

도로터널시설 위험평가 모델링을 위한 방법론 연구

조인우*, 한대용¹, 김승진¹, 윤종구²
¹(주)나다건설 기술연구소, ²(주)포슈이앤알

A Study on the Methodology modelling of Risk Assessment in Road Tunnels

Inuh Cho^{*}, Dae-yong Han¹, Seung-jin Kim¹, Jong-ku Yoon²

¹Research Institute, Nada Construction Inc.

²ForSUP E&R Inc.

요약 지하 수송에 대한 수요가 증가함에 따라 도로터널 사용자와 운영자는 다양한 원인에 의한 위험에 노출되어 있으며, 주요 원인은 각각 사고 이벤트가 될 수 있는 교통상황이다. QRA(정량적 위험평가)의 중요성은 도로터널의 안전성을 정량화 하고, 다수의 이해관계자들의 관점(용량, 신뢰성, 가용성, 유지보수 및 안전)에서의 요구조건에 밸런스를 유지하려는 의도에서 커지기 시작했다. 위험평가에 사용되는 고전적 방법은 ETA, FTA이지만, 변수의 다양함과 상호관계를 반영하지 못한다는 이유에서 이 방법들은 상대적으로 단순한 경우에만 적용할 수 있다. 특정위험평가에 필요한 객체, 이벤트, 결과 및 가정, 경계 조건 등의 총체는 도로 터널시설 위험평가를 위해 필수적인 내용으로 관찰되어야 하는 시스템을 만들고, 정보, 데이터, 모델 등 관련 항목들이 그 시스템을 서술하게 된다. 시스템은 위험모델에 기반한 계층적 지표들을 사용하여 모델링되고 분석되며, 시스템의 모든 가능한 구성은 지표의 적절한 선택을 통하여 표현될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 일반터널에서뿐만 아니라 복층터널 같은 복합적인 지하시스템 변수들간의 상호의존성을 고려하여 정량화할 수 있는 베이지안 네트워크를 근거로 한 정량적 위험평가방법을 소개한다.

Abstract The demand for subsurface transport is increasing. The users and the operators of road tunnels are exposed to risks with different causes. One main cause, however, is the traffic situation in the event of accidents. The importance of a Quantified Risk Assessment is increasing to quantify the safety of road tunnels and to balance the requirements (capacity, reliability, availability, maintainability and safety) of various stakeholders. Although there are classical methods for risk assessments, such as ETA and FTA. These methods are used for relatively simple cases because it could not relevantly reflect the diversity and relationship of the parameters. Therefore, a quantitative risk assessment based on Bayesian Probabilistic Networks considering interdependence between the parameters of a complex underground system as a double deck tunnel is provided.

Keywords : Bayesian Probabilistic Networks, Quantitative Risk Assessment, Tunnel

1. 서론

터널은 인프라의 주요한 구성 요소로서 도시와 자연 환경 관점에서 신뢰할 수 있으며, 수송을 용이하게 하는 시설이다. 현재 운영중인 국내 교통터널은 대략

1,300km로 선형개량공사의 증가에 따라 도로터널의 장대화가 이루어지고 있으며, 해저터널, 병렬 터널, 복층 구조 등 다양한 유형의 터널적용 가능성이 도심지 교통 혼잡 완화와 홍수방재 등을 목적으로 고려되고 있다. 이를 통해 도심지 내 도로 공간활용과 교통 네트워크에 의

본 논문은 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Inuh Cho(Research Institute, Nada Construction)

Tel: +82-2-539-3857 email: inuh@hotmail.de

Received March 22, 2016

Accepted April 7, 2016

Revised April 6, 2016

Published April 30, 2016

한 접근성은 기대할 수 있지만 도로터널의 제한된 공간 구조적 특징과 터널 내 다른 설비 배치 등으로 이용자가 느끼는 차이점뿐만 아니라 위험요인 및 영향력이 다를 수 있기 때문에, 터널시설에서 안전, 특히 화재예방과 화재로부터 인명보호는 점점 더 중요해지고 있다.

터널에 대한 위험평가는 크게 세 가지 유형으로 구분할 수 있으며 각각의 방법과 특징, 대표적인 적용 모델은 Fig. 1. 에 제시되어 있다. 터널 위험평가(RA, Risk Assessment)는 비용효율성을 고려한 터널 안전에 대한 최적화를 목적으로 하며, 인간행동, 교통흐름, 건설 및 시스템(환기, 조명, 화재감지 등), 각종 사고에 대한 사항을 포함하는 매우 복잡한 과정이다. 예상되는 위험에 대한 빈도와 결과를 다루며, 안전예방대책 및 관리 프로세스를 포함한 넓은 영역의 시나리오를 고려한 위험 수준을 평가할 수 있는 장점이 있다.

Table 1.과 같이 다양한 정량적 위험평가(QRA, Quantitative Risk Assessment) 방법은 서로 다른 목적과 사고유형에 따라 조금씩 다르지만, 계획 및 절차는 유사하며, 터널 안전성에 영향을 미치는 모든 요소를 통합하여 다양한 요소에 대한 상대적 중요성을 평가하고, 평가의 불확실성을 정량화할 수 있다[1][2].

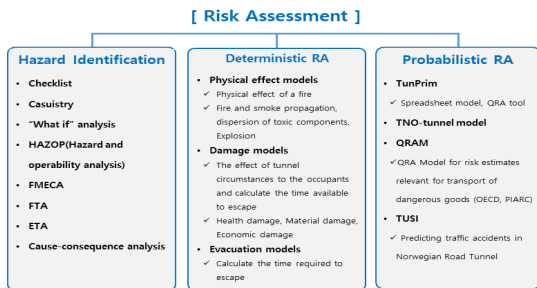


Fig. 1. Three main types of Risk Assessment of a tunnel

따라서 기존터널과는 다른 해저터널이나 복층구조 등에서 발생가능한 위험요인 도출과 이에 대한 상관관계 연구가 우선되어야 하며, 새로운 터널 계획에서 뿐만 아니라 터널 운영 관리 측면에서도 터널 안전문제에 대한 의사결정에 합리적이고 일관된 기준, 위험 평가 및 문서화, 투명한 의사소통을 가능하게 하는 틀을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 다양한 변수와 변수들 간의 복잡한 상호의존성을 고려할 수 있는 베이지안 네트워크를 근거로 한 정량적 위험평가방법을 소개하고자 한다.

2. Bayesian Probabilistic Networks

베이지안 네트워크는 위험 평가 기술의 현재 상태를 나타낸다. 베이지안 확률 네트워크(BPN)는 다른 소스로부터 얻은 정보를 처리 및 해석하고 일관된 모델을 확립하기 위해 개발되었으며(Pearl, 1985), 오늘날에는 이 방법의 유연성과 효율성 때문에 엔지니어링 분야, IT분야 등 광범위하게 사용되고 있다. 터널과 관련하여 2011년 스위스와 노르웨이 도로터널 위험분석에서 기존 터널의 교통사고 후 후속화재와 위험물 운반에 관련해서 적용되었다.

시스템은 위험모델에 기반한 계층적 지표들의 결과인 베이지안 확률 네트워크를 사용하여 모델링되고 분석될 수 있다. 이들은 간단한 사건수목을 완전하게 표현할 수 있을 뿐만 아니라 다른 지표 또는 결과 사이의 종속성을 고려할 수 있다. 즉 사고빈도와 결과 모델링에 고려되는 파라미터의 불확실성과 종속관계가 정량화되고 기술된다는 것이 주요 특징이라 할 수 있다.

2.1 시스템 표현

시스템의 모든 가능한 구성은 지표의 적절한 선택을 통하여 표현되며, 서로 다른 지표 사이의 인과관계를 고려하여 타당성을 확인하기 용이하고, 또한 복잡한 시스템의 그래픽 표현에 대해 효과적이다. 그러나 지표의 선택이 위험평가 및 과정에 중요한 역할을 하는 것은 분명하지만, 어떤 선택도 완전하지 않을 수 있어 유럽의회는 2004년 지표들의 최소목록을 제안한 바 있다[3].

Fig. 2.는 위험 지표들, 모델링된 이벤트와 상응하는 결과간의 인과 관계를 나타낸다. 모델의 종속성은 경험적 또는 물리적 모델뿐만 아니라 이용 가능한 데이터를 사용하여 설명될 수 있으며, 사용가능한 모든 정보를 하나의 모델에 고려하고 조합하는 높은 수준의 융통성을 보여준다[4].

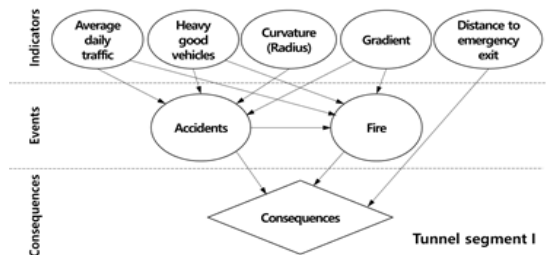


Fig. 2. Generic system representation using a BPN[4]

Table 1. Comparison of risk analysis schemes about probability risk assessment in tunnel[2]

	QRAM for transportation of dangerous good	QRA procedure for fire evacuation	Dutch QRA for road tunnels (TunPrim)	TUSI model (Norwegian Road Tunnels)	
1. Type of risk assessment method	Probabilistic risk analysis	Quantitative risk analysis for a unidirectional road tunnel	Probabilistic risk analysis	Frequency assessment method, based on statistics	
2. Objective	-To assess the risks for transport of dangerous goods -To evaluate for the consequences, frequencies of occurrences of possible scenarios	Used by decision-makers when deciding upon which resources should be spent on further safety installations for the tunnel	To establish safety objectives and criteria for underground infrastructure (TunPrim model in 2 bore tunnels)	To calculate the number of traffic incidents, accidents, and fires	
3. Type of accidents	Fire, Explosion, Leakage of aggressive and toxic materials	Fire, Explosion	Traffic disturbance without damage, Collisions, Fire, Explosion, Leakage of aggressive and toxic materials	Personal injury accidents, material damage only accidents, fires in private cars and HGV	
4. Methodology	4.1 Structure	a) Choice of a restricted number of dangerous goods b) Choice of representative accidental scenarios c) Identification of physical effects of those scenarios d) Evaluation of their physiological effects on road or rail users and on the local population e) Determination of yearly frequency of occurrence for each scenario	a) Definition of the tunnel b) Identification of representative accident scenarios c) Frequency determination d) Consequence assessment, including a basic queue model and evacuation analysis e) Risk mapping and interpretation f) Risk reduction, ranking system for risk reducing measures g) Tunnel Safety Management System	a) Identification of initial events b) Identification of accident scenarios in an event tree, each branch of the event tree is a scenario c) Frequency calculation for each scenario d) Consequence assessment for each scenario e) Calculation of the overall risk	Frequency assessment method
	4.2 Hazard Identification	Limited number of dangerous goods and a limited number of representative accidental scenarios	(Simple procedure) literature study (Complicated methods) HAZOP, What-if Analysis	Based on the Centre for Tunnel Safety in the Netherlands	N.A.
	4.3 Frequency calculation	The yearly frequency of occurrence for each scenario	Based on the Swedish VTI model, using simple event tree and statistic information	ETA	(Considered variables) Accident rate on equal road section, Speed limit, One or two way traffic, AADT (average Annual Daily Traffic), HGV, Length of the tunnel, Number of lanes in each direction, Geometry
	4.4 Consequence assessment	-Physical modelling of the effects -Effects on road/ rail users and local population -Frequency of scenarios	-Consequences of fire on humans by heat and direct radiant heat, carbon monoxide, carbon dioxide, and low oxygen -Evacuation possibilities : Evacuation time, Simple queue model	-Mechanical victims, deaths due to serious injuries, entrapment -Death due to fires, explosions, exposure to toxic substances. -Evacuation possibilities(free fleeing distance, traffic jam)	N.A.
	4.5 Risk calculation	-Social risk (F/N curve) -Individual risk=Expected value (number of fatalities per year)	-Frequency for each scenario -Consequence (number of casualties)	-Expected Value -Social Risk (F/N curve)	N.A.
5. Risk monitoring & evaluation	(France) evaluation of risk levels obtained for a given set of alternative routes (Austria) threshold values for tolerable and non-tolerable risk			Accident rate, number of accidents, number of car fires (private cars and HGV), incidents	
5.1 Risk-informed decision making	(France) ADR categorization			N.A.	
5.2 Risk acceptability	(France) The least risky route (Austria) Threshold values for tolerable and non tolerable risk	Discussed such as Dutch or Swiss Risk criteria	Defined for tunnel users	N.A.	

Fig. 3.에서는 터널 세그먼트가 몇몇 관련 위험지표들, 즉 평균연간교통량, 중량차 비율, 세그먼트 반경과 다음 비상구까지 최대 거리 등을 통해 표현되었다. 이러한 지표들은 위험 인과 영향인자 즉, 특정값에 직접 영향을 미칠 위험으로 간주된다. 정성적으로 터널 세그먼트 내의 높은 경사는 사고율의 증가 및 화재 빈도의 증가를 이끈다[3].

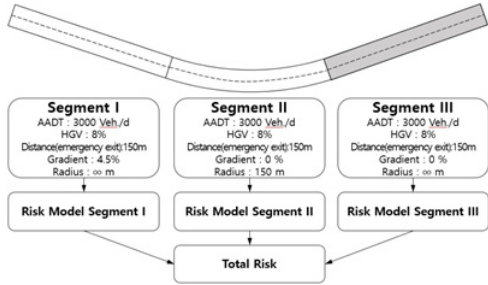


Fig. 3. Combining single segment models for the total risk

단일 세그먼트 모델은 전체터널을 모델링하기 위해 사용되며, 계층적 접근법(모델)이 사용된다. 전체터널은 처음에 균일한 세그먼트로 정의되어 모델링된다. 여기서 균일하다는 것의 의미는 모든 고려되는 지표들이 터널의 특정 세그먼트 내에서 동일한 값을 갖는다는 맥락으로 이 세그먼트들은 하나의 균일한 세그먼트로 간주될 수 있다. 세그먼트 길이가 현저하게 차이를 보이는 경우에 위험은 비율을 고려하여 모델링된다. 이 비율은 교통량과 구간길이를 고려한 절대값으로 처리된다.

Fig. 3.에서 터널은 위험 값이 일정한 3개의 균일한 세그먼트로 구성되며, 각 세그먼트에 대한 값의 정보는 각 세그먼트 모델에서 고려된다. 가장 높은 계층 레벨에서 각 세그먼트의 결과는 집계되고, 전체 위험이 계산된다.

2.2 베이지안 네트워크 구조

도로 터널에서 위험 평가를 위해 개발된 베이지안 네트워크 구조는 사고 위험 모델, 터널 화재에 대한 위험 모델, 사고에 대한 결과 모델, 터널 화재 결과의 4가지 논리적 파트로 나누어지고, 터널 내 모든 위험 계산은 베이지안 네트워크를 사용하여 수행된다. 이 네트워크는 위험 평가 틀의 핵심이라고 할 수 있으며, 위험 지표들의 많은 부분이 상호관련이 있고, 계산 효율을 최대화하기 위해 각 논리 파트들이 하나의 네트워크로 통합된다.

Fig. 4.에서 주황색, O로 표시된 관찰 지표는 위험을 모델링 하는데 사용되며, 분석을 위한 입력 파라미터(변수)이다. 노란색, I로 표시된 중간 노드는 위험 계산 시 관련 정보를 포함하며, 입력자의 입력내용에 종속되므로 사용자 입력에 따라 다르게 계산된다[3].

사고율, 부상율과 사망률 등의 베이지안 확률 네트워크 결과 지표들은 사고를 위해 정의되어 있고, 특정터널 세그먼트에서 현재 위험을 계산하기 위해 사용되는 정보를 포함한다. 터널 세그먼트에서 화재사고에 대한 결과 지표들, 터널 화재로 인한 사망자수와 터널 화재로 인한 부상자 수가 터널 세그먼트에서 화재사고에 고려된다.

터널 화재로 인한 사망자 및 부상자 수가 단일 터널 세그먼트에 한정되지 않는다는 것은 분명하다. 터널 사망자 수는 특정 터널 세그먼트 화재에서 터널 사망자와 부상자의 총 수를 의미한다. 이 가정은 두 개의 다른 터널 세그먼트에서 독립적이고 동시에 화재 사고의 확률이 무시할 수 있을 정도로 작다는 전제하에서 만들어졌으며 화재가 다른 터널세그먼트로 이동할 수 없다는 것을 의미하지는 않는다. 따라서 전체터널에서 화재사고 결과가 고려되는 것이다.

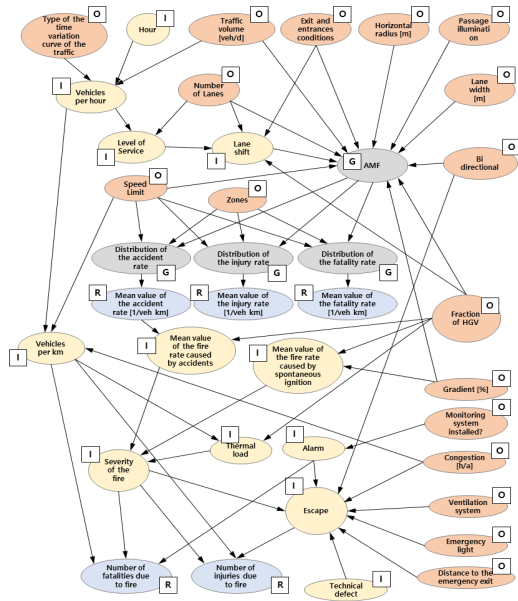


Fig. 4. Bayesian Probabilistic Network of the hazard model for vehicle accidents[3]

그리고 Fig. 4.에서 회색, G로 표시된 사고수정계수 (AMF, Accident Modification Factor), 사고율, 부상율

-, 사망률분포 지표들은 직접 관찰되지 않는 지표들이다.

사고수정계수와 표시되는 노드는 일반적으로 사고 예측 모델에 사용된다. 베이지안 확률 네트워크는 전체 네트워크의 인과 관계를 보고 이해하는 것을 돕고, 일부 지표는 다른 위치의 위험에 영향을 미친다. 하나 이상의 다른 노드들에 링크가 되어있는 모든 노드는 네트워크 내의 종속적 관계를 표현한다. 한가지 예는 지표 “양방향”이다. 양방향 교통상황은 사고빈도와 터널에서 환기제어 되는 화재의 경우 사람이 대피할 수 있는 확률에 영향을 미친다. 여기서 우리는 네트워크상 종속성을 확인할 수 있고, ETA같은 순수곱셈방식이 복잡한 시스템 모델링에 적합하지 않다는 것을 알 수 있다.

모든 지표들의 정보는 원칙상 가능하거나 특정 노력으로 얻을 수 있는 것으로 가정한다. 파라미터에 대한 정보가 없는 경우에도 베이지안 확률 네트워크에서 위험을 계산하는 것은 가능하다. 이 경우, 지표들의 사전확률분포가 계산에 고려된다. 그러나 실제 터널에 대한 적은 정보를 가지고 위험 분석을 하는 것이 어렵기 때문에 적어도 두 개의 지표는 즉, 터널길이와 각 방향 교통량은 계산을 위해 알고 있어야 한다. 터널(예 : 튜브 수)의 구성에 대한 정보가 없으면 위험 평가는 수행되지 못하며, 사전 확률 분포나 네트워크는 개발되는 국가에 따라 달라질 수 있다.

3. 베이지안 네트워크에 근거한 위험평가

3.1 사고수정계수

사고수정계수 컨셉은 일반적인 사고예측 방법의 하나로 일반적으로 통상사고율로부터 사고율의 편차를 설명하는데 사용되며, 도로인프라 변경 시 그 영향을 사고빈도에 모델링하기 위해 자주 사용된다. 사고수정계수는 하나 이상의 지표를 정규화한 함수로 여러 지표에 대해 다양한 방법론과 모델을 이용하여 개발되고 있으며, 하나 이상의 지표들이 일반적인 경우와 편차가 있을 때 예상할 수 있는 사고율의 퍼센티지 변화율을 반영한다.

도로 네트워크의 임의의 부분에서 예상되는 사고수는 이 도로 구간의 추가적인 정보를 사용할 수 없는 경우 백그라운드 비율을 사용하여 계산할 수 있다. 사고수정계수는 보다 구체적인 정보를 사용할 수 있는 경우 도로

구간의 백그라운드 비율의 예상변화를 통하여 정보를 제공한다.

3.2 백그라운드 사고율과 터널 영역

백그라운드 사고율은 전체 터널 네트워크에서 관찰될 수 있는 사고율이다. 그것은 모든 사고율의 평균값이다. 이 비율은 지표에 의존하지 않고, 사고수정계수는 다양한 영향 요소들을 고려하기 위해 다시 백그라운드 비율을 분해하는데 사용된다. 데이터 수집에서 다양한 지표들을 직접 관찰 할 수 있다면, 사고수정계수의 사용은 계속해서 되지 않을 것이다. 이것은 교통, 터널 배치, 터널 형상, 터널 장비 등의 모든 조합에 대한 전용 통계를 의미한다.

터널 디자인이 다양하고, 사고, 부상과 사망자 통계는 드물어서 거의 모든 조합을 만들기는 어렵지만 사고수정계수 개념은 모델을 사용할 수 있는 명확한 장점을 가지고 있으며, 그 결과를 직접 관찰할 수 없는 (통계에 근거해서 알 수 없는) 상황에 사용 할 수 있다. 통계 조합의 일부를 사용할 수 있게 되면, 기존의 사전 분포는 이 새로운 정보와 함께 업데이트 될 수 있다.

터널사고 통계로부터 터널 길이에 따른 사고율의 변화가 관찰된다. 터널 내 중간영역에서의 사고수는 적고, 터널 입구 외부접근도로와 입구 내부에서 상대적으로 많은 사고가 관찰되었다(Hovd, 1981 / Amundsen and Engebretsen, 2009). 한편, 조사 결과에서는 터널 내부에서의 사고가 보다 심각한 것으로 나타났다[5].

이후 상세 관찰을 통해 입구에서의 사고집중과 내부에서 증가된 사고결과를 확인하게 되고, 각 트래픽 방향으로 터널영역을 나누는 것에 대한 합리적 근거를 제시하게 된다. 이러한 현상을 고려하기 위해 Fig. 5.에서와 같이 터널은 4영역으로 나누어졌다[4].(Amundsen and Ranes, 1997)

백그라운드 사고율은 다양한 터널 영역(Table 2.)에 대해 데이터를 사용해서 계산되었다(Amundsen and Engebretsen, 2009 / Amundsen and Melvær, 1997). 터널 사고에 관한 두 연구는 터널 사고에 대해 사용할 수 있는 가장 포괄적인 데이터를 포함하고 있으며, 터널에서 백그라운드 부상율과 치사율을 보여준다[5]. 부상사고, 사망 등 사고결과와 예상 값은 위험노출 비율과 곱으로 계산된다. 위험노출 $E=v \cdot 365 \cdot l$ [veh·km/a]이고, l은 고려할 터널 구간 길이, v는 고려한 방향에서 연평균 일일

교통량을 나타낸다. 사고율은 $[사고수 \cdot 10^6] / E$ 로 $10^6 \cdot \text{vehicle} \cdot \text{km}$ 당 사고수를 의미한다.

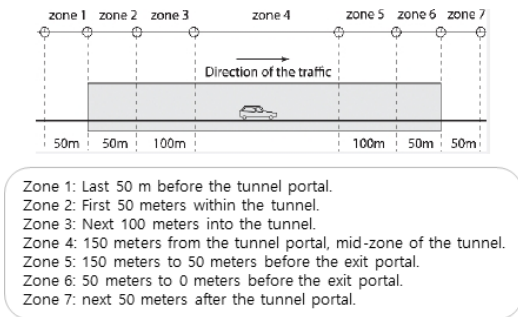


Fig. 5. Different Tunnel Zones[5]

언급한 데이터들이 조합되고, 최근에 수집된 데이터가 더 설득력을 갖는다고 가정함으로써 정보는 모델에서 높은 가중치가 주어진다. 부상율이 사고율보다 큰 경우 부상사고로 정의되며, 부상 유형에 대한 정의는 다음과 같다.

- 사망 : 사고관련 부상에서 사고 후 30 일 이내에 사망하는 사람들
- 매우 심각하게 부상 : 생명을 위협하는 부상 또는 영구적인 성격의 부상
- 중상 : 생명을 위협하는 부상은 아니지만 심각함
- 약간 부상 : 경미한 골절, 상처 등 입원이 필요하지 않음
- 심한 부상 : "매우 심각하게 부상"과 "중상"에 대한 포괄적 용어

Table 2. Background rate[6]

		Background rate[per 10^6 . veh. km]		
		1992-1996	2001-2006	weighted mean
Accidents	zone 1	0.2964	0.2700	0.2779
	zone 2	0.2380	0.2400	0.2394
	zone 3	0.1723	0.1900	0.1847
	zone 4	0.0702	0.0800	0.0771
	zone 5	-	-	0.11082
	zone 6	-	-	0.17955
	zone 7	-	-	0.22232
Injuries	zone 1	0.4131	0.3927	0.3988
	zone 2	0.3570	0.2930	0.3122
	zone 3	0.2575	0.2784	0.2721
	zone 4	0.0993	0.1097	0.1066
	zone 5	-	-	0.16326
	zone 6	-	-	0.23415
	zone 7	-	-	0.31904

Fatalities	zone 1	0.0140	0.0087	0.0103
	zone 2	0.0025	0.0084	0.0066
	zone 3	0.0036	0.0091	0.0075
	zone 4	0.0066	0.0053	0.0057
	zone 5	-	-	0.0045
	zone 6	-	-	0.00495
	zone 7	-	-	0.00824

Table 3.에서 나타난 결과는 모든 부상의 9-10%가 심한 부상이라는 것을 보여준다. 이러한 차별성은 모델에 적용되지 않고 총부상자 수로부터 심한 부상자수는 Table 3.에 주어진 값과 소프트웨어 툴의 결과를 곱하여 추정할 수 있다. Table 2.에서 사고율은 터널 입구에서 증가하고 치사율은 터널의 내부에서 더 높은 것을 알 수 있다. 그러나 Zone 2에 비해 Zone 3에서 치사율이 약간 증가하는 이유는 통계적 불확실성 일수도 있다.

Table 3. Ratio of severe injuries to light injuries[6]

	Ratio of severe injuries to light injuries [%]		
	1992-1996	2001-2006	weighted mean
zone 1	12.4	6.8	8.5
zone 2	14.1	7.1	9.2
zone 3	15.1	7.1	9.5
zone 4	13.6	8.4	10.0

3.3 지표노드 모델링

3.3.1 교통량 시간변화곡선 유형

교통량은 하루동안 균일하게 분포되지는 않는다. 연평균 일일 통행량 (AADT)은 교통량을 기술하기 위한 지표로서 역할을 한다. 그러나 터널에서 사고는 하루동안 현저하게 변화하는 교통밀도와 더 큰 관련이 있다. 통행의 일일 변화를 기술하는 시간변화곡선의 유형은 1970년대 후반 이후 주로 특정 도로구간의 교통구조를 설명하기 위해 사용되었고, 현재 위험분석에 사용되고 있다.

시간변화곡선의 여섯가지 일반적인 유형은 식별되고 (Pinkofsky, 2005), 독일에서 데이터를 분석했지만 주요 유형화는 다른 국가에서도 사용하고 있다[7].

- 유형 A : 아침에 뚜렷한 피크
 - 유형 B : 오후에 작은 피크와 함께 아침에 피크.
 - 유형 C : 상대적으로 하루 동안 같은 교통 분산.
 - 유형 D : 아침과 오후 명백한 피크.
 - 유형 E : 오후에 뚜렷한 피크, 아침에 작은 피크.
 - 유형 F : 오후에 뚜렷한 피크
- 통근자를 포함한 지역간 교통은 유형 B, 통근 교통은

유형 D, 로컬(현지) 교통은 유형 E, 지역 교통은 유형 F 그리고 레저 교통은 유형 C를 참조하여 사용되고 있다.

Fig. 6.은 유형 A~F에 대한 시간변화곡선의 일반적인 모양이다. 위험에 영향을 크게 미치지 않기 때문에 시간변화곡선의 여섯 가지 유형은 위험 분석에 충분하다. 이 지표의 고려는 이 모델의 추가 개발을 위한 추가 인 터페이스를 제공한다. 시간 변화 곡선의 유형에 관한 정보를 사용할 수 없는 위험 분석에서는 Table 4.에 나와 있는 사전 확률이 사용될 것이다.

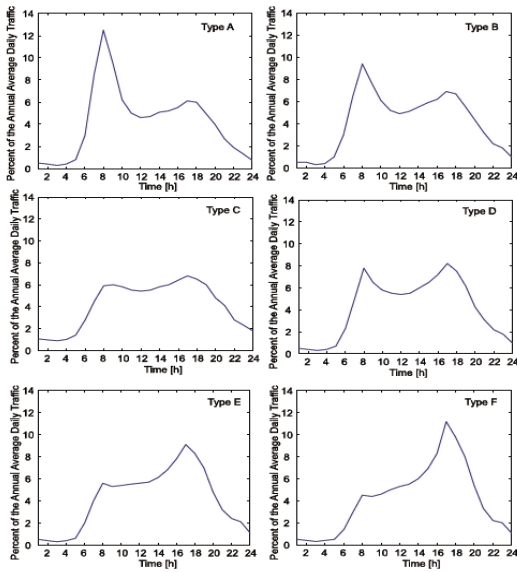


Fig. 6. Different Types of time variation curves of the traffic[5]

Table 4. Prior probabilities for the different type of time variation curves of the AADT[5]

	Prior distribution		
	Switzerland	Germany	Norway
Type A	0.05	0.08	0.07
Type B	0.16	0.15	0.16
Type C	0.12	0.15	0.14
Type D	0.32	0.24	0.28
Type E	0.26	0.25	0.26
Type F	0.10	0.12	0.11

3.3.2 교통량

교통량은 사고수에 영향을 미친다. 만약 10⁶ vehicle km당 측정된 사고율이 다른 수정없이 적용된다면, 교통량이 사고 수에 영향을 미치는 관계는 선형이 되지만 항

상 그런 것은 아니다.

교통량에 대해서는 연구되고 있다(Amundsen and Ranes, 1997). 터널 내 밀도가 높을 때 혼잡 또는 교통정체와 함께 충돌위험이 증가되어 심각한 결과를 가질 수 있다. 반면에 교통량이 일정수준에 다다르면 제한속도가 영향을 받게 되어 주행속도는 일반적으로 낮아지고 더 균일해져서 위험은 감소되지만, 터널설계가 교통량에 따라 달라지게 되므로 높은 교통량을 가진 터널들은 높은 수준의 별도 가이드라인 등을 갖추어야 한다.

다음 모델은 함부르크 엘베터널에서의 사고 관찰에 기초한다. 터널 운영자가 제공한 1975-2000 25년간의 데이터는 서비스나 교통개발측면을 위해 사용되었다(Haack, 1995, 2002). 교통량에 대한 모델은 차선 수를 고려해야 하며, 사고 빈도는 교통량이 일정 한도 이상이고 일정 포화상태가 달성 될 때까지 증가하는 것으로 보인다(Fig. 7.)[8][9].

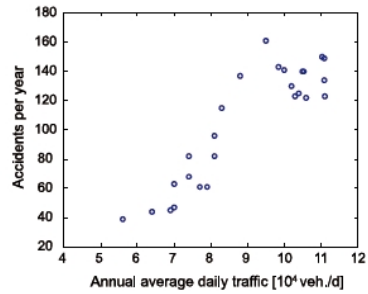


Fig. 7. Annual number of accidents in the Elbe tunnel (1975-2000)[9]

분석에 의한 모델은 각 방향 당 차선 수와 각 방향 연평균일일 통행량의 함수로서 만들어진다. 사고수정계수에 이 두 지표들의 공동영향은 Fig. 8.과 Fig. 9.관계에서 보듯이 베이지안 네트워크에서 모델링된다.

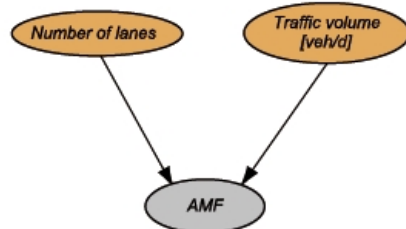


Fig. 8. Part of the network for the consideration of the joint effect[3]

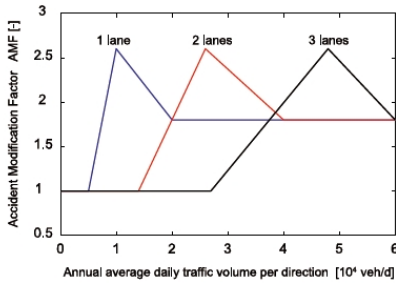


Fig. 9. Relation between the AADT per direction and the AMF depend on the number of lanes[9]

3.3.3 세그먼트에서 출입구 조건

일반적으로 터널 출입구는 경사로를 택하지 않는 것이 좋다. 이를 위한 통계적 기준은 매우 적지만 터널이 지하램프로 제안되고 있기 때문에, 상대적으로 드문 특징을 평가하기 위한 모델을 가질 필요가 있다. 터널 입출구에서 특별한 위험은 Fig. 10.에서와 같이 4가지 다양한 상황을 구별하여 모델링 된다.

터널에서 위험에 영향을 미치는 다른 관점은 터널 출입구 램프의 길이이다. 일반적으로 그것은 최근 코드와 표준에 의해 규정되어 있으나 기존 터널에서 이러한 요구 사항은 항상 충족되지는 않는다.

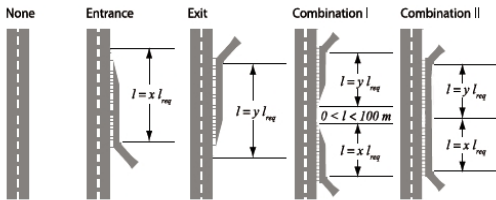


Fig. 10. Five types of exit and entrance ramps[3]

3.3.4 양방향 또는 단방향 교통

- (1) 사고에 영향 : 단방향 교통에 두 개의 튜브를 통한 통행에서 정면충돌사고는 완화된다(역주행 운전자 제외). 이것은 사고율뿐만 아니라 사망률까지 감소시킨다.
- (2) 터널화재에 영향 : 터널환기에 의해 제어되는 터널화재 경우에 교통상황도 터널에서 사람들의 성공적인 대피확률에 영향을 미친다.
- (3) 터널에서 추월 : 제한된 환경, 부분적으로 감소된 시야와 거리지각을 이유로 유럽의 도심지 외곽 양방향 도로터널에서 추월은 제한된다. 추월이 원인

이 되는 위험증가에 대한 모델은 차선 폭, 시선, 트래픽 구성, 기울기, 제한속도변화 등의 요인들에 따라 달라진다.

3.3.5 터널 내 중량 물건 운반차량비율

무거운 물건을 운반하는 차량이 개인 차량에 비해 사고빈도를 증가시킨다는 것이 관찰되었고(OECD, 1997), 그 이후 비슷한 관찰이 다시 보고되었다.(OECD, 2001 / PIARC, 1999). 사고빈도는 HGV의 평균 비율이 대략 12%일 때, 40-50% 증가되는 것으로 가정한다.

- (1) 위험물질 운반 : 일반 교통 사고관점에서 위험물질을 운반하는 HGV가 일반 HGV에 비해 사고빈도가 감소된다는 것이 관찰되었다. 그 이유는 운전자가 받는 특수 교육과 수송의 민감함 일 수 있다. OECD 자료를 참고하면, 사고빈도가 다른 HGV에 비해 20% 정도 감소된 것을 알 수 있다. 터널 운영자는 운반되는 위험물의 유형에 (A-E: 제한 없음에서부터 모든 위험물에 대한 전면 금지) 제한 범주 중 하나를 적용할 수 있으며, 터널 내 위험물 운송에 제한을 둘 때 터널 운영자는 규정된 시스템에 따라 제한사항을 표시하고 공표해야 한다[10][11].
- (2) 버스 사고 : 터널에서 버스로 인한 사고는 관련된 많은 인원수 때문에 심각한 문제를 초래할 수 있다. 버스사고 또는 버스 내 화재와 사고에 대한 특정 모델은 아직 결정되지 않은 상태이지만, 터널 내 화재사고 시 노출된 사람들 수가 절대적으로 고려되어야 하기 때문에 버스의 비율이 높은 도시 터널의 경우, 별도의 분석이 필요하다.

3.3.6 터널 조명

빛 조건이 터널에서의 사고율에 영향을 미친다는 것은 잘 알려져 있다. 조명을 통해 전체 터널의 선명도를 향상시키고 터널과 그 주변 다른 차들간의 밝기 차이를 감소시키는 긍정적인 효과를 가진다. 눈부심 효과가 감소될 수 있으며, 상이한 조명 조건에 눈의 적응이 최소화된다. 터널 조명은 운전자의 집중에 긍정적 영향 즉, 운전자의 눈을 편하게 한다. 터널조명은 밝기(cd/m²)로 설명된다. 조명을 통하여 입·출구 영역에서 주행방향을 구별하고 터널 내부와 입구영역의 조건을 판단할 수 있다.

- (1) 터널 내부 : 모델에 사용되는 밝기는 낮 시간에 사

용되는 밝기이다. 모델은 터널외부에서의 빛 조건의 변화를 고려해야 한다. 밝기가 낮은 경우 보통 밤 시간에 사용하는 것이 보통이다. 속도가 증가할 것으로 가정하는 경우, 이 효과는 개별적으로 고려되어야 할 것이다. 만약 실제속도제어에 다른 조치가 없다면 Table 5.와 같이 대략적인 가이드라인으로서 속도가 영향을 받는 것으로 가정한다.

- (2) 터널 입·출구 : 터널 입·출구에서 사고위험이 높기 때문에 조명조건은 특히 중요하다. 터널의 입·출구 영역의 위험 수준은 적용회도 수준에 영향을 받는다. 입구영역에서 평균 적용 회도는 1.5~5%로 정한다. 입구 영역은 간소화를 위해 터널 Zone 2, 3에 해당하는 150m로 정한다. 터널에서 일광 조건을 만드는 것은 불가능하기 때문에 터널 조명 조건과 일광의 전환에 눈부심 효과가 발생할 수 있다. 출구 영역에 증가된 조명이 항상 배치되어 있지는 않지만 양방향 교통에서 다른 방향 입구영역은 조명으로부터 혜택을 받을 수 있는 위치에 있을 수 있다.

Table 5. Influence on change of speed from luminance level[3]

Tunnel lighting Luminance [cd/m ²]	Change in speed [km/h]
< 0.5	-10
0.5 ~ 1	-7.5
1 ~ 2	-5
2 ~ 3	0
3 ~ 4	+2.5
4 ~ 5	+5
6 ~ 8	+7.5
> 8	+10

3.3.7 터널 수평반경

터널의 직선 구간에서보다는 곡선에서 더 많은 사고가 관찰된다. 이것은 곡선으로 인한 가시선의 부분적 감소 때문일 수 있다. 코드 및 가이드라인에는 주행속도에 따른 최소반경에 대한 요구사항이 주어지지만 단조로움을 유발할 수 있는 완전한 직선터널을 권하고 있지는 않다. 수평반경의 사전 분포는 가정된다. 지표가 정상적으로 알려졌거나 또는 실제 터널에서 측정될 수 있기 때문에 사전 확률 분포 가정은 큰 영향을 미치지 않는다.

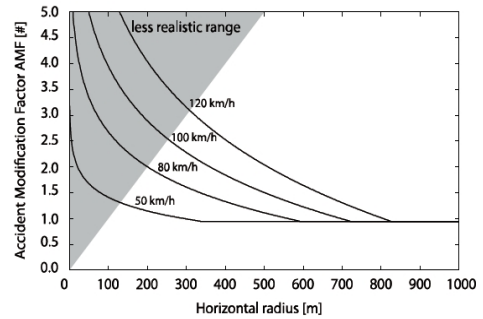


Fig. 11. Accident modification factor depending on the curvature (radius) and the speed limit[12]

3.3.8 터널 경사

터널의 종방향 구배는 여러 가지 면에서 위험 수준에 부정적인 영향을 미친다. 우선 경사 위 아래쪽으로 사고 빈도가 증가하고, 둘째, 경사가 터널의 위쪽 지점에서 터널 정지 차량의 빈도에 영향을 준다. 셋째, 화재(사고, 전기적/기계적 문제로 인한 화재) 빈도는 사고와 정지차량이 같은 패턴을 따르는 것으로 가정하고, 마지막으로 큰 경사는 특히 아랫방향쪽에서 종방향 환기를 위한 환기시설에 대해 문제일 수 있다. 따라서 지점의 경사는 사고에 영향을 미칠뿐만 아니라 터널 화재의 발화에도 영향을 미친다.

- (1) 경사면에서 사고 : 경사를 가진 도로에서 사고빈도가 증가하는 다양한 이유가 언급되었는데 (Haue, 2001), 경사면 아래로 향할때 주로 높은 속도가 사고 증가의 원인이었다. 아래쪽과 위쪽으로 가는 사이와 위쪽방향으로는 사고증가의 주 원인이 될 수 있는 대형 차량이 느려지면서 속도에 차이가 있을 수 있다. 모델은 위방향과 아래방향쪽 사고에 모두 고려되는 것을 제안했다. 사고 수정계수 “경사”는 경사변화함수로 계산되었다. 대부분의 터널이 일정한 종방향 경사를 가진다는 것이 가정되어야 한다. 여기서 경사의 평균값은 2%로 스위스터널 데이터에 상응한다. 큰 경사와 작은 수평 반경 두 지표들의 조합이 악화 효과가 있다는 것이 암시되었다. 터널 세그먼트 경사에 정보가 없는 경우 주어진 사전 확률 분포를 위험 계산에 사용한다[13].

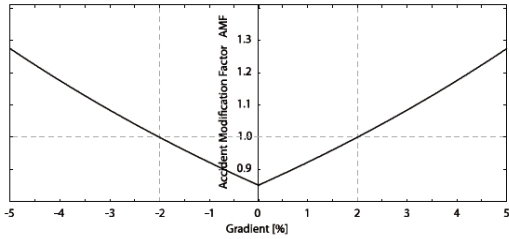


Fig. 12. Accident modification factor depending on the longitudinal gradient in the tunnel[11]

(2) 전기/기계 문제로 인한 화재, 모터 정지 : 높은 경사를 가진 터널에서 화재발생의 증가가 관찰되었다. 그러나 특정 모델은 현재 이용 가능한 것이 없다. 이 지표의 모델링을 위해 여기 정지 차량의 증가가 기술적 결함으로 인한 화재 증가에 대한 지표 역할을 할 수 있다고 가정한다. 정지 차량의 위험은 경사의 함수로서 보고되었다(PIARC, 1999 / Lingelser, 1998). 2%를 넘는 경사는 빈도 증가를 초래하는 것으로 보여진다. 사고수정계수는 유사한 접근법에 따라 화재 빈도에도 사용되며, 화재 빈도수정계수는 사고수정계수와 동일한 특성을 갖는다[14].

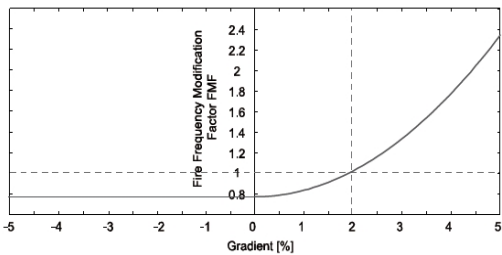


Fig. 13. Modification factor for the fire frequency depending on the longitudinal gradient[14]

3.3.9 차선 폭

터널 단면의 폭, 도로의 차선 폭이 위험에 일부 영향을 미친다. 만약 필요 폭을 사용할 수 없는 경우에는 위험이 증가 될 수 있다. 사고 빈도에 차선 폭 $W[m]$ 와 제한 속도 $V [km/h]$ 의 영향에 대한 시험 모델이 확립되었다. 일반적으로 차선 폭이 사고율에 긍정적인 영향을 갖지만, 차선 폭이 너무 크고 제한속도가 낮은 경우 사고율이 증가하는 경향도 있다.

3.3.10 방향 차선 수

Fig. 14. 에서 차선 수 지표가 네트에서 중심 위치에 있다는 것을 관찰 할 수 있다. 차선 수는 교통량의 종속성에서 사고율에 영향을 미치며, 차선이동과 서비스 수준에 영향을 미친다.

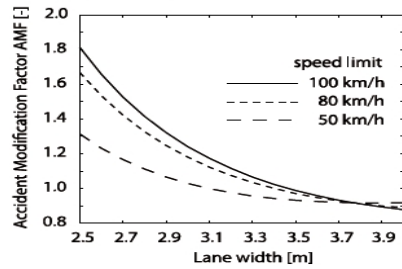


Fig. 14. Accident Modification Factor in dependency of the velocity and the lane width[15]

3.3.11 터널 내 속도제한

속도 제한은 몇 가지 이유에서 교통안전을 위한 주요 지표 중 하나이며, 주행속도와 속도제한의 관계 등은 사고율에 큰 영향을 미친다. 사고수정계수에 속도제한의 영향이 수평 반경과 차선폭에서 논의되었으며, 부상과 사망의 관점에서 사고빈도와 결과는 트래픽의 (평균)속도에 따라 달라진다.

3.3.12 시간당 차량

노드 "시간당 차량"은 낮동안 다양한 교통특성을 고려하고, 시간변화곡선유형과 교통량이 알려진 경우 직접 계산될 수 있는 중간 논리 지표이다. 그것은 전적으로 두 지표의 함수이므로, 이 노드에 대한 데이터를 삽입할 필요는 없다. 차량 수가 하루 동안 변하기 때문에 노드 "시간당 차량"은 하루 동안 시간당 차량의 확률 분포를 나타낸다. 이 노드는 차량/km과 서비스 수준에 직접적 영향을 미치고, 따라서 사고 수와 터널화재 후 결과에 영향을 미친다.

3.3.13 시간

노드 "시간"은 논리 노드로 시간당 차량을 계산하기 위해 필요하다. 이 지표는 현재 사용자에 의해 변경될 수 있는 지표로서는 간주되고 있지 않다. 하루 동안 위험 분포가 의사 결정 프로세스와 관련이 있다면, 하루의 시간 함수로서 결과를 표시하기 위해 이 노드를 사용하는

것이 원칙적으로 가능하다.

3.3.14 서비스수준

서비스 레벨은 트래픽 흐름의 질에 대한 지표이다. 이 노드는 직접적으로 위험 평가를 위한 것은 아니며, 정보 노드이다. 이 지표는 터널 세그먼트에서 차선 이동에 직접적인 영향을 모델링하고 있다. 차선 이동의 발생은 차례로 터널 세그먼트에서 사고 수에 대한 지표이다. 여기서, 서비스의 레벨에 대한 정의는 Table 6.과 같다.

상이한 서비스 수준에 대한 확률을 계산하기 위해서는 독일 도로교통연구팀(2005)에서는 임계값을 사용하고 있다. 서비스 수준지표는 직접적으로 차선 수 노드와 시간당 차량지표에 의해 결정된다[16].

Table 6. Influence on change of speed from luminance level[16]

		Vehicles per hour		
		1 lane	2 lanes	3 lanes
Type A	Free Flow	≤700	≤1,170	≤1,650
Type B	Reasonably free flow	≤1,800	≤2,090	≤3,025
Type C	Stable flow	≤2,200	≤2,850	≤4,125
Type D	Approaching unstable flow	≤2,800	≤3,420	≤4,950
Type E	Unstable flow	≤3,200	≤3,800	≤5,500
Type F	Forced or breakdown flow	>3,200	>3,800	>5,500

3.3.15 차선이동

교통사고는 차선의 이동으로 인해 발생할 수 있다. 밀도가 높은 터널과 중량차 비율, 느린 교통, 대형차, 경사로 또는 일반적으로 터널에서 도시 환경에서 차선 이동의 빈도 증가가 예상된다. 사고확률의 변화는 사고수정계수에 의해 모델링되고, 많은 차선이동이 있는 구간에서는 사고발생이 증가한다는 것을 알 수 있다.

도로 특정 구간에서 차선이동 수는 다양한 교통과 터널 조건에 따라 다르다. 대부분의 관련지표는 서비스 수준에 의해 표현되는 교통조건, 차선수, 무거운 물건을 실은 차량비율, 출입구 조건 등으로 요약된다.

교통흐름이 원활하면 차선이동은 최소가 되고, 만약 불안정한 흐름일 경우 차선이동은 최대에 도달한다. 밀도가 높은 경우 차선이동의 경우는 다시 줄어 들거나 차선이동이 정상주행속도에서보다 매우 느린 속도로 가능하게 된다.

차선 수는 차선이동 수에 대한 핵심지표이다. 출구 또는 입구램프가 없는 터널세그먼트에서 하나의 차선만 있는 경우 차선이동이 없을 거라는 것은 명백한 사실이다. 무거운 차량 비율은 차선 변경에 원인이 될 수 있다. 무거운 물건을 실은 차량이 증가하는 경우 차선변경이 감소되도록 일반 승용차는 점점 더 왼쪽 차선을 사용한다.

또한 병합 영역에서 차선이동은 필연적으로 발생하며, 이것은 사고 빈도의 증가를 초래한다. 위험은 병합 영역의 길이에 더욱 의존한다.

3.3.16 사고수정계수 AMF

노드 AMF는 사고수정계수를 나타낸다. 일반적 컨셉은 앞에서 설명되었으나, Fig. 4의 네트워크에서 지표들의 조합과 실제 터널 위험 평가에 중심적인 역할을 하는 노드 AMF는 직접적으로 11개 지표에 종속적이며 이 모든 노드를 위해 개발된다. 이러한 모델을 사용하여 사고수정계수는 다양한 영향요인들의 곱으로 계산되며, 노드 AMF는 사고수정계수의 분포를 포함한다. 즉 결과가 분석의 불확실성을 반영하게 되는데, 이 때 불확실성은 모델과 고려되는 지표에 대한 지식의 결여로 인한 인식론적 측면에서의 불확실성을 의미한다. 불확실성은 모든 지표들의 상태가 확실하게 알려진 경우 최소화된다. 정보가 없는 경우 모델의 불확실성이 매우 높다. 사고수정계수 분포가 여러 모드를 가진다는 것은 다양한 요인들이 분포에 기여한다는 것이기 때문에 합리적이라 할 수 있다.

3.3.17 사고율-, 부상율-, 사망률 분포

노드 "사고율-, 부상율-, 사망률분포"는 노드 "AMF", 영역과 제한 속도에 종속된다. 이들 노드들에 포함된 정보와 백그라운드 사고율, 부상율, 사망율과 함께 사고율, 부상율, 사망율의 분포가 계산된다. 이들 분포는 직접 사 결정 프로세스에는 사용되지 않는다.

3.3.18 사고율, 부상율, 사망률 평균값

분포에 대한 정보는 제공되지 않는다. 사고율의 평균값은 현재 위험을 특성화하고 합리적 의사 결정을 위해 필요한 정보로 간주된다. 그러나 불확실성에 대한 정보가 이미 베이지안 네트워크에 포함되고, 이 의사 결정 프로세스를 필요로 하는 경우에 이용할 수 있다. 이 노드에서 부상율 평균값과 특정 터널 세그먼트의 사망률 평균

값이 계산된다. 원칙적으로 사고율, 부상율, 사망률을 위한 노드는 베이지안 네트워크에 사용할 필요가 없지만, 실질적인 이유와 베이지안 네트워크의 전체구조 때문에 사용된다.

3.3.19 사고에서 기인한 화재 평균값

화재사건은 사고 후뿐만 아니라 차량의 기술적 결함 등으로 인한 점화에 의해 발생할 수 있다. 두 경우 모두 별도로 모델링된다.

3.3.20 차량 기술 결함에서 기인한 사고율 평균값

화재율에 대한 기술적 결함 또는 차량 과열의 영향은 노드 "기술 결함"을 통해 모델링된다. 화재 심각도는 화재발생없음, 5MW 화재, 30MW 화재 및 100MW 화재 4가지로 분류된다. 노드 "화재심각도"는 열하중과 종속 관계에 있다.

3.3.21 열하중

터널의 열하중은 터널 화재의 심각성에 대한 지표 역할을 할 수 있다. 터널 내 열하중은 화재시의 차량 수 및 각 차량의 각 화재하중에 기초하여 평가되며, (PIARC, 1999)를 참조하면 승용차의 열하중은 평균 3,000~7,000 MJ로 가정되고, km 당 차량 및 무거운 물건을 실은 차량의 비율과 종속적 관계에 있다.

3.3.22 알람

여러 연구에서(UPTUN, 2006) 승객들이 가능한한 차 안에 머무르는 것을 선호하는 것으로 알려졌다. 가시 또는 가청 경보를 통해 또는 라디오 또는 다른 통신 시스템을 통한 명확한 지침은 자가구조가 성공할 확률을 높이기 위한 효과적인 측정이 될 수 있다. 알람작동은 비디오 감시, 시정 모니터와 화재 감지기 등 모니터링시스템이 터널에 설치되어 있을 때 가능하다[17].

3.3.23 대피

Fig. 3.에서 화재사고시 성공적인 대피를 위해 영향을 미치는 지표는 트래픽 상태이며, 이는 혼잡 시간과 교통 경로 유형(단방향 또는 양방향)이 고려되었다. 터널의 특성을 설명하는 지표들로는 환기 시스템, 비상등의 유무, 비상구까지의 거리, 모니터링 시스템과 비상구간의 거리가 있다.

비상등은 터널에 무거운 연기가 있는 경우에 특히 필요하며, 성공적인 대피확률에는 약간의 영향을 미친다. 비상구 간의 거리는 사람이 대피 할 수 있는 가능성에 더 큰 영향을 미치는 요인이지만, Table 7.에서 650m 이상의 거리는 대피 확률에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

알람은 터널 사용자가 적시에 옳은 결정을 내리도록 돕기때문에 터널 내 사람의 대피 확률을 증가시킬 수 있도록 돕는다. 대피확률에 경보 시스템의 효과는 기본대피율을 위한 배율로서 표시된다.

환기 시스템은 대피확률에 달라진다. 하나의 요인은 화재의 심각성이다. 터널 화재가 작을수록 효율적으로 환기 시스템이 대피할 확률을 증가시킬 수 있다. 혼잡의 경우에 따라 중방향 환기 시스템은 대피 확률에 긍정적인 효과가 거의 없다.

Table 7. Influence of the distance of the emergency distance on the probability to escape[3]

Distance to the emergency exit [m]	Factor
0 ~ 150	0.1
150 ~ 350	0.4
350 ~ 650	0.7
> 650	1.0

3.3.24 모니터링 시스템

화재감지를 위해 다수의 다양한 모니터링시스템이 사용가능하다. 이러한 감시 시스템은 알람을 작동하여 자가구조할 수 있을 가능성이 증가되도록 하고, 환기시스템의 화재모드를 시작하고 콘트롤 할 수 있도록 입력한다. 초기에는 단지 설치여부만(설치/비설치) 고려되어 다양한 시스템이 차별화되지 않았었다. 현재 모니터링 시스템은 전체 터널의 50%에 설치되어 있는 것으로 가정된다.

3.3.25 환기시스템

화재는 일반적으로 복잡한 유해환경에서 발생하며, 열로 인한 부상보다 연기에 의해 더 많은 부상과 사망에 이르는 것으로 인식되고 있다. 화재 사건에서 다양한 독성 가스가 방출될 뿐만 아니라 산소가 고갈된다. 화재 환기의 주요 기능은 연기를 관리함으로써 탈출 및 구조에 유리한 조건을 설정하는 것이다.

환기 시스템의 효과는 환기시스템, 터널형상, 두 터널

입구(게이트) 사이의 높이의 차이, 터널 디자인(양방향 또는 단방향 트래픽), 혼잡(밀집) 확률, 자연굴뚝효과, 외부풍압과 설계하중사이즈 같은 여러 요인에 달려있다. 터널 환기는 일부 일반화와 단순화가 정형화된 방법으로 고려 될 수 있다.

3.3.26 혼잡(밀집)

화재 시 탈출에 안전한 조건을 만들 수 있는 터널 환기 시스템의 능력은 터널의 혼잡 여부에 달려있다. 연간 혼잡시간에 관한 정보를 사용할 수 없는 경우에는, 사전 확률을 사용한다. 터널에서 혼잡시간의 감소는 위험을 감소시키는 척도 자체로 고려될 수 있음에 주목해야 한다.

3.3.27 비상등

비상등은 다음 (비상)출구까지의 최단 거리를 나타내고, 출구에 도착 속도를 증가시키기 위한 것이다. 시스템은 화재, 연기, 통상전력공급의 손실 등 조건하에서도 그 기능을 수행 할 수 있어야 한다. 그것은 중단없는 전력공급 그리고/또는 전력공급에 독립적으로 사용가능한 시스템에 대한 요구조건이다.

3.3.28 비상구까지 거리

비상구에 가까울수록 사망이나 부상 확률은 0이라고 가정한다. 사망할 확률과 부상을 입을 확률이 대피성공 확률과 완전하게 상관관계가 있음을 가정한다. 출구가 가까이에서 사망할 확률은 0에서 사망할 확률까지이다. 그래서 수정계수는 0에서 1까지 선형으로 증가한다. 비상구로부터 멀리 있는 일정거리는 사망할 확률이 일정하다.

3.3.29 km당 차량

노드 "차량/km"는 논리 노드이고, 교통흐름조건과 도로 사용자가 제한속도로 운전한다는 가정하의 근사치이다. 노드 "차량/km"은 터널 열하중에 대한 지표로서 그리고 터널 화재 시 부상자와 사망자 수를 위한 지표로서 역할을 한다.

3.3.30 기술적 결함

알람 시스템 및 환기 시스템은 크게 터널 화재발생을 감소시키는데 도움이 될 수 있다. 사고 시 자동 경보 시스템이나 환기 시스템 같은 기술장비가 작동하지 않을 수 있다. 모든 시스템은 특정 결함 확률 분포 데이터를

갖고, 결함 빈도 데이터는 상세하게 연구되지 않았다.

4. 적용 예

4.1 터널 시스템 정의 및 분석

터널의 종류, 특성 등을 정의하고 분석한다.

- 분기부를 가진 램프에 연결된 양방향 트래픽 튜브와 10개 구간으로 구성된 복층터널
- 단면, 주터널 길이와 램프길이, 주 터널의 경사
- 최대교통량과 중량차량 비율 등

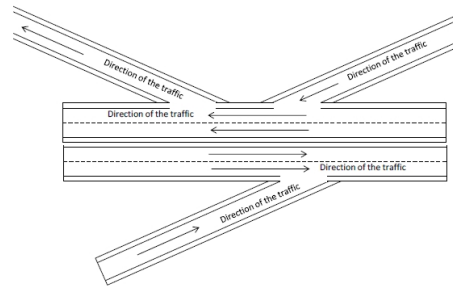


Fig. 16. Double deck tunnel system (bi-directional traffic with bifurcations)

4.2 방법론

특정 위험 평가에 필요한 모든 대상, 사고, 결과, 가정 및 경계조건의 핵심은 고려 시스템의 구성요소이다. 모든 관련 입력데이터를 시스템에서 수집하고, 일반설정과 가정된 사항들의 설명을 통하여 시스템은 정의된다 (데이터, 전문가 지식, 모델 또는 다른 정보).

터널 특성과 각 터널 영역의 세그먼트 수를 고려하고 리스크 지표를 입력하여 터널 모든 구간의 위험들을 사고, 화재 등의 각각 다른 상황에 따라 계산한다. 기준시점 이전 상황의 위험수준을 파악하고, 원래상황과 비교 분석한다. 표준터널과 비교하면 몇가지 측면은 낮은 속도, 중량차 비율 감소, 개선된 조명 등을 통해 감소된 위험수준을 보이거나, 분기부, 주 터널에서 경사 증가, 좁은 램프 등을 통해 높은 위험 수준으로 이어질 가능성을 가질 수도 있다.

원래 상태의 분석에 기초하여 정량화된 위험을 알 수 있고, 연간 예측된 사고율과 비교하여 비용효율적인 위험완화조치 방법의 성공여부를 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 다양한 변수들 간의 복합적인 상호의존성을 고려할 수 있는 베이지안 네트워크를 근거로 한 정량적 터널 위험분석방법을 소개하였다.

베이지안 확률 네트워크는 확률변수를 의미하는 노드와 이들간의 독립/종속성을 나타내는 관계(→)로 되어있으며, 결과는 수행하는 사람에 의존적이지 않고, 의사결정에 있어 전형적인 문제설정과 함께 일반요구사항을 정의할 수 있도록 하고 있다. 또한 이벤트를 모델링하는 방법에서 도로터널의 위험평가를 위한 독립적인 결과를 제공할 뿐만 아니라 과학적 수준에 따른 현재 안전수준은 평가, 터널의 계획 단계와 터널이 운영되는 동안 위험 저감 대책에 관련해 위험기반의 의사결정을 용이하게 한다.

이러한 장점에도 불구하고 위험지표 분석의 상세 수준 개선을 위하여 모델에는 현실적 시나리오와 입력데이터에 대한 데이터베이스의 향상이 필요하며, 교통안전 평가와 위험평가 분야에서는 비교 가능하고, 재현 가능한 결과를 제시할 수 있는 방법론 개발을 위하여 위험증가 요인의 영향뿐만 아니라 관련 안전대책을 통한 위험감소가 고려된 위험평가방법론의 지속적인 개선 및 수정이 필요 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 2015년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(15SCIP- B088624-02)’을 통해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- [1] Trijsenaar Buhre, Wijnant Timmerman, *Harmonised risk assessment*, 2004.
- [2] Authors of all SafeT workpackages, *Guidelines for tunnel safety*, 2007.
- [3] ASTRA/NPRA, *Entwicklung einer besten Praxis Methode zur Risikomodellierung fuer Strassentunnelanlagen*, 2012, 2014.
- [4] Dieter Tetzner, *Risikoanalyse für Straßentunnel*, 2012.
- [5] Amundsen, F. H. and G. Ranæs, *Traffikkulykker i vegtunneler*. Oslo, Vegdirektoratet, 1997.
- [6] Amundsen, F. H. and A. Engebretsen, *Traffic accidents*

in road tunnels. An Analysis of traffic accidents on national roads for the period of 2001-2006, Staten Vegvesen, 2009.

- [7] Pinkofsky, L., *Typisierung von Ganglinien der Verkehrsstärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage*. TU Braunschweig, 2005.
- [8] Haack, A., *Introduction to the EUREKA EU 499 Firetun project*. International Congress on Fires in Tunnels. Borås, Sweden, 1995.
- [9] Haack, A., "Current safety issues in traffic tunnels." *Tunnelling and Underground Space Technology* 17(2): 117-127, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00013-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00013-5)
- [10] OECD, *Road Safety Principles and Models: Revive of Descriptive, Predictive, Risk and Accident Consequence Models*, 1997.
- [11] OECD, *Safety in tunnels transport of dangerous goods through road tunnels*, 2001.
- [12] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, *Geschwindigkeit als Projektierungselement*, VSS, SN 640 080b, 1998.
- [13] Hauer, E., *Road Grade and Safety, Review of literature for the Interactive Highway Safety Design Model*, Toronto, Canada, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 2001.
- [14] PIARC, *Fire and Smoke Control in Road Tunnels*, Committee on Road Tunnels C5, Brüssel, Belgien, 1999.
- [15] U. Salvisberg, R. Allenbach, M. Cavegn, M. Hubacher und S. Siegrist, *Verkehrssicherheit in Autobahn- und Strassentunneln des Nationalstrassennetzes*, Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung, BfU, Bern, 2004.
- [16] FGSV, *HBS Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen*, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln, Deutschland, 2005.
- [17] UPTUN, *Major European RTD-project on cost effective, sustainable and innovative upgrading methods for fire safety in existing tunnels*, 2006.

조 인 우 (Inuh Cho)

[정회원]



- 2009년 8월 : 베를린공대 토목공학과 (Dip-Ing)
- 2011년 7월 ~ 2013년 4월 : (재) 한국재난안전기술원 선임연구원
- 2013년 4월 ~ 2014년 3월 : 동국대학교 글로벌 프로젝트 연구팀 선임연구원
- 2014년 4월 ~ 2015년 9월 : ㈜포송이엔알 기업부설연구소 연구소장
- 2015년 10월 ~ 현재 : ㈜나다건설 기업부설연구소 연구소장

<관심분야>
재난안전, 위험관리

한 대 용(Dae-Yong Han)

[정회원]



- 2011년 8월 : 연세대학교 건축학과 (공학석사)
- 2013년 2월 ~ 2014년 2월 : (재) 한국재난안전기술원 연구원
- 2014년 3월 ~ 2015년 9월 : (주)포술이엔알 기업부설연구소 대리
- 2015년 10월 ~ 현재 : (주)나다건설 기업부설연구소 대리

<관심분야>
재난안전, 위험관리

김 승 진(Seung-Jin Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : KAIST 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 2월 ~ 2013년 3월 : (재) 한국재난안전기술원 연구원
- 2013년 3월 ~ 2015년 9월 : (주)포술이엔알 기업부설연구소 과장
- 2015년 10월 ~ 현재 : (주)나다건설 기업부설연구소 과장

<관심분야>
재난안전, 위험관리

윤 종 구(Jong-Ku Yoon)

[정회원]



- 2006년 2월 : KAIST 토목공학과 (공학박사)
- 2006년 2월 ~ 2012년 1월 : 한국유지관리 이사
- 2012년 4월 ~ 2014년 12월 : (주)포술이엔알 사장
- 2015년 1월 ~ 현재 : (주)포술이엔알 대표이사

<관심분야>
재난안전, IT