

산림관통 터널 입출구부 위치와 훼손 면적의 관계^{1a}

김동필² · 홍석환^{2*} · 최송현² · 이상철³ · 안미연³

Relationship between the Locations of Tunnel Entrance and Areas Affected by Deforestation in the Forest in Korea^{1a}

Dong-Pil Kim², Suk-Hwan Hong^{2*}, Song-Hyun Choi², Sang-Cheol Lee³, Mi-Yeon Ahn³

요 약

터널은 산림 훼손면적이 다른 공법에 비해 입구부와 출구부만 훼손하면서 도로가 지하로 건설되기 때문에 훼손면적을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 본 연구는 터널 건설 시 산림이 훼손되는 터널입출구부를 중심으로 주변 지형과 관계를 살펴보고, 훼손면적을 최소화하고 지형 훼손을 저감할 수 있는 방향을 제시하기 위해 진입유형별 훼손면적을 살펴보고자 하였다. 연구는 국내 주요도로의 터널 150개를 선별하여 입구부와 출구부를 합쳐 300개 지점에 대해 진입유형을 구분하고 터널 진입부 훼손면적과 터널 상부 훼손면적을 산출하였다. 터널조성 위치에 따른 통계분석결과 진입유형별 훼손면적은 통계적 유의성이 인정되었다. 경사면직교형은 다른 진입유형에 비해 터널입출구부의 훼손면적은 작았으며, 반대로 골짜기진입형, 경사면평행형은 다른 진입유형에 비해 훼손 면적이 크게 나타났다. 지형을 고려한 터널위치 선정은 터널 1개소 당 최대 약 1.5ha 정도의 산림훼손을 줄일 수 있을 것으로 조사되었다.

주요어: 갱구부, 도로건설, 산림 지형, 터널 건설

ABSTRACT

The construction of road tunnels and bridges have delivered driving efficiency and stability based on developed engineering technology. Tunnels have the advantage of reducing the deforested area compared with other road construction methods. Since a tunnel is an underground passageway dug through the surrounding soil/earth/rock and enclosed except for the entrance and exit, commonly at each end, it does not cause a large amount of deforestation. This study surveyed the deforested areas at each end of the tunnel by the design of the tunnel entrance and exit and forest topography to minimize the amount of deforestation caused by road construction. A survey was done on a total of 150 tunnels (300 entrances and exits) on several main roads in Korea. The deforested area of each tunnel was collected by a breakdown of the entrance area and the upper area of the tunnel. According to the results of Kruskal-Wallis analysis, it was found that there was statistically a significant relation between the location of tunnels and the amount of deforestation by the topographical access type of the tunnels. The tunnel with 'facing orthogonal to incline' type access caused the smallest deforestation while the the tunnel with 'facing to valley' and 'parallel with incline' type accesses caused large deforestation

1 접수 2016년 12월 9일, 수정 (1차: 2017년 1월 5일, 2차: 2017년 1월 18일), 게재확정 2017년 1월 19일

Received 9 December 2016; Revised (1st: 5 January 2017, 2nd: 18 January 2017); Accepted 19 January 2017

2 부산대학교 조경학과 Dept. of Landscape Architecture, Pusan Nat'l Univ., Miryang 50463, Korea

3 부산대학교 대학원 조경학과 Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Pusan Nat'l Univ., Miryang 50463, Korea

a 이 논문은 산림청 산림과학기술개발사업 중 훼손지 복원연구(S211216L020410)의 지원에 의해 수행되었음.

* 교신저자 Corresponding author: Tel: +82-55-350-5406, Fax: +82-55-350-5409, E-mail: hong@pusan.ac.kr

during tunnel construction. Tunnel positioning in the light of topography can reduce the deforested area by up to 1.5ha at each tunnel.

KEY WORDS: TUNNEL PORTAL, ROAD CONSTRUCTION, FOREST TOPOGRAPHY, TUNNEL CONSTRUCTION

서론

자동차 수의 꾸준한 증가에 따라 교통 수요 및 교통량이 급격히 늘어나게 되고 이에 따른 교통시설 확충은 지속적으로 요구되고 있다. 증가된 교통 수요 해결과 국가간교통망 확충을 위해 정부는 지속적으로 도로 건설 및 노선개선 사업을 진행하고 있다. 산림면적이 64%를 차지하는 산악국가 특성상 우리나라는 도로건설로 인한 산림 훼손이 필연적으로 대규모로 발생하게 된다.

토목기술이 발달하지 않은 과거, 도로는 교량이나 터널과 같은 대규모 공사에 대한 기술적 한계로 불가피하게 낮은 산림 또는 산림 가장자리를 중심으로 계획되어 도로가 연장되고 굴곡이 많은 상태로 조성되었다. 그러나 최근 토목기술 발달과 함께 차량이동의 효율성과 안전성이 강조되면서 되도록 직선형의 도로를 조성하려 노력하고 있어 지형변화가 심한 우리나라는 자연스럽게 터널과 교량이 증가하고 있다. 여기에 더해 최근 전 세계적으로 환경적 부작용을 최소화하고 자연과 인간이 공존하는 생태적 개념의 친환경적 도로 조성에 대한 인식이 증가하는 추세로 도로에 의한 자연환경의 부정적 인식을 완화하고자 하는 노력이 지속되고 있다. 대표적으로 공사비 절감 차원에서 진행되던 능선의 대규모 절토가 최근 점차 줄어들고 이를 터널로 대체하여 훼손지 면적을 최소화하려는 시도가 계속되고 있다. 이러한 시도는 노선의 연장 대비 터널 연장 비율의 증가로 이어지고 있다(MLIT, 2015). 터널의 증가로 인해 대규모 능선의 절토와 같은 산림훼손은 줄었으나, 여전히 터널입출구부의 과도한 지형 변화에 따른 산림훼손이 적지 않게 발생하고 있다. 그럼에도 지형을 고려한 도로설계는 일반적으로 자동차의 효율적 이동 측면에서 경사와 토양, 경제적 측면에서 토지이용 등을 기반으로 진행되어(Han *et al.*, 1999) 산림면적의 훼손 측면은 부각되지 않고 있다.

터널에 대한 연구는 대부분 토목적 관점에서 시공기술 및 구조적 안정성을 중심으로 진행되어 왔으며, 새로운 시공방법 등에 대한 연구가 지속적으로 이뤄지고 있다. 또한 2000년대 이후부터 환경친화적인 도로건설의 패러다임으로 도로노선 선정에 대한 환경친화적인 도로건설 지침(MLTM and ME, 2010), 비탈면녹화의 설계 및 시공 지침(MLTM, 2009)들이 마련되었으며 비탈면의 녹화를 통한

안정화 연구는 꾸준히 진행되고 있다. 터널입출구부로 한정하면 주로 터널 굴착 공법(Cho, 2012; Han and Park, 2002)과 사면 안정성(Jeong and Seo, 2013; Baek *et al.*, 2004) 등에 국한되어 진행되어 왔다.

터널입출구부는 조성이후 필연적으로 훼손된 비탈면이 나타나게 되는데 이들 지역은 기존 지형을 인위적으로 조정된 것으로 안정성이 떨어지게 된다. 이에 비탈면 안정화를 위한 녹화는 비탈면의 직접적인 침식을 막고 뿌리생장으로 인한 토사의 흘러내림을 막는 등 사면안정화를 위해 중요한 항목이 된다(You *et al.*, 2009). 대규모 건설공사로 인해 발생하는 훼손지들은 침식방지, 경관미 및 종다양성 회복과 증진을 위해 훼손되기 이전의 모습으로 빠르게 복원·녹화시키는 것이 바람직하므로(Harker *et al.*, 1999) 비탈면에 대한 연구는 대부분 절·성토에 의해 훼손된 산림 복원을 목적으로 진행되어 왔다. 비탈면 녹화용 도입초종의 생물특성을 분석한 연구(Woo *et al.*, 1998)를 포함하여 식생천이(Jeon, 2013) 등과 같이 식재지의 현황과 모니터링에 관한 연구가 한 축을 이루고 있으며, 절·성토에 의해 훼손된 지역의 효과적 녹화방법(You *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2007) 및 식물선정(Song *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2008) 등과 같이 효과적 복원 방안과 관련한 연구가 한 축을 이루어 진행되어 왔다.

터널에 대한 자연환경 관련 연구는 매우 미미한 실정인데, 조성된 터널입출구부의 생태·경관적 평가연구(Lee, 2011) 등이 일부 진행되었으나, 자연환경적 측면에서 터널 조성으로 인해 발생하는 훼손지의 규모나 훼손의 형태 등에 대한 평가와 이에 따른 훼손 면적의 축소 방안 등 근본적으로 훼손 면적을 줄이기 위한 기초 연구는 미미하다. 근본적 해결책을 제시하기 위한 유사 개념으로는 도로조성에 따른 지형 훼손 최소화를 위한 절·성토 높이관련 연구(Kim *et al.*, 2014)와 진입방향 설정연구(Seol *et al.*, 2002) 등이 진행된 바 있다. 그러나 실질적으로 다양한 지반에 기인하는 터널 조성으로 인해 발생하는 직접적인 산림훼손에 관한 실증적 접근은 이루어지지 않았다.

터널입출구부는 주변 자연과 융합된 도로경관을 창출하여 시각적 연속성을 도모하고 명암순응의 안정성을 고려하여 도로 이용자에게 쾌적한 주행여건 제공을 위한 중요한 공간이다. 다양한 지형 지질조건 등 설계인자의 다변성으로 터널입출구부에 대한 일률적인 기준의 설정은 어려운 것으로 판단되나(Seol *et al.*, 2002) 환경적 측면을 고려하여 과

다한 훼손규모를 축소시킬 수 있는 적극적인 대안의 검토가 필요한 시점이다. 일반적으로 터널은 자연경관이 우수한 장소에 건설되는 경우가 많으므로 기존의 주변경관에 대한 기능적, 미적인 배려 등 세심한 검토가 요구되며(Son, 2010), 터널입출구부의 많은 절토량을 줄이기 위한 방법으로 갱구를 절토가 없어지는 위치까지 돌출하자는 제안(Okano, 2005; Lee *et al.*, 2012)도 있다. 그러나 근본적으로는 훼손지의 복원보다는 초기 훼손면적을 축소하는 것이 가장 중요하다 할 수 있다. 터널입출구부 훼손지 면적을 줄이기 위해서는 도로노선을 결정하는 초기 도로계획단계에서 도로 선형과 주변 지형과의 관계를 검토하여 훼손 면적을 최소화 할 수 있는 터널 진입부 유형을 선정해야 한다. 그러나 과거와 달리 도로계획 시 중요한 요소는 지형여건보다는 노선의 단축과 안전성 측면이 강조되고 있어 현장의 세부 지형에 따른 노선의 변경가능 폭은 크지 않다.

지질적 특성을 고려하지 않은 상태에서 지형적 특성만을 바탕으로 터널조성 위치를 판단할 경우 산림경사면과 접촉면이 커지는 사면부와 터널이 마주하는 경우, 능선이나 계곡과 마주하는 경우에 비해 접촉면이 증가할 가능성이 높아 훼손면적이 증가함을 단순 예측할 수 있다. 다만, 이러한 단순추정이 현재까지 터널조성 사례에서 어떠한 결과를 보이는지에 대한 구체적 검증은 없는 상태이다.

본 연구는 현재 조성된 도로에 대해서 터널입출구부와 주변 지형과 관계를 유형화한 후, 조성된 터널입출구부의 훼손 면적을 확인하였다. 이를 바탕으로 지형에 따른 진입 유형별 훼손된 면적의 통계적 비교를 통해 훼손량의 차이를 살펴보았다. 도로계획의 경우 긴 거리의 연속된 선형으로 이루어지는 특성상 일반적으로 계획 시 특정 지점에서의 일부 산림의 훼손면적 증가로 인해 도로 노선을 대폭 수정하기는 어려우며, 계획단계에서 노선 전체지역과 주변 대안 노선범위까지의 모든 지형·지질적 특성을 파악하는 것은 현실적으로 가능하지 않다. 이에 본 연구는 도로계획 시 노선의 미세 조정단계에서 터널입출구부의 조정을 통해 훼손

면적 최소화와 지형훼손 저감을 위한 방향조정이 산림훼손을 어느정도 저감하는지에 대한 실증자료를 제시하고 터널 진출입부의 부분적 위치수정을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

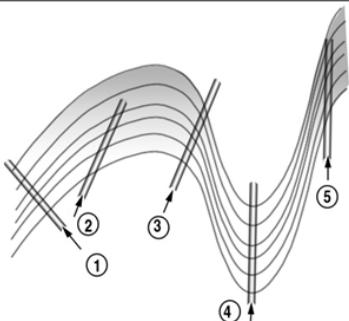
연구방법

1. 터널 입출구부와 지형과의 관계 설정

터널 중심축선과 주변 지형과의 관계는 산림사면과 도로가 교차하는 관계로 볼 수 있으며, 이러한 관계는 노선의 결정뿐만 아니라 터널입출구부 설치에 있어서 가장 우선적이고 기본적인 검토사항으로, 본 연구에서는 Seol *et al.*(2002)이 분류한 체계를 차용하여 다음과 같이 분류하였다(Table 1).

일반적으로 산림사면과 도로가 만날 경우, 경사면직교형은 가장 이상적인 위치관계로 볼 수 있다. 경사면경사교차형은 비대칭절취경사면과 편토압이 문제 되어 편토압에 대한 보강공법이 필요하며, 골짜기진입형은 자연재해 발생 가능성이 높아 이에 대한 대비가 필요하다. 능선평행형은 터널 양측 토피가 매우 얇아지며, 경사면평행형은 토사층이 깊게 발달하여 편토압의 위험이 있는 형태이다(KTA, 2007). 일반적으로 터널의 구조적 위험성은 주변의 기존 지형 및 식생 훼손을 증가시키는 요인이 된다. 도로계획 단계에서는 세부 지질특성을 파악하기 어려우며, 세부 특성이 확인된다 하더라도 부분적 훼손면적을 줄이기 위해 전체 노선을 대폭 수정하는 것은 현실적으로 가능하지 않아 조정의 폭은 크지 않게 된다. 다만 노선의 회전반경과 안전성 측면을 고려한 부분적 수정을 통해 인접 지역으로의 진입부 변경이 가능해진다. 지질적 특성을 고려하지 않은 지형적 특성에서 살펴본다면 경사면평행형과 능선평행형, 골짜기진입형이 산림사면과의 접촉면을 최소화할 수 있어 이들 지역에 터널을 조성할 경우 산림훼손면적이 증가할 수 있음을 단순 추정할 수 있다.

Table 1. Location type and characteristics of tunnel entrance(Seol *et al.*, 2002)

	Type	Characteristics
①	Orthogonal Slope	Most ideal location
②	Cross Slope	Asymmetry cut-slope and Declinating earth pressure
③	Entering Valley	High risk of natural disaster
④	Parallel Ridge	Thinning cover depth
⑤	Parallel Slope	Declinating earth pressure

2. 연구대상지

연구 대상지는 우선 국토교통통계누리(stat.molit.go.kr)에서 전국에 조성된 국내 도로 터널 현황을 확인한 후 터널이 상대적으로 많이 조성된 지역을 선정하고자 하였다. 우리나라의 경우 백두대간 및 주요 산악지대를 통과하는 상대적으로 최근에 조성된 도로에서 터널분포가 많았는데, 터널 분포 빈도가 높은 영동·중부내륙·중앙·남해·대구포항·당진영덕고속도로를 선정하였고, 일반도로로는 부산광역시 및 경상남도의 주요 간선도로의 터널을 중심으로 선정하였다. 조사대상지에 조성된 터널은 총 154개소이었는데, 이 중 양방향 터널입출구부가 인접하여 훼손면적에 상호간 영향을 받는 대관령2, 3터널, 문경1터널, 탄부터널을 제외한 150개소, 상행과 하행의 입출구부를 구분하여 총 300개소를 선정하였다.

3. 조사분석 방법

1) 터널진출입 유형분류

조성된 터널의 유형분류는 국립지리원 1:5,000 수치지도를 바탕으로 주변 등고선과의 연결관계를 확인하여 분류하였다. 경사면직교형은 주변 등고선이 산림의 사면을 이루고 있고 해당 등고선과 터널입출구부와 연결되는 도로노선이 이루는 각도가 75°이상인 지역을 해당유형으로 구분하였고, 골짜기진입형과 능선평행형은 각각 골짜기, 능선과 터널입출구부 진입 도로노선이 이루는 각도가 15°이하인 지역으로 하였다. 경사면평행형은 사면등고선의 방향과 도로노선의 진행방향이 15°이하인 지점으로 구분하였으며 나머지 지역은 경사면경사교차형으로 각각 구분하였다.

2) 산림훼손면적 산정 및 식생도입가능성 분석

터널조성에 따른 훼손면적은 각 터널별로 터널진입부 훼손면적, 터널상부 훼손면적으로 나뉘 산출하였으며, 이 둘의 합을 전체 훼손면적으로 계산하였다. 일반적으로 급경사 사면일 경우 훼손면적이 줄어들며 완경사 사면일 경우 훼손면적이 늘어나게 된다. 진입부 훼손면적은 갭문을 기준으로 반경 100m 내 진입부 양측사면, 중앙분리대, 도로 면적 등을 말하며, 상부 훼손면적은 갭문을 기준으로 반경 100m 내 인접 산림지역까지 훼손된 면적으로 설정하였다. 훼손면적의 산출은 2008년부터 2013년까지 제작된 항공사진을 바탕으로 최초 훼손면적이 가장 뚜렷하게 확인되는 지도를 활용하였으며, 이를 1:5,000 수치지도에 중첩하여 Auto CAD program을 이용하여 디지털이징 후 훼손지 면적을 산정하였다. 평면도를 활용한 훼손지 면적산출은 실제 경사도에

따른 사면면적의 변화를 확인할 수 없다는 수치적 한계를 안고 있으나, 조사의 한계상 경사면 차이에 따른 면적산출은 적용하지 않았다.

식생도입 가능성은 Lee et al(2012)의 연구결과를 참고하여 전체 대상지를 3개 유형으로 단순화하여 구분하였다. 유형분류는 터널조성이후 확보된 토양층의 유무와 주변의 공사사마감결과에 따른다. 식생도입 가능성이 양호한 곳은 별도의 추가 공사 없이 현재 상태로 식물의 생육기반이 확보된 지역을 말한다. 이 지역은 사면경사가 완만하고 암반이 노출되지 않는 지역이다. 식생도입 가능성이 보통인 곳은 추가적인 산림훼손이나 대규모 토목공사 없이 현재 상태를 유지하면서 간단한 지형변형 및 갭문형식 변경 등 추가 공사를 통해 생육기반 확보가 가능한 지역을 말하며, 식생도입가능성이 불량인 곳은 지형훼손이 심하고 암반이 노출되어 있어 생육기반 확보가 용이하지 못한 지역을 말한다. 해당 지역은 드러난 암반에 식재를 위한 토양 성토가 실질적으로 가능하지 않은 지역이 해당된다.

조사한 결과값을 바탕으로 터널 진입유형과 산출된 훼손면적을 중심으로 각 진입유형별 훼손면적의 규모 차이를 비교해보고자 일원배치분산분석을 진행하여 각 유형별 차이가 나타나는지를 통계적으로 살펴보았다. 자료의 통계적 처리와 분석은 IBM SPSS Statistics program을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 터널 진입부 훼손 현황

각 터널이 산림사면과 만나는 진출입유형을 구분한 결과 (Table 2), 표본수 총 300개 중 경사면직교형 82개소, 경사면경사교차형 81개소, 골짜기진입형 57개소, 경사면평행형 55개소, 능선평행형 25개 순으로 나타났다. 진입부 훼손면적은 경사면직교형, 능선평행형, 경사면경사교차형, 골짜기진입형, 경사면평행형 순으로 그 면적이 증가되었으며, 경사면직교형에서 최소값을, 골짜기진입형에서 최대값을 보였다. 상부 훼손면적의 경우, 경사면직교형, 능선평행형, 경사면경사교차형, 경사면평행형, 골짜기진입형 순으로 나타났다. 전체 훼손면적은 경사면직교형, 능선평행형, 경사면경사교차형, 경사면평행형, 골짜기진입형 순으로 나타났다.

골짜기진입형의 경우 훼손면적이 가장 높았는데, 단순히 지형적 측면에서 바라봤을 때 훼손면적이 상대적으로 적을 것으로 판단되었으나 실제 조성결과에서는 훼손면적이 가장 많게 나타나고 있어 지형적 개념과는 달리, 실제 공사에 있어 퇴적토양의 깊이나 지질의 안정성 측면에서 다른 지형과 현격히 다르다고 판단할 수 있다. 훼손면적으로 살펴봤을 때, 지형적으로 산림훼손을 줄이는데 긍정적인 것으로

Table 2. Deforestation area of each tunnel entrance type

Type*	Sample No.	Ave. of Deforestation Area(m ²)	Standard Dev.(m ²)	Standard Err.(m ²)	Min.(m ²)	Max.(m ²)	
Deforestation of tunnel entrance	A	82	5,168.4	2,455.8	271.2	313	13,297
	B	81	7,477.8	2,610.1	290.0	1,745	14,842
	C	57	10,188.7	3,347.8	443.4	3,723	25,349
	D	25	6,998.7	2,522.3	504.4	2,868	12,341
	E	55	10,375.4	4,453.0	600.4	4,921	24,258
	Total	300	7,852.9	3,732.8	215.5	313	25,349
Deforestation of tunnel upper	A	82	3,168.9	2,291.6	253.1	169	15,133
	B	81	4,295.8	2,324.9	258.3	268	12,014
	C	57	6,038.7	3,301.6	437.3	1,196	15,588
	D	25	3,373.1	2,005.8	401.2	916	10,217
	E	55	5,207.5	3,438.6	463.7	86	14,127
	Total	300	4,409.2	2,916.7	168.4	86	15,588
Total deforestation Area	A	82	8,337.3	4,106.9	453.5	482	28,430
	B	81	11,773.6	3,985.1	442.8	4,778	24,225
	C	57	16,227.4	4,902.6	649.4	7,552	28,466
	D	25	10,371.8	3,188.1	637.6	4,528	18,646
	E	55	15,582.8	6,231.6	840.3	7,726	33,219
	Total	300	12,262.1	5,546.4	320.2	482	33,219

*A: Orthogonal Slope, B: Cross Slope, C: Entering Valley, D: Parallel Ridge, E: Parallel Slope

판단되었던 골짜기진입형이 산림훼손이 오히려 큰 것으로 나타남을 확인할 수 있었다. 골짜기진입형의 경우 산림훼손 면적이 전반적으로 넓음에도 불구하고 적지 않은 곳에서 시공이 이루어진 것을 확인할 수 있었는데, 이는 상대적으로 터널 길이를 최소로 할 수 있는 지점이라는 데에서 고려된 것으로 판단된다.

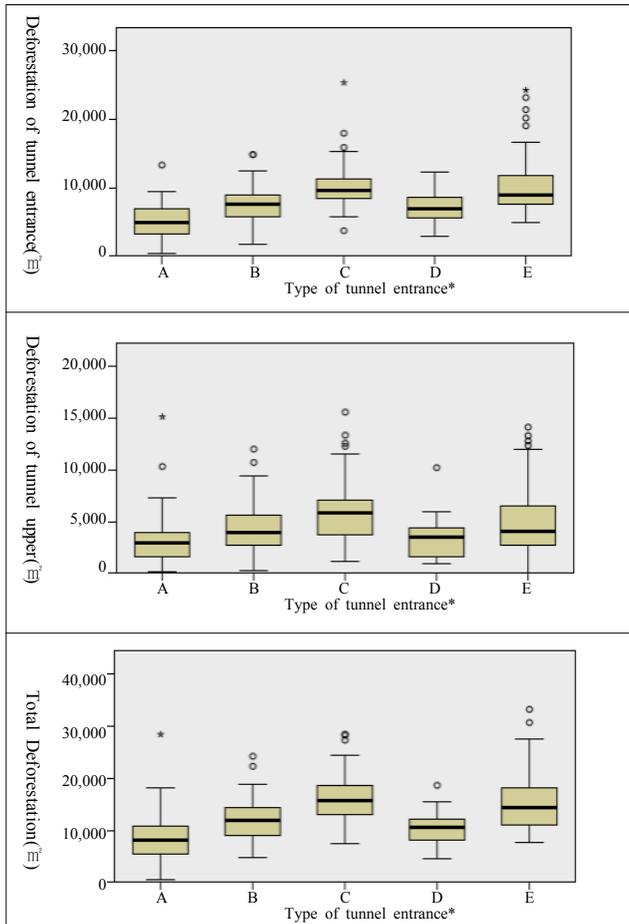
전체적으로 터널상부보다 주변 진입부의 훼손면적이 약 2배 정도 큰 것으로 조사되었으며, 대부분 유형이 상부와 진입부의 훼손면적비율이 유사하였다. 이러한 경향은 터널 조성 시 기존 산림의 경계를 터널의 시작점으로 설계가 이루어지지 않고, 안정된 암반층이 나타날 때 까지 산림토양을 굴취하는 방식에 의해 공사가 진행되는 데에서 나타난다고 볼 수 있다.

두 훼손면적을 합한 전체 훼손면적이 가장 적은 경사면지교형은 평균 약 8,300m²의 산림훼손이 일어나는 반면 가장 많은 훼손면적을 보이는 골짜기진입형은 약 16,200m²으로 경사면지교형에 비해 훼손면적이 2배 정도 많은 것으로 확인되었다. 본 조사의 훼손면적은 터널의 한쪽 면만을 대상으로 하기 때문에 터널진입부의 적정한 선정으로 터널 1개소당 최대 1.5ha 이상의 산림훼손을 억제하는 효과를 기대할 수 있다.

2. 터널 진입유형별 훼손면적 차이 분석

각 진입유형별 훼손지 면적을 비교하기 위해 각 진입유형의 터널 진입부, 터널 상부, 전체로 구분하여 훼손지 면적에 대한 분산분석(ANOVA)을 실시하기 위해 각 집단의 데이터 등분산성을 검정하였다. Levene의 등분산성 검정결과 진입부 훼손면적과 상부훼손면적, 전체 훼손면적 모두 유의도 0.01에서 등분산성이 충족되지 않음을 확인하였다. 터널 진입부 조성의 경우 설계단계에서 정밀 지질특성을 확인하기 어려운 관계로 일반적으로 암반이 노출될 때까지 토양층을 제거해 나가면서 터널 위치를 조정하게 된다. 이에 터널 조성에 따른 구체적 훼손면적은 단편적으로 터널이 진입하는 위치만이 아닌 해당 지역의 토양 및 암반 특성, 지형의 경사도, 도로 폭 등이 복합적으로 결합하여 이루어지는 만큼 분산이 동질하지는 않은 것으로 추정되었다. 등분산성의 미충족으로 인해 이에 따른 유형별 차이에 대한 통계적 검증을 위해 비모수검정법인 크루스칼-왈리스(Kruskall-Wallis) 검정을 진행하였다(Figure 1).

비모수검정의 특성상 사후검정이 진행되지는 않으나 유형별로 살펴보면 경사면평행형과 골짜기진입형의 훼손면적이 진입부 및 상부, 전체 훼손면적 모두에서 여타 유형에 비해 높게 확인되었으며 상대적으로 경사면지교형과 능선평행형의 훼손면적이 낮게 나타남을 확인할 수 있었다(Figure 1). 특히 능선평행형의 경우 상대적으로 표준편차가 작고 모든 값들이 오차범위 내에 분포하고 있어 예외적 현상이 발생하는 경우가 나타나지 않고 있었다.



*A: Orthogonal Slope, B: Cross Slope, C: Entering Valley, D: Parallel Ridge, E: Parallel Slope

Figure 1. Kruskal-Wallis test between the deforestation area and each tunnel entrance type

각 진입 유형은 동일유형 내에서도 훼손 면적의 편차가 비교적 높게 나타났으며 능선평행형을 제외하면 모두 오차범위 밖의 훼손면적을 가진 샘플들이 존재하였다. 이는 진입 유형 외에 터널 조성의 안정성 측면에서 기본적 문제인 해당 지역의 지반특성이 영향을 준 것으로 판단되며, 추가적으로 훼손 면적에 영향을 줄 수 있는 도로 폭, 중앙분리대 넓이, 갭문 상부 사면의 안식각 확보를 위한 성토사면 조성 등 여러 요인이 작용하기 때문이다. 그럼에도 본 연구에서 제시하는 결과가 실제 시공되어 운영 중에 있는 터널을 대상으로 특정 지역에 국한되지 않고 다양한 지역에서 다수의 표본으로 훼손 면적을 산출한 것으로 진입 유형별 훼손면적의 차이 또한 독립적으로 터널조성 시 훼손면적의 차이를 가져오고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 도로설계 시 모든 지역에 대한 지반특성을 면밀히 조사하는 것이 불가능한 상황에서 현실적으로 보다 효과적인 터널 진입부 위치선정

을 위한 실증적 자료로서 가치가 있는 것으로 판단되었다.

산림의 진입과 도로노선의 방향성을 살펴보면, 지형의 형태적 특성상 경사면직교형을 제외하고 능선평행형의 노선 방향은 나머지 경사면경사교차형, 경사면평행형, 골짜기진입형과 모두 유사한 방향성을 지닌다. 이에 부분적인 노선의 조정을 통해 경사면경사교차형, 경사면평행형, 골짜기진입형의 터널입출구부는 능선평행형이 되도록 하는 것이 산림훼손면적을 평균적으로 약 1/3정도 줄일 수 있는 바람직한 계획방향으로 확인되었다.

3. 식생도입을 통한 복원가능성

산림식생 훼손지에 대한 경관녹지 및 생태적 연결녹지의 조성가능성은 일반적으로 훼손지 면적이 넓을수록 높아지는 경향이 있어 훼손지 면적과의 통계적 유의성과 함께 진입형태별 차이를 살펴보았다.

훼손면적에 대한 등분산성이 충족되지 않으므로 훼손면적에 따른 식생도입 가능성에 대한 비모수검정(Kruskal-Wallis)을 실시하였는데(Figure 2), 일반적인 경향과는 달리 진입부와 전체 훼손면적의 크기에 따른 식생도입 가능성의 통계적 차이는 없는 것으로 나타났다. 다만, 터널 상부의 훼손지의 경우 신뢰도 99% 수준에서 식생도입 가능성에 대한 유의성이 인정되었는데 훼손면적이 커질수록 도입가능성은 높아지는 것으로 확인되었다. 터널 상부훼손지의 경우 터널공사 특성상 일반적으로 지반이 안정된 암반의 경우 훼손면적을 상대적으로 적게 할 수 있으며 암반이 나타나지 않거나 안정된 지반이 아닐 경우 경사각을 완만하게 하여 상부면적이 확대되는 경향이 뚜렷하여 이러한 특성을 보여주는 것으로 판단된다. 달리 말하면 암반이 노출되는 안정된 기반의 터널조성지역의 경우 암반노출위치까지 기존 토양을 훼손하나 상대적으로 상부의 토양재성토가 이루어지지 않음을 반증하는 것이다.

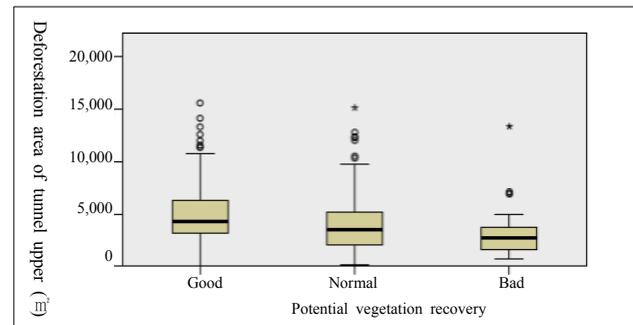
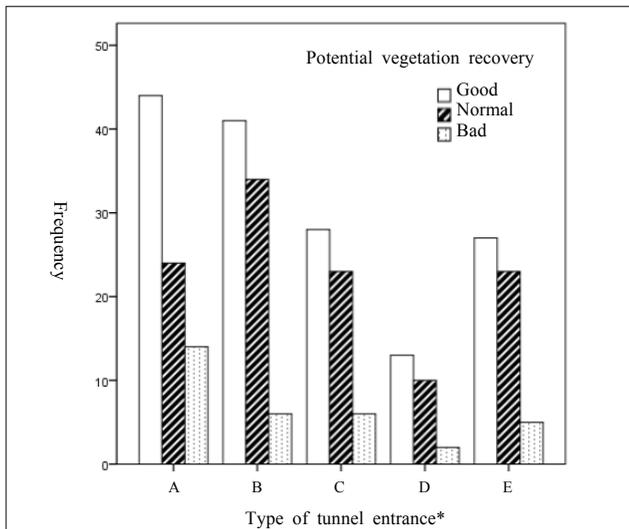


Figure 2. Kruskal-Wallis test between the potential vegetation recovery and deforestation area of tunnel upper

진입유형별 복원가능성의 차이가 나타나는지를 살펴보고자 우선 각 집단의 데이터 등분산성을 검정하였다. Levene의 등분산성 검정결과 유의확률 0.162로 진입유형별 복원가능성은 집단 간 분산의 동질성이 인정되어 일원배치분산분석(ANOVA)를 실시하였다. 분산분석결과 F통계량이 0.123 ($p=0.974$)으로 통계적 유의성이 인정되지 않아 터널진입유형과 상부 훼손지의 복원가능성은 관계가 없다고 볼 수 있었다.

이를 기반으로 했을 때 터널조성 시 경관적 측면을 위해서는 식생복원 가능성이 상대적으로 낮은 터널 상부공간의 훼손이 최소화될 수 있는 입지선정과 공법의 선택이 필요한 것으로 판단된다.



*A: Orthogonal Slope, B: Cross Slope, C: Entering Valley, D: Parallel Ridge, E: Parallel Slope

Figure 3. Potential vegetation recovery frequency of each tunnel entrance type

4. 종합고찰

우리나라의 현 터널설계기준(KTA, 2007)에서는 터널입출구부 위치 선정 시 가급적 경사면직교형을 권고하고 있으며, 골짜기진입형과 경사면평행형은 가급적 피하고 부득이한 경우 편토압에 대한 검토와 이에 대한 대책을 수립하여야 한다고 명시되어 있다. 여기서 나타나는 문제는, 일반적인 지형특성상 경사면직교형과 여타의 도로노선 방향은 대부분 일치하지 않아 골짜기진입형이나 경사면평행형의 터널위치를 권고하는 경사면직교형으로 조정하기 위해서는 계획노선의 대폭적인 변경이 필요하다는 문제를 안고 있다.

본 연구에서는 능선평행형의 터널진입이 경사면직교형과 함께 다른 유형보다 훼손면적이 매우 적음을 확인하였다. 능선평행형의 경우 지양해야 하는 터널진출입구 위치와 도로노선의 방향이 유사하므로 골짜기진입형이나 경사면평행형의 위치에 노선이 계획될 경우, 이를 인접 능선부로 조정하여 능선평행형으로의 조정을 통해 산림면적 훼손을 대폭 줄일 수 있을 것으로 판단되었다. 실제 훼손면적이 적은 능선평행형의 조성위치는 상대적으로 훼손면적이 넓은 다른 유형에 비해 매우 적음을 확인할 수 있었는데, 향후 도로 계획 시 적극적인 조정이 필요한 것으로 판단되었다.

일반적으로 도로설계 시 가장 중요한 측면으로 부각되는 것이 도로의 안전성을 전제로 지형의 경사도와 경계성을 우선하며(Han et al., 1999) 산림훼손과 경관적 측면은 상대적으로 간과되어 왔다. 터널에서도 마찬가지로 지금까지 기존 국내 터널 시공 시 입출구부는 계획된 공간의 조정단계에서의 조정보다는 시공 시 안전성을 고려하여 많은 환경훼손을 감수하며 대규모 절토를 수행하여 왔다(Han and Park, 2002). 즉 산림훼손 억제를 목적으로 사전계획 시 터널 진출입부 조정은 충분히 고려하지 않았다. 본 연구에서는 도로 계획노선의 대폭적인 수정 없이도 현재의 노선방향에서 입출구부의 부분적 조정을 진행할 경우 산림훼손면적을 대폭 줄일 수 있다는 결과를 확인하였다. 향후 이에 대한 고려가 도로설계 시 반영된다면 도로건설에 따른 산림훼손 영향을 완화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

Baek, Y., O.I. Kwon and H.B. Koo (2004) Study on Development of Data Base system and Pattern Analysis of Tunnel Portal Slope in Korea. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 6(3): 213-225. (in Korean with English abstract)

Cho, G.C. (2012) Tunnel Excavation Methods Suitable for Reduction of Construction Period. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 60(11): 30-39. (in Korean with English abstract)

Han, C.B., Y.K. Chang, I.J. Kang (1999) Selecting optimal route using Geo-Spatial Information System in road design. Journal of Urban Studies, 8: 83-92. (in Korean with English abstract)

Han, K.M. and I.J. Park (2002) An Environmentally Friendly Tunnel Construction Method at Low Overburden. Tunnelling Technology, 4(3): 207-216. (in Korean with English abstract)

Harker, D., G.Libby, K. Harker, S. Evans and M. Evans (1999) Landscape restoration handbook. 2nd edition, Lewis Publications.

Jeon, G.S.(2013) A Study on the Plant Succession Structural Analysis in Expressway Slope. J. Korean Env. Res. & Tech.,

- 16(4): 41-52. (in Korean with English abstract)
- Jeong, H.G. and Y.S. Seo (2013) Slope stability analysis and landslide hazard assessment in tunnel portal area. *J. of Korean Tunn. & Undergr. Sp. Assoc.*, 15(4): 397-400. (in Korean with English abstract)
- Kim, M.R., S.R. Kim, J.H. Shin and H.C. Sung (2014) A Study on the Standard of Cutting and Filling Height to Minimize Topographical Damage in Road Side Construction. *J. KILA*, 42(1): 115-122. (in Korean with English abstract)
- Kim, N.C., H.K. Song, G.S. Park, G.S. Jeon, S.H. Lee and B.J. Lee (2007) An Analytical Study on the Revegetation Methods for Highway Slopes. *J. Korean Env. Res. & Tech.*, 10(2): 1-15. (in Korean with English abstract)
- KTA(2007) Tunnel Design Standards. Korean Tunnelling Association, 81-84pp. (in Korean)
- Lee, J.H., H.J. Kwon, G.S. Jeon, N.C. Kim, G.S. Park and H.K. Song (2008) Native Plants Selection for Ecological Replantation in Roadside Cutting-slope of the Baekdu Range. *J. Korean Env. Res. & Tech.*, 11(4): 67-74. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.C. (2011) Environmental Assessment for an Improvement of Ecology and Landscape on Highway Tunnel gates around area. MS Thesis, Pusan National Univ., Korea, 99pp. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.C., S.H. Choi, D.P. Kim, J.T. Song and H.K. Oh (2012) A Study on the Potential Vegetation Recovery according to the Environment and Type of Tunnel Entrance and Exit. *J. KILA*, 40(6): 161-172. (in Korean with English abstract)
- MLIT (2015) MOLIT Statistics System. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. stat.molit.go.kr
- MLTM and ME (2010) Environmentally friendly Road Construction Guideline. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs and Ministry of Environment, 120pp. (in Korean)
- MLTM (2009) A Guideline for Design and Construction of Roadside Slope Revegetation. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 143pp. (in Korean)
- Okano Shigetoshi (2005) Review on the Construction of the Portal Slope in Korea. KGES Conference(5th), 3-8. (in Korean)
- Seol, S.H., C.S. So and D.H. Kim (2002) The Installation Method of Eco-friendly Tunnel Portal with Minimize Cut. *Korean Tunnelling Association*, 4(2): 32-44pp. (in Korean with English abstract)
- Son, W.P. (2010) Theory of Road Landscape Plan. Publishing of Banseok Tech., 124pp. (in Korean)
- Song, H.K., G.S. Jeon, N.C. Kim, G.S. Park, H.J. Kwon and J.H. Lee (2007) Selection of Replantation Species in Roadside Cutting-slope Area of the Baekdu Range. *J. Korean Env. Res. & Tech.*, 10(3): 52-59. (in Korean with English abstract)
- Woo, B.M., K.K. Oh, B.Y. Kim, Y.C. Cho and G.S. Jeon (1998) Analysis of Growth Characteristics of the Introduced Species Revegetated on the Highway Cut-slopes. *J.KILA*, 26(1): 12-20. (in Korean with English abstract)
- You, B.O., G.S. Jeon, J.W. Shim and H.I. Jang (2009) Application on Environment-friendly Vegetation Countermeasures in Expressway. Korean Geo-Environmental Conference 2009, 58-69. (in Korean)