

## 임목폐기물을 활용한 비탈면 녹화용 식생기반재 배합비율\*

박연재<sup>1)</sup> · 전기성<sup>2)</sup> · 조동길<sup>3)</sup> · 심윤진<sup>3)</sup> · 도종남<sup>2)</sup> · 박미영<sup>4)</sup> · 이재영<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> 서울시립대학교 일반대학원 환경공학과 · <sup>2)</sup> 한국도로공사 도로교통연구원 · <sup>3)</sup> 넥서스환경디자인연구원(주)  
<sup>4)</sup> 대한콘설턴트 · <sup>5)</sup> 서울시립대학교 환경공학과

## The Mixing Ratio of Wood Waste on Slope Revegetation base Materials

Park, Yeon-Jae<sup>1)</sup> · Jeon, Gi-Seong<sup>2)</sup> · Cho, Dong-Gil<sup>3)</sup> · Shim, Yun-Jin<sup>3)</sup> · Do, Jong-Nam<sup>2)</sup>  
Park, Mi-Young<sup>4)</sup> and Lee, Jai-Young<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Environmental Engineering, Graduate School, University of Seoul,

<sup>2)</sup> Korea Expressway Corporation Research Institute,

<sup>3)</sup> NEXUS Environmental Design Centre,

<sup>4)</sup> DAE HAN CONSULTANTS CO., LTD,

<sup>5)</sup> Department of Environmental Engineering, University of Seoul.

### ABSTRACT

This study introduced wood waste into revegetation base materials for recovery of highway cut slope. The object of this study is to derive the mixing ratio of wood waste, kaoline and silica by conducting a test installation, monitoring, analysis and evaluation. The following items were investigated and analyzed each experimental zone to deduce the mixing ratio of wood waste, kaoline and silica on slope revegetation base materials: the physical and chemical properties of the vegetation base materials, soil-hardness, soil-humidity, collapse and eroded spots, established number of trees, existing species of grass and tree species, vegetation coverage ratio, pest status, and invasion of disturbance species. The revegetation method was evaluated in each experiment zone which had different mixing ratios. As a result, experiment zone C scored 47 points out of 60 as the best revegetation method. However, this

\* 본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원 과제 “꺾기비탈면 표층유실 복구를 위한 녹화공법 시험시공 모니터링”의 지원에 의해 수행되었습니다.

**First author** : Park, Yeon-Jae, Department of Environmental Engineering, Graduate School, University of Seoul,  
Tel : +82-44-201-7270, E-mail : p529446@korea.kr

**Corresponding author** : Jeon, Gi-Seong, Korea Expressway Corporation Research Institute,  
Tel : +82-31-371-3373, E-mail : giseong@ex.co.kr

**Received** : 13 June, 2016. **Revised** : 22 August, 2016. **Accepted** : 22 August, 2016.

result has been derived from just one construction and short-term monitoring. In order to derive the suitable and dependable mixing ratio, conducting an objective revegetation method evaluation and long-term experimenting and monitoring is required.

Key Words : *Ecological restoration, Highway cut slope, Recycling, Soil-media hydroseeding measures.*

## I. 서 론

인류 역사를 돌아보면 인간은 끊임없이 주변의 산림을 제거하고 이를 개간해왔다. 하지만 18세기 산업혁명이 이후 인류는 과학문명의 이기를 동원해 과거 어느 때보다 빠른 속도와 큰 규모로 산림을 훼손하고 이를 개간해왔다(Zalasiewicz et al., 2011). 우리나라의 경우 국토 면적의 60% 이상이 산지지형으로 이루어져 전 국토에 걸쳐 도로공사 및 각종 건설공사로 인하여 매년 산림훼손이 이루어졌고, 이에 따른 비탈면 발생이 증가되고 있는 실정이다(Cho et al., 2015b). 이러한 훼손 비탈면은 식생의 생육기반이 불량하여 자연복원력만으로 녹화되기까지 오랜 시간이 소요된다. 특히 각종 건설공사로 인해 발생하는 비탈면은 경사가 매우 급하고, 양분 및 수분 공급이 어려운 열악한 조건으로 식물 생육에 매우 불리한 조건을 가지고 있다(Pritchett and Fischer, 1987).

일반적으로 건설공사를 통해 발생하는 비탈면은 식생의 천이를 위한 기반으로 우수나 외기 조건으로부터 안정화하기 위해 다양한 녹화공법이 적용되고 있다. 이러한 녹화공법은 대부분 폐자원인 하수오니와 각종 슬러지를 활용하고 있는 상황이나 많은 공법들이 악취와 미생물의 활성화로 인해 도심지 공사 등에서는 어려움을 겪고 있는 실정이며, 바람이나 태풍, 강우 등에 의해 비산되거나 침식되어 제 역할을 못하는 경우가 많은 것이 사실이다(Park et al., 2015).

한편, 환경부에서는 「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률」에 의거, 건설공사 현장의 폐기물에 대한 재활용을 적극 권장하고, 매년 발

생하는 임목폐기물을 재활용함으로써 건설공사 예산절감 및 국토환경 개선에 적용하도록 하고 있다. 이러한 관련 법률 제정에도 불구하고 국내에서는 임목폐기물의 약 10% 이상을 현장에서 사용하도록 권고하고 있을 뿐, 관련 법규나 기준이 마련되지 않아, 현장 반출, 소각, 매립 등 활용 기술에 한계를 나타내고 있다. 건설현장에서 발생하는 5톤 이상의 임목폐기물은 사업장 일반폐기물로 분류되고 있으며 2009년 기준으로 발생량은 1,030톤/일으로, 이 중 약 80%가 재활용되고 있으나 실제 국내 건설현장에서 발생하는 임목폐기물은 재활용에 대한 관련 기준 및 지침이 미비하여 건설현장의 재활용률은 저조한 실정이다(MOE and KEITI, 2014).

건설공사 중에 발생하는 식물발생제(잎, 가지, 목질부, 뿌리)를 파쇄하여 재활용하는 것은 자연본래의 순환시스템으로 되돌리는 것이므로 가장 바람직한 자원재활용이라고 할 수 있다(Chiaki and Oouchi, 2001). 2000년대에 들어오면서 녹화용 임목폐기물 분쇄재를 이용한 공법에 대하여, 환경친화적 사방공법의 정립에 관한 연구(KFS, 2002), 생육보조재 취부공법에 의한 비탈면 녹화 식생배합의 적정성 연구(Kim et al., 2005), 얇은 식생기반 취부공법에 의한 비탈면 녹화 식생배합 및 적용시험 연구(Kim et al., 2006), 폐유목분쇄재 녹화공법의 식물 발아능 평가(Kim et al., 2007), 비탈면 녹화에서 임목폐기물의 활용에 관한 연구(Kim et al., 2008), 임목폐기물의 현장 재활용을 위한 퇴비화기술(Heo et al., 2009), 임목폐기물 파쇄칩을 활용한 녹화기술의 비탈면 적용성에 관한 연구(Koh et al., 2010a) 등 다양한 연구가 이루어졌다. 현재



Figure 1. Current state of experimental plot.

까지 임목폐기물에 대한 식재기반재로서의 활용성은 여러 측면에서 검증되고 있으나 비탈면 녹화공법으로서 적용방법 부문에 대해서는 아직 미진한 상황이다.

임목폐기물은 녹화토양의 근간이 될 수 있으며, 장차 부식되면 식물이 활용하는 영양소의 공급원이 될 수 있다. 그러나 이러한 임목폐기물만으로는 토양의 결속력이 부족하여 녹화토양으로 사용이 용이하지 않는 실정이다(Futami et al., 1999). 따라서 본 연구에서는 이러한 임목폐기물의 단점을 보완하고자 고령토와 규석을 활용하고자 한다. 고령토는 메타카올린과 포졸란의 성분을 가지고 있어 입자들 사이의 공극을 충족시켜 치밀한 조직을 갖게 해주며(Kim et al., 2014), 규사는 무수규산인 이산화규소( $\text{SiO}_2$ ) 성분을 가진 석영알갱이로 된 모래로 둥근 모양의 입자를 가지고 있어 암반의 틈이나 공간을 확장시켜서 투수성(Permeability)을 증가시킨다(Chun, 2007). 고령토의 결합력과 규사의 투수성은 임목폐기물의 식생기반으로써의 효과를 높일 수 있다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 비탈면의 식생기반재로 임목폐기물과 고령토, 규사의 재료 배합비율을 달리하면서 시험시공 및 모니터링을 실시한 후 효과 분석 및 평가를 실시하였다. 이를 통해 식물의 생육조건을 향상시킬 수 있는 임목폐기물, 고령토, 규사의 적절한 배합비율을 도출하여 향후 비탈면의 생태적인 녹화를 위한 기초 자료를 제공하는 데 목적을 두고 있다.

## II. 연구의 범위 및 방법

### 1. 시험시공 대상지

시험시공 대상지 위치는 충북 충주시 신니면 모남리 일대 서충주 톨게이트 회차로 옆 비탈면으로 길이 150m, 높이 10m로 총 면적은 약 1,100 $\text{m}^2$ 이다. 비탈면 방위는 동사면으로 윗단은 경질토사로 경사 약 60°, 아랫단은 리핑암으로 약 60°의 경사를 이루고 있다(Figure 1).

### 2. 공시재료

본 연구에 이용된 종자배합은 ‘도로비탈면 녹화공사의 설계 및 시공 지침(MLTMA, 2009)’의 기타 적용지역의 두꺼운 식생기반재뿔어붙이기(두께 5cm 이상) 종자배합량 조건표 중 초본·관목 혼합형 종자배합을 기준으로 적용하였다(Table 1).

식생기반재의 재료 배합에 사용된 임목폐기물은 경기도 안성의 벌목을 진행하는 임목을 10mm 이하로 파쇄 후 이물질 선별 및 제거 과정을 거쳐 조달되었다. 고령토는 경주 성주에서, 규사는 강릉 주문진에서 재료가 조달되었다. 고령토, 규사, 임목, 제지 슬러지, 오니 등 재료를 적정 배합한 후 범면녹화 스크린 선별기를 통해 최종적으로 이물질 제거 과정을 실시하였다(Table 2). 시험시공은 2015년 4월에 재료배합 비율(부피비를 기준)을 달리한 4가지 실험구(A, B, C, D)와 유리슬러지를 이용한 녹생토를 대조구로 설정하여 Figure 2와 같이 대상지에 실시하였다.

Table 1. Mixing ratio of applied seeds.

(Unit: g/m<sup>2</sup>)

Division	Native trees (30%)		Native grass (60%)		Exotic grass (10%)	
Plant name	<i>Rhus javanica</i> L.	1.8	<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonica</i> Regel	6.0	<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	4.0
	<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	8.0	<i>Dianthus chinensis</i> L.	5.7	<i>Lolium perenne</i> L.	3.2
	<i>Indigofera pseudo-tinctoria</i>	6.5	<i>Astragalus sinicus</i> L.	6.2	-	-
	-	-	<i>Centaurea cyanus</i> L.	7.8	-	-
	-	-	<i>Silene armeria</i> L.	5.4	-	-
	-	-	<i>Coreopsis tinctoria</i> Nutt.	2.8	-	-
	-	-	<i>Cosmos bipinnatus</i> Cav.	2.6	-	-
Total	3 Species	16.3	7 Species	36.5	2 Species	7.2
			12 Species (60)			

Table 2. Mixing ratio of vegetation base materials.

(Unit: %)

Division	Kaoline + silica	Wood waste	Paper mill sludge	Slime	*Clay+ granite soil +sand	Auxiliary material	Polymer
A	10	30	10	10	35	3	2
B	20	20	10	10	35	3	2
C	30	10	10	10	35	3	2
D	40	0	10	10	35	3	2
Control zone	glass sludge 20%, sea mineral 10%, loess 20%, cement 10%, phospho-gypsum 5%, vegetable and its by-product materials 35%						

\*Structure: clay(40%) + silt(40%) + sand(20%)

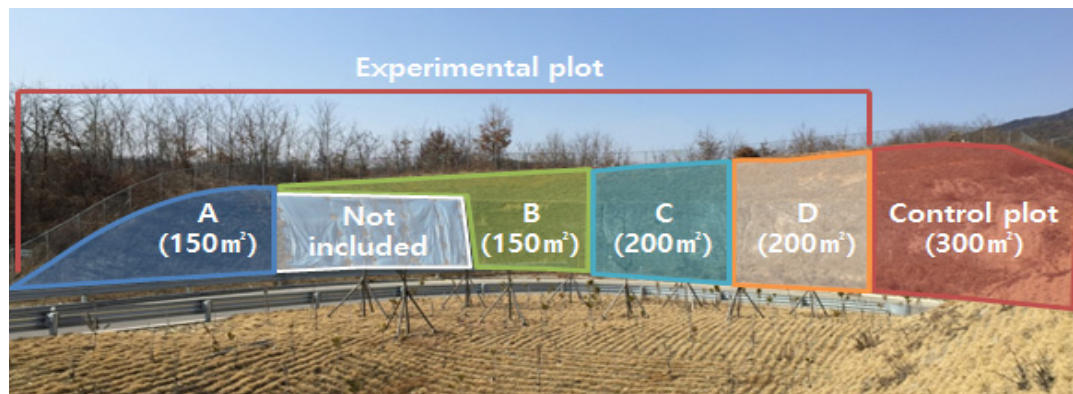


Figure 2. Experimental plot mimetic diagram.

### 3. 시험시공 모니터링 항목 및 방법

시험시공 모니터링 조사 항목은 MLTMA (2009)를 기본으로 Kwon(2013), Koh et al. (2010b), Jang et al.(2012) 등 선행연구 내용을

검토하여 조사 항목을 도출하였다. 도출된 조사 항목의 신뢰도 향상을 위해 전문가들의 자문회의를 통해 의견을 수렴하여 최종적으로 조사항목을 선정하였다.

**Table 3.** Analysis method of physical and chemical characteristics of the vegetation base materials.

Physical characteristics	Available soil water			Porosity			Permeability			
	Pressure equilibrium method			Dry gravimetric method			Constant water method			
Chemical characteristics	Acidity (pH)	Organic material (%)	Total Nitrogen (%)	Available phosphate (mg/kg)	CEC (cmol/kg)	Exchangeable cation(cmol/kg)			EC (dS/m)	Salinity (%)
	pH-meter	Dry oxidation method	Dry oxidation method	Lancaster	1N-Ammonium acetate leaching method	Potassium	Calcium	Magnesium	EC-meter	Morhr's method
						Atomic Absorption Spectroscopy method				

식생기반재에 대한 물리적 특성분석 항목으로 유효수분, 공극률, 투수성 등 3개 항목, 화학적 특성분석 항목으로 산도, 유기물, 전질소, 유효인산, CEC, 치환성양이온(칼륨, 칼슘, 마그네슘), EC, 염분 등 10개 항목을 선정하고 Table 3과 같은 분석 방법을 적용하였다.

식생기반재 모니터링 항목은 토양경도, 토양습도, 탈락 및 붕괴 정도 등 3개 항목, 식생 모니터링은 목본성립분수, 초본·목본 출현중수, 피복률, 병충해 유무, 생태계교란생물 및 위해종 등 5개 항목을 선정하였다. 식생기반재 모니터링 및 식생 모니터링 방법은 MLTMA(2009)에서 제시하는 조사방법을 참고하였다.

**4. 시험시공 모니터링 시기**

MLTMA(2009)의 녹화공법 평가 일정에 따라 식생모니터링은 1차 모니터링(2015년 5월), 2차 모니터링(2015년 8월), 3차 모니터링(2015년 10월) 등 총 3회에 걸쳐 실시하였다. 토양경도, 토양습도, 탈락 및 붕괴지점 등 식생기반재에 대한 모니터링은 모니터링 결과의 신뢰도를 높이기 위해 총 5회(2015년 5월, 2015년 6월, 2015년 8월, 2015년 9월, 2015년 10월)에 걸쳐 조사를 실시하였다.

**5. 녹화공법 평가기준**

MLTMA(2009)의 녹화공법 평가표 중 본 연구

에서 적용가능한 품질 관련 항목을 중심으로 평가기준을 제시하였다. 경제성 및 품질 관련 일부 항목(식생생육량, 녹화 지속성 및 식생침입 가능성)을 제외한 품질기준에 한해 60점 만점으로 평가하였으며, 기존 평가방법을 고려하여 녹화 공법이 선정 가능한 점수 75점<sup>1)</sup>을 비율로 환산하여 45점 이상인 녹화공법에 대하여 우수 녹화공법으로 평가하였다(Table 4).

임목폐기물과 고령토의 배합 비율에 따른 식생기반재와 물리적·화학적 분석 항목(유효수분, 공극률, 투수성, 산도, 유기물, 전질소, 유효인산, CEC, 치환성양이온(칼륨, 칼슘, 마그네슘), EC, 염분) 및 모니터링 항목(토양경도, 토양습도, 목본성립분수, 출현중수) 간의 상관관계를 확인하기 위하여 SPSS 프로그램(SPSS 17.0, IBM SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하여 상관분석 및 회귀분석을 수행하였다.

**III. 결과 및 고찰**

**1. 식생기반재 물리적 특성 분석**

1) 식생기반재 유효수분

식생기반재의 유효수분은 수분특성식을 이용

1) MLTMA(2009)에 따르면 녹화평가점수가 100점 만점 중 75점 이상인 녹화공법을 선정하도록 되어 있다.

**Table 4.** Evaluation criteria of slope revegetation measure.

Evaluation	Items		Score	Criteria for score			
Quantitative	Plant growth	Vegetation coverage ratio (overall)	Grass and shrub hybrid type	15	$80\% \leq (15)$	60~79%(10)	$60\% > (5)$
		Vegetation coverage ratio (grasses)		(0~-5)	$30\% > (0)$	30~59%(-3)	$60\% \leq (-5)$
		Blights		5	Good(5)	Average(3)	Bad(1)
	# of appeared species	Established number of trees		10	$80\% \leq (10)$	60~79%(7)	$60\% > (3)$
		existing species of grass and tree species		15	$80\% \leq (15)$	60~79%(10)	$60\% > (5)$
		Ecology disturbance and risky species invasion		(0~-5)	Low(0)	Middle(-3)	High(-5)
Physical characteristics of vegetation base material		10	Good(10)	Average(7)	Bad(3)		
	Collapse and eroded spots		5	Good(5)	Average(3)	Bad(1)	
Qualitative	Similarity to the surrounding environment		(0~-5)	Good(0)	Average(-3)	Bad(-5)	
Total			60				

해 포장용수량, 위조점을 계산하여 유효수분함량을 도출하였으며, 포장용수량은 33kPa, 위조점은 1,500kPa을 기준으로 하였다.

실험구에서 유효수분함량은 A에서 가장 높게, D에서 가장 낮은 것으로 분석되었으며, 임목폐기물의 비율이 증가함에 따라 포장용수량이 증가하여 그로 인해 유효수분함량 또한 높게 나타났다. 임목폐기물이 배합되지 않고 고령토+규사의 비율이 가장 높은 실험구 D에서는 위조점이 다른 실험구에 비해 높은 값을 나타내었다 (Table 5).

## 2) 식생기반재 공극률 및 투수성

공극률은 임목폐기물의 비율이 높을수록 높은 값을 나타내며, 실험구 A에서 가장 높고 실험구 D에서 가장 낮은 것으로 분석되었다(Table 6). 투수성은 실험구 내에서는 D에서 가장 높고 C에서 가장 낮아 공극률과 달리 일정한 경향을 나타내지 않았다. 일반적으로 공극률과 투수성은 관련이 있다고 볼 수 있지만 공극률이 공극의 크기를 반영하지 않기 때문에 공극률이 높더라도 미세 공극이 주로 발달한 경우에는 투수성을 향상시키지 못하고, 반대로 공극률이 낮더라도 대공극

**Table 5.** Results of available water analysis of the vegetation base materials.

Division	Moisture characteristic equation (x=Water potential, y=Volumetric water content)	Field capacity(%)	Wilting point(%)	Available soil water(%)
A	$y = -14.28\ln(x)+103.59$	50.59	7.83	42.76
B	$y = -11.65\ln(x)+86.928$	43.13	9.34	33.79
C	$y = -11.11\ln(x)+81.331$	40.20	6.57	33.63
D	$y = -6.64\ln(x)+57.161$	33.53	11.59	21.94
Control plot	$y = -3.356\ln(x)+36.733$	25.00	4.46	20.54
Adequate content*			Available water: equal to or over 4.0	

\*Source: KILA(2013)

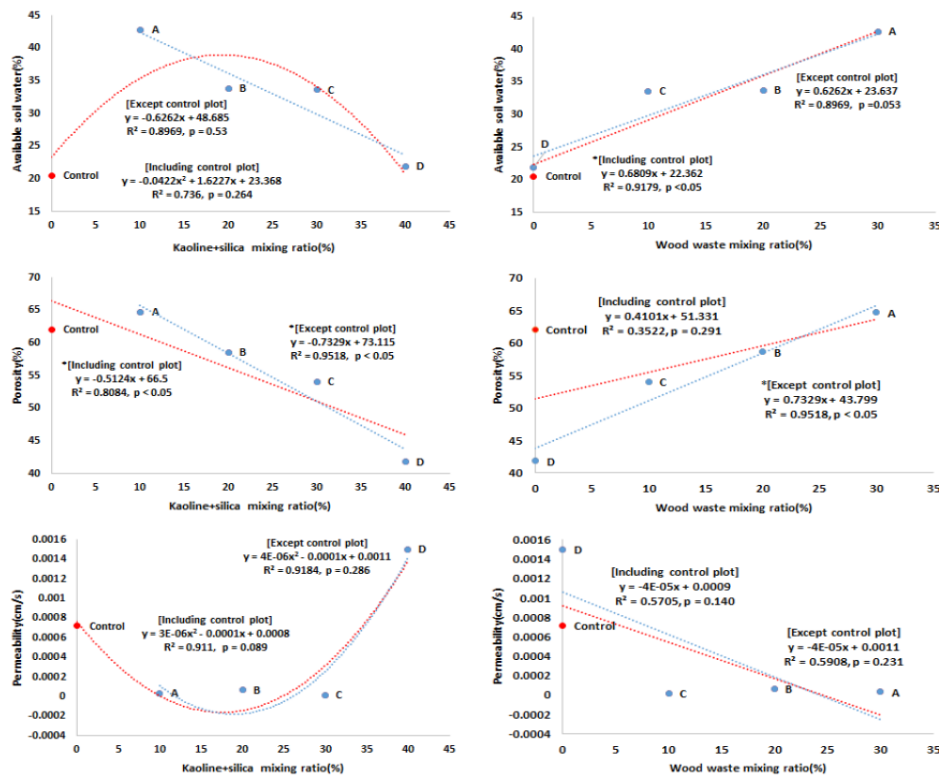
**Table 6.** Results of porosity, permeability analysis of the vegetation base materials.

Division	Porosity(%)	Permeability(cm/s)
A	64.72	$3.3 \times 10^{-5}$
B	58.60	$6.7 \times 10^{-5}$
C	54.04	$1.7 \times 10^{-5}$
D	41.81	$1.5 \times 10^{-3}$
Control plot	62.09	$7.2 \times 10^{-4}$
Adequate content	equal to or over 40	equal to or over $10^{-5}$

이 주로 발달한 경우에는 투수성이 크게 증가하는 것으로 판단된다(Cho et al., 2015a).

3) 식생기반재와 물리적 특성의 상관관계  
식생기반재의 고령토 및 임목폐기물의 배합

비율과 물리적 특성인 유효수분, 공극률, 투수성 간의 상관관계를 확인하기 위하여 대조구 결과의 포함 유무에 따라 각각 회귀분석을 수행하였다(Figure 3). 대조구의 결과 값을 제외한 회귀분석의 결과는 고령토의 배합비율이 증가할수록



**Figure 3.** Relationships between physical characteristics(available soil water, porosity and permeability) and mixing ratio(kaoline+silica and wood waste) of the vegetation base materials(Including control plot, n=5; Except control plot, n=4; \*p<0.05).

\*Red and Blue dash line indicate 'Including control plot' and 'Except control plot', respectively.

**Table 8.** Correlation coefficients between chemical characteristics and mixing ratio(kaoline+silica and wood waste) of the vegetation base materials(n=5).

Division		Acidity (pH)	Organic material (%)	Total Nitrogen (%)	Available phosphate (mg/kg)	CEC (cmol/kg)
Including control plot	kaoline+silica mixing ratio(%)	0.730	-0.856	-0.856	-0.830	-0.944*
	wood waste mixing ratio(%)	-0.076	-0.279	-0.291	-0.113	-0.089
Except control plot	kaoline+silica mixing ratio(%)	0.548	-0.986*	-0.979*	-0.619	-0.886
	wood waste mixing ratio(%)	-0.548	0.986*	0.979*	0.619	0.886
Division		Exchangeable cation(cmol/kg)			EC (dS/m)	Salinity (%)
		Potassium	Calcium	Magnesium		
Including control plot	kaoline+silica mixing ratio(%)	-0.799	-0.831	-0.827	-0.597	-0.214
	wood waste mixing ratio(%)	-0.762	-0.334	-0.241	-0.623	0.839
Except control plot	kaoline+silica mixing ratio(%)	-0.990**	-0.941	-0.622	0.738	-0.800
	wood waste mixing ratio(%)	0.990**	0.941	0.622	-0.738	0.800

\*p&lt;0.05; \*\*p&lt;0.001

유효수분, 공극률은 감소하는 경향을 나타내었으며 투수성은 증가되는 경향을 나타내나 공극률과의 관계를 제외하고는 통계적 유의성을 나타내지 못하였다(p<0.05). 임목폐기물의 경우 배합비율이 증가할수록 유효수분, 공극률은 증대

되고 투수성은 감소한 결과를 나타내었으며 이중 공극률과의 관계에서만 통계적으로 유의하였다 (p<0.05). 대조구를 포함한 회귀분석 수행 결과, 통계적으로 유의한 결과는 고령토와 공극률 (p<0.05) 및 임목폐기물과 유효수분(p<0.05)의

**Table 7.** Results of the Chemical characteristics of the vegetation base materials.

Division	Acidity (pH)	Organic material (%)	Total Nitrogen (%)	Available phosphate (mg/kg)	CEC (cmol/kg)	Exchangeable cation(cmol/kg)			EC (dS/m)	Salinity (%)
						Potassium	Calcium	Magnesium		
A	7.5	3.22	0.211	382	9.08	0.72	6.78	1.27	2.19	0.014
B	7.8	2.07	0.174	427	8.68	0.64	5.98	0.64	2.17	0.017
C	7.8	1.64	0.160	401	8.44	0.47	5.90	0.62	2.43	0.011
D	7.7	0.74	0.110	312	6.20	0.32	4.45	0.79	2.34	0.008
Control plot	7.5	9.39	0.481	515	11.12	0.59	14.53	2.09	3.55	0.009
Adequate content*	6.0~8.0	3.0≤	0.06≤	100≤	6.0≤	0.6≤	2.5≤	0.6≤	< 1.0	< 0.5

\*Source: MLTMA(2009) and KILA(2013)



관계에서 확인되었다. 이러한 결과를 토대로 유효수분은 고령토보다는 임목폐기물의 배합비율이 증가할수록 증대되는 것으로 판단되며 공극률은 고령토의 배합비율이 증대될수록 감소하는 것으로 사료된다. 투수성의 경우 고령토와 임목폐기물의 비율에 상반되는 양상을 나타내나 유의미한 결과를 보이지는 않았다.

**2. 식생기반재 화학적 특성 분석**

식생기반재 화학적 특성 분석결과, 모든 실험구에서 EC를 제외한 항목 모두 적정함량 기준에 적합한 것으로 분석되었다. 대체로 유기물함량과 전질소, 유효인산, CEC, 치환성양이온은 임목폐기물의 비율이 높을수록 높은 값을 나타냈다(Table 7).

식생기반재와 화학적 특성 간의 상관관계를 분석하였으며 대조구를 포함한 분석결과는 (Table 8) 고령토 배합비율과 CEC 간의 유의한 상관계(p<0.05)를 보였으며 그 외 식생기반재 처리 비율과 토양의 화학적 성분의 유의한 상관계는 확인되지 않았다. 그러나 대조구를 제외한 식생기반재와 화학적 특성의 상관관계 분석결과 고령토 배합율과 유기물 함량, 총질소, 칼륨(K) 간에 통계적으로 유의한 상관관계를 확인하였으며 임목폐기물의 배합비율은 고령토 배합비율의 상관관계 분석결과와 반대의 결과를 나타내었다. 이러한 분석결과를 통해 고령토의 배합비율이 증가할수록 유기물 함량,

총질소, 칼륨은 감소하며 반대로 임목폐기물의 배합비율이 증가할수록 유기물함량, 총질소, 칼륨은 증대되는 것으로 확인되어 화학적 특성의 증대는 고령토의 배합비율보다는 임목폐기물의 배합비율에 의한 것으로 판단된다.

**3. 식생기반재 모니터링 결과**

**1) 토양경도 변화**

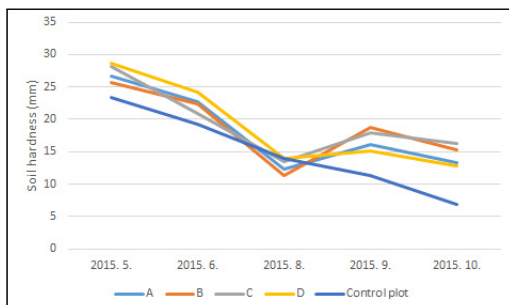
식생기반재 토양경도 변화는 Figure 4와 같다. 임목폐기물 비율에 따라 변화를 살펴보았지만 비율에 따른 변화양상은 나타나지 않았다. 토양경도는 대조구를 제외하고 평균 18.22~19.36mm로 나타나 토양경도 적정기준(MLTMA, 2009)에 따라 식물의 근계생장에 적당한 값으로 측정되었다.

**2) 토양습도 변화**

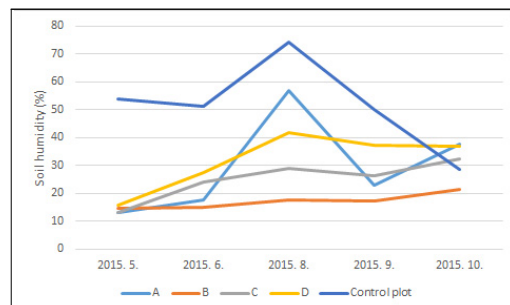
식생기반재 토양습도 변화는 Figure 5와 같다. 토양습도는 토양경도와 마찬가지로 임목폐기물 비율에 따른 변화양상을 살펴보았지만 비율에 따른 특이사항은 나타나지 않았다. 토양습도의 조사 결과는 대조구를 제외하고 평균 17.14~31.72%로 나타났다.

**3) 탈락 및 붕괴**

식생기반재의 안정성을 평가하기 위해 탈락 및 붕괴지점을 파악하였다. 모니터링 기간 동안 모든 실험구 및 대조구에서 탈락과 붕괴가 발생



**Figure 4.** Changes in soil hardness for the vegetation base materials.



**Figure 5.** Changes in soil humidity for the vegetation base materials.

Table 9. Evaluation of established number of trees with experiment zones.

(Unit: # of trees/m<sup>2</sup>)

Division	Experiment zone				
	A	B	C	D	Control plot
Recovery target	Grass and shrub hybrid model (3 tree)				
Established number of trees	1.67	2.97	2.86	1.06	0.37
Ratio(%)	56	99	95	35	12

한 지점은 관찰되지 않았다. 토양경도 조사결과 평균값이 18mm 이상으로 안정적으로 비탈면을 유지하고 있는 것으로 판단되나, 향후 탈락 및 붕괴지점이 발생할 수 있으므로 지속적인 모니터링이 필요하다고 판단된다.

#### 4. 식생 모니터링 결과

##### 1) 목본성립본수

목본성립본수에 대한 판정 방법은 1m×1m 방형구를 설치하고 목본의 성립본수를 10회 조사하여 본수/m<sup>2</sup>로 평균하여 각 실험구별 목본성립본수를 비율로 나타냈다. 모니터링 결과 실험구 B에서 가장 높은 비율을 나타냈으며 대조구에서 가장 낮은 비율을 보였다(Table 9).

##### 2) 초본목본 출현종 수

초본 및 목본류의 출현종수에 대한 판정 방법은 각 위치별 사용종과 출현종을 조사하여 목표 대비 출현비율을 통해 비교하였다. 대조구를 포함한 실험구 C, D에서 출현 비율이 58.3%로 나타나고 실험구 A(50.0%), 실험구 B(41.7%) 순으로 출현 비율이 나타났다(Table 10). 목본으로는 붉나무, 초본으로는 자운영, 외래 초종으로는 페레니얼라이그라스가 출현하지 않아 향후 지속적인 모니터링을 통해 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

##### 3) 피복률

실험구별 식생피복률은 Table 11과 같다. 전체피복률은 대상지에 설치되어 있는 방형구(1m×1m)를 이용하여 3회 측정 후 산술평균하여 전체피복도로 환산하거나 현장에서 육안으

Table 10. existing species of grass and tree species at monitored slopes.

(●: appeared, ○: non-appeared)

Division	Plant name	A	B	C	D	Control plot
Trees	<i>Rhus javanica</i> L.	○	○	○	○	○
	<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	●	●	●	●	●
	<i>Indigofera pseudo-tinctoria</i>	○	●	●	●	●
	Sub-Total	1	2	2	2	2
Native grass	<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonica</i> Regel	●	●	●	●	●
	<i>Dianthus chinensis</i> L.	○	○	●	●	○
	<i>Astragalus sinicus</i> L.	○	○	○	○	○
	<i>Centaurea cyanus</i> L.	●	●	●	●	●
	<i>Silene armeria</i> L.	○	○	○	○	●
	<i>Coreopsis tinctoria</i> Nutt.	●	○	○	○	○
	<i>Cosmos bipinnatus</i> Cav.	●	○	●	●	●
Sub-Total	4	2	4	4	4	
Exotic grass	<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	●	●	●	●	●
	<i>Lolium perenne</i> L.	○	○	○	○	○
	Sub-Total	1	1	1	1	1
Total	6	5	7	7	7	
Ratio(%)	50.0%	41.7%	58.3%	58.3%	58.3%	

**Table 11.** Results of the overall coverage ratio of experiment zone.

(Unit: %)

Division	A	B	C	D	Control plot
May 2015	42	13	70	30	8
Aug 2015	100	100	100	100	100
Oct 2015	100	88	97	100	90

로 실측 또는 사진촬영 후 실내에서 피복률을 계산하였다.

2015년 5월 조사결과는 시험시공 초기 조사 결과로 전반적으로 피복률이 낮은 것으로 조사되었으나, 실험구 C의 경우 상대적으로 피복률이 높게 조사되었다. 전반적인 식물출현 특성은 시공 초기인 관계로 이입종은 거의 조사되지 않았고, 출현하더라도 1~2개체 정도로 나타났다. 또한 덩굴성식물의 이입도 조사되지 않았으며, 초기 피복률을 높인 종으로 초본은 외래종인 툼웨스큐 및 수레국화, 목본은 참싸리로 조사되었다.

2015년 8월과 10월 조사결과는 조사 초기에 비해 우점종의 변화가 상대적으로 심했으며 우점종의 경우 파종식물이 우점하는 지점과 이입종이 우점하는 지점이 유사한 비율로 나타났다. 우점종의 경우 계절적인 영향으로 인해 남아초, 참싸리, 코스모스 등의 파종식물이 높은 비율로 나타났으며 도로 및 산림과 인접해 있는 환경을 고려했을 때 참쭈, 바랭이 등 이입종 또한 나타난 것으로 판단된다.

**4) 병충해 유무**

시험시공 후 수시로 파종 식물의 병충해 발생 유무를 동정하였다. 조사결과 모든 조사구에서 병충해가 발생하지 않았다.

**5) 생태계교란 및 위해종**

시험시공지역에 환경부에서 지정한 생태계교란생물(돼지풀, 단풍잎돼지풀, 가시박 등)과 환삼덩굴, 칩 등과 같은 하부식생을 파괴하는 위해 수종에 대해 시험시공지 침입여부를 확인하

고 교란정도를 측정하였다. 생태계교란생물은 전 실험구 내에서 발견되지 않았으나 C, D, 대조구에서 위해종으로 환삼덩굴, 칩 등이 조사되었다.

**6) 식생기반재와 식생의 상관관계**

식생기반재 배합비율과 식생 모니터링 결과로 확인된 목본성립수 및 식물 출현종수 간의 상관관계를 분석하기 위해 대조구 결과의 포함 유무에 따라 각각 회귀분석을 수행하였다(Fig. 6). 대조구를 포함한 식생기반재와 식생의 상관관계 결과는 선형관계보다는 비선형인 2차 다항식의 관계를 나타내고 있으나 통계적으로 유의하지는 않았다. 반면 대조구를 제외한 분석에서는 목본성립수가 고령토 및 임목폐기물의 배합비율과 유의한 상관관계를 확인하였으며 ( $p < 0.05$ ) 대조구를 포함한 관계와 동일한 2차 다항식의 관계를 나타내었다. 그러나 식물 출현종수와는 유의한 상관관계가 확인되지 않았다. 이러한 상관분석 및 회귀분석 결과로 식생기반재로서 식생의 활착에 가장 적절한 배합비율은 고령토 20~30%, 임목폐기물 10~20%가 적절한 것으로 판단되며 추후 장기간의 모니터링을 통해 식생기반재 비율의 장기적인 타당성 및 효과에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

**5. 녹화공법 평가**

실험구별 녹화공법에 대한 평가는 <Table 12>과 같다. 임목폐기물 비율에 따른 평가결과 C 실험구가 47점으로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 B, A, D 및 대조구 순으로 나타났다.

이 중 45점 이상의 평가점수를 만족하는 배합

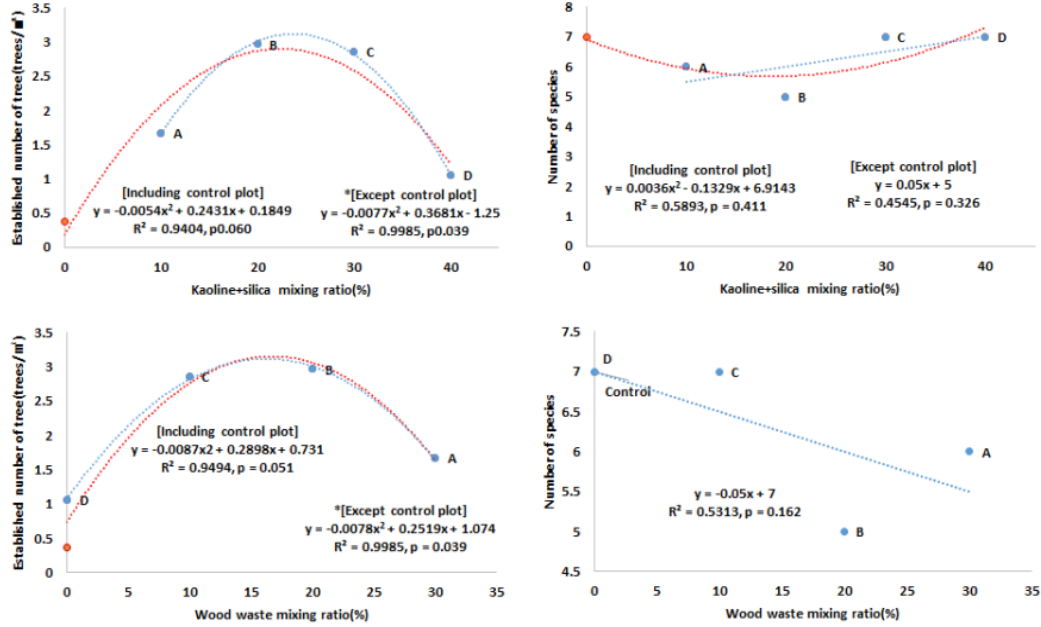


Figure 6. Relationships between established number of trees, total plant species and mixing ratio(kaoline+silica and wood waste) of the vegetation base materials(n=5).

\*Red and Blue dash line indicate 'Including control plot' and 'Except control plot', respectively.

Table 12. Evaluation results of slope revegetation measures.

Evaluation	Items		Score	A	B	C	D	Control plot	
Quantitative	Plant growth	Vegetation coverage ratio (overall)	Grass and shrub hybrid type	15	15	10	15	10	10
		Vegetation coverage ratio (grasses)		(0~-5)	0	0	0	-3	0
		Blight		5	5	5	5	5	5
	# of appeared species	Established number of trees		10	3	10	10	3	3
		existing species of grass and tree species		15	5	5	5	5	5
		Ecology disturbance and risky species invasion		(0~-5)	0	0	-3	-3	-3
	Physical characteristics of vegetation base material		10	10	10	10	10	7	
Collapse and eroded spots		5	5	5	5	5	5		
Qualitative	Similarity to the surrounding environment		(0~-5)	0	0	0	0	0	
Total			60	43	45	47	32	32	
Ranking			-	3	2	1	4	4	

비율은 실험구 C와 B로 나타났으며, 대조구를 포함한 다른 배합비율에 대해서는 해당 점수에 만족하지 못하는 평가결과가 나타났다.

따라서 실험구 C와 B의 식생기반재 배합비율인 임목폐기물 10~20%, 고령토+규사 20~30%, 제지슬러지 10%, 오니 10%, 점토+마사토+모래 35%, 보조재료 3%, 고분자재 2%의 배합비율에서 식생기반재로써의 가능성을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 연구는 임목폐기물을 활용한 비탈면 녹화 기술의 식생기반재 배합비율을 알아보기 위하여 임목폐기물의 단점을 보완하고자 임목폐기물에 고령토 및 규석을 추가로 도입하여 이들에 대한 배합비율을 4가지(임목폐기물 배합 비율을 기준으로 A 실험구 30%, B 실험구 20%, C 실험구 10%, D 실험구 0%)로 구분하여 시험시공을 실시하였으며, 식생기반재의 물리적·화학적 특성 분석을 실시하여 재료의 품질을 평가하였다. 또한, 임목폐기물 배합비율별 실험구에 대한 식생기반재와 식생 모니터링 결과를 토대로 도비탈면 녹화공사의 설계 및 시공지침(MLTMA, 2009)에 따라 녹화공법을 평가하여 식생기반재로써 적합한 배합비율을 도출하였다.

식생기반재 물리적·화학적 특성 분석 결과, 물리적 특성은 모두 적정함량 기준에 적합한 것으로 나타났으나 화학적 특성의 경우 유기물, 치환성양이온(칼륨), EC 항목에서 일부 적정함량 기준에 미달하는 실험구가 나타났다. 식생기반재 모니터링 결과, 토양경도는 평균 18.22~19.36mm로 나타나 식물의 근계생장에 적당한 값으로 측정되었으며, 토양습도는 평균 17.14~31.72%로 나타났다. 탈락 및 붕괴 모니터링 결과, 모든 실험구에서 탈락과 붕괴가 발생한 지점은 관찰되지 않았다. 식생 모니터링 결과, 목본성립본수는 35~99%의 비율로 나타났으며 실험구 B에서 가장 높은 99% 비율을 나타냈다.

초본·목본 출현종수는 실험구 C, D에서 출현 비율이 58.3%로 나타나고 실험구 A(50.0%), 실험구 B(41.7%) 순으로 출현 비율이 나타났다. 식생피복률은 88~100%의 비율로 나타났으며 실험구 A와 D에서 100% 피복률을 나타냈다. 병충해는 모든 실험구에서 발생하지 않았다. 생태계교란생물은 전 실험구 내에서 발견되지 않았으나 C, D에서 위해종으로 환삼덩굴, 칩 등이 조사되었다.

이상의 결과를 토대로 각 실험구별 녹화공법 평가결과, 실험구 C와 B가 60점 만점 중 각각 47점, 45점으로 평가되어 우수 녹화공법으로 평가되었다.

따라서 본 연구로 진행된 임목폐기물을 활용한 식생기반재는 실험구 C와 B의 식생기반재 배합비율인 임목폐기물 10~20%, 고령토+규사 20~30%, 제지슬러지 10%, 오니 10%, 점토+마사토+모래 35%, 보조재료 3%, 고분자재 2%의 배합비율에서 식생기반재로써의 가능성을 확인하였다.

본 연구는 단기간에 1회 시험시공한 결과를 바탕으로 MLTMA(2009)의 녹화공법 평가 기준을 적용하였기에 많은 한계가 있다. 향후 지속적인 시험시공과 모니터링 등을 통하여 좀 더 신뢰성 있는 조사결과를 도출해야 하며 녹화공법 평가 항목 중 적용하지 않은 경제성도 함께 고려해야 할 것이다.

#### References

- Chiaki, M. and K. Oouchi. 2001. Examination of the Mix of Revegetation Raw Materials using Lignocellulosic Chip. Journal of the Japan Society of Re-Vegetation Engineering 27(1): 178-180. (in Japanese)
- Cho DG · Jeon GS · Shim YJ · Kim DH · Do JN and Park MY. 2015a. A Study on the Mixing Ratio of Food Waste on Slope Re-vegetation

- Base Materials. Journal of the Korean Society of Environmental Re-storation Technology 18(6): 215-226. (in Korean with English summary)
- Cho SR · Kim JH and Shim SR. 2015b. Practical Use of Several Ground Covers on a Slope Revegetation Construction - *Miscanthus sinensis* var. *purpurascens*, *Festuca arundinacea*, *Pennisetum alopecuroides*, *Zoysia japonica*. Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology 18 (3): 97-107. (in Korean with English summary)
- Chun JS. 2007. A Study on the Application of Slica Sand as Fine Aggregate. MD dissertation, Gyeongsang National University. (in Korean with English summary)
- Futami, S. · M. Suzuki · M. Chiaki · Y. Nakano and A. Uchida. 1999. Root Property of Epilayer Basic Materials Spray Work on the Basis of Natural Circulation Type Plant Growth. Research Presentation of the Japan Society of Re-Vegetation Engineering: 134-137. (in Japanese)
- Heo YJ · Koh JH · Joo P and Ahn TY. 2009. The Composting Technique for On-site Recycling of Wood Waste. Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology 12 (4): 72-80. (in Korean with English summary)
- Jang HT · Park WJ · Kim NC and Park JM. 2012. Use of *Arundinaria munsuensis* Y. Lee as revegetation plant materials of damaged slopes. Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology 15(1): 133-140. (in Korean with English summary)
- Kim JH · Heo YJ · Kim NC and Cheong YM. 2005. A Study on the Seeding Mixture Improvements for the Restoration and Re-vegetation of the Slopes by the Thin-Layer-Soil-Media Hydroseeding Revegetation Measures. Journal of the Korean Society For Environmental Restoration Technology 8(2) : 90-97. (in Korean with English summary)
- Kim JW · Jung TG · Kim NC and Kwon BS. 2006. A Study on the Seeding Mixture and Application Test for the Restoration and Revegetation of the Slopes by the Thin-Layer-Soil-Media Hydroseeding Measures - Application by the S.O-Soil Spray Measures. Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology 9(6): 143-151. (in Korean with English summary)
- Kim YJ · Youm GJ · Kim JG · Lee JY and Jeon KU. 2007. Evaluation of Vegetation Germinative Power for Waste Woody Debris-Chip Revegetation Measures. Proceedings of the Summer season symposium on Korean Forest Society. pp. 294-297.
- Kim NC · Lee JH · Lee TO and Hur YJ. 2008. A Study on the Use of Fresh Root-chips in Slope Revegetation Work. Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology 11(4): 119-128. (in Korean with English summary)
- Kim KN · Cho GG and Kim IJ. 2014. Study on How to Use Mineral Resources in Gangwon-do as Advanced Construction Materials of with a Focus on Kaolin and Basalt Rocks. Research report to Research Institute for Gangwon. (in Korean)
- Koh JH · Hur YJ · Lee YK and Kim NC. 2010a. A Study on the Use of Wood Waste for Slope Revegetation Techniques. Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology 13(1): 47-56. (in Korean with English summary)

- Koh JH · Hur YJ · Lee YG and Kim NC. 2010b. A study on the use of a continuous fiber soil reinforcement system to revegetate a cut slope. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 13(3): 73-83. (in Korean with English summary)
- Korea Forest Service (KFS). 2002. A study on establishment of environment friendly erosion control works. (in Korean)
- Kwon HJ. 2013. Plantation structures of the natural landscape recovery type of revegetation measures for roadside slope. MD dissertation, Dankuk University. (in Korean with English summary)
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA). 2009. Design and Construction guidelines for revegetation of the road cut-slope. (in Korean)
- Ministry of Environment (MOE) and Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI). 2014. Development of ecological restoration technologies using soil seed bank, top-soil and wood waste biomass on construction sites. (in Korean with English summary)
- Park KS · Hwang IS and Bae WS. 2015. A Study on Utilization of Waste Organic Matter for Slope Protection. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* 16(4): 41-48. (in Korean with English summary)
- Pritchett, W. L. and R. F. Fischer. 1987. Properties and management of forest soils. New York : Wiley.
- The Korean Institute of Landscape Architecture (KILA). 2013. Landscape design criteria. (in Korean)
- Zalasiewicz, J. · M. Williams · A. Haywood and M. Ellis. 2011. The Anthropocene: a new epoch of geological time?. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369(1938): 835-841.