

폐석더미에서 복토 및 식생기반재 처리가 참싸리(*Lespedeza cyrtobotrya* Miq.)의 생장에 미치는 영향

김정환¹⁾ · 임주훈¹⁾ · 이 궁¹⁾ · 이임균²⁾ · 정용호¹⁾

¹⁾ 국립산림과학원 수토보전과 · ²⁾ 산림청 산림정책과

Effects of Soil Covering Depth and Vegetation Base Materials on the Growth of *Lespedeza cyrtobotrya* Miq. in Abandoned Coal Mine Land in Gangwon, Korea

Kim, Jeong-Hwan¹⁾ · Lim, Joo-hoon¹⁾ · Yi, Koong¹⁾ · Lee, Im-Kyun²⁾ and Jeong, Yong-Ho¹⁾

¹⁾ Division of Forest Soil and Water Conservation, Korea Forest Research Institute,

²⁾ Division of Forest Policy, Korea Forest Service.

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the effects of soil covering and vegetation base materials implementation on the growth of *Lespedeza cyrtobotrya* Miq. in abandoned coal mine land. We compared the biomass of *L. cyrtobotrya* at the study plots of four different soil covering depth (control, 10cm, 20cm, and 30cm) and four different compounds of vegetation base materials composed of soil conditioner (S), erosion control (E), and peat moss (P) (control, S+P, E+P, and S+E+P). The result showed that the biomass of *L. cyrtobotrya* was higher in the study plots implemented with soil covering than control plot, although the increase in biomass was not constant with soil covering depth. In case of the vegetation base materials treatments, the biomass was highest in S+E+P plot, and S+P and E+P plots showed higher biomass than control plot.

First author : Kim, Jeong-Hwan, Division of Forest Soil and Water Conservation, Korea Forest Research Institute, 57 Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 130-712, Korea, Tel : +82-2-961-2634, E-mail : restore@forest.go.kr

Corresponding author : Lim, Joo-Hoon, Division of Forest Soil and Water Conservation, Korea Forest Research Institute, 57 Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 130-712, Korea, Tel : +82-2-961-2632, E-mail : forefire@korea.kr

Received : 15 October, 2012. **Revised** : 24 December, 2012. **Accepted** : 24 December, 2012.

Key Words : *Abandoned coal mine land, Lespedeza cyrtobotrya, soil-enhancement, erosion-control, reclamation.*

I. 서 론

2010년 기준으로 국내에 분포하는 광산은 총 5,396개소로서, 이 중 4,681개소가 폐광산이며, 122개소가 휴지광산이다. 무연탄 광산은 400개소 중 394개소가 폐광산이며, 6개소만이 가행광산으로 남아 있다. 이는 에너지 소비구조의 변화에 따라 무연탄의 소비가 급격히 감소하였기 때문이다(Korea forests research institute, 2012).

채광 활동은 대단위 면적의 산림을 황폐화시키고, 활동 중 발생하는 폐석은 산림생태계를 교란시킨다. 폐석더미(Abandoned coal-mine land)는 이러한 채탄활동 후 생산된 폐석을 모아둔 더미로서 자연경관을 훼손시킬 뿐 아니라 지반침하와 폐석 유실을 일으킨다. 또한, 폐석 중 일부는 pH 3~3.5의 강산성을 띠는 황화수소로 산화되어 지하수 및 하천오염을 유발하는 등 복합적인 환경문제와 막대한 경제적 손실을 발생시키고 있다(Cho et al., 1995; Bradshaw and Chadwick, 1980).

폐석더미는 물리적 수단에 의해 안정화시킬 수 있으나, 비용이 많이 들고 그 효과가 오래 지속되지 못할 뿐만 아니라 훼손된 자연경관을 회복하는 효과도 미미하다(Smith and Bradshaw, 1979). 따라서 이에 대한 대안으로 폐석더미의 물리화학적 특성을 고려하여 생장에 적합한 수종을 식재하는 방법이 연구되고 있다(Lunt, 2003).

기존의 폐석더미의 복원은 생태학적인 고려가 부족한 상태에서 이루어져 왔다(Kim, 2005; Lee et al., 2002). 기존 폐석더미의 녹화사업은 주로 부분적인 객토 및 복토와 묘목 식재에 의한 단순 녹화공사나, 30cm 이상의 전면 복토 후 실시하는 재래식 파종공법과 묘목식재공법, 때 붙이기 등 주로 인력에 의한 녹화공법에 치중하였다. 이러

한 방법은 폐석더미에 생태계가 성립할 수 있는 물리적 기반은 만들 수 있으나 그 기질이 불량하여 정화기능이 낮아 중금속을 비롯한 오염물질이 하천으로 유입되어 심각한 오염을 유발하고 있다(Cho et al., 1995).

유출수로 인한 오염을 저감시키기 위하여 폐석더미 위에 차단층(barrier layer)을 만들거나 독성물질을 세탈시키는 방법이 이용되기도 하지만 비용이 많이 드는 단점이 있다(Bradshaw and Chadwick, 1980). 다른 방법은 폐석 위에 식물을 직접 식재하는 것으로서, 해당 지역의 기후에 적응하고 영양염류 요구도가 낮은 자생식물을 식재한다. 식재식물은 *Arapidopsis halleri* L., 은행나무, 콩과식물과 같이 복원 대상지에 현재 잔류하는 독성물질에 대한 내성을 가지고 있거나 지속적인 질소원 확보를 위해 질소고정을 하는 식물을 주로 이용한다(Piha et al., 1995; Rossum, 2004).

본 연구의 목적은 폐석더미 위에서 자라는 참싸리의 생장을 조사하여 복토 깊이와 식생기반재 처리가 참싸리의 생장에 미치는 영향을 구명하는 것이다.

II. 재료 및 방법

1. 연구시험지 개황

본 시험지는 강원도 D탄광(N 37° 11' 21.88", E 128° 58' 59.48")에 위치하고 있으며, 이 지역의 연평균 기온은 8.5°C, 연강수량은 1,307mm이다. 시험구의 사면경사는 25~30°, 사면방향은 남서사면이다(Figure 1).

폐석더미 위의 토양은 모래의 비율이 높은 사양토로서 표토와 심층 모두 고상의 비율이 상대적으로 높고, 식물 생육에 필요한 액상과 기상의

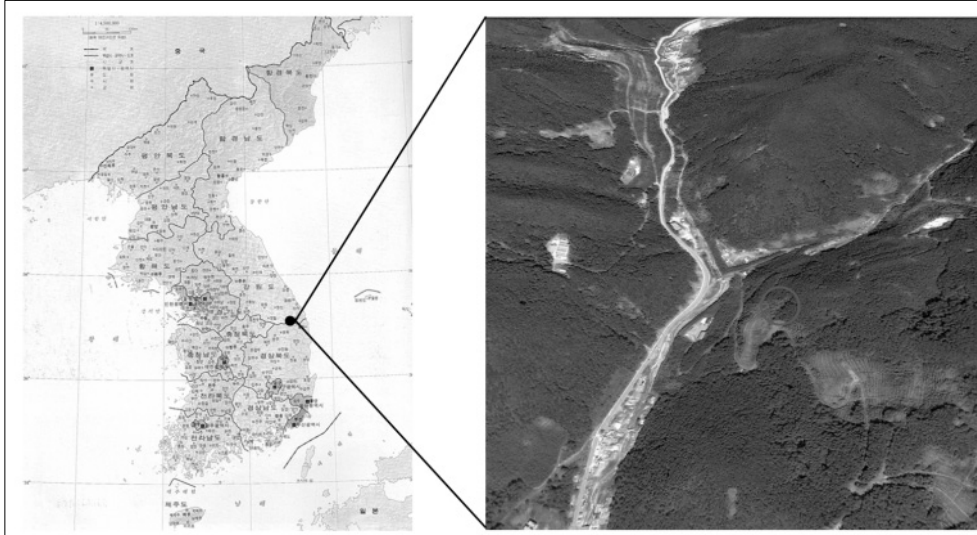


Figure 1. Location of abandoned coal-mine study site in Gangwon-Do, Korea.

비율은 현저히 낮았다. 가비중 또한 일반 산림토양의 범위보다 높아 식물의 뿌리 발달에 취약한 환경이었다(Table 1). 토양의 산도는 pH 4.0 미만으로서 강한 산성을 띠고 있었으며, 양이온 치환용량(cation exchange capacity, CEC)과 치환성 양이온 함량(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) 또한 낮았다. 전질소와 유효인산의 농도는 일반 산림토양과 큰 차이를 보이지 않았다(Table 1).

2. 시험지 조성

복토 깊이에 따른 참싸리의 생체량 및 개체군 밀도를 비교하기 위해서 복토처리를 하지 않은 대조구와 10cm, 20cm, 30cm 깊이로 각각 복토한 처리구를 조성하였다(Figure 2). 그리고 식생기반재에 의한 차이를 확인하기 위해 각 복토처리구를 다시 토양개량제+침식방지제+피트모스 처리

구(S+E+P), 토양개량제+피트모스 처리구(S+P), 침식방지제+피트모스 처리구(E+P)로, 그리고 아무런 처리를 하지 않은 시험구를 대조구로 구분하였다(Table 3). 각 처리구별로 사용한 식생기반재의 양은 토양개량제 $11,000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 침식방지제 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 피트모스 $0.2 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2}$ 이었다. 종자의 파종은 2009년 7월 차량장착 분사기를 이용한 종자 뿌어붙이기 방법으로 실시하였으며, 수종별 파종량은 소나무 $10 \text{ ml} \cdot \text{m}^{-2}$, 참싸리 $10 \text{ ml} \cdot \text{m}^{-2}$ 이었다.

3. 분석방법

처리 후 3년이 지난 2012년 8월, 각 시험지에서 처리구별로 $1.5 \times 1.5 \text{ m}$ 크기의 방형구 내 참싸리 개체수와 생체량을 측정하였다. 건중량 측정을 위해 싸리의 일부는 105°C 에서 72시간 동안

Table 1. Chemical properties of abandoned coal-mine land.

Soil-depth (cm)	pH (1 : 5)	Organic matter (%)	Total nitrogen (%)	P_2O_5 (me/100g)	CEC (me/100g)	Exchangeable cations (me/100g)			
						K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
0-15	3.76	9.88	0.13	18.41	2.53	0.03	0.04	0.24	0.09
15-30	3.45	10.08	0.14	2.68	2.75	0.03	0.04	0.20	0.09

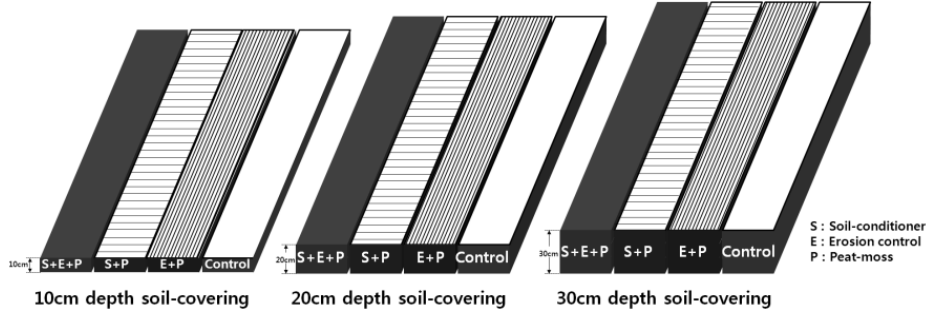


Figure 2. Design of study plots with different soil covering depth and plant base materials in abandoned coal-mine land.

항량에 도달할 때까지 건조하여 중량을 측정하였다. 복토 깊이 및 식생기반재 처리에 따른 차이를 확인하기 위해 조사된 사리 개체수와 생체량을 SAS 9.2(Analytical software)를 이용하여 이원배치분산분석을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 복토처리에 따른 참싸리의 생체량 비교

복토처리에 따른 참싸리의 생체량을 비교한 결과 대조구의 경우 처리구에 비해 낮은 생체량을 나타내었다($p < 0.05$). 복토처리에 따른 생체량을 비교한 결과 20cm 복토처리구의 참싸리 생체량이 평균 $1,241.3 \pm 108.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 으로 가장 높았으며 이어서 10cm 복토처리구가 $731.5 \pm 67.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 30cm 복토처리구가 $280.0 \pm 77.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 으로 나타났다(Figure 3). 이러한 결과는 복토처리하는 경우 토양의 pH 값을 증가시켜 초본류나 참싸리와 같은 관목류가 우점한다는 보고와 유사한 결과이다(Pichtel et al., 1994).

현재 폐석더미의 인공복원을 위해 복토를 실시하는 경우 복토를 60cm 이상 실시하며(산림청, 2012), 복토층과 폐석층 사이에 안정제를 투입하여 강우시 오염물질 배출 등을 막는 것이 일반적이나, 수목을 이용하여 폐석더미의 복원을 실시하는 경우 복토층의 깊이는 큰 문제가 되지 않으며, 복토 깊이가 10cm 이상인 상태에서는 복토깊

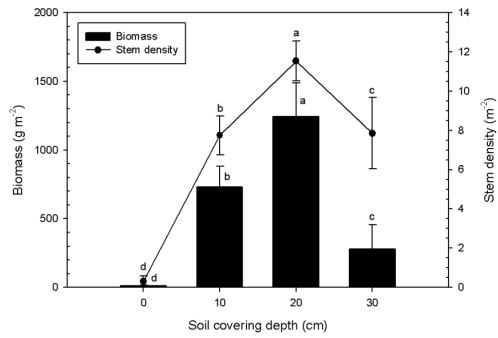


Figure 3. Dry weight of *Lespedeza cyrtobotrya* by soil-covering depth at abandoned coal-mine land. Error bars indicated standard errors. Treatments marked with different letters differ statistically for each soil-depth according to Tukey's multiple range test at $\alpha = 0.05$.

이가 식물의 성장 및 식물정화(phytoremediation)에 큰 영향을 끼치지 않는다고 보고된 바 있다(Korean forest research institute, 2012). 1ha 면적의 폐광지를 복토하는 경우 복토층이 10cm만 증가되더라도 1,000m³의 흙이 필요로 하는 등 많은 자본이 소요되기 때문에 폐석더미에서의 복토처리는 10cm 이상의 깊이만 실시하여도 참싸리의 성장에 유리하게 작용하는 것으로 판단된다.

2. 식생기반재 처리에 따른 참싸리의 개체군밀도와 생체량 비교

식생기반재 처리에 따른 참싸리의 생체량을

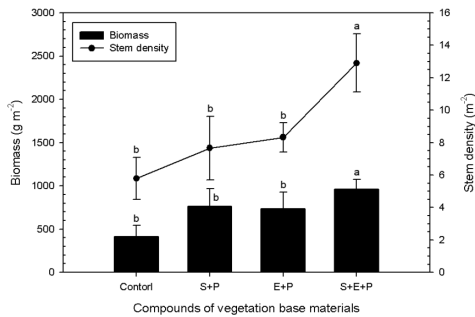


Figure 4. Dry weight and individual density of *Lespedeza cyrtobotrya* by soil type at abandoned coal-mine land. S : soil-conditioner, E : erosion control, P : peat-moss. Error bars indicate standard errors. Treatments marked with different letters differ statistically for each component according to Tukey's multiple range test at $\alpha=0.05$.

비교한 결과 S+E+P 처리구에서 자란 참싸리의 생체량이 $962.6 \pm 111.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 으로 가장 높게 나타났다($p < 0.05$). 이어서 E+P 처리구 $736.0 \pm 189.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, S+P 처리구 $762.6 \pm 202.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 순으로 나타났으나 E+P 처리구와 S+P 처리구간에는 통계적 유의성이 나타나지 않았다. 대조구는 $411.1 \pm 133.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 으로 나타나 다른 처리구에 비해 낮은 생체량을 보였다($p < 0.05$).

참싸리의 개체군밀도는 참싸리의 생체량과 유사한 경향을 나타내었다. 처리구별 개체군밀도는 S+E+P 처리구에서 $12.9 \pm 1.8 \text{ 개} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 가장 높았다($p < 0.05$). 이어서 E+P 처리구 $8.3 \pm 0.9 \text{ 개} \cdot \text{m}^{-2}$, S+P 처리구 $7.6 \pm 2.0 \text{ 개} \cdot \text{m}^{-2}$ 순으로 나타났으나 두 처리구간 개체군밀도는 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 대조구의 개체군밀도는 $5.8 \pm 1.3 \text{ 개} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 다른 세 처리구에 비해 낮게 나타났다($p < 0.05$).

토양개량제의 효과는 S+E+P 처리구와 S+P 처리구의 생체량 및 개체군밀도가 대조구에 비해 높은 결과를 통해 알 수 있었다. 이는 식물의 생장은 토양산도와 양분이 일정한 수준으로 유지되는 것이 중요하다는 결과(Pichtel et al., 1994) 및 식생기반재 처리 없이 복토만을 실시하는 경우

기반토양에서 용출되는 중금속 및 유기산 등으로 인해 식물의 생장에 악영향을 끼친다는 결과(Yang et al., 2006)와 유사하였다.

침식방지제의 효과는 S+E+P 처리구와 E+P 처리구의 생체량 및 개체군밀도가 대조구에 비해 높은 결과를 통해 알 수 있었다. 일반적으로 폐석더미와 같이 사면의 경사가 높은 경우 토양이 유실될 가능성이 높아지며 이에 따라 토양 내 양분의 손실이 증가한다(Kim et al., 1998). 이러한 점을 미루어 볼 때, 본 연구에서 나타난 결과는 토양침식이 방지되어 토양 내 양분이 유지되고 있는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 폐석더미에서 자라는 참싸리의 생장을 조사하여 각 복토 깊이와 식생기반재 처리가 참싸리의 생장에 어떠한 영향을 끼치는지 밝히고자 실시되었다.

참싸리와 소나무 종자를 동시에 종자 뺀어붙이기를 실시하였으나 대부분의 지역에서 참싸리가 우점하는 경향을 보였다. 복토 깊이에 따른 참싸리의 생장은 깊이에 따라 일정한 경향을 보이지는 않았다. 그러나 복토처리를 하지 않은 대조구에 비해 모든 복토 처리구에서 높은 개체군과 생체량을 나타내었다. 따라서 폐석더미 위에서 참싸리의 생장을 위해서는 복토 처리가 반드시 필요한 것으로 나타났다.

식생기반재 처리에 따른 참싸리의 생장을 비교한 결과 토양개량제와 피트모스, 그리고 침식방지제를 처리하지 않은 대조구에서 참싸리의 생장이 저조하게 나타났다. 이는 식생기반재 처리를 하지 않은 경우 토양이 유실될 가능성이 높아 토양 내 양분이 줄어들며 토양산도도 유지되지 않을 가능성이 높다(Johnson and Skousen, 1995; Min et al., 2006; Pichtel et al., 1994).

따라서 폐석더미에서 복토 및 식생기반재 처리에 따른 참싸리의 생체량 및 개체군밀도를 비

교환 결과 식생의 생장이 제한되는 폐석더미에서 우선적으로 조치해야 할 요인은 복토임을 알 수 있었고, 토양개량제와 침식방지제 처리가 참싸리 생장에 있어서 효과적이라는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 이러한 처리는 식물생장에 기반이 되는 토양의 물리, 화학적 성질을 변화시킬 수 있기 때문에 시간에 따른 성질의 변화와 토양의 성질을 결정하는 요인들이 식생의 생장에 미치는 영향에 관한 연구가 필요하다.

인 용 문 헌

- Bradshaw, A. D. and Chadwick, M. J. 1980. The Restoration of Land : The ecology and reclamation of derelict and degraded land. Cambridge University Press, UK.
- Cho, H. J., Lee, S. C. and Cheong, Y. H. 1995. Ecological Study for Restoration of Vegetation on Abandoned Coal-mined Land. Formerly the Research reports of the forestry research institute 51 : 14-24. (in Korean with English abstract)
- Johnson, C. D. and Skousen, J. G. 1995. Minesoil Properties of 15 Abandoned Mine Land Sites in West Virginia. Journal of Environmental Quality 24(4) : 635-643.
- Kim J. D. 2005. Assessment of Pollution Level and Contamination Status on Mine Tailings and Soil in the Vicinity of Disused Metal Mines in Kangwon Province. Journal of Korean Environmental Engineering 27(6) : 626-634. (in Korean with English abstract)
- Kim N. C., Suk W. J. and Nam, S. J. 1998. The Study on the Seed Mixture for the Revegetation of the Cut-slopes. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 27(6) : 262-634. (in Korean with English abstract)
- Korea forest research institute. 2012. The Development of Purification Technology at Abandoned mine area using Phytoremediation. Korea Forest Service. 63 pp. (in Korean)
- Lee, J. C., Han, S. H., Jang, S. S., Lee, J. H., Kim, F. G., Heo, J. S. and Yum, K. J. 2002. Selection of Indigenous Tree Species for the Revegetation of the Abandoned Coal Mine Lands in Taeback Area. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 4(2) : 86-94. (in Korean with English abstract)
- Lunt, I. D. 2003. A Protocol for Integrated Management, Monitoring, and Enhancement of Degraded *Themeda triandra* Grasslands Based on Planting of Indicator Species. Restoration Ecology 11(2) : 223-230.
- Min, J. G., Park, E. H., Woo, S. Y., Kim, J. K. and Moon, H. S. 2006. Vegetation Structure of Some Abandoned Coal Mine Lands in Mungyeong Area. Journal of Korean Forest Society 95(1) : 23-31.
- Pichtel, J. R., Dick, W. A. and Sutton, P. 1994. Comparison of Amendments and Management Practices for Long-Term Reclamation of Abandoned Mine Lands. Journal of Environmental Quality 23(4) : 766-772.
- Piha, M. I., Vallack, H. W., Reeler, B. M. and Michael, N. 1995. A low input approach to vegetation establishment on mine and coal ash wastes in semi-arid regions : I. Tin mine tailings in Zimbabwe. Journal of Applied Ecology 32(2) : 372-381.
- Rossum, van F., Bonnin, I., Fénart, S., Pauwels, M., Petit, D. and Laprade, P. S. 2004. Spatial genetic structure within a metallicolous population of *Arabidopsis halleri*, a clonal, self-incompatible and heavy-metal-tolerant species. Molecular Ecology 13 : 2959-2967.

Smith, R. A. H. and Bradshaw, A. D. 1979. The Use of Metal Tolerant Plant Populations for the Reclamation of Metalliferous Wastes. *Journal of Applied Ecology* 16 : 595-612.

Yang, J. E., Kim, H. J., Choi, J. Y., Kim, J. P.,

Shim, Y. S., An, J. M. and Skousen, J. G. 2006. Reclamation of Abandoned Coal Mine Wastes Using Lime Cake Byproducts in Korea. *Mine Water and the Environment* 25(4) : 227-232.