폐광산 암반 및 폐석사면에 적합한 친환경 식생복원 소재 개발에 대한 연구

정문호² · 류종흠¹ · 김태혁² · 이학주³ · 추창오¹ · 신연수³ · 정교철^{1*}

¹안동대학교 지구환경과학과, ²한국광해관리공단 광해기술연구소, ³(재)FITI시험연구원 산업환경본부

Development of Green Rehabilitation Material for Rock and Abandoned Mine Debris Slopes

Mun-Ho Jung², Jong-Heum Ryu¹, Tae-Heok Kim², Hak-Joo Lee³,
Chang-Oh Choo¹, Youn-Soo Shin³, and Gyo-Cheol Jeong^{1*}

¹Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

²Institute of Mine Reclamation Technology, Mine Reclamation Corporation

³Environment & Bio Business Team, FITI Testing & Research Institute

이 연구는 폐광산 암사면 및 폐석 적치장 사면의 안정화와 더불어 척박한 환경에 친환경적으로 식물이 생육할 수 있는 기반을 조성, 녹화함으로써 광업활동으로 인해 생성된 인위적인 사면의 미관을 개선하는 것을 목적으로 하고 있다. 따라서 이 연구에는 사면의 안정화와 더불어 폐석유실 및 광물찌꺼기 비산 방지를 통해 광산지역의 환경을 친환경적으로 복원하고자 개발하고 있는 폐광산 사면 보호를 위한 친환경 식생복원 소재 개발에 대한 내용을 기술하였다. 폐광산 암사면 및 폐석사면에서의 친환경 식생복원 소재를 개발하기 위하여 우선적으로 현재 많이 사용되고 있는 천연섬유인 코이어섬유 소재, 내구성을 향상시키기 위한 천연섬유/화학섬유 소재 및 화학섬유 소재 등을 대상으로 인장강도, 인열강도 등의 시험을 실시하였다. 그 결과 천연섬유인 코이어섬유에서 친환경 식생복원의 가능성을 파악할 수 있었다. 이는 동일한 천연섬유라 할지라도 꼬임의 정도 및 생분해성에서의 내구성을 향상시키기 위한 항균처리 등으로 자연상태에서의 내구성을 향상시킬 수 있으리라 판단된다.

주요어 : 폐광산, 폐석사면, 친환경 식생복원 소재, 천연섬유

The aim of this study is to develop eco-friendly, fundamental technology for vegetative restoration of barren lands using green rehabilitation material, for the stabilization of abandoned mine debris slopes and depository slopes composed of rock fragments. It is expected that such methods would help to improve the negative view of artificial slopes that remain following mining activity, while also contributing to slope stabilization and prevention of the loss of rock fragments and the dispersion of tailings. We tested the tensile strength and tear strength of various materials, including commonly used natural coir material, natural fibers, and synthetic textile materials with enhanced durability. In conclusion, there is the possibility that natural coir can be used as an eco-friendly material in vegetation restoration, while its durability in natural conditions can be improved by controlling the degree of knot convolution and by antibacterial treatment against biodegradation.

Key words : Abandoned mine, Abandoned mine debris slope, Green rehabilitation material, Natural fiber

*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

© 2012, The Korean Society of Engineering Geology
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 언

광산개발에 따라 발생하는 광해에는 토양 및 수질 오염과 함께 주요한 광해 요인 중 하나가 과거 광산 개발

시 진출입로 등으로 만들어진 절개사면과 폐석/광물찌꺼기 적치에 의한 산림훼손이다. 과거에 폐광된 노천광산 절개사면은 방치한 상태로 시간이 경과한 지금도 자연적으로 식생이 회복되지 못하고 미관을 저해하는 요소로 남아있다. 이와 더불어 우기 시 강우에 의하여 폐석이 유실되어 수질과 토양을 오염시키고, 사면의 파괴와 산사태 등이 발생하여 주변 도로 및 주거지역의 파손을 불러일으키기도 한다. 뿐만 아니라, 광물찌꺼기 적치장의 사면에서 광물찌꺼기가 강우에 의해 유실되거나 바람에 의해 비산하면서 인근지역까지 퍼져 2차적인 대기 및 수질 오염의 문제도 발생시켜 인근 주민의 민원문제로까지 번지고 있다. 이러한 문제는 결국 광산지역의 발전을 저해하는 요인으로 작용하고 있으며 이를 방지하기 위해서는 광산 지역에 인위적으로 발생한 사면을 대상으로 생육기반을 조성한 후 자생식물로 녹화하여 복구하는 사면 보호공법의 개발이 필요하다(Choi et al., 2009).

최근 우리나라에서는 다양한 연구를 통해 폐광지역, 채석장, 임도 및 도로 사면에 대한 사면보호공법을 발달시켜왔다. 하지만 대부분의 공법은 경사가 완만한 사면이나 토층이 유실되지 않은 지역을 대상으로 하고 있으며, 급경사지에 시공이 가능한 공법도 종자 사용이 제한적이거나 식물 고사가 빠른 단점 등이 있었다. 식생복원 소재로는 암사면과 폐석사면을 대상으로 한 MIRECO (2007)와 Choi et al. (2009)에 의해 개발된 섬유방틀공 (mine green formwork; M.G.F)이 있으나, 이 또한 폴리에스터(PET)로 방틀을 만들어 내부에 배양토 등의 충전재를 넣어 식물을 배양하는 것으로 자연상태에서는 반영구적인 소재로써 배양토의 유실을 막는 데는 양호한 소재라 생각된다. 그러나 자연적으로 분해가 요구되는 친환경적 복원이라는 의미에서는 소재로서의 적절성에 문제가 제기되고 있다. 따라서 배양토 내에 우리나라 자연환경에 적합한 소나무 및 콩과식물 등의 식물체가 발아하여 자연상태로서의 성장이 이루어질 때 까지 배양토의 유실을 막아주면서 6~7년 후 자연상태로 분해가 가능한 친환경 소재로서 광산지역의 급경사 암사면이나 폐석사면을 보호하고 녹화할 수 있는 공법에 대한 연구·개발이 시급하다고 하겠다.

따라서 본 연구에서는 폐광산 암사면 및 폐석 적치장 사면의 안정화와 더불어 척박한 환경에 친환경적으로 식물이 생육할 수 있는 기반을 조성, 녹화함으로써 광업활동으로 인해 생성된 인위적인 사면의 미관을 개선하고, 사면의 안정화와 더불어 폐석유실 및 광물찌꺼기 비산방지를 통해 광산지역의 환경을 친환경적으로 복원하고

자 개발하고 있는 폐광산 사면 보호를 위한 친환경복원 소재 개발에 대한 내용을 기술하고자한다.

폐광산 사면보호공법

국내외 사면의 보호공법으로는 크게 종자를 직접 뿌어 붙이는 공법이나 코이어넷 등을 설치하여 녹화를 시키는 공법, 사면 격자틀을 이용한 공법, 식생대 자루 등을 이용하여 녹화시키는 심기공법 등의 환경과 입지조건에 따라 다양한 공법들이 존재한다(Kwon and Nam, 2007; Kim et al., 2005).

폐광산 암사면 및 폐석사면에 가능한 섬유방틀공의 기능은 직사광선에서도 쉽게 풍화되지 않고 강도를 유지할 수 있으며, 사면을 보호하고 침식을 방지할 수 있다. 또한 식물은 투과하되 종자와 토사는 유출되지 않는 특성을 가지고 있다. 이를 감안하여 섬유 방틀공의 재료는 상기 조건을 만족시키고 산성에도 내구성이 뛰어난 폴리에스터(PET) 재질로 선정하였다. 폴리에스터 재질은 수중 및 지중에서 산, 염기성, 기타물질에 의한 화학적 반응이 발생하지 않고 부식되지 않기 때문에 반영구적인 재질이다. 또한 무게가 가볍고 시공이 편리하며 동절기에 동해가 발생하지 않는 장점이 있다. Table 1은 현장시공에 사용된 섬유 방틀공의 재질을 '07년 과 '08년 각각 한국건설생활환경시험연구원에 의뢰하여 분석한 결과이다(Choi et al., 2009).

국내외 많이 적용되고 있는 암반사면 녹화공법을 간략히 정리하면, 암사면 절개지 식생이 곤란한 지역에 철망을 설치하고 고정핀으로 고정된 일정한 두께의 잔디와 초본류를 혼합한 녹생토를 분사하여 붙이는 공법의 녹생토 공법, 절토암반 사면에 배토조성물을 부착시켜 식생대가 보호 및 녹화 되는 원리를 이용한 공법의 아스나(ASNA)공법, 코코넛 열매껍질에서 추출한 섬유질과 황마를 재료로 하는 천연섬유를 사용하여 침식에 의한 유실을 방지하고 식생기반을 조성하는 공법의 코이어넷 설치공법, 일반토양이나 사면 지역에서 강우에 의한 침식 방지나 녹화를 위해 수용성 점착제로 천연펄프에 종자를 점착시키고 약품처리 후 유공필름과 함께 녹화하는 공법의 유공씨드벨트공법, 암사면 대상지에 철망을 설치하고 유기질 비료, 토양개량제 등을 이비콤포를 사용하여 점착제와 함께 뿌어 붙여 녹화하는 공법의 이비콤포그린공법 및 단계별로 사질토, 시멘트, 천연섬유, 보강재, 복합비료 등을 혼합하여 뿌어 붙여 녹화하는 공법의 화이바쏘일 녹화 스텝공법 등이 있다(KICT,

1999). 이들 대부분의 공법은 경사가 완만한 사면이나 토층이 유실되지 않은 지역을 대상으로 하고 있으며, 녹생토공법과 같이 급경사지 및 폐석사면에 시공이 가능한 공법은 제한된 종자의 사용과 생육의 불량 및 친환경 소재가 아니라는 단점을 가지고 있다(Kang et al., 2004). 특히 폐광산에서의 적용은 수분의 함유 특성과 뿌리가 활착할 수 있는 공간 확보 등을 검토할 수 있는 폐석의 입도분포 및 폐석에서의 화학적 특성을 무시한 공법으로 우선은 폐광산 폐석의 특성을 검토할 필요가 있다.

폐광산 폐석사면의 특성에 적합한 수종 선정

폐광산 폐석사면은 우리나라에서 금속광산으로 대표되며, 특히 폐석과 광물찌꺼기가 혼재된 사면으로 형성된 연화광산을 대상으로 조사 하였다. 연화광산의 폐석과 광물찌꺼기는 주 광산으로부터 떨어져 남측사면에 적치되어 있다(Fig. 1). 이들 폐석은 사면에서부터 3단의 적치장으로 채워져 있는데, 바닥인 1단은 평탄하며, 2

단, 3단의 사면은 현재에도 다짐작용이 진행되고 있는데, 돌서령의 안식각(Duncan, 2000) 유지와 같이 적절한 안식각을 유지하면서 방치되어 있다.

폐석사면의 주향은 N15W~N30E 범위이며, 훼손되지 않은 안정한 사면의 경우 평균적으로 N5E의 방향으로 발달한다. 사면의 경사는 25~50도 범위로 다양하게 나타난다. 이같이 주향과 경사각이 다양한 이유는 N5E 방향으로 안정화되어 있던 사면이 부분적인 세굴작용으로 인하여 일부가 무너져 내렸기 때문이다(Fig. 2). 세굴된 부분은 광물찌꺼기가 유실되어 폐석이 상대적으로 많이 노출되어 있는 것이 특징이다.

폐석사면의 최상단부는 기존의 산사면과 접하는데, 산사면의 토층은 10 cm 정도로 발달하며 참나무과의 활엽수와 소나무가 주종을 이루면서 잡목들이 일부 포함되어 있다. 그러나 적치장 폐석사면에서는 식생이 거의 없는데, 약간의 잡풀만이 서식하고 있으며, 실제로 성장하고 있는 나무종류는 거의 발견되지 않는다. 예외적으로 수 cm 높이의 어린 소나무가 간혹 사면에 생장한 경우도 있는데, 이는 인근 삼림으로부터 소나무 씨앗이 바람에 날려 와 최근에 착생한 것으로 보인다. 부분적이지만 폐석사면에서의 소나무 생육의 의미는 소나무 씨앗이 자

Table 1. Results of M.G.F material test.

M.G.F (07, 08)		
Tensile strength	Filter point	2588.7N
	Ground	1803.5N
Tensile elongation	Filter point	33.6%
	Ground	31.5%
Tearing strength	Wale	1257.3N
	Coarse	981.4
Material	PET	
Weight	413.7 g/m ²	
Width	0.41 mm	
Permeability	2.6 × 10 ⁻² cm/s

Fig. 1. Location of Yeonhwa mine and the whole view of it.

Fig. 2. Enlarged images of slopes, showing abandoned gangue materials and rock fragments. (a) Left slope with a steep, unstable face caused by erosion and rill formation. (b) Right slope with a relatively stable face.

Fig. 3. Abandoned metalliferous rock fragment showing intense dissolution and weathering.

랄 수 있는 환경이 그 자리에 마련되어 있었기 때문으로 생각된다. 다시 말하면 폐석사면에서 소나무가 활착하기 위한 토양수분, 공간적 특성과 토양분이 적절하였을 것으로 판단된다.

암편의 종류와 식생

폐석사면에는 회흑색의 암편, 광물찌꺼기, 경제성이 없는 부수광물들이 적치되어 있는데, 이들은 다짐작용을 심하게 받지 않았으며, 현재에도 급경사부에서는 암편이 아래로 쓸려 내려갈 정도이다. 암편들은 대부분 각상(angular)~아각상(subangular)이 특징적이며, 함철광석들은 심하게 풍화작용을 받았다. 이들 금속광석들은 흑색, 회흑색, 담갈색 등이 주를 이루는데, 본 연화광산에서 채굴하였던 주 광석광물인 연, 아연은 쉽게 발견되지 않으며, 심하게 산화되고 풍화된 함철산화물로 피복되어 있다(Fig. 3). 일부 황철석, 황동석 입자들은 2mm 이하의 크기로서 자형을 보이며, 맥상으로 발달하기도 한다. 함철성분은 용탈되어 나와 광석이나 암편의 표면에 교질상, 미립질의 비정질상태로 침전되어 있어 육안으로도 금속광석과 비금속 암편들을 쉽게 구분할 수 있다. 비금속 광물로 된 암편의 경우 주로 석영, 방해석, 능철석, 석류석 등을 함유하는데, 주로 모암의 파편으로 구성된다.

적치장에서 관찰한 결과에 의하면 금속광석으로 구성된 암편의 비율은 5% 이하로 추정되며, 현재에도 일부 금속광물은 풍화, 용해작용을 겪고 있는 것으로 판단된다. 그러나 폐석사면 주변 또는 상류구배에서는 하천수나 지하수 발달이 거의 관찰되지 않으므로 이곳 폐석적치장에서는 심각한 산성광산배수를 배출시킬 가능성은 낮다고 판단된다. 그러나 폐광산 폐석사면에서는 산

성광산배수를 무시할 수 없으므로 일반 식생 토양의 분류에서 산성토에 잘 견디는 수종으로는 소나무가 대표적이라고 알려져 있다. 그러므로 소나무 등과 같은 식생이 폐석사면에서 활착하기까지 산성에 의해 자연분해되지 않고 배양토를 유지시켜 줄 수 있는 친환경방틀소재의 개발은 필요하다고 하겠다.

지력에 의한 식생 선정

토양에서의 식생 및 수종에 의한 지력의 판단은 일반적으로 비옥토에서는 수목이 굵고 높으며 자갈이 많은 곳에서는 수목이 굵고 낮은 특성을 갖는다. 따라서 수목에 의한 지력 판단으로서는 자갈이 많은 지력이 불량한 토지에서는 소나무, 자작나무 등이 적합하다고 알려져 있다. 토양수분과 식생과의 관계에서는 건조지 식물로는 우리나라에 많이 분포하는 소나무가 대표적이다. 또한 토양의 조밀 정도에 따라 적합수종을 구분할 수 있는데 폐석사면과 같이 느슨한 토양 및 사토에 견디는 수종으로는 소나무, 아카시아, 오리나무 등을 들 수 있다(KorLand Institute, 2012). 따라서 식생복원 대상이 되는 폐석사면에서의 토질특성을 검토할 필요가 있어 입도를 분석하여 보았다.

이 연구에서는 사면에 분포하고 있는 대표적인 암편들의 크기와 분포특징을 분석하였다. 이를 위하여 1m² 면적당 암편의 개수와 크기를 측정하였다(Fig. 4). 암편들의 입도분포는 이미지 분석프로그램인 Image J (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>)를 이용하여 계산하였다. 이 과정에서 각 암편의 면적과 둘레를 계산한 후, 이를 다시 지름으로 환산하였다. Image J 프로그램은 전체 이미지 중에서 특정부분을 따로 지정하거나 제거하는 것이 가능하고, 데이터가 엑셀과 같이 시트파일로 저장되어 입도구간별로 데이터 분석이 용이하다. 그 외에도 Image J는 입자들 각각의 면적과 둘레를 실제 넓이와 둘레로 환산된 값으로 얻을 수 있다.

1m² 면적을 대상으로 실시한 이미지 분석결과에 따르면 암편의 크기분포는 최소 0.18 cm, 최대 17.43 cm, 평균 3.52 cm, 표준편차는 2.91 cm이며, 이때 총 측정된 입자는 270개였다(Fig. 5). 한편 2mm 이하의 모래 및 세립질은 육안으로도 구분하기 어려우며, 이미지 분석에서도 오차를 야기하므로 본 연구에서는 모래질 이하의 세립질 입자들은 입도계산에서 제외시켰다.

폐석사면에서의 이미지분석 결과 2mm 이하의 모래 및 세립질 분포가 자갈분포에 비해 상대적으로 많은 자갈질모래~중립자갈로 분포하는 것을 알 수 있다. 이는

Fig. 4. Abandoned gangue materials and rock fragments in an area of 1×1 m used in Image J analysis. (a) Original image, (b) after image processing.

일반적으로 지하수의 평균 비산출률 25%에 해당하는 토성을 갖는다(Fetter, 2001). 따라서 토양의 지력, 수분, 종류 및 조밀성을 종합적으로 검토하여 보면 폐석사면에서의 식생은 소나무가 적당하다고 판단된다.

폐석사면 식생복원소재의 물리적 특성 시험

폐석사면에서의 구성 토질의 특성을 고려한 식생복원

Fig. 5. Size distribution of rock fragments in an area of 1×1 m (calculated using Image J). Maximum, 17.43 cm; minimum, 0.18 cm; average, 3.52 cm; and standard deviation, 2.91 cm.

의 대상이 되는 수종은 우리나라 대부분을 점하고 있는 소나무로 검토하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 연화광산 폐석사면에서 현재 활착되어 있는 몇 그루의 소나무를 고려하면 폐석사면에서 활착하기는 오랜 기간과 조건이 필요함을 알 수 있다. 이러한 조건을 인위적으로 만들어 주기 위하여 배양토를 고려함과 동시에 오랜 기간 동안 배양토를 유지시켜주는 친환경적 방틀소재의 개발을 위해 현재까지 천연소재로서 내구성이 2~3년으로 가장 긴 코이어섬유를 대상으로 하였다. 폐석사면 및 암사면에서의 소나무 활착기간을 최소한 6~7년으로 잡아 코이어섬유의 내구성을 증가시키는 방법에 대하여 검토하였다.

천연섬유와 천연섬유/화학섬유 물성시험

친환경 식생복원 소재 개발을 위하여 다음과 같이 천연 및 화학섬유 소재별 물리적 특성시험을 실시하였다. 친환경적이며 생분해성이 좋은 천연 식생재료의 개발을 목표로 총 11개의 천연섬유 소재, 천연섬유/화학섬유의 혼합소재 및 화학섬유 소재 등에 대하여 각각 인장강도, 인열강도, 굽기, 중량 등의 물리적 특성을 조사하였다. 시험방법은 Table 2와 같이 표준시험법을 사용하였다.

Table 2. Test methods for assessing the physical properties of natural, natural/synthetic, and synthetic materials.

Test item	Test methods	Remarks
Tensile strength (N), Length	KS K 0743:2009	C.R.E, Grab method
Tensile strength(N), Width	KS K 0743:2009	C.R.E, Grab method
Weight (g)	KS K ISO 9864:2007	
Thickness (mm)	KS K ISO 9863-1:2010	Method A

Table 3. Test results of the physical properties of natural, natural/synthetic, and synthetic materials.

Classification	Material type	Test results			
		Testing items	Results	Strength per unit thickness (Length) N/mm	Strength per unit thickness (Width) N/mm
Natural	Coir	Tensile strength (N), Length	4321.4	110.5	99.6
		Tensile strength (N), Width	3894.8		
		Weight (g/m ²)	2215.5		
		Thickness (mm)	39.12		
Natural	Coir	Tensile strength (N), Length	4321.4	96.6	87.1
		Tensile strength (N), Width	3894.8		
		Weight (g/m ²)	3103.2		
		Thickness (mm)	44.73		
Natural	Coir	Tensile strength (N), Length	2168.6	48.9	47.5
		Tensile strength (N), Width	2106.1		
		Weight (g/m ²)	6468.5		
		Thickness (mm)	44.36		
Natural /Synthetic	Coir /Synthetic /PLA	Tensile strength (N), Length	732.5	45.4	41.9
		Tensile strength (N), Width	676.5		
		Tensile elongation (N), Length	43.5		
		Tensile elongation (N), Width	26.4		
		Weight (g/m ²)	1260.0		
		Thickness (mm)	16.13		
Natural /Synthetic	Coir /Synthetic /PLA	Tensile strength (N), Length	863.2	56.4	55.7
		Tensile strength (N), Width	851.9		
		Tensile elongation (N), Length	36.3		
		Tensile elongation (N), Width	37.3		
		Weight (g/m ²)	1289.7		
		Thickness (mm)	15.30		
Natural /Synthetic	Coir /Synthetic /PLA	Tensile strength (N), Length	394.1	33.2	22.1
		Tensile strength (N), Width	263.0		
		Tensile elongation (N), Length	15.8		
		Tensile elongation (N), Width	13.6		
		Weight (g/m ²)	1153.3		
		Thickness (mm)	11.88		
Natural /Synthetic	Coir /Synthetic /PLA	Tensile strength (N), Length	427.6	41.5	23.8
		Tensile strength (N), Width	245.5		
		Tensile elongation (N), Length	14.5		
		Tensile elongation (N), Width	14.2		
		Weight (g/m ²)	754.7		
		Thickness (mm)	10.30		
Synthetic	Nylon	Tensile strength (N), Length	174.1	6.5	5.6
		Tensile strength (N), Width	150.2		
		Tensile elongation (N), Length	104.8		
		Tensile elongation (N), Width	107.2		
		Weight (g/m ²)	730.3		
		Thickness (mm)	26.60		
Synthetic	Nylon	Tensile strength (N), Length	150.8	9.1	9.1
		Tensile strength (N), Width	150.3		
		Tensile elongation (N), Length	116.4		
		Tensile elongation (N), Width	137.0		
		Weight (g/m ²)	751.2		
		Thickness (mm)	16.54		

Table 3. continued

Classification	Material type	Test results			
		Testing items	Results	Strength per unit thickness (Length) N/mm	Strength per unit thickness (Width) N/mm
Synthetic	Nylon	Tensile strength (N), Length	159.4	9.8	8.8
		Tensile strength (N), Width	143.6		
		Tensile elongation (N), Length	103.1		
		Tensile elongation (N), Width	101.3		
		Weight (g/m ²)	447.1		
Natural /Synthetic	Nylon/Jute	Thickness (mm)	16.33	20.9	18.7
		Tensile strength (N), Length	363.7		
		Tensile strength (N), Width	324.1		
		Tensile elongation (N), Length	68.4		
		Tensile elongation (N), Width	81.9		
		Weight (g/m ²)	752.4		
		Thickness (mm)	17.37

Fig. 6. Specimen sampling of coir matting.

인장강도 시험장비 및 시험조건은 제조사는 Instron(모델명 4302), 장비용량은 10 kN, 분해능은 0.1 N, 표점거리는 76 mm, 및 시험속도는 300 mm/min 등이다.

시험결과는 Table 3과 같다. 3개의 코이어 천연섬유 시험에서 보면 단위길이당 인장강도는 약 2.3배의 차이가 남을 알 수 있다. 이것은 동일한 천연 재료로서 섬유의 꼬임정도에서 발생하는 차이로 볼 수 있으며, 천연

섬유 소재와 천연섬유/화학섬유의 혼합소재의 차이는 시험재료의 굵기에서 오는 차이도 있지만 마찬가지로 재료의 꼬임 특성에 기인한 것으로 판단된다.

내구성 평가를 위한 5년 경과된 천연섬유의 물성시험
시험시료 채취: 코이어 천연섬유로 식생매트의 시간 의존성 인장강도 변화를 알아보기 위하여, 제주특별자치

Fig. 7. Surface image of sample (left, before construction; right, after 5 years).

Fig. 8. Cross-sectional image of sample (left, before construction; right, after 5 years).

Table 4. Test results of tensile strength of a sample from Jeju island.

Sample	Thickness (mm)	Tensile strength (N)	Tensile strength (N/m)	Strength per unit thickness (Length) N/m/mm
Before construction	22.20	29125.0	81552.1	3673.5
After 5years	13.67	409.9	11477.2	839.6

도의 용늪이 오름 통로지역에 제주 자연오름에서 설치한 코이어 소재의 식생매트를 채취하였다. 용늪이 오름내 식생매트의 경우 2007년 5월경에 설치되었으며, 설치된 지 약 5년 정도 경과 되었다고 판단된다. 설치전의 코이어 천연섬유는 제주 자연오름에서 제공한 코이어섬유를 사용하였다. 인장강도 측정을 위하여 약 1.2 m의 길이로 전정가위를 이용하여 채취하였으며, 시험편 채취 과정은 Fig. 6에 나타내었다.

전자주사현미경 관찰: 식생매트의 변화된 상태를 확인하기 위하여, 전자주사현미경(TESCAN, VEGA 5136MM)을 이용하여 식생매트 섬유 표면 및 단면을 관찰 하였다. 시험편은 먼저 정제수를 이용하여 표면에 산재한 토양을 완전히 제거한 후, 100°C에서 수분을 완

전히 증발시킨 다음, 표면의 경우 100배의 배율로, 단면의 경우 100배와 400배 배율로 BSE (Background Scattered Electron) mode를 이용하여 관찰하였다.

관찰결과 시험편은 총 3종류의 재질을 이용하여 구성되었다. 또한 설치된 후 5년이 경과한 식생매트 섬유의 표면변화를 알아보기 위하여 같은 원료로 제조된 식생매트와 비교한 결과 표면에 많은 풍화가 일어났다. 이는 식생매트에 주위 환경요인으로서 물리적(압력) 요인 및 화학적(강우에 의한 가수분해), 생물학적 요인(토양 미생물)에 의하여 영향을 받은 결과라고 판단된다. 전자주사현미경 사진은 Fig. 7, 8에 나타내었다.

인장강도 측정: 인장강도 측정은 KS K 0410; 2007 코드 및 인장강도 및 신도 시험방법의 관련 표준에 의

Fig. 9. Measurement of tensile strength.

거 측정하였다. 파지드럼과 중심사이의 거리는 약 250 mm로 하고, 시험속도는 300 mm/min으로 하여 웨빙 인장강도 시험기(Webbing tensile strength tester, INSTRON 4204)를 이용하였다. 시험과정은 Fig. 9와 같으며, 시험 결과는 Table 4에 나타내었다.

설치 후 5년이 지난 식생매트의 인장강도의 측정결과를 토대로 미루어 볼 때, 인장강도가 약 4.5배 정도 저하되는 것을 확인하였다. 즉 동일소재의 경우 시공 전 인장강도는 약 3673.5 N/m/mm로 측정되나, 5년 후에는 839.6 N/m/mm로 측정되었다. 이는 환경적 영향에 의하여 소재 자체의 변화가 일어나기 때문이라고 판단된다. 따라서 환경적 영향인 기수분해, 토양의 미생물, 자외선 등에 대한 내구성 향상을 위하여 라텍스 코팅이나, 항균 처리 등이 필요하다고 판단된다.

결 언

광산개발에 있어서 사면의 발생은 광산 개발과 복구 사업수행을 위하여 필연적이므로 이에 따라 사면의 관리방안 수립이 필요하다. 관리방안과 관련하여 광산의 개발 및 복구 시 발생된 사면은 일반적인 사면들과 사면 조성 목적이 다르므로 관리방안 수립을 위해서는 사면의 체계화, 세분화의 과정이 우선되어야 하며, 이를 기준으로 등급화 및 복구방안이 이루어져야 한다. 특히 폐광산에서의 암사면 및 폐석사면은 산지의 주변녹색과는 어울리지 않은 황폐한 모습을 나타내고 있어 친환경적 식생복원이 시급하다고 하겠다.

본 연구에서는 폐광산 암사면 및 폐석사면에서의 친

환경 식생복원의 대상이 되는 수종으로는 우리나라에 많은 부분을 점하고 있는 소나무를 선정하였으며, 식생이 활착하기까지 오랜 기간 동안 배양토를 유지시켜 줄 수 있는 친환경 방틀소재를 개발하기 위하여 우선적으로 현재 많이 사용되고 있는 천연섬유인 코이어섬유, 내구성을 향상시키기 위한 천연섬유/화학섬유 및 화학섬유 등을 대상으로 꼬임의 정도, 인장강도 및 인열강도 등의 시험을 실시하였다. 그 결과 천연섬유인 코이어섬유에서 친환경 식생복원의 가능성을 파악할 수 있었다. 이는 동일한 천연섬유라 할지라도 꼬임의 정도 및 생분해성에서의 내구성을 향상시키기 위한 항균처리 등으로 자연 상태에서의 내구성을 향상시킬 수 있으리라 판단된다. 앞으로의 연구는 물리적인 시험결과로부터 가장 우수한 인장강도 결과를 나타내는 패턴과 소재를 선정 후 내구성 향상을 위한 화학적 처리 및 소재의 내기수분해성, 내후성, 내화학성, 인열강도 등의 평가를 하고자 한다. 또한 앞으로는 광해 관련 사면의 친환경적 개념을 포함한 모니터링 기술 개발이 필요하며 광해 관련 사면의 차별화된 목적에 적합하도록 관련 기술 및 기법의 개선이 필요한 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 한국광해관리공단에서 지원하는 ‘친환경 식생복원 소재 및 사면안정화 공법 개발’ 사업에 의하여 수행되었다. 이에 감사한다.

참 고 문 헌

- Choi, G. S., Kim, T. H., and Kwon, H. H., 2009, A study on the protection method of mine site slope using mine green framework, Journal of Korean Society for Rock Mechanics TUNNEL & UNDERGROUND SPACE 19(6), 526-533 (In Korean with English abstract).
- Duncan, J. M., 2000, Factors of safety and reliability in geotechnical engineering, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, ASCE, 126(4), 307-316.
- Fetter, C. W., 2001, Applied hydrogeology, Prentice Hall, New Jersey, 598p.
- Kang, S. S., Cheong, Y. Y., Cho, I. L., and Baek, H. J., 2004., Stability analysis of the coal mine waste dump, Journal of Korean Society for Geosystem Engineering, 41(4), 209-300 (In Korean with English abstract).
- KICT, 1999, Development of Environmental Friendly Vegetation on Rock Slope, 28p (in Korean).
- Kim, S. R., Kim, Y. S., Jang, B. S., and Shin, C. G., 2005,

A Study on the external characteristics and countermeasure method of road cut-slope, KSCE annual conference, 4462-4465 (in Korean).
 KorLand Institute, 2012, Vegetation and fertility of soil, <http://cafe.naver.com/korland1212>.
 Kwon, H. H. and Nam, K. S., 2007. Mine Reclamation Engineering, 373p (in Korean).
 MIRECO, 2007, Development of protection technology with vegetation for cut slope in open-pit mine, 193p (in Korean).

원고접수일 : 2012년 12월 5일
 수정본채택 : 2012년 12월 20일(1차)
 2012년 12월 26일(2차)
 게재확정일 : 2012년 12월 26일

정문호

한국광해관리공단 광해기술연구소
 331-803 충남 천안시 서북구 성환읍 매주리 362
 Tel : 041-901-7923
 Fax : 041-901-7970
 E-mail : jungmh2@hanmail.net

류종흠

안동대학교 지구환경과학과
 760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)
 Tel : 054-820-5753
 Fax : 054-822-5467
 E-mail : goodrjh007@naver.com

김태혁

한국광해관리공단 광해기술연구소
 331-803 충남 천안시 서북구 성환읍 매주리 362
 Tel : 041-901-7921
 Fax : 041-901-7970
 E-mail : shykth@mireco.or.kr

이학주

(재)FITI시험연구원 산업환경본부
 135-713 충북 천원군 오창읍 양청리 686-1
 Tel : 043-711-8860
 Fax : 043-711-8805
 E-mail : hjlee@fiti.re.kr

추창오

안동대학교 지구환경과학과
 760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)
 Tel : 054-820-5753
 Fax : 054-822-5467
 E-mail : mordenite@hanmail.net

신연수

(재)FITI시험연구원 산업환경본부
 130-864 서울시 동대문구 방아다리길 36
 Tel : 02-3299-8070
 Fax : 02-3299-8151
 E-mail : ysshin@fiti.re.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과
 760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)
 Tel : 054-820-5753
 Fax : 054-822-5467
 E-mail : jeong@andong.ac.kr