다양한 시도가 이루어져 왔다. 우리나라에서 채탄쓰레기 매립지 복원은 생태적 복원보다는 복구에 초점을 맞추어 진행되어 왔다(Kim 2002; Lee 2002). 이러한 사업에는 채탄쓰레기 표면에 산림토양을 덮은 후 식물을 식재하는 방법이 주로 사용되어 왔다. 이러한 방법으로 식물을 식재할 수 있는 물리적인 틀은 마련되었지만 복토용으로 사용하는 토양은 주로 심토(subsoil)를 사용하기 때문에 식물의 정상적인 정착과 생육이 어렵다(Cho *et al.* 1995). 심토는 표토(surface soil)와 달리 영양물질이 결핍되어 있어 식물이 자라는데 적합한 조건을 갖추지 못하고 있다(Lee *et al.* 2007, 2008).

또한 도입하는 종은 단일종을 식재하고 외래종을 무분별하게 도입하여 주변 산림과 어울리지 않는 이질적인 경관이 창조되었다. 이러한 채탄쓰레기 매립지를 복원하는 방법으로 선진국의 경우에는 채탄쓰레기 기질의 이화학적 개선을 위해 표토를 복토하는 것이 일반화되어 있다(Olsen and Jones 1989). 이러한 방법이 표토를 걷어내어 적당한 곳에 보관하였다가 원하는 광물을 채취한 후 다시 복토하는 노천채굴(opencast mine)에서는 가능하다(Bradshaw 2000). 하지만 우리나라의 경우는 대부분 지하 깊은 곳에서 광물을 캐내어 원하는 광물을 골라낸 후 나머지 찌꺼기를 매립하는 심층 채광법(deep mining)이 사용된다(KCC 2001). 따라서 생성된 채탄쓰레기를 덮을 정도로 많은 표토의 수급이 용이하지 않은 문제가 있다. 하지만 그것도 비용이 많이 들기 때문에 복구 시범지와 사람들의 눈에 많이 띄는 도로변과 주택가 등 특수한 지역을 제외하고는 거의 실시하지 않고 있으며 깊이도 대부분 20 cm 이하이다(KFRI 2006).

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 생태적 복원을 시도하였다. 척박한 기질을 개량하기 위하여 개량제로 유기물질을 투입하였다(Jochimsen 1996; Bradshaw 1997; Dželetović *et al.* 2009; Pedrol *et al.* 2010). 도입한 식물은 해당지역의 식생을 대표할 수 있는 종을 선발하여 스스로 유지 가능한 식물군집을 창조하고 주변의 자연림과 조화를 이루며 다양성을 유지하여 훼손되기 이전의 생태계 서비스 기능을 발휘할 수 있도록 하였다(Berger 1993; Grant *et al.* 2002; Jefferson 2004; Weir *et al.* 2006; Lee *et al.* 2007, 2008; Courtney *et al.* 2009). 복원된 식생은 자연림의 구조를 모방하여(Lee *et al.* 2004) 교목, 아교목, 관목 및 초본 식물이 고르게 포함되는 복층림을 이룰 수 있도록 구성하였다(Lee *et al.* 2007).

이렇게 복원된 생태계에서 발휘되는 생태계 서비스는

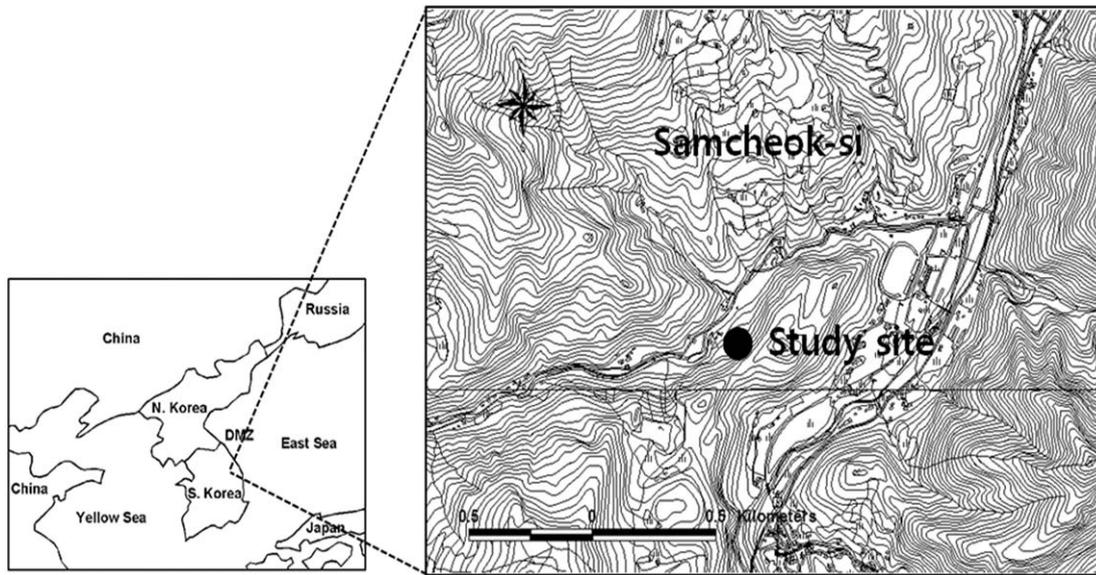


Fig. 1. Maps showing the study site.

토양 안정과 같은 생태적 기능(Garcia-Palacios *et al.* 2010)의 회복도 있지만 심미적인 안정에도 기여한다(Dunnett 2011). 하지만 생물다양성의 복원은 생태계 서비스 공급에서 가장 중요한 목표이다(TEEB 2011). 따라서 훼손된 생태계의 복원을 통한 생태계 서비스 기능의 회복은 복원의 성공을 확인함과 동시에 새로운 생태계 서비스 공급도 가능하게 된다. 석탄을 채굴하여 사용하는 것은 생태계 서비스의 직접적인 자원으로서 한계를 가지고 있는 반면에(TEEB 2011), 복원 이후 제공되는 생태계 서비스는 간접적인 자원으로서 지속적으로 공급받을 수 있는 무한 자원이 된다(Larondelle and Haase 2012). 또한 훼손된 생태계가 복원된 후 인간에게 제공하는 혜택인 생태계 서비스를 향상시키는 것은 생태복지의 달성을 의미한다(Lee 2013).

복원된 생태계에서 생태계 서비스 기능을 확인하는데 어려운 분석법이 아니라 단순한 조합으로 된 알고리즘으로 입증하는 것은 채광 이후 복원계획을 수립하는 정책 입안자들에게 유익한 정보로 이용될 수 있다(Larondelle and Haase 2012). 본 연구는 복원된 생태계에서 Millennium Ecosystem Assessment (MA 2005)의 생태계 서비스 분류를 기반으로 생태계 서비스 평가항목을 선정한 후 단순한 알고리즘을 사용하여 생태계 서비스의 기능 회복을 정량적으로 입증하고, 향후 복원된 생태계의 서비스를 지속적으로 유지하기 위한 방안을 제시하는 것을 목표로 하였다.

연구 방법

1. 조사지 개황

본 연구는 강원도 삼척시 도계읍 늑구리에서 수행하였다(Fig. 1, 조사지소의 중심부: N 37° 15' 17", E 129° 02' 52"). 복원은 2008년에 시행하였다. 식생 도입은 교목으로 소나무, 거제수나무, 박달나무 및 자작나무 그리고 관목으로 진달래를 도입하여 수행하였다. 복원은 토양개량과 식생도입을 통해 이루어졌다. 토양개량은 유기질비료를 공급하여 수행하였다. 조사지소는 어떠한 처리도 하지 않은 순수한 채탄쓰레기 매립지(비복원구), 복원된 채탄쓰레기 매립지(복원구) 및 인근의 소나무림(대조구)으로 설정하였다.

2. 연구 방법

Millennium Ecosystem Assessment (MA 2005)는 주요 생태계서비스 평가지표 중 공급 서비스, 조절 서비스 및 문화 서비스에 관한 항목을 채택하였다. The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB 2011)는 생태계 서비스 평가지표를 공급 서비스, 조절 서비스, 유지 서비스 및 문화서비스의 4개 유형으로 구분하였다. 유지 서비스는 다른 서비스를 부양하는 기반이 되는 서비스이므로 조절서비스와 중복 된다(Haines-Young *et al.* 2010). 따라

Table 1. Indicators for determining use of ecosystem services (MA 2005)

Provisioning services	Regulating services	Cultural services
Food	Air quality regulation	Spiritual and religious values
Fiber	Climate regulation*	Knowledge systems
Genetic resources	Water regulation*	Educational values
Biochemicals, natural medicines, and pharmaceuticals*	Erosion regulation	Inspiration
Fresh water	Water purification and waste treatment	Aesthetic values
	Disease regulation	Social relations
	Pest regulation	Sense of place
	Pollination	Cultural heritage values
	Natural hazard regulation	Recreation and ecotourism
	Soil formation and regeneration*	
	Photosynthesis	
	Primary production	
	Nutrient cycling	
	Water cycling	

* chosen indicators for this study

서 본 연구에서는 유지 서비스를 공급 및 조절 서비스에 통합하여 수행하였다. 문화 서비스는 자연자원으로 평가하기 어렵다. 더구나 본 연구 장소는 주변에 채탄쓰레기매립지가 많아 관광 및 휴양가치가 크지 않아 문화 서비스 평가는 제외하였다. 토양 형성과 토양 기능 그리고 물의 순환은 채광활동에 직접적으로 영향을 받는 생태계 구성요소이다 (Krüger *et al.* 2002). 따라서 복원 후 회복된 토양기능의 생태계 서비스 가치를 평가하는 것이 중요하다. 공급 서비스 항목은 유전자원의 기반이 되는 식물의 종 조성을 선정하였고 (De Groot *et al.* 2010), 조절 서비스는 미기후 조절, 토양 개량 및 물 조절을 선정하여 가치평가를 수행하였다 (Table 1).

공급 서비스로서 생물다양성은 식생조사를 통하여 얻은 종 조성의 유사도로 결정하였다. 유사도는 Sørensen 지수 (Sørensen's similarity index)로 구하였다 (Wloda, 1981). 채탄쓰레기 매립지의 복원은 채탄쓰레기 매립지 생성 이전의 식생으로 되돌리는 것이다. 따라서 복원의 목표는 인근에 위치한 자연림이 된다. 복원된 생태계의 생물다양성은 식물과 동물을 아우르는 것이지만, 동물은 식물이 복원되어 서식처가 제공되어야 복원이 가능하기 때문에 초기 복원기간에는 식물의 다양성이 주로 평가 도구로 선정된다 (Koch and Hobbs 2007b).

조절서비스로서 미기후 조절의 가치는 토양개량제 처리 후 식생의 정착에 기인한 지표온도의 차이를 통하여 얻었다. 지표 온도는 열화상카메라 (Ti10 Thermal imager, Fluke, USA)를 이용하여 측정하였다. 적외선 사진은 복원구와 비복원구 및 대조구에서 3반복으로 촬영하였고 촬영범위는 1 m × 1 m로 하였다. 촬영한 적외선 사진은

Smart view 1.9 (2009)를 이용하여 분석하였다. 한편, 지표 온도를 결정하는 요인으로서 식생의 정착은 식피율로서 구하였다. 식피율에 대한 평가는 식물의 종을 구분하지 않고 전체 식물이 실험구를 덮고 있는 비율로 평가하였다. 식피율은 복원구, 비복원구 및 대조구에서 5% 단위로 조사하였다.

토양은 식물이 자랄 수 있는 물리적 기반이 되므로 토양 개량은 복원사업에서 우선적으로 수행해야 하는 과정이다 (Dželetović *et al.* 2009). 토양 조건은 토양의 유기물 함량을 측정하여 평가하였다. 유기물 함량은 조사지소에서 채집한 토양을 음건 시킨 후, 400°C 전기로에서 4시간 작열 후 작열소실량으로 구하였다.

물 조절은 토양수분 함량을 측정하여 평가하였다. 토양 수분 함량은 IMKO 사의 precise moisture measurement HD2를 이용하여 지점 당 무작위로 6회 측정된 값을 평균하여 사용하였다. 지표온도, 유기물 함량 및 토양수분 함량은 2012년 5월부터 10월까지 측정하여 평균값으로 계산하였다.

이러한 과정을 통해 얻은 값은 복원의 목표인 인근 자연림 (대조지소)에서 얻은 대조지소의 값에 대한 상대값으로 환산하여 가치평가를 수행하였다 (식 1).

$$EP(\%) = \frac{SSP}{RSP} \times 100 \quad (\text{식 1})$$

EP : 평가 점수 (evaluation point)

SSP : 조사지소 점수 (survey site point)

RSP : 대조지소 점수 (reference site point)

Table 2. Sørensen's similarity indices based on floristic composition among the restored, unrestored and reference sites

	Restored site	Reference site
Reference site	0.39	
Unrestored site	0.64	0.17

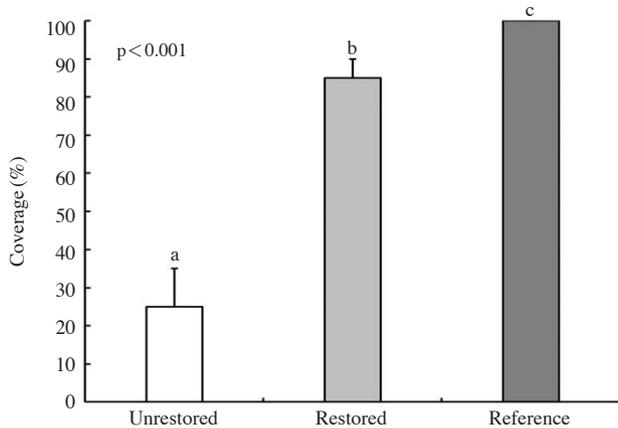


Fig. 2. A comparison of vegetation coverage among the restored, unrestored and reference sites.

결 과

1. 종 조성 변화

복원지소와 대조지소 사이, 비복원지소와 대조지소 사이 및 복원지소와 비복원지소 사이의 Sørensen 유사도 지수는 각각 0.39, 0.17 및 0.64로 나타났다 (Table 2). 이러한 결과는 복원지소가 비복원지소와 비교해 종조성이 온전한 자연지소와 더 유사해졌음을 의미하며, 복원 활동이 긍정적인 영향을 미친 것으로 해석할 수 있다.

2. 식피율

복원지소, 비복원지소 및 대조지소 사이의 식피율을 비교한 결과 (Fig. 2), 복원지소의 식피율은 $85 \pm 5\%$ 로 나타났다, 비복원지소는 $25 \pm 10\%$ 그리고 대조지소는 100% 로 나타났다.

3. 미기후 조절

복원지소의 지온은 $19.89 \pm 2.73^\circ\text{C}$ ($10.75 \pm 0.33 \sim 30.58 \pm 0.43^\circ\text{C}$)로 나타났고, 비복원지소는 $25.59 \pm 3.51^\circ\text{C}$ ($13.54 \pm 0.50 \sim 36.54 \pm 0.66^\circ\text{C}$) 그리고 대조지소는 16.94 ± 2.35

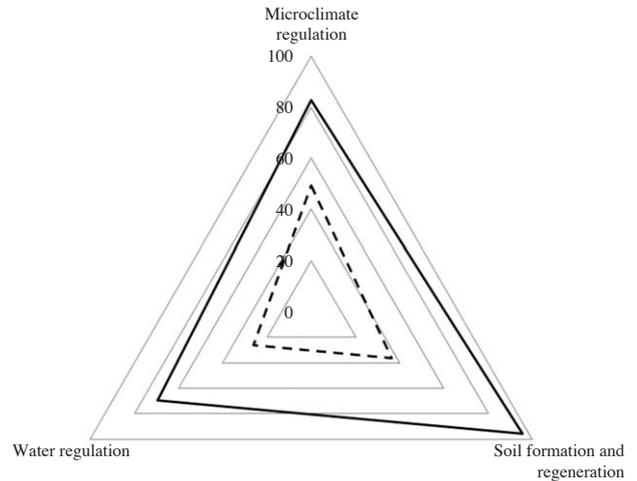


Fig. 3. A spidergram displays the regulating service of ecosystem for the restored and unrestored sites. Values are standardised between 1 and 100, where 0 exhibits the lowest, and 100 the highest, value. line: restored site, dotted line: unrestored site.

$^\circ\text{C}$ ($10.67 \pm 0.12 \sim 24.33 \pm 0.10^\circ\text{C}$)로 나타났다. 이러한 결과로부터 환산된 생태계 서비스 평가점수에서 복원지소는 82.59로 평가되었고, 비복원지소는 49.29로 평가되었다 (Fig. 3).

4. 토양개량

복원지소, 비복원지소 및 대조지소의 토양 유기물 함량은 각각 $12.50 \pm 0.24\%$ ($11.54 \pm 0.29 \sim 12.94 \pm 0.50\%$), $4.73 \pm 0.25\%$ ($4.10 \pm 0.23 \sim 5.50 \pm 0.17\%$) 및 $13.08 \pm 0.32\%$ ($12.10 \pm 0.56 \sim 14.50 \pm 0.30\%$)로 나타났다. 이러한 결과로부터 환산된 생태계 서비스 평가점수에서 복원지소는 95.57로 평가되었고 비복원지소는 36.16으로 평가되었다 (Fig. 3).

5. 물 조절

토양 수분 함량은 식물의 정착에 중요한 요인이 되며 식생 정착에 따른 유기물의 투입으로 토양의 물리적 특성이 개선되면서 토양 함수량 또한 늘어날 수 있다 (Herrick and Wander 1998). 하지만 채탄쓰레기 기질은 구조가 조악하여 침식되기 쉬우며, 토양 함수량 또한 낮은 특징을 나타낸다 (Šourková *et al.* 2005). 따라서 토양 함수량 변화를 통하여 복원된 이후 생태계의 기능 회복을 확인할 수 있다. 측정결과 토양 함수량은 복원된 지소, 비복원지소 및 대조지소에서 각각 $16.07 \pm 2.60\%$ ($9.14 \pm 0.25 \sim 25.22 \pm 0.17\%$), $6.10 \pm 0.11\%$ ($4.63 \pm 0.50 \sim 9.32 \pm 0.52$

%) 및 $23.14 \pm 2.53\%$ ($17.56 \pm 0.30 \sim 32.90 \pm 0.40\%$)로 나타났다. 이러한 결과로부터 환산된 생태계 서비스 평가 점수에서 복원지소는 69.45 그리고 비복원지소는 26.36으로 평가되었다(Fig. 3).

고 찰

1. 복원된 생태계의 공급 서비스

생태적 복원은 생물 다양성의 소실을 방지할 뿐만 아니라 생태계 서비스 기능을 증진시키는 주요 전략으로 간주된다(Bullock *et al.* 2011). 복원된 생태계는 목표로 삼은 대조지소와 종 조성이 유사하게 나타나고, 스스로 유지가 가능할 때 성공이라고 할 수 있다(Lee *et al.* 2004). 성공적으로 복원된 생태계는 정상적인 기능을 수행하여 생태계 서비스를 제공할 수 있게 된다. 생태적 복원은 자연의 과정을 모방하여 수행해야 한다. 채탄쓰레기와 같은 기질은 아직 토양이 형성되지 않은 상태이기 때문에 일차 천이를 모방하여 그 과정을 촉진시킬 필요가 있다(Bradshaw 1997). 사람들이 주관적으로 실시한 복원은 효과적으로 식생을 피복할 수는 있지만 그들이 생태계 내부로 전하는 영양물질, 종 조성, 종 다양성 등의 효과는 매우 제한적인 능력을 갖는다. 따라서 인공적인 조립 차원의 복구보다는 생태적인 복원 즉, 자연의 모습을 모방하고 그 과정을 수용하여 복원을 실행할 필요가 있다(Bradshaw 2000). 복원 후 성립한 식생은 생활사를 거치며 토양에 유기물질을 공급하고, 스스로 유지가능한 생태계로 자리 잡으면서(Grant *et al.* 2002; Jefferson 2004; Weir *et al.* 2006; Courtney *et al.* 2009) 온전한 생태계서비스를 제공할 수 있게 된다. 특히, 목본식물은 초본식물에 비해 더 많은 생물량을 가지고 뿌리를 깊게 내리기 때문에 채탄쓰레기 기질의 깊은 곳까지 유기물을 효과적으로 공급하는 역할을 수행한다(Zhao *et al.* 2012).

하지만 지금까지 수행된 대부분의 복원 사업에서 종 조성이 목표 수준에 도달한 사례는 찾기 어렵다(Holl 2002; Ross *et al.* 2004; Koch 2007). 그 이유는 주변 생태계를 고려하지 않고 어울리지 않는 종을 도입한데 기인한다(Oh 2012). 훼손된 생태계의 종 조성 복원은 대조지소와 유사한 모습으로 이루어져야 한다(Koch 2007). 따라서 복원 시 종 도입은 신중하게 고려하여야 한다. Lee *et al.* (2004)은 자생종을 위주로 하되, 처한 환경에 견딜 수 있는 내성을 갖고 있는 종, 생태계의 기능을 복원하기 위한 종, 그 생태계의 천이 후기단계에서 주요 구성원이 되는 종 그리고 스스로 유지가 가능한 종이어야 그 효과를

극대화 할 수 있다고 하였다. 본 연구에서 선정된 복원구는 주변의 자연지역에 성립한 소나무군락을 모방하여 교목층, 관목층 및 초본층을 이루는 식물을 고르게 도입하여 천이 과정을 앞당겼다. 이러한 복원은 식생의 종 조성과 구조적인 복원을 동시에 달성하여 생태계서비스 효과를 극대화 할 수 있는 것으로 평가되고 있다(Bullock *et al.* 2011).

복원된 생태계에서 종 풍부도는 생태계 서비스 공급을 향상 시킨다(Balvanera *et al.* 2006; Bullock *et al.* 2007). 생태계의 구조가 제대로 갖추어지면 더 나은 생태계 서비스를 제공한다(Lee 2013). Lee (2013)는 생태계 서비스 중 조절서비스의 관점에서 군집의 종 조성을 보전하거나 복원하는 것이 종 수를 늘리는 것보다 더 중요하다고 하였다. 따라서 생태계 서비스 기능을 향상시키기 위해서는 목표로 하는 대조지소의 구조를 모방하여야 한다.

본 연구의 공급 서비스로서 생물다양성의 가치 평가 결과, 복원 지소가 비복원지소와 비교해 대조지소의 종 조성과 상대적으로 더 높은 유사성을 나타내는 긍정적인 효과가 나타났다. 이러한 결과는 종 조성이 대조지소와 유사하게 변함으로서 대조지소와 유사한 공급서비스를 제공하기 위한 토대를 마련했다고 할 수 있다.

공급서비스는 직접적인 서비스로서 목재와 연료의 공급 기능도 갖고 있다(MA 2005). 하지만 복원 후 상업적인 목재 사용의 가치는 한정되어 있다(Pagiola 2008). TEEB (2011)는 복원된 생태계가 제공하는 직접적인 공급 서비스에 대한 사례를 제시한 바 있다. 즉 채광으로 얻은 직접적인 산물인 석탄의 경제적 가치에 비해 채광 이후 복원을 하는 과정에서 소요되는 비용 및 채광을 하지 않았을 때 인간이 공급 받을 수 있는 생태계 서비스의 가치가 상대적으로 높다고 하였다. 이러한 사례는 생물다양성 공급 가치가 목재와 연료로서의 가치보다 훨씬 더 높고, 지속적인 공급이 가능하다는 것을 보여준다. 이러한 점에서 생태계서비스의 경제적 가치가 평가될 필요가 있고, 나아가 그러한 평가는 난개발을 막을 수 있는 도구로 활용될 수도 있다.

2. 복원된 생태계의 조절 서비스

유기질비료의 공급은 채탄쓰레기 매립지의 토양을 대조지소와 유사하게 개선하여 식물이 생육하기에 적합한 환경을 이루어낸다(Coyne *et al.* 1998). 복원된 채탄쓰레기 매립지는 식물의 종자 은행(seed bank) 형성, 식물 생장, 토양 유기물 함량 증가, 토양의 물리적 구조 개량, 분해자로서 미생물군집의 형성 등이 온전한 생태계와 유사

한 모습으로 변화한다(Koch and Hobbs 2007). 토양 개량 후 성립한 식생은 생활사를 이어가며 토양에 유기물질을 공급하고, 스스로 유지가능한 생태계가 성립되어(Grant *et al.* 2002; Jefferson 2004; Weir *et al.* 2006; Courtney *et al.* 2009) 온전한 조절 서비스를 수행할 수 있게 된다. 본 연구의 결과는 토양개량 이후 토양조건이 대조지소와 거의 유사한 수준으로 복원되었음을 보여주고 있다(Fig. 3).

생태계는 기후를 소규모 수준에서부터 전 지구적 수준까지 조절한다(MA 2005). 토지 피복 변화는 온도, 미기후, 토사유출, 홍수, 대수층의 물 공급에 영향을 미친다(MA 2005). 채탄쓰레기는 석탄이라는 자원을 얻기 위해 인위적으로 파쇄된 것으로서 기질의 구조가 거칠다(KFRI 2006). 따라서 수분함량으로 표시된 그것의 수분 보유능은 매우 낮다(Šourková *et al.* 2005). 그러나 토양개량제를 적용하여 기질의 구조를 개량하면 수분함량이 크게 늘어난다(Fig. 3, Herrick and Wander 1998). 이러한 결과는 복원을 통해 기질의 물 조절 기능이 개선되어 보다 나은 생태계 서비스 기능을 수행할 수 있다는 것을 의미한다.

생태계 서비스로서 개선된 물 조절 기능은 식생의 정착을 용이하게 하고, 토양 비옥도 유지 및 침식방지 기능을 갖추게 된다(MA 2005). 복원이 실행되기 이전 채탄쓰레기 매립지는 검은색을 띠고 있어 열 흡수율이 높아 여름철에는 지표 온도가 약 70°C까지 올라간다(Oh 2012). 복원을 통해 이루어 낸 토양의 비옥도 및 수분 보유능 개선은 식생의 정착에 긍정적으로 작용한다(Herrick and Wander 1998). 그 후 식생의 성공적인 정착은 채탄쓰레기 매립지에 효과적인 그늘로 작용함으로써 지온을 현저히 낮출 수 있다(Bell and Ungar 1981). 실제로 본 연구에서 복원된 지소는 식피율이 크게 증가하여(Fig. 2) 대조지소와 거의 유사한 수준으로 지표온도를 낮추었다. 이러한 결과로부터 생태적 복원을 통해 이루어 낸 식생 피복이 성공적으로 미기후 조절 서비스를 수행하고 있음을 확인하였다.

결 론

훼손된 생태계를 복원하는 것은 생물다양성 손실을 줄여 생태계 서비스 기능을 향상시킬 수 있는 주요 전략이다(Bullock *et al.* 2007). 훼손된 생태계를 복원하는 과정에서 복원생태학자의 역할은 매우 중요하다(Koch and Hobbs 2007). 하지만 전 세계적으로 생태계 서비스 기능을 좌우하는 토지 이용은 금전적 가치 산정을 토대로 결정된다. 그리고 그와 같이 중요한 결정이 주로 정치가와

공무원에 의하여 이루어진다. 이러한 과정에서 발생하는 중요한 문제는 결정권자의 생태학적 정보가 부족하거나 결여되어 있다는 것이다(Cowling *et al.* 2008). 따라서 최근에 출범한 생물다양성과 생태계 서비스의 정부 간 과학-정책기반(IPBES)은 정책입안자와 과학자들의 협업을 강조하고 있다(Lee *et al.* 2011). 복원생태학자들의 생태학적 지식과 정책 입안자의 행정력 그리고 이해당사자의 편익이 적절히 조화될 때 복원 이후 창조되는 생태계에서 공급하는 생태계 서비스의 극대화를 이룰 수 있다(Bullock *et al.* 2007). 훼손된 생태계를 복원하는데 소모된 비용은 복원 이후 생태계 서비스의 가치평가를 통하여 그 비용이 상쇄되거나 더 많은 이익을 남길 수 있다(TEEB 2011). 이러한 가치 평가는 생태계 복원의 당위성을 주장할 수 있는 역할을 하지만 사전에 난개발을 막고 생태계를 보전할 수 있는 기능도 수행할 수 있다(TEEB 2011).

온전한 생태계는 생물다양성의 보전에 긍정적인 영향을 미치지만 문화적 서비스에도 영향을 미치게 된다(Lee 2013). 훼손된 생태계인 채탄쓰레기 매립지에서 얻을 수 있는 문화적 서비스는 매우 빈약하다. 하지만 복원된 생태계에서는 복원의 교육장소로서 활용할 수 있는 교육적 가치, 주변 환경과의 조화로부터 얻을 수 있는 예술적 영감, 미적 가치, 사람들에게 특징적으로 인지되는 장소로서의 기능 등을 수행할 수 있다. 이와 같이 훼손된 생태계의 복원은 목표로 하였던 대조 생태계로 향한 구조적 복원 목표 달성과 생태계 서비스 기능 개선이라는 기능적 목표를 동시에 이루어낼 수 있다.

그러나 채탄쓰레기 매립지에서 복원의 실행은 인간 활동으로 훼손되어 기능이 약화된 생태계를 인위적 도움을 통해 온전한 모습으로 되돌려 건강한 생태계로 거듭나게 하기 위한 하나의 출발이다. 본 연구는 이러한 출발선 상에 있는 복원 초기 상태의 생태계를 대상으로 연구가 이루어졌다. 생태학자들은 교란에서 비롯된 단순하고 불안정한 생태계가 천이과정을 통해 복잡하고 안정된 생태계로 스스로 변해가는 과정을 연구하며 파괴된 생태계를 치유할 수 있는 방법을 찾아냈다(Lee and You 1998). 즉 복원은 자연이 스스로를 치유해가는 과정에 인간의 도움을 더하여 안정 상태에 도달하는 기간을 단축시키는 생태기술이다(Lee *et al.* 2011). 그런 점에서 복원된 생태계는 시간이 경과함에 따라 더 안정되고 더 큰 기능을 발휘할 수 있는 생태계로 변해가며 보다 유익한 생태계 서비스 기능을 발휘하며 우리가 투자한 비용을 보상해 줄 것이다.

사 사

본 연구는 서울여자대학교 교내 연구비의 부분적 지원으로 수행되었다.

REFERENCES

- Adriano DC. 2001. Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risk of metals, 2nd ed. Springer-Verlag, New York.
- Balvanera P, AB Pfisterer, N Buchmann, JS He, T Nakashizuka, D Raffaelli and B Schmid. 2006. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecol. Lett.* 9:1146-1156.
- Bell TJ and IA Ungar. 1981. Factors affecting the establishment of natural vegetation on a coal strip mine spoil bank in southeastern Ohio. *Amer. Mid. Nat.* 105:19-31.
- Berger JJ. 1993. Ecological restoration and non-indigenous plant species: A review. *Res. Ecol.* 1:74-82.
- Bradshaw AD. 1984. Ecological principals and land reclamation practice. *Land. Plan.* 2:35-48.
- Bradshaw AD. 1997. Restoration of mined lands-using natural process. *Ecol. Eng.* 8:255-269.
- Bradshaw AD. 2000. The use of natural processes in reclamation - advantages and difficulties. *Land. Urb. Plan.* 51:89-100.
- Bradshaw AD and MJ Chadwick. 1980. The restoration of land. Blackwell Scientific, Oxford.
- Bullock JM, J Aronson, AC Newton, RF Pywall and JM Rey-Benayas. 2011. Restoration of ecosystem services and biodiversity: Conflicts and opportunities. *Trend. Ecol. Evol.* 26:541-549.
- Bullock JM, RF Pywell and KJ Walker. 2007. Long-term enhancement of agricultural production by restoration of biodiversity. *J. Appl. Ecol.* 44:6-12.
- Butchart SHM, M Walpole, B Collen, A van Strien, JPW Scharlemann, REA Almond, JEM Baillie, B Bomhard, C Brown, J Bruno, KE Carpenter, GM Carr, J Chanson, AM Chenery, J Csirke, NC Davidson, F Dentener, M Foster, A Galli, JN Galloway, P Genovesi, RD Gregory, M Hockings, V Kapos, JF Lamarque, F Leverington, J Loh, MA McGeoch, L McRae, A Minasyan, MH Morcillo, TEE Oldfield, D Pauly, S Quader, C Revenga, JR Sauer, B Skolnik, D Spear, D Stanwell-Smith, SN Stuart, A Symes, M Tierney, TD Tyrrell, JC Vié and R Watson. 2010. Global biodiversity: Indicators of recent declines. *Science* 328:1164-1168.
- Cho HJ, CS Lee, YH Cheong, JY Kim and JS Oh. 1995. Ecological study for vegetation on abandoned coal-mined land. *J. For. Sci.* 51:14-24. (in Korean with English abstract).
- Connell JH and RO Slatyer. 1977. Mechanism of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *Amer. Nat.* 111:1119-1144.
- Costanza R, R d'Arge, R De Groot, S Farber, M Grasso, B Hannon, K Limburg, S Naeem, RV O' Neill, J Paruelo, RG Raskin, P Sutton and M van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Courtney R, G Mullen and T Harrington. 2009. An evaluation of revegetation succession bauxite residue. *Res. Ecol.* 17: 350-358.
- Cowling RM, B Egoh, AT Knight, PJ O'Farrell, B Reyers, M Rouget, DJ Roux, A Welz and A Wilhelm-Rechman. 2008. An operational model for mainstreaming ecosystem services for implementation. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 105:9483-9488.
- Coyne MS, Q Zhai, CT Mackown and RI Barnhisel. 1998. Gross nitrogen transformation rates in soil at a surface coal mine site reclaimed for prime farmland use. *Soil Biol. Bioc.* 30: 1099-1106.
- Daily GC. 1997. *Nature's Services: Societal dependence on natural ecosystems.* Island press, Washington, DC.
- De Groot RS. 1992. Functions of nature, Evaluation of nature in environmental planning, management and decision making. Wolters-Noordhoff, Groningen, Netherlands.
- De Groot RS, R Alkemade, L Braat, L Hein and L Willemen. 2010. Challenges in integtating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecol. Comp.* 7:260-272.
- Down CG. 1975a. Soil development on colliery waste tips on relation to age. I. introduction and physical factors. *J. Appl. Ecol.* 12:613-622.
- Down CG. 1975b. Soil development on colliery waste tips on relation to age. II. chemical factors. *J. Appl. Ecol.* 12:623-635.
- Dunnett N. 2011. Urban meadows: an ecological discussion. *Asp. Appl. Biol.* 108:11-17.
- Dželetović ZS, RM Filipović, DDJ Stojanović and MM Lazarović. 2009. Impact of lignite washery sludge on mine soil quality and poplar trees growth. *Land Deg. Dev.* 20:145-155.
- Garcia-Palacios P, S Soliveres, FT Maestre, A Escudero, AP Castillo-Monroy and F Valladares. 2010. Dominant plant species modulate responses to hydroseeding, irrigation and fertilization during the restoration of semiarid motorway slopes. *Ecol. Eng.* 36:1290-1298.

- Grant CD, CJ Campbell and NR Charnock. 2002. Selection of species suitable for derelict mine site rehabilitation in New South Wales, Australia. *Water, Air & Soil Pol.* 139:215-235.
- Haines-Young R and M Potschin. 2010. CHAPTER SIX The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. In *Ecosystem Ecology: a new synthesis BES Ecological Reviews. Series, CUP.* (Raffaelli, D and C Frid eds.), Cambridge [in press].
- Halpern BS, BS Halpern, S Walbridge, KA Selkoe, CV Kappel, F Micheli, C D'Agrosa, JF Bruno, KS Casey, C Ebert, HE Fox, R Fujita, D Heinemann, HS Lenihan, EMP Madin, MT Perry, ER Selig, M Spalding, R Steneck and R Watson. 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science* 319:948-952.
- Herrick J and MM Wander. 1998. Relationship between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: The importance of distribution, composition, and soil biological activity. In *Soil process and the carbon cycle.* Lal R, JM Kimble, RF Follett and BA Stewart eds.). CRC Press, London.
- Holl KD. 2002. Long-term vegetation recovery on reclaimed coal surface mines in the eastern USA. *J. App. Ecol.* 39:960-970.
- Hüttermann A, LJB Oriquiriza and H Agaba. 2009. Application of superabsorbent polymers for improving the ecological chemistry of degraded or polluted lands. *Clean* 37:517-526.
- Im YC. 2007. Study for reclamation · restoration business in mine spoils. *Mine reclamation technology.* Mine reclamation Corp. (in Korean with English abstract)
- Jefferson LV. 2004. Implications of plant density on the resulting community structure of mine site land. *Res. Ecol.* 12: 429-438.
- Jochimsen MEA. 1996. Reclamation of colliery mine spoil founded on natural succession. *Water, Air & Soil Pol.* 91: 99-108.
- Kim NC. 2002. 'The restoration and problems of mining and quarrying area in Korea'. The meeting for development of eco-friendly mine and establishment of ecological restoration model: Halla cement corporation Proceeding, July 5, 2002, Halla cement corporation, Gangneung.
- Koch JM. 2007. Restoring a jarrah forest understorey vegetation after bauxite mining in western Australia. *Res. Ecol.* 15:S26-S39.
- Koch JM and RJ Hobbs. 2007. Synthesis: Is alcoa successfully restoring a jarrah forest ecosystem after bauxite mining in western Australia? *Res. Ecol.* 15:S137-S144.
- Korea Coal Corporation. 2001. The 50th history of KCC.
- Korea Forest Research Institute. 2006. Report for technology of ecological restoration of damaged slope.
- Krüger B, A Kadler and M Fischer. 2002. The creation of post-mining landscapes of lignite mining in the new federal states. *Sur. Min. Brau. & Min.* 54:161-169.
- Larondelle N and D Haase. 2012. Valuing post-mining landscapes using an ecosystem services approach-An example from Germany. *Ecol. Ind.* 18:567-574.
- Lee CS, KS Lee, JK Hwangbo, YH You and JH Kim. 2004. Selection of tolerant plants and their arrangement to restore a forest ecosystem damaged by air pollution. *Water, Air & Soil Pol.* 156:251-273.
- Lee CY. 2002. The restoration and countermeasure of forest to anthropogenic activity. The meeting for development of eco-friendly mine and establishment of ecological restoration model: Halla cement corporation Proceeding.
- Lee SM. 2013. Development and application of assessment model for urban green ecosystem services-Focusing on urban cemeteries in Seoul. A dissertation written for the degree of Ph.D., Dongguk University. (in Korean with English abstract)
- Li MS. 2006. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: a review of research and practice. *Sci. Tot. Env.* 357:38-53.
- MA (Millennium Ecosystem Assessment Panel). 2005. Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Report. www.millenniumassessment.org.
- Oh WS. 2012. Selection of soil ameliorators and tolerant plant species and development of their application methods to realize ecological restoration of the coal mine spoils. A dissertation written for the degree of Ph.D., Seoul Women's University. (in Korean with English abstract)
- Olsen FJ and JH Jones. 1989. Organic amendments compared to topsoil replacement for prime farmland reclamation. *Land. Urb. Plan.* 17:197-203.
- Pagolia S. 2008. Payment for environmental services in Costa Rica. *Ecol. Eco.* 65:712-724.
- Palumbo AV, JF McCarthy, JE Amonette, LS Fisher, SD Wullschleger and WL Daniels. 2004. Prospects for enhancing carbon sequestration and reclamation of degraded lands with fossil-fuel combustion by-products. *Adv. Env. Res.* 8:425-438.
- Paone J, P Struthers and W Johnson. 1978. Extent of disturbed lands and major reclamation problems in the United States. In *Reclamation of Drastically Disturbed Lands* (Schaller, FW and P Sutton eds.). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA.
- Pedrol N, CG Puig, P Souza, R Forján, FA Vega, V Asensio, L González, B Cerqueira, EF Covelo and L Andrade. 2010. Soil fertility and spontaneous revegetation in lignite spoil banks under different amendments. *Soil and Til. Res.* 110: 134-142.

- Perrings C, A Duraiappah, A Larigauderie and H Mooney. 2011. The biodiversity and ecosystem services science-policy interface, *Science* 331:1139-1140.
- Ross KA, JE Taylor, MD Fox and BJ Fox. 2004. Interaction of multiple disturbances: importance of disturbance interval in the effects of fire on rehabilitating mined areas. *Aus. Ecol.* 29:508-529.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2010. *Global Biodiversity Outlook 3*, Convention on Biological Diversity.
- Shrestha RK and R Lal. 2006. Ecosystem carbon budgeting and soil carbon sequestration in reclaimed mine soil. *Env. Int.* 32:781-796.
- Slonecker ET and MJ Bengert. 2001. Remote sensing and mountaintop mining. *Rem. Sen. Rev.* 20:293-322.
- Šourková M, J Frouz and H Šantrůčková. 2005. Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic). *Geoderma* 124:203-214.
- TEEB (The economics of ecosystems and biodiversity). 2011. www.teebweb.org.
- Vymazal J and P Sklenicka. 2012. Restoration of areas affected by mining. *Ecol. Eng.* 43:1-4.
- Weir BJ, I Fulton and NW Menzies. 2006. Revegetation strategies for bauxite refinery residue: a case study of Alcan Gove in Northern Territory, Australia. *Env. Man.* 37:297-306.
- Wloda H. 1981. Similarity indices, sample size and diversity. *Oecologia* 50:296-302.
- Wong MH. 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere* 50:775-780.
- Yang JE, YS Ok and YH Park. 1993. The plan of ecological restoration in mine spoils. *Mine reclamation Corp.* 1:67-75. (in Korean with English abstract)
- Zhao Z, Z Bai, Z Zhang, D Guo, J Li, Z Xu and Z Pan. 2012. Population structure and spatial distributions patterns of 17 years old plantation in a reclaimed spoil of Pingshuo open-cast mine, China. *Ecol. Eng.* 44:147-151.

Received: 19 March 2014

Revised: 1 May 2014

Revision accepted: 9 May 2014