

비탈면에 적용된 식생공법의 사례연구

A Case Study on Vegetation System Applied on Cutting Slope

이처근* · 배우석** · 김상수*** · 한주희****

Lee, Cheo-Keun · Bae, Woo-Seok · Kim, Sang-Su · Han, Ju-Hee

Abstract

The purpose of this study was to evaluate the effect of vegetation on the cutting slope applied by vegetation system in the whole land. The engineering characteristics of slopes were investigated using the face mapping and physical tests. From the statistical methods, a relationship between a geologic stratum and degree of covering was independent. Therefore, the afforestation of slope was affected more by condition of vegetation as direction and opening of joints, and a topsoil state than by conventional classification of layer. It was concluded that the adjustable vegetation on the slope considering condition of geometric shape of slope, joint data and spontaneous type could make useful early afforestation.

Keywords : Afforestation, Cutting slope, Degree of covering, Vegetation

요 지

본 연구의 목적은 식생공법이 적용된 전국의 비탈면에 대한 식생의 공학적 효과를 평가하는데 있다. 대상사면의 공학적 특성은 지표지질조사와 물리실험결과를 이용하여 평가하였다.

통계적 분석결과, 지층조건과 피복도가 상호 독립적인 관계를 보이므로 일률적인 지층분류보다 절리의 발달여부, 절리의 방향성, 개구폭, 표토층 상태와 같은 식생의 조건이 더욱 중요한 인자로 평가될 수 있을 것이다. 시공초기의 음각부의 형성상태와 절리현황, 사면의 기하적 형상과 같은 공학적 조건들과 함께 주변 자생종에 대한 검토 등 생태학적 조건들이 고려됨으로써 비탈면의 조기 녹화에 좀 더 합리적인 접근이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 녹화, 비탈면, 피복도, 식생

* 정회원 · 충북대학교 강사, Lecturer, Dept. of civil Engineering, Chungbuk National University

** 정회원 · 충북대학교 강사, Lecturer, Dept. of civil Engineering, Chungbuk National University

*** 정회원 · (주) 토탈지오이앤씨 대표이사, President, Total Geo EnC Co., Ltd.

**** 비회원 · (주) 일송환경복원 이사, Director, Il Song ERT Co., Ltd.

1. 서론

최근 친환경적인 공법의 필요성이 대두되면서 여러 비탈면 시공 현장에서 식생을 이용한 보호공법이 활발히 적용되고 있는 상황으로 식생에 대한 관심과 노력으로 다양한 기법의 시공법과 식생재료들이 발달되고 있다.

식생을 이용한 공법들이 침식이나 사면안정성 등의 문제를 해결할 수 있다는 것을 여러 공학자들이 다양한 방법에 의해 밝혀 왔으며 이와 같이 불안정성을 줄이고 침식을 방지할 목적으로 식물을 단독으로 또는 소규모 토목구조물과 병행하여 사용하는 것을 일반적으로 Bio-engineering이라 칭하고 있다(유전용 등, 2004; Morgan and Rickson, 1995). 가장 중요한 역할을 차지하는 구조체인 식물은 다른 공법에서 사용되는 재료에 비해 비교적 저렴하며 뿌리의 인장력을 흙의 전단강도, 버팀력, arching 등으로의 변환을 통하여 흙 자체의 강도를 증가시키게 된다. 따라서, 식물 하나가 제공하는 기능에 지지기능을 추가적으로 제공하고 식물이 성장하면서 강도는 증가하고 자연력에 대한 저항도 증가하게 된다. 사용되는 자연식물들은 바람, 중력 및 수리학적 힘으로부터 사면 표층을 안정화시키는데 사면 아래로 이동하는 암편과 물의 에너지 소산에 기인하며 물의 침투는 식물 생존을 위한 수량을 증가시키고, 식물의 성장이 왕성하면 공급을 초과하는 사면내의 물을 대기로 소산시키는 역할을 하게 된다. 또한, 식물의 필터작용과 낙엽더미의 증가는 쓸려 내려오는 퇴적물을 억제해주는 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다. 한편, 자연에서 살포된 씨앗은 그 위치에 남으려는 경향이 있어 안정화된 표층을 더 향상시킬 수 있으며, Bio-engineering 처리를 이용한 임시 식생은 시간이 지남에 따라 좀더 영구한 식생을 형성할 수 있게 된다(조주형, 1998). 따라서, 이러한 식생을 통하여 표층의 안정화와 물 침투량의 증가, 계단형태의 완사면 형성과 같은 지반보강, 미관확보, 친환경성 등의 이점을 얻을 수 있게 된다.

그러나 기존 연구는 뿌리의 보강기능에 의한 전단강도 증진효과나 피복된 사면의 침식량에 대한 연구 등 단기적인 현상에 대한 규명이 주를 이루고 있다. 이에 반하여 식생이 적용된 사면에 대한 공학적인 측면에서의 장기적인 모니터링 결과는 매우 부족한 것이 현실이며, 시공 당시에 비해 사후 관리나 장시간 경과 후의 피복현황 및 공학적 접근은 관심사에서 멀어져 온 것이 사실이다.

따라서, 본 연구에서는 식생과 관련된 인자들과 식생상태의 상관성을 평가하기 위해 동일공법(사면보호식생공법)이 적용된 전국의 18개 현장, 31개 비탈면의 시공결과를 2004

년 8월 모니터링 하여 현재의 대상 비탈면의 피복 상태와 식생현황을 사면의 기하학적 형상과 흙의 종류 등 토질공학적 특징에 따라 분류하고 분석하여 식생과 적용사면의 공학적 관계를 제시하였다. 이러한 결과가 대상 사면의 토질공학적 조건에 따라 식생공법을 선정하고 사후 관리에 이용하는 데 기초적인 자료를 제공할 수 있을 것이다.

2. 식생공법 적용 비탈면의 모니터링 현황

본 연구의 대상 비탈면에 적용된 공법은 스펀지머 및 종이화이버를 생육보조재로 이용하고 있는 공법으로 다양한 비탈면 보호공법 중의 하나로 훼손된 자연이 방지상태에서 극상에 이르는 자연천이과정 중 초기 단계의 식생 천이과정에 개입하여 시간을 단축시켜 다음 세대로 식생천이가 이행되도록 유도하는 공법이다. 대상공법은 식물이 척박한 환경에서 생존을 위해 보다 좋은 조건을 스스로 찾아가는 생리현상을 이용하여 식물발아 및 초기 생장에 필요한 최소한의 조건을 생육보조재를 통해 충족시켜주고 식물이 암반의 절리와 균열지점을 찾아 뿌리를 직접 착생토록 하며 생육보조재는 식물종자가 초기단계의 발아와 초기 성장 시 필요한 양분, 기본적인 환경조건을 충족시키는 조성물로 시간이 지남에 따라 완전 분해되는 소재로 구성되어 있다.

지표지질조사가 수행된 전국의 대상 비탈면은 1995년에서 2003년까지 다양한 시공시기를 보이고 있으며 표 1과 같은 지역적 분포를 나타내고 있다(김상수 등, 2004).

대상 사면이 위치한 지역에 대하여 강우에 의한 표면침식 또는 피복율과의 관계를 구명하기 위해서 대상사면의 시공시기로부터 현재까지 발생한 강우량을 인접한 관측소의 통계 자료를 이용하여 조사한 결과 대상구간의 강우량은 31개소의 비탈면 시공 지역 중 28개소에서 산사태발생경보기준인 200mm를 상회하였으나 일부 배수설비가 갖추어지지 않거나 미비한 3개소를 제외하고 대부분 침식에 대해 안정적인 것으로 조사되었다.

표 2는 대상현장의 기하학적 형상과 방향성, 지층상태 등과 식생부의 피복도 및 식물 뿌리부의 발육상황을 조사한 결과를 나타내고 있다. 연구 대상 비탈면은 15m를 상회하는 대절토 사면인 경우가 주를 이루었으며 사면의 경사는 연암과 풍화암부로 구성된 현상이 대다수를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

대상지 31곳 중 출현종 조사가 수행된 10개 현장 12개 비탈면의 조사 결과 표 3과 같이 56과 124속 145종 17변종 1이종 1품종 총 164종이 출현된 것으로 조사되었다. 대상

지의 시공 년 수가 10개월에서 2년 4개월 정도로 아주 짧은 시기였지만 이렇게 많은 식물종이 출현된 것은 본 연구의 대 상공법이 시공된 지역의 주어진 환경에 배타적이지 않고 융 화되어 가는 것을 보여주는 예라고 할 수 있다.

10곳의 모든 사면에서 출현한 종은 참싸리, 크리핑레드웨 스큐, 톨웨스큐로 시공 시에 파종한 종자들이며 비탈면에서 의 적응 능력이 우수한 식물들이다. 시공지 9곳에서 출현한 종은 낭아초, 붉은토끼풀, 쑥, 페레니얼라이그라스 등 4종으 로 낭아초, 붉은토끼풀, 페레니얼라이그라스 모두 시공 시 파종한 식물종이며, 쑥이 주변에서 유입된 유일한 종이다. 특히 시공 시 파종한 8종 모두가 9-10개의 조사 방형구에서 7회 이상의 높은 출현빈도를 보이고 있어서 비탈면은 초기 파종한 식물종자의 발아와 생장에 의해 조기 녹화되어 안정 화를 이루는 것으로 보인다.

3. 실내 및 현장 실험

본 연구에서는 동일한 공법이 적용된 비탈면의 공학적인 분석·평가를 위하여 초·목본류가 근착된 지표부의 토사를 채취하여 실내시험을 실시하였다.

채취된 시료에 대하여 자연함수비를 측정된 결과 대부분의 정착부 토사가 표층에 존재하여 3.6~21.7%의 범위를 나타내고 있으며, 대표단면에서 채취한 시료에 대하여 입도 분석시험과 액·소성 한계시험을 실시하여 통일분류를 수행한 결과 대부분의 토사가 SW로 나타났으며 시공시기에 따라 다소 차이가 있으나 표면부 풍화 등으로 인해 거의 SW/SP의 범주에 속하는 것으로 나타났다.

강열감량법(700℃)을 이용한 유기물 함유량 조사 결과 1.1~9.8%의 범위로 9개 비탈면에서 유기물 함량이 5%를 초과하는 것으로 나타났으나 유기질토 라기 보다는 식생의 잔유물이 다수 포함되어 있는 것으로 판단된다(표 4).

표 1. 모니터링 대상 비탈면 현황

현장명	시공 일시	최대일 강우량 (mm)	3일 연속 최대강우량 (mm)
의정부 송산지구	2003.10	106	163
안산(서해안고속도로)	1996.9	120	137
춘천(중앙고속도로)	1997.5	196	388
평창 휘닉스파크	1997.5	258	325
원주 오코밸리	1996.5	122	181
원주(중앙고속도로)	1997.5	299	465
제천지방산업단지	2003.10	214	353
제천(청풍-금성간 도로)	2002.4	233	367
음성(음성-생극간 국도)	2003.12	125	295
진천(청주-진천간 21번 국도)	2003.6	338	407
오창(오창-진천간 17번 국도)	2002.8	297	323
보은(거교-은운간)	2003.3	192	244
신탄진(경부고속도로)	1997.4	178	346
세종화약 공장법면	2003.3	190	300
민주지산 자연휴양림	2003.6	127	201
안동 사월도로	2003.10	76	208
임피(서해안고속도로)	1995.11	219	240
화심(전주-진안간 26번 국도)	1995.11	170	228

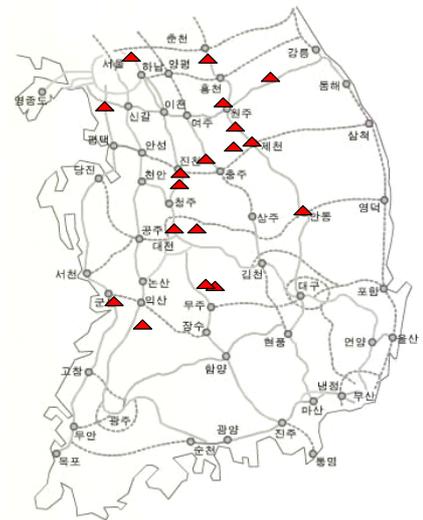


표 2. 지표지질조사 결과

현장 No.	사면 높이 (m)	사면 경사 (°)	사면 방향	피복도 (%)	지층상태	초본류 뿌리 (cm)	목본류 뿌리 (cm)
1-A	7.5	34	SE~NE	81.1	조립풍화토	10~15	-
1-B	15.5	34	SW		조립풍화토	15~20	20 이상
2	15~20	63	NE	89	연암-풍화암/절리/파쇄발달	20~30	80~90
3	24	51, 45	NW	64.5	연암-풍화토	40~50	30, 100 이상
4	31	40	SE	65.2	연암-풍화토	25~30	40~50
5-A	13	40	SE	83	조립풍화토	20	50 이상
5-B	14.5	40	SE		풍화암-풍화토/자갈섞인토사	20	135 이상
5-C	16	40	SW		풍화암-풍화토	15~20	80~90
6	40	54, 45	NE	82.1	연암-풍화암	50~60	90 이상
7-A	15	36	NW	84.5	조립풍화토	40 이상	30 이상
7-B	23.5	45, 38	NE		조립풍화토	10~20	-
8	17	52, 55	NW	92.5	풍화암/파쇄/자갈섞인토사	10~20	60~80
9	32	63, 45	SW	72	연암-풍화암-풍화토/풍화	20~30	30이상
10	38.5	53, 45	NW	84	풍화암-풍화토조립토사	20~30	30~40
11-A	33.5	63, 55	SW	62.2	경암-풍화암/절리/파쇄	10~20	-
11-B	23.5	63, 55	NE		경암-풍화암/절리/파쇄	10~20	-
12-A	6~14	50, 45	SW,NW	95.5	풍화암-풍화토/자갈섞인토사	10~20	30~40
12-B	27	51, 45	NE		연암-풍화암/자갈섞인토사	10~15	20~30
13	16~27	70, 63	SE,NE	67.6	경암-연암-풍화암/풍화	5~20	-
14	9, 20	55, 51, 45	NE,SE	89.8	연암-풍화암-풍화토	5~15	-
15-A	12.5	45	NW	90.3	풍화암-풍화토/파쇄/풍화	10~40	-
15-B	21.5	51,	NW		풍화암-풍화토/파쇄/풍화	15~30	-
15-C	25	51, 45	NE		풍화암/절리발달	10~25	-
16-A	19	55	NE	71.5	풍화암-풍화토/풍화발달	20~30	-
16-B	19	45	NW		조립풍화토	20~30	-
17-A	19	51, 45	SW	86.4	연암-풍화암-풍화토	40	30~40 이상
17-B	7	45	NE		풍화암-풍화토	30~40	70 이상
18-A	15.5	55, 45	NW	61.5	풍화암-풍화토/절리/풍화	20~40	60~70 이상
18-B	18	55	SE		연암-풍화암	-	-

표 3. 식생공법 적용지의 출현종

현장 No.	1	5	7	8	9	11	12	14	15	16
지역명	송산지구	오크밸리	제천산업단지	청풍 - 금성	음성 - 생극	오창 - 진천	거교 - 은운	세종화약	민주지산	사월도로
초기도입종	10종	10종	10종	10종	10종	10종	10종	10종	10종	10종
총 출현종	25	50	45	59	42	59	23	24	27	64
전이대 출현종	8	5	7	10	4	22	5	10	12	25
조사지역 출현종	17	45	38	49	38	37	18	14	15	39

표 4. 실내외시험 결과

대상 현장	지층상태	USCS	자연 함수비 (%)	유기물 함유율 (%)	콘관입저항치(kg/cm ²)		피복도 (%)
					무식생부	식생부	
1-A	조립풍화토	SW	4.1	2.0748	6.38~8.49	7.79~9.20	81.1
1-B	조립풍화토	SW	5.3	1.8510	7.08~8.49	7.79~9.20	
2	연암-풍화암(절리/파쇄발달)	SP(피복)	5.9	7.0084	-	-	89
3	연암-풍화토	SP	9.0	3.2126	1.44~2.14	6.38~8.49	64.5
		SW	11.1	3.1600	2.85~4.26	7.08~9.91	
4	연암-풍화토	SP(피복)	10.5	2.5375	4.26~5.67	7.79~9.91	65.2
5-A	조립풍화토	SW	9.2	1.7869	4.97~7.79	8.49~10.61	83
5-B	풍화암-풍화토(자갈섞인토사)	GP	5.1	1.8924	3.56~5.67	9.20~11.32	
5-C	풍화암-풍화토	SW	8.2	2.6765	2.85~5.67	7.79~11.32	
6	연암-풍화암	SW(피복)	6.4	4.1075	-	-	82.1
7-A	조립풍화토	SW	7.6	1.9585	2.85~4.26	8.49~9.91	84.5
7-B	조립풍화토	SW	4.7	1.7099	2.85~6.38	8.49~12.02	
8	풍화암/파쇄(자갈섞인토사)	GW	9.1	5.0195	2.85~4.97	9.20~9.91	92.5
9	연암-풍화암-풍화토	SW-SC	15.7	5.3473	4.26~4.97	7.79~9.20	72
		SP	6.1	4.8659	-	-	
10	풍화암-풍화토(조립토사)	SW	10.6	3.5849	2.85~4.26	6.38~8.49	84
11-A	경암-풍화암(절리/파쇄)	SP(피복)	21.7	9.8244	3.56~6.38	7.79~9.20	62.2
11-B	경암-풍화암(절리/파쇄)	SP	21.7	7.5931	3.56~5.67	7.08~8.49	
12-A	풍화암-풍화토(자갈섞인토사)	GW-GM	16.8	5.4725	6.38~7.08	10.61~11.32	95.5
12-B	연암-풍화암(자갈섞인토사)	SW-GM	13.4	4.8813	4.26~5.67	8.49~9.91	
13	경암-연암-풍화암(풍화발달)	GW(피복)	3.6	3.1452	4.26~4.97	9.20~10.61	67.6
14	연암-풍화암-풍화토	SW(피복)	7.8	2.6522	5.67~7.08	7.08~8.49	89.8
15-A	풍화암-풍화토(파쇄/풍화)	SW	12.8	2.2964	2.14~4.97	9.20~10.61	90.3
15-B	풍화암-풍화토(파쇄/풍화)	SW	19.5	2.4036	2.14~4.97	8.49~9.91	
15-C	풍화암(절리발달)	SW(피복)	-	-	-	-	
16-A	풍화암-풍화토(풍화발달)	SW	6.9	1.1353	-	-	71.5
16-B	조립풍화토	SW	8.3	1.1181	2.14~4.26	7.79~9.20	
17-A	연암-풍화암-풍화토	SW	5.2	5.1715	4.97~5.67	6.38~8.49	86.4
17-B	풍화암-풍화토	SP-SC	10.7	4.8209	1.44~2.85	6.38~7.79	
18-A	풍화암-풍화토(절리/풍화)	GW	8.9	6.9337	3.56~4.97	7.79~9.91	61.5
18-B	연암-풍화암	SW-SM(피복)	17.8	7.6397	-	-	

본 연구에서는 초본류의 뿌리가 지반의 강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 각 현장의 대표적인 위치에서 식생부와 무식생부에 대하여 5회 이상 실시하여 콘관입저항치를 비교 분석하였다. 실험은 초본류가 정착되어 있는 심도 20cm 내외에서 수행되었으며, 토층에 따른 오차를 제거하기 위해 30cm×30cm의 방형구내에서 뿌리부와 비식생부에서 실시하였다. 실험결과 식생부의 평균 콘관입저항치는 무식생부의 1.10~4.15배 정도로 평가되어 초본류의 뿌리가 입자 사이를 연결하는 보강효과에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있으며, 전체 평균값을 고려하면 식생부의 전체 평균 콘관입저항치는 8.86kg/cm²으로 무식생부 콘관입저항치(4.66kg/cm²)의 약 2배 정도 큰 값을 나타내었다.

4. 결과 및 분석

지표지질조사 및 실내·외 실험과 기상자료 검토를 통해 획득된 결과를 이용하여 비탈면에 대한 식생공법의 공학적 역할을 통계 패키지인 SPSS 10.0를 이용하여 그 상관성을 분석·평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

4.1 현장조건에 따른 결과 분석

본 연구에서는 초·목본류의 전면적에 대한 피복도를 조사하였으며 이를 통하여 식생의 발육상황 및 전이도를 평가하였다.

분석결과 그림 1, 2와 같이 피복도는 61.5~95.5%, 평균 79.72%로 나타났다. 대상사면은 1995~2003년도에 시공되었으며, 2002년 이후에 시공된 현장에서도 62.2~95.5%의 피복도를 보이고 있는 것으로 나타났다.

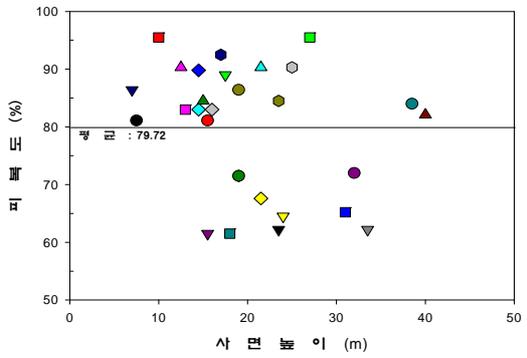


그림 1. 대상현장의 피복도 빈도 분포

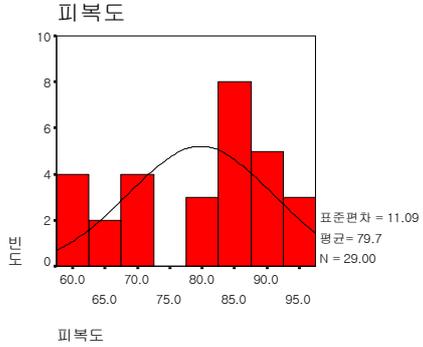
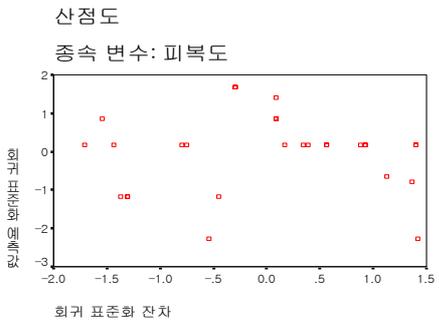


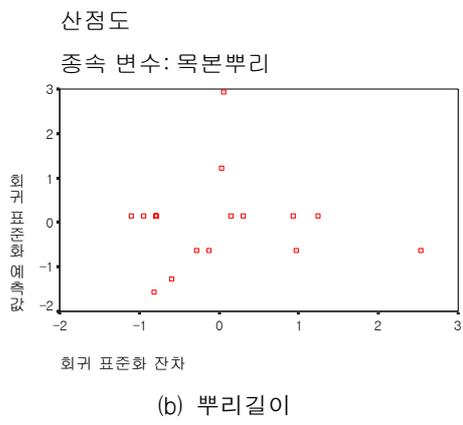
그림 2. 사면높이와 피복도의 관계

4.1.1 법면의 기하학적 형상과의 관계

그림 3은 비탈면의 높이와 대상현장의 시공결과와의 관련성을 평가하기 위하여 높이와 피복도의 관계를 도식한 것으로 회귀분석결과 사면의 높이가 증가할수록 0.361의 기울기로 피복도가 감소하는 것으로 나타났으나, 결정계수가 0.076로 작고, 유의확률이 0.149로 크게 나타나 사면의 높이와 피복도는 독립적인 것으로 평가되었다.



(a) 피복도



(b) 뿌리길이

그림 3. 사면경사에 대한 회귀분석 결과

또한, 사면의 경사각은 40~60°사이 경사가 약 60%로 가장 많은 분포를 나타내며 사면경사와 피복도에 대한 선형 회귀분석결과 사면의 경사가 증가할수록 0.374의 기울기로 피복도가 감소하는 것으로 나타났으나, 결정계수가 0.061로 매우 작게 나타나고, 유의확률이 0.196으로 크게 나타나 뚜렷한 경향성을 보이지 않으므로 사면의 경사각이 식생 피복도와 상관성을 갖지 않으며 서로 독립적인 것으로 평가되었다. 따라서, 사면의 기하학적 형상은 식생의 전이나 발육 정도 등에 독립적인 관계를 가지고 있음을 알 수 있으며 연~경암부의 식생상태를 조사한 결과 오히려 절리의 발달 상황이나 방향성 등 불연속면의 영향을 더욱 크게 받고 있는 것으로 판단된다.

4.1.2 사면방향과의 관계

사면 방향에 따른 방향성을 분석하기 위해 경사방향을 중심으로 방향성을 측정하였으며, 분석결과 그림 4와 같이 SE를 제외하고는 평균 피복도가 80% 이상으로 조사되었고 미소하나 북측의 방향성(NE, NW)을 나타내는 비탈면의 피복도가 다소 높은 것으로 나타났다.

초본류 뿌리의 발육상태를 통해 분석해본 결과도 사면의 방향이 NW, NE인 경우가 비교적 양호하며, 사면방향이 SE인 경우가 다른 방향에 비해 상대적으로 발육상황이 다소 미진한 것으로 나타났으며 초본류의 피복이 우수하거나 목본류로의 전이가 양호한 사면에 대해 방향성을 비교할 경우도 약 68%가 북측(NE, NW)인 것으로 나타났다. 각방향의 피복도에 대한 산술평가결과 NE와 NW에서 각각 81.8%, 81.6%를 나타냈으며, SE와 SW에서 각각 75.0%, 79.1%를 보이고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 일반적으로 식생의 발달에 영향을 미치는 여러 가지 요소 중

사면의 방향성이 한 가지의 요인으로써 작용될 수 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 사면의 기하학적인 조건에 대한 분석결과 식생상태는 사면의 높이나 경사각에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 조사되었으며, 사면의 경사방향은 앞서 밝힌 바와 같이 식생의 발달에 중요한 한가지 요인으로 작용될 수 있을 것으로 판단된다.

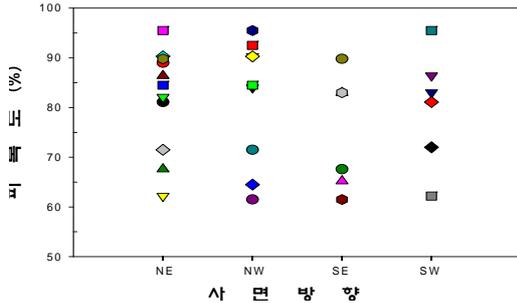


그림 4. 사면방향과 피복도의 관계

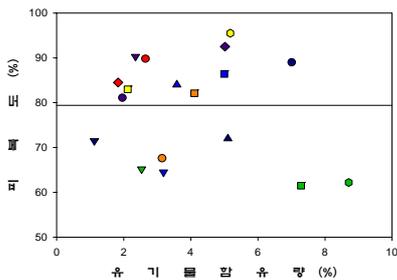


그림 5. 유기물 함유율과 피복도의 관계

4.2 지층특성에 따른 결과 분석

과업 대상현장에 대해 실내 및 현장실험을 실시하였으며, 실험결과와 지층상태, 식생상태를 비교·분석하여 상호관계를 규명하고, 이에 따른 식생류의 Bio-Engineering적 기능을 평가하였다.

4.2.1 지층조건에 따른 시공결과 평가

각 사면에서 채취된 대표 시료를 사용하여 흙의 공학적 분류를 실시한 결과 약 66%가 입도분포가 양호한 모래질 흙(SW)으로 평가되었으며 23%가 SP인 것으로 나타났다. 또한, 비교적 식생상태가 양호한 사면만을 대상으로 흙의 종류를 평가해 본 결과 약 80% 흙이 SW, SP인 것으로 평가되어 식생의 기반이 되는 지층인 것으로 판단된다. 단, 자갈질

이 포함된 지층의 경우에도 왕성한 발육 상태를 나타내고 있으며, 식생이 불량한 사면의 흙의 종류에도 SW가 다수 포함되어 있어 절대적인 판단기준이 될 수는 없을 것이다.

대상 비탈면을 풍화토, 풍화암, 연암-풍화암의 3개 범주로 나누어 통계분석을 수행한 결과 평균 피복도가 풍화토층에서 가장 큰 것으로 나타났으나 차이가 미소하며, 지층상태에 따른 초본류의 뿌리길어도 뚜렷한 경향성을 보이지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 풍화토 지반의 경우 일정심도 하부의 지층이 견고하여 초본류의 뿌리부가 관통하지 못하기 때문인 것으로 판단되며, 풍화암층의 경우 암반을 피복하고 있는 표층부의 깊이에 관련된 것으로 판단된다.

대상현장을 피복도가 우수한 사면을 중심으로 재분류한 결과로 대상 사면의 피복 및 천이 등 식생상태에 따른 평가 결과 피복도가 80% 이상인 사면의 약 53%가 풍화암-풍화토층이며, 초본류가 피복되어 있는 비탈면의 피복도가 다소 높은 것으로 나타났다. 또한, 건조하며 유기질 함량이 적은 풍화토 지반의 경우 초본류의 발육은 왕성하나 목본류로의 천이가 양호하지 않은 것으로 나타났으며, 절리나 파쇄가 발달한 풍화암에서의 발육이 오히려 양호한 것으로 평가되었다.

따라서, 지표지질조사 결과와 피복도에 대한 통계분석결과와 식생은 경암-연암-풍화암과 같은 일률적인 분류와는 밀접한 관계를 보이고 있지는 않는 것으로 평가되어, 좀더 합리적인 인자의 평가를 위해서는 식생상태와 절리의 발달상태나 방향성, 개구상태나 표층분포 등에 관한 인자와의 상관성을 분석하는 작업이 필요할 것이다.

4.2.2 실험결과에 따른 시공결과 평가

조사된 대상사면을 통해 유기물의 함량과 식생의 상호관련성을 평가한 결과, 그림 5와 같이 대부분의 현장에서 유기물 함량이 1~5%의 범위를 보이고 있으며 유기물함량의 증가에 따른 식생의 피복도는 결정계수가 0.3으로 설명력을 갖지 못하는 것으로 평가되었다. 일반적으로 함량이 5% 이상인 경우 유기질이 다수 포함된 흙으로 구분하고 있으나 대상 현장의 경우 유기질의 함유량이 식생분포 상태와 선형적인 관계를 갖지는 않는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 시공 후 식생된 초본류 등이 시간이 경과함에 따라 주변 지역에 유기물화 되어 유입되기 때문인 것으로 판단되며 향후 식생의 전이에 일정부분의 역할을 수행하고 있음을 알 수 있다.

식생의 지반보강 기능을 평가하기 위해 최대 20cm의 심도에서 실시한 휴대용 콘관입시험결과, 식생부의 평균 콘관입저항치는 무식생부에 비해 1.10~4.15배 정도, 전체 평

균값을 고려하면 약 2배 정도 값을 나타내어 초본류의 뿌리부가 지반강도에 비교적 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 그림 6은 각 현장의 콘관입저항치와 피복도와의 관계를 나타낸 것으로 콘관입저항치가 증가할수록 3.264의 기울기로 피복도가 증가하는 것으로 나타났으나 결정계수가 0.088, 유의확률이 0.158로 상관성이 좋지 않으며, 일정한 경향을 나타내고 있지 않아 상호 독립적인 관계에 있음을 확인할 수 있다.

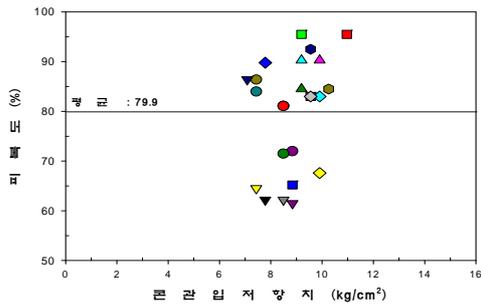


그림 6. 콘관입저항치와 피복율의 관계

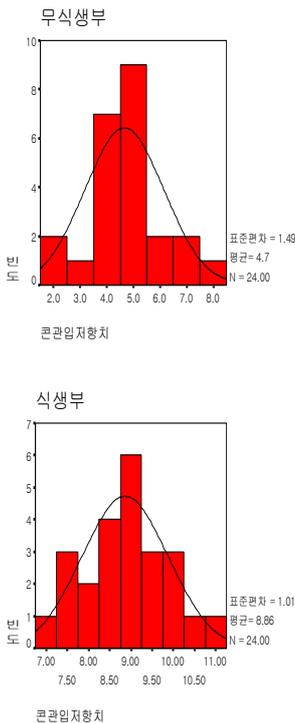


그림 7. 평균 콘관입저항치 빈도분석 결과

실험 결과로부터 식생상태와의 연관성은 찾을 수 없으나 식생부의 평균 콘관입저항치가 그림 7과 같이 무식생부에 비해 더 큰 범위에서 주된 분포를 보이는 것은 식생의 보강(Reinforce function) 및 앵커기능(Anchor function)으

로 표층의 개개입자가 뿌리에 의해 결합력이 증진되거나 지층 또는 암반대로 뿌리가 근입되어 느슨한 상부토층과 하부토층이 일체화되는 현상에 의해 뿌리부가 매트(Mat function)을 수행하기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 대상지역의 생태학적 변화

식생공법이 적용된 10개 현장 12개 비탈면의 식생구조를 파악하기 위해 출현종, 귀화식물, 식물종의 출현 빈도, 식물종 조성 등을 조사 분석하였다. 조사결과 대상현장의 피복율은 조경공사 표준 시방서상의 녹화 목표인 피복도 42%를 모두 상회하고 있어 출현종이 다양하고 목본류가 다양하게 침투되는 경향을 보여 점차 식생천이가 이루어지고 있는 것으로 보인다.

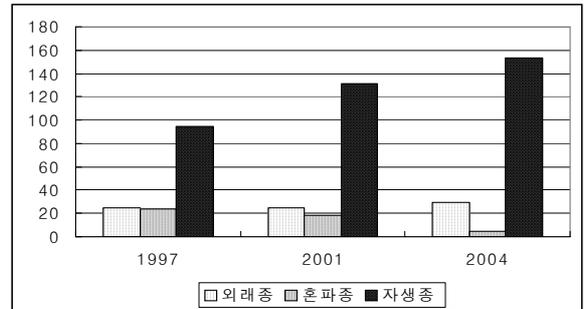


그림 8. 출현종의 자생종과 외래종 구분

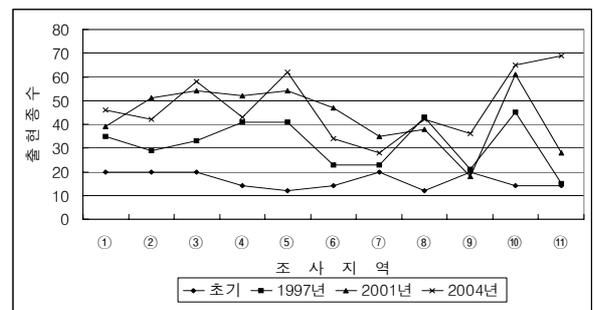


그림 9. 출현종의 변화추이

식물 출현종 감소가 나타난 4개 현장은 1997년 조사 시에는 거의 나타나지 않던 족제비싸리와 낭아초가 우점하면서 피압으로 인해 다른 종들의 이입이 어려워 졌기 때문인 것으로 판단되며, 족제비와 낭아초의 영향이 적게 미치는 주변부에서는 다양한 식물종이 출현하고 있는데 반해 비탈면의 안쪽으로 갈수록 종의 출현도가 떨어졌다.

대상 현장에 출현하는 식물종을 외래종과 자생종으로 구분하여 보면 그림 8과 같이 외래종은 줄어들고 자생종은 증

가하는 추세를 보이고 있다. 이는 시공 당시 조기 녹화를 목적으로 도입된 외래종인 양잔디류가 시간이 경과할수록 쇠퇴(24종→18종→5종)되면서 인근, 혹은 공기 중에 비산되던 자생종의 유입은 증가(95→131→153)하여 식생 구조가 서서히 변하고 있음을 보여준다. 또한, 그림 9와 같이 대상 현장의 출현종은 시간에 따라 변화를 나타내고 있는 것으로 조사되었다.

그림 10은 식물의 종류에 따른 출현종의 변화로 목본식물종의 출현종수는 교목류의 경우 대체로 경과 년 수가 길어질수록 비례하여 출현종도 증가하며, 1997년도에는 일년생 초본과 지표형 식물이 38.9%와 35.3%로 전체에서 74.2%를 차지하는 것으로 나타났고, 교목형과 관목형은 6.95와 11.1%로 나타났으나 2001년 조사 결과를 보면 일년생 초본과 지표형 식물은 각각 26.4%, 31.6%로 줄어든 반면 교목형과 관목형은 12.6%, 16.2%로 증가한 경향을 보이고 있어 교목과 관목형으로 천이가 진행되고 있음을 알 수 있다.

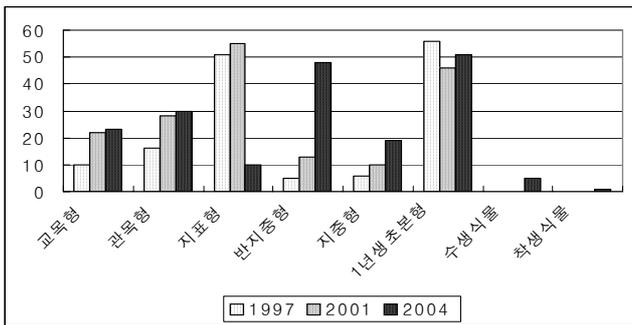


그림 10. 출현종의 생활형 변화 추이

2004년 조사에서 가장 큰 특징은 2001년에 비해 지표형이 극적으로 줄고 반지중형이 극적으로 증가하는 경향을 보였다는 점으로 출현종 수의 증가가 점차 정체되어 가는 과정에서 생활형이 다른 식물종들의 급격한 변화는 이들 생활형 간에 활발한 경쟁이 일어나고 있기 때문으로 사료된다. 반면 목본류의 경우 2001년에 비해 교목과 관목의 출현종이 약간 증가했으나 구성비는 12.3%와 16%로 비슷하게 나타났고 1년생 초본류도 소폭 증가에 그쳤다. 이는 대상공법이 적용된 비탈면의 식생이 약 7년에서 9년이 경과하면서 1년생 초본형 중심의 식물종 구성에서 목본류(교목과 관목) 및 1년생 초본형 중심으로 식물종 구성이 변화되고 이 과정에 지표형과 반지중형 및 지중형이 세력경쟁을 하고 있는 것으로 사료된다.

경과 년 수가 비교적 긴 비탈면별 식물군락의 종 구성을 살펴보면 7-9년 정도 지나면서 비탈면의 식생 중 군락을 이루는 주요종이 초본류는 툴웨스큐, 벌노랑이, 칩 등으로 나타나고 목본류로는 낭아초, 붉나무, 아까시나무, 리기다 소나무 등으로 나타났다. 이는 시공 경과 년 수가 짧은 시공지의 주요 군락 형성종이 툴웨스큐, 크리핑 레드 웨스큐, 페레니얼라이그라스 등의 벼 과류와 붉은 토끼풀인 것과 극명하게 대비되는 현상으로 초기 도입식물종이 쇠퇴하면서 자생 목본류가 그 세력을 넓혀 가는 과정이라 설명할 수 있다.

5. 결과 및 제언

동일한 식생공법이 적용된 전국의 18개 지역 31개 사면에 대한 지표지질조사와 실내 및 현장실험 결과 등을 통해 비탈면의 식생상태를 공학적으로 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 대상 사면에 대하여 강우에 의한 표면침식과의 관계를 구명하기 위해 인접한 관측소의 강우량을 분석한 결과 대상구간의 강우량은 31개소의 비탈면 시공 지역 중 28개소에서 산사태발생경보기준인 200mm를 상회하였으나 붕괴는 지표수가 집중되는 구간에서 소규모로 발생되었으며 붕괴지역과 피복도가 상관성을 보이고 있지 않으므로 배수공의 미비가 붕괴의 주된 원인인 것으로 판단된다. 따라서, 비탈면을 피복하고 있는 초·목본류들이 강우에 대한 비탈면 안정에 결정적인 역할을 수행한다고는 볼 수 없으나, 피복(armor)과 배수(drain) 기능 등을 통해 침식이나 풍화 속도를 억제하는 기능을 발휘하고 있음을 확인할 수 있다.
- (2) 식생공법이 적용된 현장은 사면 높이나 사면경사각 등 사면의 기하학적 형상과 선형적인 관계를 갖지 않으며 결정계수도 매우 작은 것으로 나타나 독립적인 관계를 보였다. 그러나, 사면의 방향과는 피복도가 높은 사면의 약 70%가 NE, NW 방향으로 북쪽의 방향성과 상관성을 보이는 것으로 분석되어 식생상태조건을 평가할 수 있는 한 가지 요인이 될 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 비탈면의 지층조건에 따른 시공결과를 파악하기 위해 피복도 및 식생상태를 분석한 결과 풍화암-풍화토층의 피복도가 다소 높은 것으로 평가되었으나 경-연암 지역도 절리나 파쇄가 진행된 경우 발육 상태가 양호한 것으로 나타나 지층조건과 피복도가 상호 독립적인 관계를 보

이므로 좀더 합리적인 평가를 위해서는 식생상태와 절리의 발달상태, 방향성, 개구상태나 표층분포 등에 관한 인자와의 상관성을 분석하는 작업이 이루어져야 한다.

- (4) 1997년 이후 대상 비탈면의 식생상태를 조사한 결과 시간의 경과에 따라 출현종수가 증가하며 조기 녹화를 위해 도입된 외래종이 점차 자생종으로 천이되어가는 과정을 확인할 수 있다. 또한, 초기 초본류의 쇠퇴과정

과 식물종간의 활발한 경쟁을 통한 자생 목본류의 세력확장을 확인하였다. 따라서, 시공초기의 음각부의 형성상태와 절리현황, 사면의 기하적 형상과 같은 공학적 조건들과 함께 주변 자생종에 대한 검토 등 생태학적 조건들이 고려됨으로써 비탈면의 조기 녹화에 좀 더 합리적인 접근이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

(접수일자 : 2005년 1월 27일)

참 고 문 헌

1. 김상수 등(2004), 원지반식생정착공법 적용 비탈면의 공학적 검토·평가 보고서, 일송환경복원, pp. 118~148.
2. 김은정(2003), SPSS 통계분석 10, 21세기사, pp. 1~476.
3. 유전용 등(2004), 방조제 피복공으로서 식생피복 시스템의 적용성에 관한 연구, 2004년도 학술발표회 논문집, 한국지반환경공학회, pp. 15~27.
4. 장범수 등(2004), 집중강우 시 발생하는 국내 건설공사비탈면의 붕괴특성 연구, 2004년 사면안정 학술발표회, 한국지반공학회, pp. 131~138.
5. 조주형(1998), 식생도입에 의한 비탈면 안정 효과에 관한 연구, 박사학위논문, 경희대학교 대학원.
6. Morgan and Rickson(1995), Slope Stabilization and Erosion Control, E&FN SPON, pp. 5~58.