

대나무 쏘일네일링의 적용성에 관한 연구

A Study for on Application of Bamboo Soil Nailing System

방 윤 경¹ Bang, Yoon-Kyung

김 홍 택² Kim, Hong-Taek

유 시 동³ Yoo, Si-Dong

유 찬 호⁴ Yoo, Chan-Ho

Abstract

In this study, a newly modified soil nailing technology which uses bamboo, rich natural material growing in southern areas, is developed to prevent the soil pollution and to overcome the difficulty of excavation near existing structures. Experimental and analytical studies were performed to confirm application possibility of bamboo taking the place of existent reinforcement material, that is steelbar, FRP and etc. In experimental study, strength characteristics of bamboo material were analyzed, and pull-out resistance of bamboo soil nailing system by field pull-out tests was examined. In analytical study, limit equilibrium analysis and displacement analysis were performed, and application possibility of bamboo soil nailing system was analyzed. As the result of this study, bamboo has comparatively good strength and pull-out resistance characteristics. It is expected that bamboo can be used as satisfactory reinforcement material by selecting bamboo with required diameter and by controlling the number of bamboo strips. Bamboo is an alternative for the reinforcement of soil nailing system, especially temporary support system in excavation near the existing structures.

요 지

본 연구에서는, 남부지방에서 자라나는 풍부한 자연재료인 대나무를 쏘일네일링공법의 보강재로 활용하는, 이른바 대나무 쏘일네일링공법의 적용 가능성을 제시하였다. 이를 위하여 본 연구에서는, 쏘일네일링의 보강재로서 기존의 재료인 철근, 강봉, FRP(Fiberglass Reinforced Plastic) 등을 대체하여 대나무의 활용 가능성을 확인하기 위한 실험 및 해석연구를 수행하였다. 실험연구로는 대나무 재료에 대한 강도특성을 분석하였으며, 현장인발시험을 수행하여 대나무 쏘일네일링의 인발저항특성 및 그 적용성을 분석하였다. 한계평형해석 및 변위해석을 통하여 대나무 쏘일네일링공법의 적용성을 분석하였다. 본 연구결과, 대나무는 비교적 우수한 강도특성과 인발저항특성을 지닌 것으로 나타났으며, 설계인장력을 만족하는 직경의 대나무를 선택적으로 사용하거나 혹은 대나무스트립의 개수를 조절하여 소요의 인장력을 만족하는 보강재로서의 사용이 가능할 것으로 예상되었다. 따라서, 추후 대나무재료는 굴착벽체 및 사면 보강 등 지반보강용 쏘일네일링의 보강재로서 적용이 가능한 대체 재료로 판단되었으며, 향후 적극적인 적용을 위한 시험시공 등의 연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

Keywords : Bamboo soil nailing system, Displacement analysis, Field pull-out test, Laboratory tensile strength test, Limit equilibrium analysis

1 대원과학기술대학 토목과 부교수 (Associate Prof., Dept. of Civil Engr., Daewon Science Colleg, ykbang@daewon.ac.kr)

2 홍익대학교 토목공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil Engr., Hongik Univ.)

3 신성엔지니어링 지반공학부 사원 (Engineer, Shinsung Engr. Co., Ltd.)

4 홍익대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engr., Hongik Univ.)

1. 서론

쏘일네일링(Soil Nailing)공법은 가시설 흙막이 벽체, 사면보강 및 지반굴착분야 등 다양한 분야에 적용되는 지반보강공법으로서, 이에 관한 이론적 연구 및 실무적 응용기술들이 국내·외적으로 계속 개발되고 있다. 특히 도심지에 있어서는 지하굴착시 가시설 흙막이 공법으로 적용되는 사례가 많아지고 있는바, 이러한 경우 굴착 인근 지역에서의 추가 굴착시 쏘일네일링의 철근 보강재에 의한 시공 장애가 문제점으로 지적되고 있다. 아울러, 지중에 철근을 장기간 방치함으로써 발생하는 부식에 의한 지반환경 오염문제 등도 추후 해결해야할 문제점으로 지적되고 있다(김홍택 등, 2000; 김홍택, 2001).

본 연구에서는, 우리나라의 남부지방에서 자라나는 풍부한 자연재료인 대나무를 쏘일네일링공법의 보강재로 활용하는, 이른바 대나무 쏘일네일링공법의 적용 가능성을 제시하였다.

대나무는 취성재료(brittle material) 이므로 인접구조물 신축으로 인한 지반의 추가 굴착시 굴착장비의 가벼운 타격만으로도 굴삭, 제거가 가능하고, 굴삭 부산물이 친환경적이라는 장점이 있다. 아울러, 대나무는 수중이나 시멘트, 콘크리트 내부에서 장시간동안 부식되지 않는 성질을 나타내며, 인장강도가 매우 큰 재료특성을 지닌다. 대나무의 건설재료로서의 활용성에 관한 기존의 연구결과(한국항만기술단, 2001; 김윤하, 2002)에서도, 대나무의 공학적 특성이 매우 우수한 것으로 평가된 바 있다. 전 세계적으로 대나무를 건설재료로 활용한 예는 매우 다양하고 광범위하며, 국내에서도 최근들어 연약지반 천층 안정처리용으로 대나무를 적용하는 공법이 개발된 바 있다(한국항만기술단, 2001).

본 연구에서는, 쏘일네일링의 보강재로서 기존의 재료인 철근, 강봉, FRP(Fiberglass Reinforced Plastic) 등을 대체하여 대나무의 활용 가능성을 확인하기 위한 실험 및 해석연구를 수행하였다. 이를 위하여 본 연구에서는, 대나무 재료에 대한 강도특성을 분석하였으며, 현장 인발시험을 수행하여 대나무 쏘일네일링의 인발저항특성 및 그 적용성을 분석하였고, 한계평형해석 및 변위해석을 통해 대나무 쏘일네일링공법의 적용성을 분석하였다.

2. 대나무 쏘일네일링의 기본 원리

2.1 대나무 쏘일네일링의 개요

본 연구에서 개발한 대나무 쏘일네일링의 형태는 크게 대나무를 별도의 성형 없이 그대로 보강재로 활용하는 통대나무 쏘일네일링과, 대나무를 띠(Strip) 형태로 가공하여 보강재로 사용하는 대나무 스트립 쏘일네일링으로 나뉘어 진다(그림 1 참조). 통대나무 쏘일네일링은 사용되는 대나무의 단면적에 따라 강도가 일정하지 않고, 길이 방향 단면 변화에 따른 강도차이가 발생하지만, 통대나무를 별도의 가공 없이 보강재로 사용할 수 있어 사용이 간편하다는 장점이 있다. 반면에 대나무 스트립 쏘일네일링은 대나무를 스트립 형태로 쪼개어 필요한 만큼 두부 정착장치에 결속시켜 사용하므로, 네일링의 설계강도를 만족하는 보강재의 제조가 가능하다는 장점이 있다. 기존의 철근 보강재와는 달리 대나무 보강재의 경우에는 두부의 직경이 일정치 않으므로, 이를 굴착면에 정착시키기 위한 정착장치의 고안이 필수적이다. 본 연구에서 제안한 두부정착장치는 에폭시수

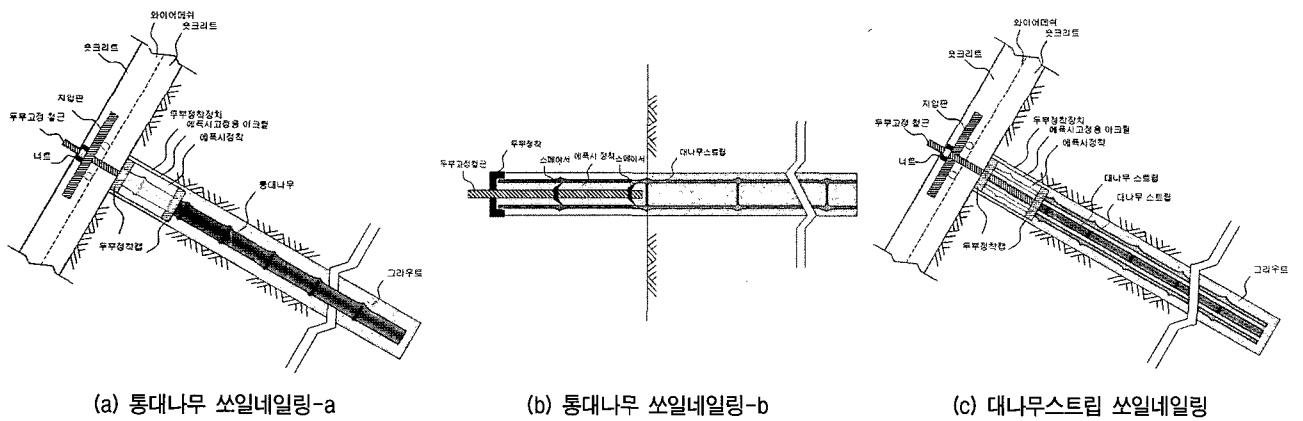


그림 1. 대나무 쏘일네일링의 형태

지(Epoxy Resin)를 경화제(Hardner)와 혼합하여 충전시킨 플라스틱 재질의 파이프와, 파이프의 양 끝단의 플레이트, 이를 연결하는 연결봉으로 구성되는 형태(그림 1(a), (c))와, 대나무 내부에 스페이서를 부착한 볼트용 강봉을 삽입하고 에폭시수지를 충전하여 고정시킨 형태(그림 1(b))이며, 두부 정착장치에 연결되는 대나무의 형태에 따라 플레이트의 형상을 구분하여 이용할 수 있도록 하였다.

2.2 대나무의 공학적 특성

본 연구에서는 쓰일네일링 두부 정착장치 내부에 충전되는 에폭시수지와 대나무 보강재 사이의 접착력을 평가하고, 대나무의 보강재의 적용성을 분석하기 위하여 대나무시편을 대상으로 실내인장시험을 시행하였다. 대나무의 실내인장시험은 KS F 2207(한국공업규격-목재의 인장시험방법)에 의거하여 총 10회 실시하였으며, 시험용 대나무 시편은 스트립 형태로 제작하였다. 시험용 시편의 크기는 폭 10mm, 두께 5mm, 길이 700mm로 균일하게 하여, 이 중 양 끝단 각 300mm는 인장시편을 정착하는 역할을 해주는 클램프에 정착하였다. 클램프는 인장시험시 시편손상을 방지하기 위하여 사각기둥 형태의 강재파이프(Steel pipe) 내에 에폭시수지를 주입하여 약 10일 정도 경화시킨 후 시험에 사용하였다. 클램프에 정착되는 대나무 시편의 길이는 다수의 예비시험 결과 대나무의 인장파괴시 까지 에폭시로부터 시편이 인발되지 않을 정도의 충분한 길이를 결정하여 제작하였다. 클램프의 제원은 20×20×300mm, 두께 2mm의 강재파이프(Steel pipe)로 하여, 인장시험시 클램프가 재료시험기의 그립력을 충분히 유지하는 동시에 변형되지 않도록

하였다. 인장력은 변위제어방식에 의해 2mm/min의 일정한 속도로 유지하였으며, 시험용 대나무 시편에는 변형 측정을 위하여 변형률계(extensometer)를 설치하여 인장력과 동시에 대나무의 탄성계수를 측정하였다. 표 1에는 실내인장시험용 공시체의 개요도 및 시험결과를 나타내었다.

대나무 시편에 대한 실내인장시험 결과 나타난 인장력-변형률 곡선 및 파괴형상은 그림 2와 같다.

표 1 및 그림 2를 살펴보면, 대나무 시편의 파단하중은 약 9.81~14.32kN의 범위로 나타났으며, 인장력-변형률 관계는 거의 직선에 가까운 형상을 나타내었다. 실내인장시험을 통해 나타난 시험시편의 파괴형상은 대나무의 결을 따라 힘이 작용하는 방향과 평행하게 파괴면이 형성되는 것으로 나타났다.

표 2에는 표 1 및 그림 2를 토대로, 대나무의 인장강도 및 탄성계수를 산출하여 정리하였다. 표 2를 살펴보면, 대나무의 인장강도는 약 196,133~287,139kPa의 범위로, 탄성계수는 약 2.74E+07~5.29E+07kPa의 범위로

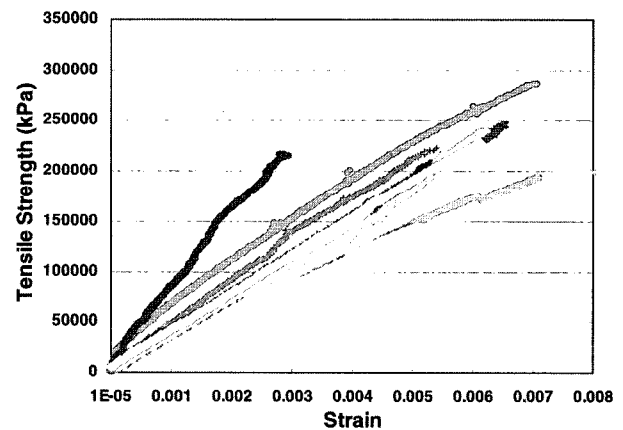


그림 2. 대나무시편의 인장-변형률 특성

표 1. 실내인장시험용 시편의 개요 및 시험결과

시편 번호	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
파단하중(kN)	12.07	9.81	14.36	9.99	10.05	12.36	10.83	11.15	12.27	11.41

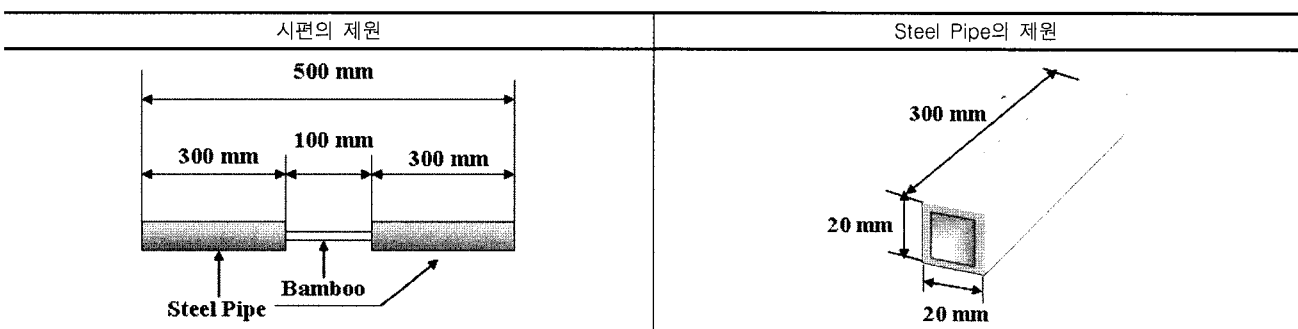


표 2. 대나무의 인장강도 및 탄성계수

시편 No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
탄성계수 (kPa)	3.44E+07	2.98E+07	3.98E+07	3.10E+07	2.74E+07	3.69E+07	5.29E+07	3.91E+07	3.48E+07	3.71E+07
인장강도 (kPa)	241,448	196,140	287,149	199,768	200,945	247,136	216,538	222,913	245,371	228,307

표 3. 통대나무의 환산 인장강도

구 분	외경(mm)	내경(mm)	두께(mm)	단면적(mm ²)	인장강도(kN)
최하부	70	50	10.0	1885	406.98
하부	52	38	7.0	990	213.88
중양부	42	33	4.5	530	107.87
상부	37	30	3.5	368	79.63
최상부	29	23	3.0	245	52.96

각각 나타났다.

상기의 시험결과를 토대로, 자연상태의 대나무(최대 직경 $\phi 70\text{mm}$, 최소직경 $\phi 29\text{mm}$, 두께 3~10mm)의 단면변화를 고려하여 대나무 전체를 5부분(최하부, 하부, 중양, 상부, 최상부)으로 구분하여 각각에 대한 인장강도를 산정한 결과, 최상부에서 약 52.96kN, 최하부에서 약 406.98kN의 값을 나타내었으며, 대나무의 중양부분을 기준으로 한 인장강도의 크기는 107.87kN 정도인 것으로 나타났다(표 3 참조).

3. 현장인발시험을 통한 거동특성

3.1 개요

본 연구에서는 대나무 쏘일네일링의 인발거동특성을 분석하기 위하여 대나무 쏘일네일링에 대한 현장인발시험을 수행하였다. 현장인발시험은 강원도 정선군과 충청북도 청주시 등 2개 절토사면에서 통대나무 쏘일네일링 5본, 대나무 스트립 쏘일네일링 5본 및 일반쏘일네일링 1본 등 총 11본의 쏘일네일링에 대한 현장인발시험을 수행하였다. 각각의 인발거동특성을 객관적으로 비교, 검토하기 위하여 유사한 지층조건을 선택하여 현장인발시험을 수행하였다. 현장인발시험이 수행된 지층은 암편이 혼재된 풍화토층으로, 느슨~중위의 상대밀도를 나타내었다.

현장인발시험은 'FHWA(1998, 2003)와 RECOMMENDATIONS CLOUTERRE(1991)'를 참고하여 변위제어방식 현장인발시험으로 시행하였다. 인발속도는 1mm/min(허용오차 $\pm 10\%$ 이내)의 속도로 하였으며, 인발력이 최대

치를 지나 감소하는 경향을 나타내거나 일정한 값에 수렴할 때 까지 지속하였다.

3.2 현장인발시험용 쏘일네일링의 제원

현장인발시험에 사용된 대나무 쏘일네일링의 개수는 총 10개(통대나무 5개, 대나무스트립 5개)로, 천공구멍 내의 정착길이는 5m이다. 사용된 통대나무의 최대직경은 70mm이고, 최소직경은 약 20mm이다. 대나무스트립은 통대나무를 4가닥의 스트립형태로 쪼개어 사용하였다. 일반 쏘일네일링은 가시철 굴착벽체에 일반적으로 사용되는 직경 25mm의 고장력철근을 사용하였고, 정착길이는 대나무 쏘일네일과 동일하게 하였다. 인발력 재하에 따른 쏘일네일의 하중전이양상을 분석하기 위해, 대나무네일의 길이방향으로 1.5m간격마다 변형률계(strain gauge)를 3개씩 부착하여, 본당 총 9개소에서 인발력 작용에 따른 변형거동을 측정하였다.

3.3 인발력-두부변위 특성

현장인발시험 결과 나타난 각각의 쏘일네일링의 인발력-두부변위 특성은 그림 3과 같다. 참고적으로, 일반 쏘일네일링의 경우 실험중 기기고장으로 인하여 최대 49.03kN 까지만 인발력을 재하하였다. 그림 3을 살펴보면, 대나무 쏘일네일링의 최대인발력은 통대나무 및 대나무스트립 모두 약 76.49kN~112.78kN의 범위로 큰 차이 없이 유사한 값을 나타내었으며, 두부변위 또한 큰 차이 없이 나타났다. 49.03kN이내의 인발하중하에서의 두부변위를 살펴보면, 대나무 쏘일네일과 일반

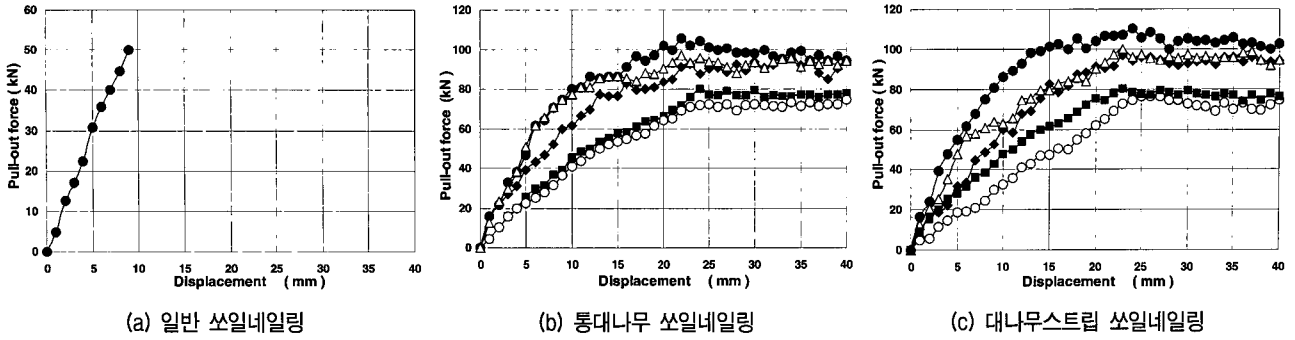


그림 3. 쏘일네일링의 인발력-두부변위 관계

쏘일네일이 명확한 차이가 없는 것으로 나타났으나, 이는 제한된 하중 영역에서의 거동특성으로서, 추후 보다 큰 인발하중하에서의 명확한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

3.4 네일 길이방향의 변위특성

그림 4에는 인발력의 크기가 49.03kN인 경우 네일 길이방향의 변형률 분포를 나타내었다. 그림 4를 살펴보면, 대나무쏘일네일링의 변형률이 일반 쏘일네일링에 비하여 다소 크게 나타났으며, 통대나무를 사용하는 경우와 대나무 스트립을 이용하는 경우간의 차이는 미미한 것으로 나타났다.

대나무를 사용하는 대나무 쏘일네일링의 변형률이 전체적으로 일반쏘일네일링 보다 30% 정도 크게 나타난 원인은, 실내인장시험 결과 나타난 대나무의 탄성계수(표 2 참조)가 일반 쏘일네일링의 25mm 고장력철근의 2.059E+09kPa에 비하여 약 3.9~7.5 배 정도 작게 나타나는데 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

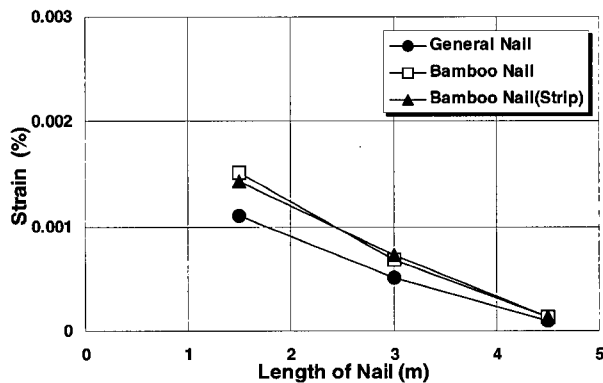


그림 4. 쏘일네일링의 길이방향 변위특성

4. 설계 예를 통한 적용성 분석

4.1 분석의 개요

본 분석에서는 상용 설계프로그램인 Talren 97을 이용하여 일반 쏘일네일링과 대나무 쏘일네일링의 보강재 강도가 굴착벽체의 안전율에 미치는 영향 등에 대한 분석을 수행하였다. 본 분석에서는 쏘일네일링 벽체의 보강 정도를 결정하는 무차원변수를 다양하게 변화시켜 분석하였다. 쏘일네일링 벽체의 보강정도를 결정하는 무차원변수(Bruce & Jewell 1986, 1987)에는 길이비(R_L , length ratio), 정착비(R_B , bond ratio) 및 강도비(R_S , strength ratio)가 있으며 이에 대한 정의는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{(길이비)} \quad R_L &= \frac{L}{H} \\
 \text{(정착비)} \quad R_B &= \frac{d_{hole} \cdot L}{S_h \cdot S_v} \\
 \text{(강도비)} \quad R_S &= \frac{d_{bar}^2}{S_h \cdot S_v}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, L : 쏘일네일의 길이

H : 사면높이

d_{hole} : 천공직경

d_{bar} : 보강재직경

S_h : 쏘일네일의 횡방향 설치간격

S_v : 쏘일네일의 연직방향 설치간격

쏘일네일링 벽체에 있어서 일반적으로 적용되고 있는 길이비, 정착비 및 강도비의 범위는 그라우트 네일의 경우 일반적으로 $R_L=0.5\sim 0.8$, $R_B=0.3\sim 0.6$ 및 $R_S=(0.3\sim 0.5)\times 10^{-3}$ 이다. 따라서, 본 분석에서는 $R_L=0.5\sim 0.8$, $R_B=0.3\sim 0.6$ 에 대한 분석이 이루어 졌다. 대나무의 극한

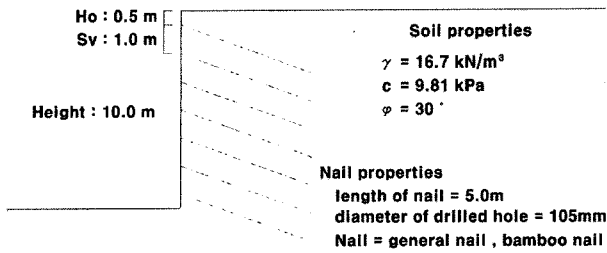


그림 5. 분석에 사용된 대표단면

표 4. 분석에 사용된 설계 제원

구 분	R_L	R_B	H (m)	L (m)	S_h (m)	S_v (m)	d_{hole} (mm)
길이비의 변화에 따른 영향분석	0.5	0.3	10.0	5.0	1.75	1.0	105
	0.6			6.0	2.10		
	0.7			7.0	2.45		
정착비의 변화에 따른 영향분석	0.5	0.3	10.0	5.0	1.75	1.0	105
		0.4			1.31		
		0.5			1.05		
영향분석	0.6	0.88					

인장강도와 철근의 극한인장강도의 값은 차이가 있으므로, 대나무 쏘일네일과 일반 쏘일네일의 강도비는 직접적으로 비교하기 어렵다고 판단되어, 길이비와 정착비에 대한 영향분석을 실시하였다. 그러나 강도비에 대한 영향분석을 제외하는 대신 보강재의 강도가 전체 안전율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 동일한 정착비 및 길이비에서 보강재의 강도를 52.96~406.98kN으로 변화시키면서 전체안전율에 미치는 영향을 분석하였다. 분석에 적용한 대표단면은 그림 5와 같으며, 분석에 사용된 제반 설계제원은 표 4와 같다.

4.2 쏘일네일의 강도가 안전율에 미치는 영향

본 분석에서는 보강재의 강도가 굴착벽체의 안전율에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 일반철근과 대나무를 보강재로 사용하는 경우에 대하여 분석을 수행하였다. 대나무의 인장강도 값은 실내인장시험에 의해 얻어진 인장강도를 토대로 하여 결정하였다. 사용되는 대나무는 임의의 직경을 선택할 수 있고, 대나무 스트립을 이용하는 경우에는 스트립의 개수를 조절하여 소요의 인장강도를 확보할 수 있으므로, 표 5와 같이 대나무의 인장강도를 다양하게 변화시켜 분석하였다. 설계변수의 변화에 따른 쏘일네일링 벽체의 안정성 평가결과를 요

표 5. 분석에 사용된 보강재의 인장강도

구 분	보강재의 종류	인장강도(kN)
Case 1	일반철근	251.92
Case 2	대나무	406.98
Case 3	대나무	213.88
Case 4	대나무	107.87
Case 5	대나무	79.63
Case 6	대나무	52.96

표 6. 길이비 및 정착비 변화에 따른 안전율

구 분	R_L	R_B	Case별 해석결과					
			1	2	3	4	5	6
길이비의 변화에 따른 영향분석	0.5	0.3	1.38	1.40	1.40	1.20	0.98	0.76
	0.6		1.54	1.54	1.55	1.09	0.87	0.68
	0.7		1.63	1.63	1.63	0.99	0.80	0.62
정착비의 변화에 따른 영향분석	0.5	0.3	1.39	1.39	1.39	1.38	1.37	1.15
		0.4	1.39	1.39	1.39	1.38	1.28	1.04
		0.5	1.39	1.39	1.38	1.35	1.15	0.91
		0.6	1.39	1.39	1.38	1.20	0.98	0.76

약하여 정리하면 표 6과 같다.

표 6의 해석결과로 부터 일반철근을 쏘일네일링으로 사용하는 경우(Case 1)와 대나무 쏘일네일 굴착벽체의 경우를 비교하면, 대나무의 인장강도가 약 200.0kN 이상인 경우(Case 2,3)에는 일반 쏘일네일링 벽체와 안전율의 차이가 거의 없는 것으로 나타났으며, 인장강도가 200.0kN보다 작은 경우에는 안전율이 저하되는 것으로 나타났다. 따라서, 표 3을 참조하면, 직경 50mm 이상의 대나무 보강재의 경우에 일반쏘일네일링과 유사한 안전율이 발휘되는 것으로 예상할 수 있다. 구체적으로 길이비 0.5, 정착비 0.3인 경우, 대나무의 인장강도가 107.87kN인 경우에는(Case 4), 안전율이 일반 쏘일네일의 약 87%에 해당하며, 대나무의 인장강도가 79.63kN인 경우에는(Case 5) 안전율이 일반쏘일네일의 약 71%, 인장강도가 52.96kN인 경우에는 일반 쏘일네일링의 약 55%정도로 나타났다.

그림 6에는 정착비 0.3인 경우에 길이비 변화에 따른 보강재의 종류별 안전율 변화 경향을 나타내었으며, 그림 7에는 정착비가 0.6인 경우 보강재의 강도변화에 따른 안전율 변화 경향을 각각 나타내었다.

그림 6의 결과를 살펴보면, 정착비가 0.3인 경우, 보강재의 강도가 비교적 큰 경우에는(Case 1,2,3) 길이비가 증가할수록 전체안전율이 증가하는 경향을 보였으나, 보강재의 강도가 비교적 작은 경우에는(Case 4,5,6) 길이비가 증가 할수록 전체 안전율은 오히려 감소하는

경향을 나타냈다. 또한, 전반적으로 보강재의 강도가 증가함에 따라 안전율이 증가하는 경향을 보이나, 보강재의 강도가 일정치 보다 큰 경우에는 보강재의 강도차이에 따른 전체안전율의 변화가 거의 없어지는 경향을 나타내었다. 그림 7로 부터, 정착비가 0.6으로 증가한 경우에 대한 분석결과를 살펴보면, 보강재의 강도가 증가함에 따른 안전율 변화경향은, 보강재의 강도가 일정치 보다(약 98.07kN)커지는 경우에 보강재 강도 증가에 따른 안전율의 증가효과는 기대할 수 없는 것으로 나타나, 그림 6에서의 분석결과와 동일한 결과를 나타내었다. 하지만, 보강재의 강도에 관계없이 길이비가 증가할수록 안전율도 증가하는 것으로 나타나, 그림 6에서의 분석에서와 다소 차이가 나는 결과를 나타내었다. 즉, 정착비가 커지는 경우에는 보강재의 강도가 작더라도 길이비 증가에 따른 안전율의 증가효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

분석 결과로부터, 정착비가 비교적 작은 경우, 보강재의 강도가 증가하면 안전율은 보강재의 인발저항에 의

해 크게 영향을 받지만, 보강재의 강도가 충분하지 못한 경우에는 보강재의 파단이 안전율에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 아울러, 보강재의 강도가 충분하지 않을 경우에 안전율의 확보를 위해 정착비를 증가시켜야 하며, 단순히 길이비의 증가로 인한 안전율의 증가는 기대하기 어려운 것을 알 수 있다.

그림 8 및 그림 9에는, 정착비 변화에 따른 보강재의 종류별 굴착벽체의 안전율 변화 경향과(그림 8), 동일한 정착비에서 보강재의 강도변화에 따른 안전율의 변화(그림 9)를 각각 나타내었다. 그림 8 및 그림 9의 결과를 살펴보면, 보강재의 강도가 비교적 작은 경우에는(Case 4,5,6) 정착비가 증가함에 따라서 전체안전율이 증가하는 경향을 보이나, 보강재의 강도가 비교적 큰 경우에는(Case 1,2,3) 정착비 변화에 따라 전체안전율의 변화가 상대적으로 미미한 것으로 나타났으며, 보강재의 강도가 일정치 이상으로 증가하면 정착비 변화에 관계 없이 강도 증가에 따른 안전율의 증가효과를 기대할 수 없는 것으로 나타나, 그림 6, 그림 7의 분석결과와 동일한 결

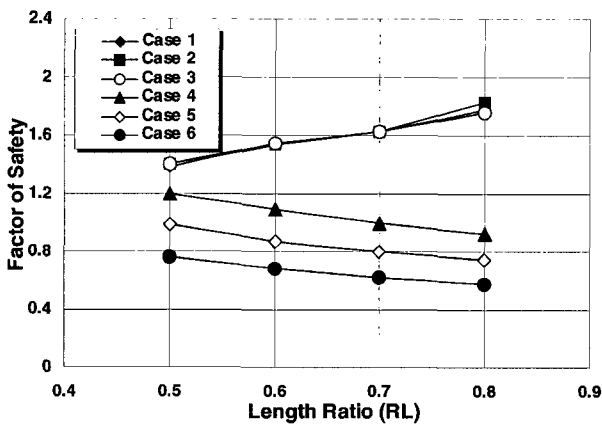


그림 6. 길이비에 따른 안전율 변화

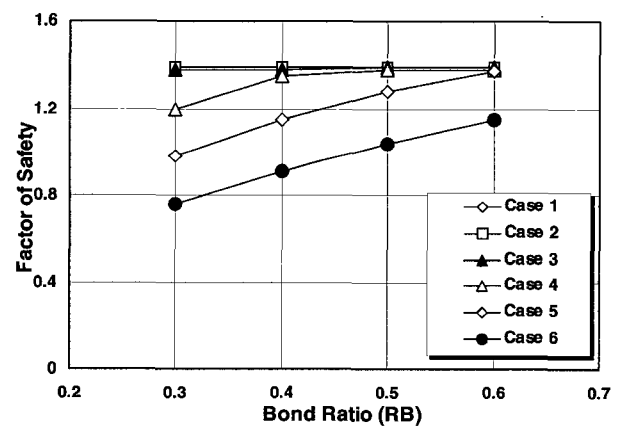


그림 8. 정착비에 따른 안전율 변화

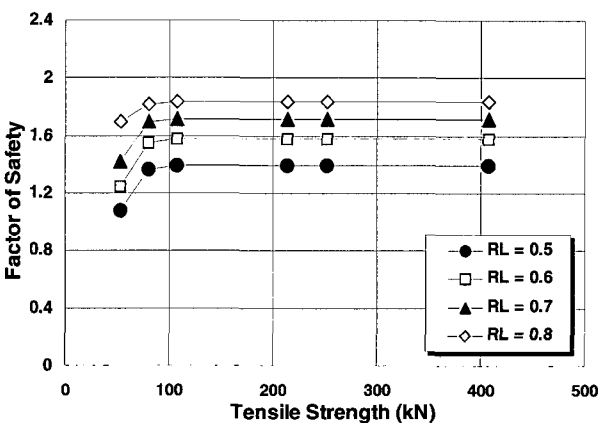


그림 7. 보강재의 강도에 따른 안전율 변화

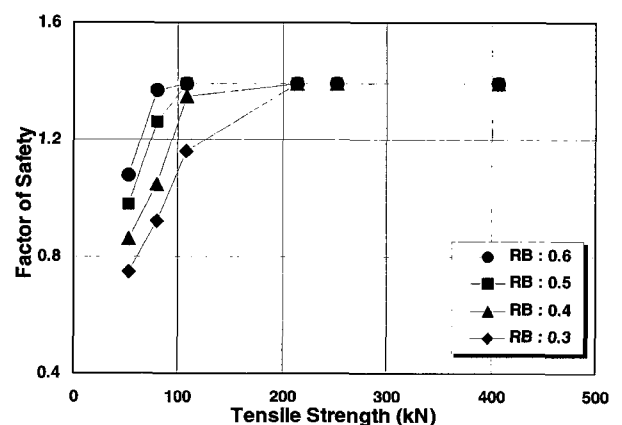


그림 9. 보강재의 강도에 따른 안전율 변화

과를 나타내었다.

그림 6~그림 9의 결과를 종합하여 분석하면, 본 연구의 대나무 쏘일네일링 보강재의 경우에 인장강도가 약 196kN 이상(통대나무의 직경이 약 50mm인 경우에 해당)이거나, 혹은 인장강도가 107.87kN인 경우(통대 나무의 직경이 약 40mm인 경우에 해당)에는 정착비가 0.4 이상인 경우에 일반 쏘일네일링과 의미있는 안전율의 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 보강재의 강도가 상대적으로 작은 경우(Case 5, Case6)에는 정착비가 증가함에 따라 전체안전율도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 일반 쏘일네일링의 경우에 정착비에 의한 영향에 비하여 길이비에 의한 안전율 증가 효과가 매우 크게 나타나지만, 본 연구의 대나무 쏘일네일링의 경우에는 비교적 인장강도가 큰 경우(Case 2,3)를 제외하면 정착비 증가에 의한 안전율의 증가 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 길이비 증가에 따라 안전율이 오히려 감소하는 경향도 나타내는 것을 알 수 있다. 참고적으로, 대나무스트립 쏘일네일링의 경우에는 필요에 따라 스트립의 개수를 조절하므로써 소요의 인장강도를 얻을 수 있는 점을 감안할 때, 대나무 스트립의 개수에 따라 굴착벽체의 소요 안전율을 확보할 수 있는 방안을 강구할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 변위해석

4.3.1 개요

본 연구에서는 대나무 쏘일네일링 시스템의 적용성을 분석하기 위하여 그림 5의 대표단면을 대상으로 단계별 굴착시공과정에 따른 변위해석을 실시하였다. 해석용 프로그램은 유한요소해석 상용프로그램인 PENTAGON-2D를 사용하였으며, 일반 쏘일네일링과 대나무를 이용한 쏘일네일링의 발생변위를 비교 분석하였다. 본 해석에 적용된 지반강도정수 및 보강재의 강도정수는 표 7과 같다.

4.3.2 해석 결과

일반 쏘일네일링과 대나무 쏘일네일링을 각각 적용한 대표단면의 PENTAGON-2D 프로그램 해석결과, 최종시공단계의 변위분포도는 그림 10 및 그림 11과 같다.

그림 10 및 그림 11에서, 대나무 쏘일네일링 벽체 및 일반 쏘일네일링 벽체의 변위분포 형태를 비교하면, 두 경우 사이의 특이한 차이점은 없는 것으로 나타났다. 변위량에 있어서는 대나무를 적용한 쏘일네일링의 경우 최대 수평변위량이 3.82~119.0mm, 일반 쏘일네일링의 경우 최대수평변위량이 3.51~109.0mm로 각각 나타나, 대나무 쏘일네일링 벽체가 일반 쏘일네일링 벽체에 비하여 약 1.10배 수평변위량이 크게 나타났다. 이러한 변위량의 차이는 일반 철근과 대나무의 탄성계수값

표 7. 수치해석에 적용한 지반강도정수 및 보강재 특성치

구분	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	탄성계수 (kPa)	보강재	항복 인장강도 (kPa)	지름 (cm)	단면적 (cm ²)	단면2차모멘트 (cm ⁴)	탄성계수 (MPa)
토사	16.7	9.81	30	24,920	이형철근(D25)	39,226	2.54	5.067	30	196,133
					대나무	21,084	Variable	Variable	Variable	34,323

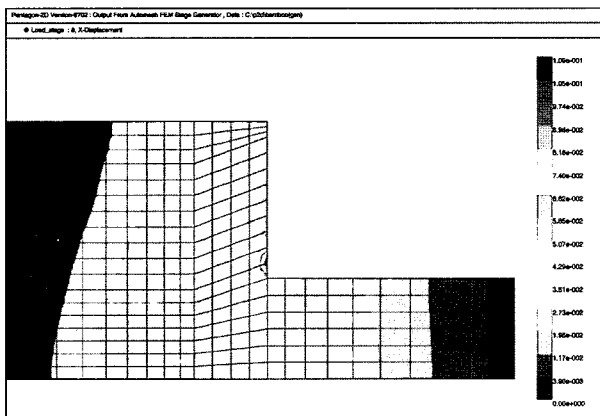


그림 10. 일반 쏘일네일링 변위 분포도

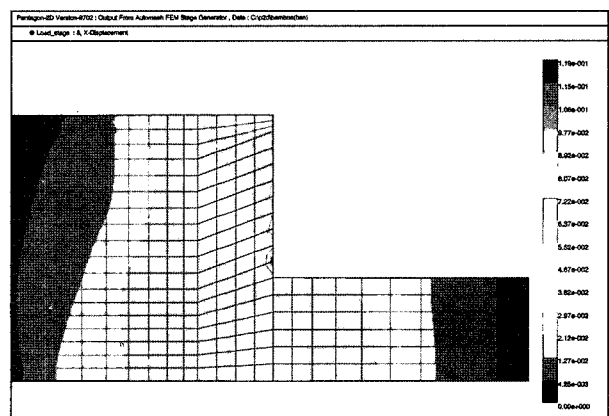


그림 11. 대나무 쏘일네일링 변위 분포도

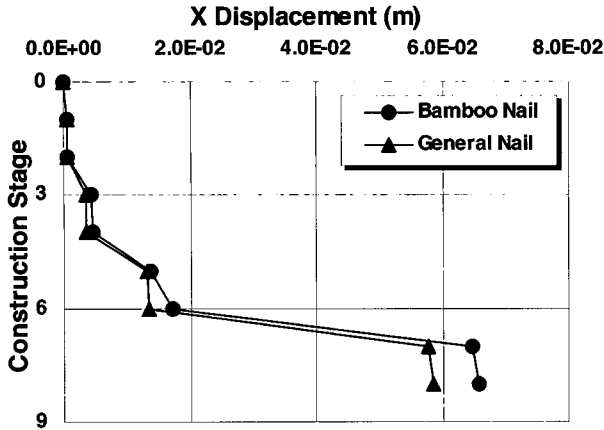


그림 12. 굴착단계별 수평변위

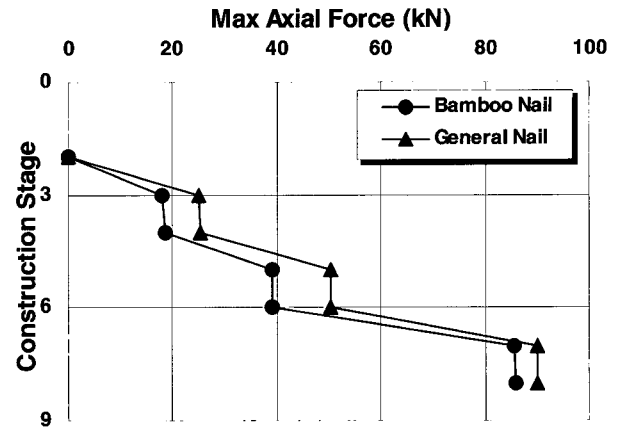


그림 13. 굴착단계별 축력

의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 대나무 쏘일네일링과 일반 쏘일네일링의 단계별 굴착시공과정에 따른 보강재 작용 축력 및 최상단 지점에서의 수평변위를 비교한 결과는 그림 12 및 그림 13과 같다.

그림 12 및 그림 13을 살펴보면, 굴착시공과정에 따른 보강재의 작용 축력은 대나무 쏘일네일링이 일반 쏘일네일링의 78~95% 정도로 나타났다. 또한 최종굴착 단계에서 누적되는 수평변위량은 대나무 쏘일네일링을 적용한 경우 0.42~65.7mm, 일반 쏘일네일링을 적용한 경우 0.36~58.5mm로, 대나무 쏘일네일링 벽체의 경우에 최대 약 1.12배의 발생변위 증가가 예측되었다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는, 쏘일네일링의 보강재로서 대나무의 활용 가능성을 확인하기 위한 실험 및 해석연구를 수행하였다. 이를 위하여 대나무 시료에 대한 강도특성을 분석하였으며, 현장인발시험을 수행하여 대나무 쏘일네일링의 인발저항특성 및 그 적용성을 분석하였고, 한계평형해석 및 변위해석을 통해 대나무 쏘일네일링공법의 적용성을 분석하였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 대나무 시편의 인장시험 결과, 대나무의 인장강도는 약 196,133~287,139kPa의 범위로, 탄성계수는 약 2.74E+07~5.29E+07kPa의 범위로 각각 나타났다.
- (2) 대나무 시편의 인장도시험 결과를 토대로, 자연상태의 대나무(최대직경 ϕ 70mm, 최소직경 ϕ 29mm, 두께 3~10mm)의 인장강도를 산정하면, 약 52.96~

406.98kN의 범위로 나타났다.

- (3) 현장인발시험 결과, 대나무 쏘일네일링의 최대인발력의 크기는 통대나무 및 대나무스트립 모두 약 76.49kN~112.78kN의 범위로 큰 차이 없이 유사한 값을 나타내었다.
- (4) 현장인발시험에 의한 두부 변위량은 통대나무를 사용하거나 대나무 스트립을 이용하는 경우에는 큰 차이가 없는 유사한 축방향 변형률을 나타냈으나, 대나무를 사용하는 대나무 쏘일네일링의 변형률이 전체적으로 일반쏘일네일링 보다 30% 정도 크게 나타났다.
- (5) 한계평형해석 결과, 대나무의 인장강도가 107.87kN 이상이고 정착비가 0.4 이상인 경우에 일반 쏘일네일링 벽체와 안전율의 차이가 거의 없는 것으로 나타났으며, 인장강도가 약 200kN 이상인 경우에는 일반 쏘일네일링 벽체와 안전율의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, 최대직경 50mm 이상인 대나무 보강재의 경우에 일반쏘일네일링과 유사한 안전율이 발휘되는 것으로 예측할 수 있다.
- (6) 한계평형해석 결과, 일반 쏘일네일링의 경우에 정착비에 의한 영향에 비하여 길이비에 의한 안전율 증가효과가 매우 크게 나타났으나, 대나무 쏘일네일링의 경우에는 비교적 인장강도가 큰 경우(Case2,3)를 제외하면 정착비 증가에 의한 안전율의 증가효과가 크게 나타났다.
- (7) 변위해석 결과, 일반 쏘일네일링과 대나무 쏘일네일링 모두 유사한 변위분포 양상을 나타내었으며, 대나무를 적용한 쏘일네일링의 경우에 일반 쏘일네일링의 경우보다 다소 큰 발생변위를 보였다.

- (8) 대나무 쏘일네일링 및 일반 쏘일네일링을 적용한 경우에 대한 변위해석 결과, 굴착시공과정에 따른 보강재의 작용 축력은 대나무 쏘일네일링이 일반 쏘일네일링의 78~95% 정도로 나타났다.
- (9) 현재까지의 연구결과, 대나무재로는 굴착벽체 및 사면보강 등 지반보강용 쏘일네일링의 보강재로서 적용이 가능한 대체 재료로 판단되며, 향후 적용을 위한 시험시공 등의 연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2004년 중소기업청 산·학·연 공동기술개발 권소사업의 연구비 지원에 의해 수행된 연구의 일부이며, 관련 기관과 현장실험에 도움을 준 지호기술산업주식회사에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김윤하 (2002), 연약지반상 청죽메트 부설지반의 즉시침하량 추정, 전남대학교 대학원 석사학위논문, pp.31-34.
2. 김홍택, 정성필, 박시삼, 류정수, 강인규 (2000), "Design, Construction and Performance of A Removable Soil Nailing System", *한국지반공학회지*, pp.107-117.
3. 김홍택 (2001), "Soil Nailing 공법의 과거, 현재, 미래", 평문각.
4. (주)한국항만기술단(2001), *대나무메트를 이용한 초연약지반 호안 및 가설도로의 기초처리공법*, 신기술 제 290호.
5. Bruce, D. A. and Jewell, R. A., Soil Nailing: Application and Practice Part 1, Ground Engineering, *The Journal of the British Geotechnical Society*, Vol.19, No.8, 1986, Nov., pp.10-15.
6. Bruce, D. A. and Jewell, R. A., Soil Nailing: Application and Practice Part 2, Ground Engineering, *The Journal of the British Geotechnical Society*, Vol.20, No.1, 1987, Jan., pp.21-28.
7. Federal Highway Administration (1998), Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls, FHWA-SA-96-069.
8. Federal Highway Administration (2003), Geotechnical Engineering Circular No.7 Soil Nail Walls, FHWA0-IF-03-017.
9. French National Research Project Clouterre (1991), RECOMMENDATIONS CLOUTERRE 1991.

(접수일자 2005. 3. 11, 심사완료일 2005. 8. 23)