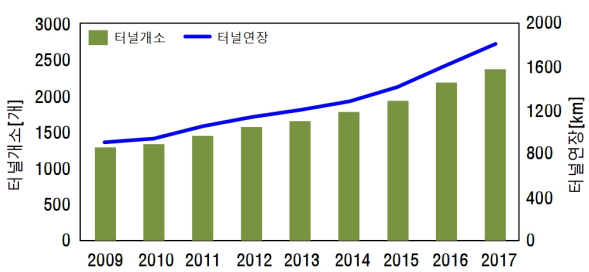
3차원 태양 시뮬레이션 기법을 활용한 터널 출구부 직광위험 분석 및 해결방안

홍기혁
(주)비엔텍아이엔씨
엔지니어링사업부

1. 서 론

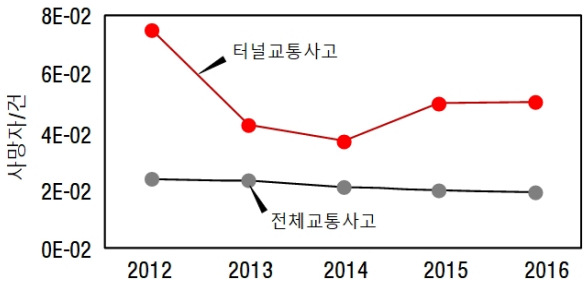
2015년 산림청 통계에 따르면 우리나라는 전국토 10,029.5천ha중 6,335천ha(63.2%)가 산지로 형성되어 있으며 국토지리정보원 통계조사결과 산맥이 27개, 산 4,609개로 지형적으로 산림의 면적이 높은 지형적 특성을 갖고 있다.



〈그림 1〉 터널현황(개소, 연장)

이러한 국내의 지형적 특성으로 도로의 계획과 건설에 많은 비용과 어려움이 발생하게 되어 그에 따른 대안으로 사회적 비용 및 건설시간의 단축, 친환경적 도로건설이 가능한 터널의 계획이 증가되고 있다. 국내 통계자료에 따르면 2017년 기준 터널은 2,382개소(총연장 1,811.1km)로 최근 8년간 약 8.03%의 연간 증가율로 터널건설이 지속적으로 증가되고 있는 추세이다.

터널은 구조적으로 반밀폐적인 특성을 갖으며 운전자는 터널통과 시 일반도로와 다른 시각적 환경에 노출되게 되며 터널 외부의 도로환경에 대한 정보를 터널 출구부에 도달해야 알 수 있는 구조적인 특징을 갖게 된다. 주행환경이 일반도로와 급진적으로 변화되는 터널 입출구부의 환경적인 특성은 운전자의 주행안전성에 영향을 미치기 때문에 터널 입출구부에서의 잠재적인 사고의 위험성이 높아지게 된다.



(a) 사고당 사망자 비율

(b) 양지터널 출구부 직광영향 발생사례

〈그림 2〉 터널 사망자 비율 및 직광영향 사례

일반적으로 터널 출구부에서 발생되는 주행위험성은 터널내부와 외부환경의 휘도 차에 의해 발생되는 위험성으로 알려져 있으며 기존 많은 연구들이 터널 외부 휘도 환경과 터널 조명과의 상관관계에 대한 연구들이 많이 수행되어 왔다. 그러나 터널 출구부에서는 외부환경과의 휘도 차에 의한 위험성뿐만 아니라 터널 진출 시 태양광이 직접적으로 운전자의 시야가 들어오는 눈부심(직광)에 의한 위험성이 존재한다.

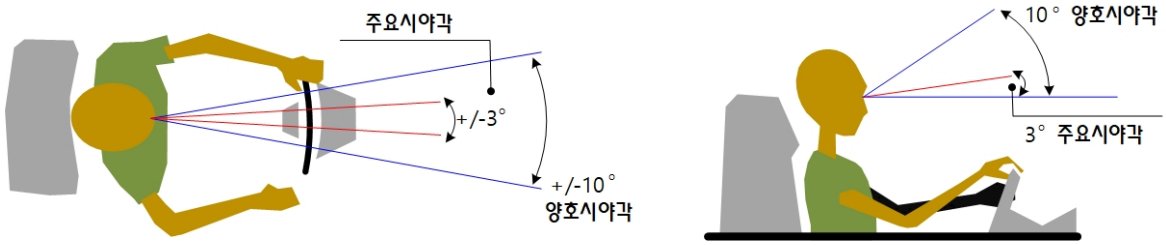
터널 출구부에서 태양광이 직접적으로 운전자의 시야에 들어오는 경우 운전자는 순간적으로 주변환경에 대한 정보습득이 불가능하고 차량조작에 어려움을 느끼게 되어 사고의 발생위험이 커지게 되며, 실제 터널 진출부에서 발생되는 70%의 교통사고가 직광이 발생되는 터널에서 발생(교통처-1674, 2012.4.17)하는 것으로 조사되었다. 국내 교통사고 통계 분석결과 터널에서의 사망자 발생비율이 전체 교통사고 사망자 발생비율보다 2.3배 이상으로 분석되어 터널에서 발생되는 교통사고의 경우 대형사고 발생 가능성이 높은 것으로 나타났다.

특히, 고속도로 터널의 경우 차량 주행속도가 일반도로보다 높게 형성되어 터널진출 시 발생되는 직광의 위험은 순간적으로 운전자의 시야확보를 어렵게 만들어 운전시야 불확보, 위험상황 인지 불가에 따른 대형사고의 위험이 일반도로보다 크게 나타날 수 있다.

본 고에서는 국내 고속도로 터널 설계 시 직광위험 분석 및 안전대책수립 사례를 중심으로 빛환경 시뮬레이션 기법 활용을 통해 터널 출구부 직광위험 분석 방법 및 해결방안을 정리하였다.

2. 직광의 발생원리 및 시야각 특성

운전자가 터널 진출 시 발생되는 직광에 의한 눈부심 현상은 태양광이 운전자의 시야각에 직접적으로 들어와 운전자가 순간적으로 주행환경에 대한 정보의 단절에 의해 차량 조작에 있어 어려움을 느끼는 현상을 의미한다. 주간에는 운전자가 항상 태양광에 노출되게 되며 절기별, 시간별 태양궤적 특성에 따라 여러 방향에서 운전자에게 영향을 줄 수가 있다. 하지만 모든 위치에서의 태양광이 운전자의 주행에 문제를 일으키는 것은 아니며, 운전자의 시야각과 태양광의 상대적 위치에 따라 영향을 주게 된다. 그러므로 태양광이 주행에 영향을 미칠 수 있는 입사각을 선정하고 그에 따라 분석을 수행할 필요가 있다. 기존 연구결과에 따르면 운전자에게 가장 중요한 주요시계는 운전자의 시야 중심선을 기준으로 양방향 3°이며 신호등이나 교통표지 등을 인식하는데 필요한 시계는 운전자의 시야 중심선을 기준으로 양방향 10°로 분석되었다. 주행 중 신호등과 교통표지 등을 인식하는데 사용되는 중심선을 기준으로 양방향 10°가 확보되지 않으며 차량의 조작에 문제가 발생할 수 있기 때문에 터널 진출 시 직광영



(a) 평면 시야각 (b) 직각 시야각

〈그림 3〉 운전자 시야각

향이 발생할 수 있는 양방향 10°의 입사각을 기준으로 직광위험에 대한 분석이 수행되게 된다.

태양 입사각은 시간의 변화에 따라 궤적이 변화되며 터널 진출 시 운전자의 시야각 범위에 입사되는 태양광은 시간에 따라 지속적으로 변하기 때문에 특정 시간을 대표한 값으로는 터널 출구부의 태양광 입사각을 예측하는 것은 무리가 있다. 또한 터널 출구부의 선형적 특성에 따라 절기별로 직광에 의한 영향이 다르게 발생할 수 있기 때문에 터널 출구부의 직광위험을 분석하기 위해서는 절기별, 시간별 태양의 궤적과 도로 선형적 특성을 고려하여 복합적으로 예측하여 판단해야 한다.

3. 관련기준

국내의 경우 터널 진출부에서 발생되는 직광에 대한 위험에 대하여 최근 관심이 증대되고 있으며 직광발생에 따른 운전자의 안전성을 확보하기 위하여 최근 "터널 출구부 교통안전성 확보를 위한 직광영향 최소화 설계방안 검토 – 한국도로공사 설계처 2013.10"이 제안되었다. 터널 설계 시 직광분석에 대한 범위, 발생기준, 안전시설물의 설치방법에 대한 내용을 제시하여 설계단계에서 터널 출구부에서 직광발생으로 인한 사고를 예방할 수 있도록 관련기준을 제안하고 있다.

관련기준은 노선 선형 계획단계에서 직광영향을 검토하여 선형조정 방법을 통한 직광위험을 최소화 할 수 있는 선형설계를 우선 시행을 하도록 하고 있으며 터널 출구부 직광영향 검토에 대해 설계 체크리스트를 반영하여 직광위험 등급에 따라 직광차단시설, VMS 및 직광안내표지등을 설치하도록 하여 운전자의 안전성을 확보할 수 있도록 하였다.

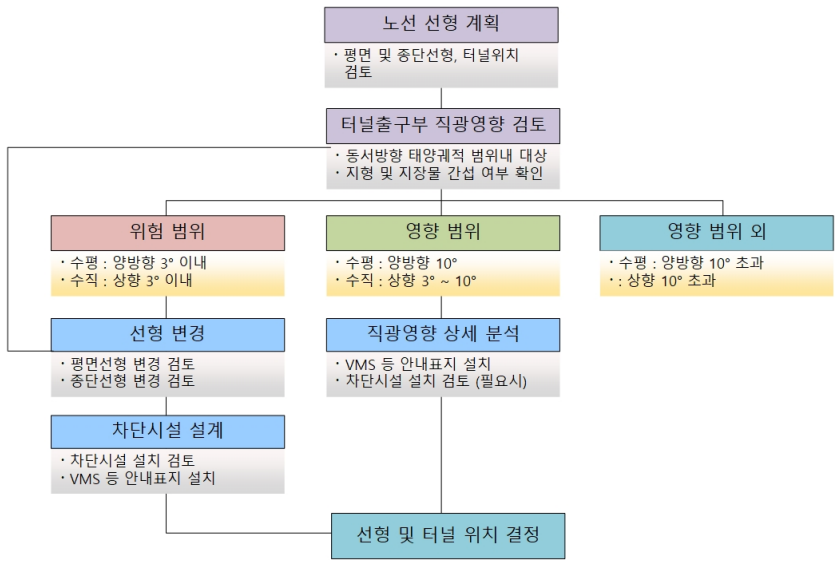
3.1 분석기준 및 방법

직광영향 검토 대상 터널은 터널 출구부의 방향이 동측 또는 서측을 기준으로 각 60° 범위로 형성된 터널을 대상으로 직광인지 각도를 직광위험, 직광영향, 그 외 범위 3개의 등급으로 구분하여 직광위험도를 분석하도록 제시하고 있다.

직광위험에 대한 검토는 노선 선형 계획에 따라 터널 출구부의 평면 및 종단 선형적 특성을 반영해야 하며 주변 지형 및 지장물 간섭 여부를 복합적으로 분석하도록 제시하고 있다. 터널 진출 시 직광위험이 발생하는 경우 차단시설 설치, VMS등 안내표지를 설치하도록 하고 있으며 직광영향 발생 시 VMS등 안내표지 설치 및 필요한 경우 차단시설을 설치하도록 제안하고 있다.

〈표 1〉 직광위험 등급

구분	직광 위험범위	직광 영향범위	그 외 범위
수직	상향 3° 이내	상향 3°~10°	상향 10° 초과
수평	양측 3° 이내	양측 3°~10°	양측 10° 초과



〈그림 4〉 직광분석 흐름도

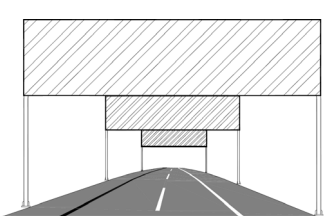
3.2 안전시설물

터널 출구부에 직광위험이 발생하는 경우 직광으로 발생할 수 있는 사고를 사전에 예방하기 위해 터널 진출부에 직광 차단시설을 설치하도록 제안하고 있으며 직광 차단시설 계획 시 직광 차단범위를 직광이 발생하는 터널 내부에서부터 도로 설계속도에 따른 조도 순응시간 3초 운행거리의 50% 이상을 차단할 수 있도록 하고 있다.

차단시설의 종류는 문형식 차단시설, 수목 식재, 방음벽 등이 가능하며 현장 여건을 감안하여 경제적인 차단시설을 선택하여 적용하거나 직광차단 효과 향상을 위해 차단시설을 혼합한 형태로 설치가 가능하다.

〈표 2〉 직광차단 거리

설계속도(km/hr)	120	100	80	60
조도순응거리	100m	83m	67m	50m
직광차단거리 (터널 외부)	50m	42m	34m	25m



(a) 문형식 차단시설

(b) 수목 식재

(c) 방음벽 등

〈그림 5〉 직광차단 시설

4. 국내 터널 진출부 직광위험 분석사례

4.1 분석대상 및 조건

분석대상인 00터널은 고속국도 제00호선 00~00간 건설공사에 계획된 터널로 인접 터널과 연속터널로 설계된 특징으로 터널을 연속적으로 통과하면서 운전자의 시환경이 빈번하게 변화되는 특성을 갖고 있으며 터널 종점부 출구부의 경우 동측으로부터 남측 방향으로 30°의 각도로 형성되어 있어 관련기준에 따라(동측 60° 이내 각도 범위) 직광위험 분석대상에 포함되었다.

직광분석은 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간의 기간을 설정하여 분석을 수행하였으며 시간별 태양궤적 변화특성에 대한 신뢰성 확보를 위해 매 10분간격으로 분석을 수행하였다.

4.2 분석모델

터널 진출 시 운전자의 시야각에 직접적으로 입사되는 직광은 태양고도가 상대적으로 낮은 일출 또는 일몰 시간에 많이 발생하게 된다. 또한, 태양궤적 변화는 작은 시간간격에 따라 태양의 평면각과 고도각이 변화되는 특징을 나타내 직광위험 분석 시 태양궤적 변화율 특성을 충분히 고려하기 위해서는 특정시간을 지정한 단순 계산법이 아닌 시간변화에 따른 방대한 정보 분석이 가능한 시뮬레이션 기법활용이 필수적이다.

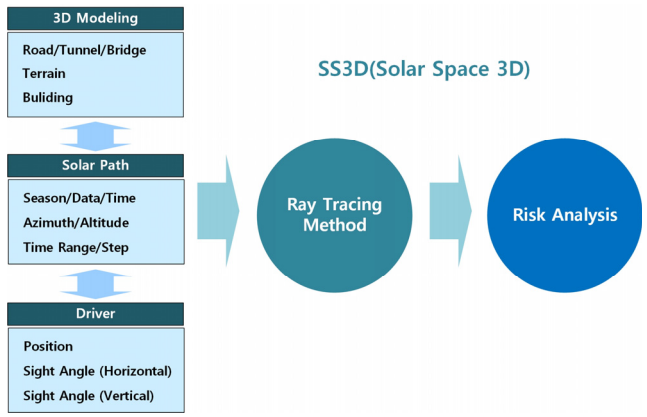
직광분석은 터널 입출구부의 형상특성과 주변의 지형 및 구조물 특성에 따라 태양광이 입사되거나 혹은 차폐되는 현상에 대한 신뢰성 있는 분석모델이 필요하다. 이러한 문제는 도로, 터널, 지형, 구조물등 3차원으로 구현된 형상위에 태양궤적을 시뮬레이션하여 분석 지점별로 변화되는 환경에 따라 각 시간별로 태양광을 추적하는 방법을 사용하는 것이 효과적이며 본 사례분석에서는 3차원 형상특성, 태양궤적 및 운전자 시야각을 복합적으로 수치 해석할 수 있는 SS3D(Solar Space 3D) 프로그램을 사용하였다.

SS3D 프로그램은 국내기술로 개발된 시뮬레이션 프로그램으로 국내의 어떤 경위도 좌표 지점에서도 3차원으로 모델링된 지형정보 데이터와 천문학 분야에서 사용되는 정확한 태양력 알고리즘을 이용하여 시간과 공간에 제한

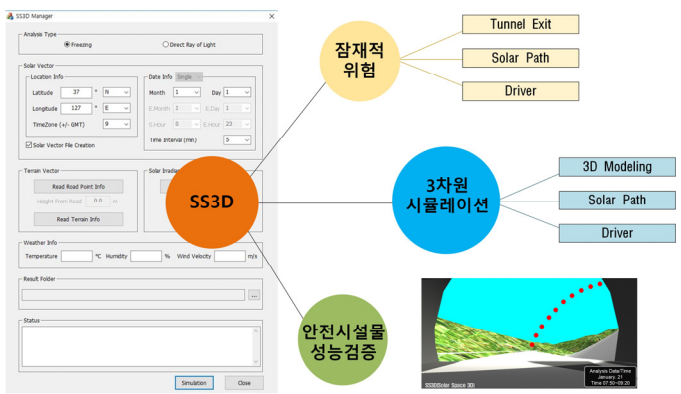
〈그림 6〉 터널현황

〈표 3〉 분석조건

구분	내용	비고
분석대상	00터널	해석일 일출~일몰시간대 분석
분석기간	1월 1일~12월 31일	
분석간격	10분 간격	



〈그림 7〉 SS3D 프로그램 개요



〈그림 8〉 SS3D 단계별 직광위험 분석 흐름도

받지 않고 도로 및 터널을 주행하는 운전자의 직광영향에 대한 시뮬레이션이 가능한 장점이 있다.

SS3D의 직광분석 모델은 잠재적 위험분석, 3차원 시뮬레이션을 통한 상세분석, 안전시설물 성능검증 분석이 가능한 모델로 도로 기하구조 및 운전자 시야 특성에 따른 잠재적 위험을 분석한후 결과 데이터를 활용하여 3차원 시뮬레이션을 통한 상세 직광분석 및 안전대책에 대한 효과검증 분석을 수행할 수 있다.

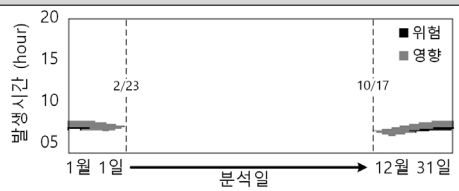
본 고에서는 국내 도로터널 설계 시 직광위험 분석 및 안전대책수립 사례를 중심으로 SS3D 직광분석 모델을 활용하여 터널 출구부 직광위험 분석결과를 정리하였다.

4.3 분석결과

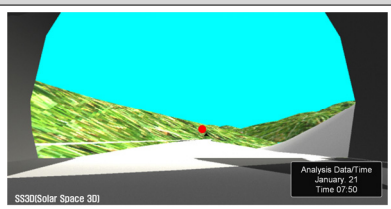
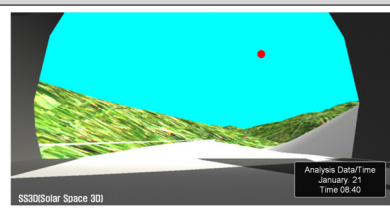
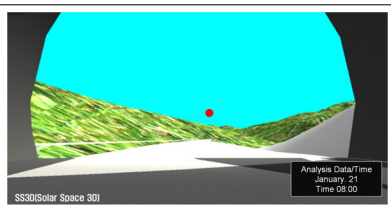
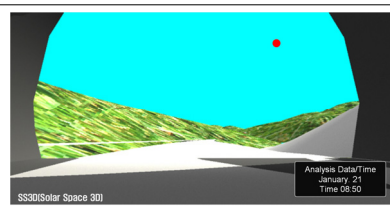
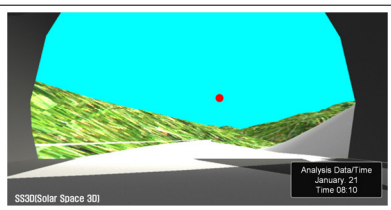
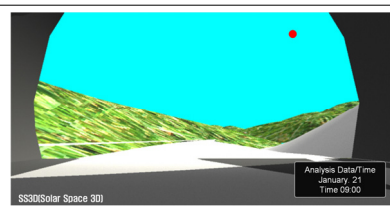
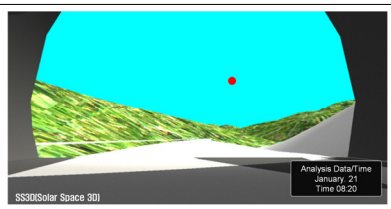
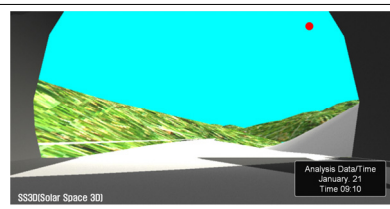
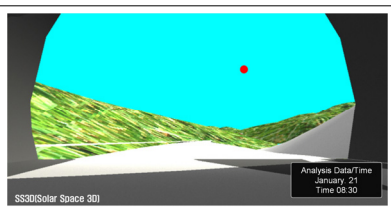
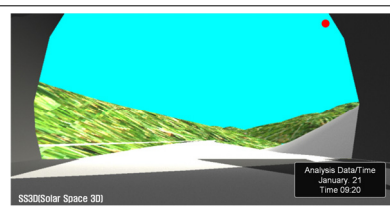
분석대상 터널에서 운전자가 진출하는 경우 연간 태양궤적 변화에 따른 태양 입사각을 분석한 결과 1월1일~2월23일, 10월17일~12월31일 범위에서 태양궤적에 따른 잠재적인 직광위험이 발생할 것으로 예측되었다.

잠재적 직광위험이 발생한 기간에 대하여 3차원 시뮬레이션을 통한 상세 직광위험 분석을 수행하였으며 각 분석 시간별 운전자 시야각을 기준으로 태양광 입사각에 대한 수치적 결과를 도출하였다.

〈표 4〉 잠재적 위험 분석결과

구분	잠재적 위험결과	
	발생기간	1월1일~2월23일 10월17일~12월31일
	발생시간	일출시간

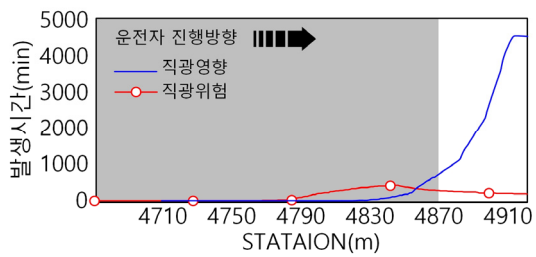
〈표 5〉 상세 직광위험 분석결과

1월 21일 : 태양위치 렌더링 결과	
	
	
	
	
	

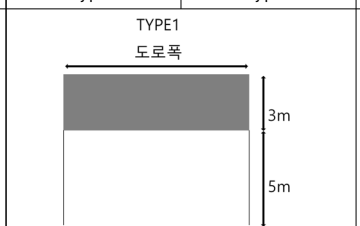
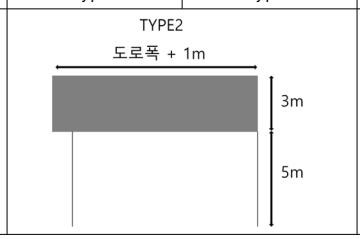
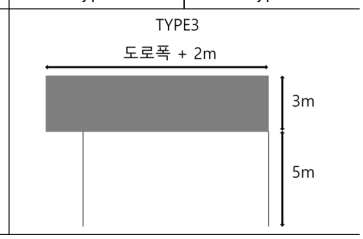
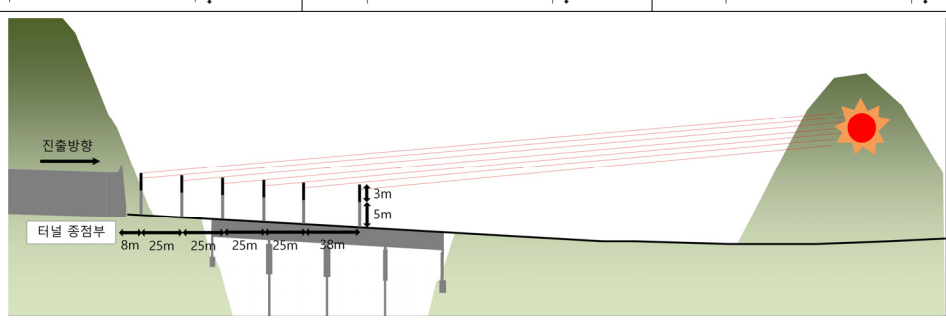
연간 태양궤적 변화에 따른 태양광 입사각 분석을 통해 터널 진출 시 직광위험 및 영향범위가 발생하는 시간을 연간누적 분석한 결과 터널 진출 시 연간 직광위험이 420분 발생하는 것으로 분석되었다.

분석대상 터널 진출 시 직광위험 및 직광영향이 발생하는 것으로 분석되어 운전자의 안전성을 확보하기 위하여 VMS 및 직광 차단시설을 계획하였다. VMS는 터널 중앙부에 설치하여 운전자에게 위험정보를 제공하였다. 직광차단 시설은 관련기준을 준용하여 터널내부에서 외부 42m지점까지의 직광위험을 100% 차단할 수 있는 직광차단 시설을 3가지 Type으로 6개소를 계획하였으며 차단시설 설치에 따른 시뮬레이션 분석을 통해 성능에 대한 효과를 검증하여 터널 설계 시 경제적이고 효과적인 대책수립이 가능하였다.

〈표 6〉 연간 직광위험 분석결과

연간 직광위험 분석결과	연간 직광 발생시간 분석결과		
	직광영향	발생여부	O
		누적 발생시간	4480분
	직광위험	발생여부	O
		누적 발생시간	420분

〈표 7〉 직광차단시설 계획

구분	1	2	3	4	5	6
위치	8m	33m	58m	83m	108m	146m
크기	Type1	Type1	Type1	Type1	Type2	Type3
Type						
직광차단 개요						

5. 결론 및 제언

본 고에서는 국내 도로터널 설계 시 직광위험 분석 및 안전대책수립 사례를 중심으로 3차원 태양 시뮬레이션 기법 활용을 통해 터널 출구부 직광위험 분석 방안을 살펴보았다.

지형적인 특성으로 인하여 국내에 건설되고 있는 터널은 지속적으로 증가되고 있으며 터널증가에 따라 관련사고의 위험성도 비례적으로 증가하고 있는 것으로 분석되어 이에 대한 지속적인 관심과 안전대책에 대한 필요성이 증대되고 있다. 직광분석은 터널 및 주변환경 차폐특성과 절기별, 시간별 변화되는 태양궤적에 대한 특성을 반영하기 위해서는 3차원 시뮬레이션 기법을 통한 직광위험 분석이 필수적으로 판단되며 본문에서 인용한 분석사례와 같이 터널의 직광위험에 따른 안전시설물 계획에 대한 효과에 대한 분석도 신뢰성있는 결과를 도출할 수 있었다.

최근 국가적으로 안전에 대한 사회적 요구와 안전사고 예방에 대한 노력이 증대되는 추세에서 터널 계획 단계에서 다양한 안전성 예측모델 사용을 통해 사고의 예측과 예방을 위한 노력이 확대되었으면 하는 바이다.

참고문헌

1. 한국도로공사(2013), “터널 출구부 교통안정성 확보를 위한 직광영향 최소화 설계방안 검토”.
2. 한국도로공사(2013), “터널구간 교통안전성 향상방안”.
3. 이영규, 서용찬(2007), “일조가 터널에 미치는 영향에 대한 컴퓨터시뮬레이션 연구”, 한국환경분석학회지 제10권(제4호), pp. 203~208.
4. 김우성, 유동욱, 김제경, 소층섭, 이호석, 임태준(2007), “터널 입출구부 환경분석에 의한 도로안전시설물 설계”, KGS Spring National Conference 2007, pp. 1360~1365.
5. Rune Elvik, Truls Vaa “The Handbook of Road Safety Measures”, pp. 372-373.