

터널 방재설비의 합리적 설치를 위한 분석적 연구

박진옥¹ · 유용호^{2*} · 박병직²

¹비회원, 한국건설기술연구원

²정회원, 한국건설기술연구원

An analysis study for reasonable installation of tunnel fire safety facility

Jin-Ouk Park¹, Yong-Ho Yoo^{1*}, Byoung-Jik Park¹

¹Korea, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 64, 182 Beon-Gil, Mado-Ro, Mado-Myeon, Hwaseong-Si

ABSTRACT: Domestic road and railroad construction have been increasingly growing and for reasons of mitigating traffic congestion, urban plan and refurbishment project, deeper and longer tunnels have been built. The event of fire is the most fatal accident in a tunnel, and it can be very disastrous with a high possibility. In this study, QRA (Quantitative Risk Analysis) which is one of quantitative risk analysis approaches was applied to tunnel fire safety design and the evaluation of QRA cases and the cost comparison of QRA methods were carried out. In addition analysis of risk reduction effect of tunnel fire safety system was conducted using AHP (Analytic Hierarchy Process) and the priority of major factors that could mitigate the risk in tunnel fire was presented. As a result, significant cost reduction effect could be obtained by incorporating QRA and it is expected to design fire safety system rationally. The priority of fire safety system based on risk mitigation effect by fire safety system considering the cost is in order of water pipe, emergency lighting, evacuation passage and smoke control system.

Keywords: Tunnel safety facility, QRA(Quantitative Risk Analysis), AHP(Analytic Hierachy Process)

초 록: 최근 국내에서는 도로 및 철도 터널의 건설이 꾸준히 증가하고 있으며, 교통체증 해소 및 도시계획 그리고 개량공사 등에 따라 터널이 더 깊은 지하에 위치하거나 장대화되고 있는 추세이다. 이러한 경우 터널 내부사고 중 인명피해에 가장 큰 위험요소인 화재사고가 발생할 경우 대형사고로 이어질 확률이 굉장히 높아진다. 본 연구에서는 정량적 위험도 분석 기법인 QRA(Quantitative Risk Analysis)를 터널에서의 방재설계에 적용하고자 국내 QRA 사례분석을 수행하고, QRA 기법의 적용 유무에 따른 비용 산출을 비교하였다. 그리고 AHP(Analytic Hierachy Process)기법을 사용하여 터널 방재시설의 위험도 저감 효과를 분석하여 터널 화재시 위험도를 낮출 수 있는 중요 인자들에 대한 우선순위를 제시 하였다. 그 결과로부터 QRA가 적용된 사례에서 상당한 비용절감 효과가 나타났으며, 그로 인해 합리적인 방재시설의 설계가 가능할 것으로 판단하였다. 그리고 방재시설별 비용대비 위험도 저감효과를 통한 방재시설 우선순위는 송수관설비, 비상조명, 대피통로, 제연설비의 순으로 분석되었다.

주요어: 터널방재시설, 정량적 위험도 분석 기법, AHP 기법

1. 서 론

최근 우리나라는 국토의 70%가 산악지형으로 이루어진 지형적 특징으로 인해 도로 및 철도 터널의 건설이 꾸준히 증가하고 있으며, 도심의 도로에서 발생되

는 교통체증의 문제나 도시계획의 선진화 그리고 신설철도 계획과 선형개량공사 등의 이유로 터널 구조물이 지하에 건설되거나 장대화되고 있는 추세이다(김도식 외 4명, 2006). 터널은 공간적인 제약으로 인해 화재발생시 화염으로부터 발생하는 높은 복사열과 대류열 그리고 많은 양의 유독가스 등에 의해 인명피해로 이어질 수 있는 위험한 환경으로 급격히 변화될 가능성이 크며, 특히 장대터널의 내부에서 화재가 발생하는 경우 대형사고로 이어질 수 있는 확률이

*Corresponding author: Yong-Ho Yoo

E-mail: yhyoo@kict.re.kr

Received April 3, 2015; Revised April 13, 2015;

Accepted April 16, 2015

Copyright ©2015, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

매우 높으므로 터널관련 연구자들에게 터널 방재는 상당히 중요한 항목으로 관심을 받고 있다(Knoflacher et. al., 2004). 이에 따라 터널 방재기준도 강화되고 있으며, 터널계획 시 방재기준을 만족하면서 위험도를 최소화할 수 있는 최적 방재시설물 계획이 요구되고 있다.

본 연구에서는 정량적 위험도 분석 기법인 QRA (Quantitative Risk Analysis)를 터널에서의 방재설계에 적용하고자 국내 QRA 사례분석을 하고, QRA기법의 적용 유무에 따른 비용을 산출하여 비교하고, AHP(Analytic Hierachy Process)기법을 통해 터널 방재시설의 위험도 저감 효과를 분석하여 터널 화재시 위험도를 낮출 수 있는 중요 인자들에 대한 우선순위를 제시하였다.

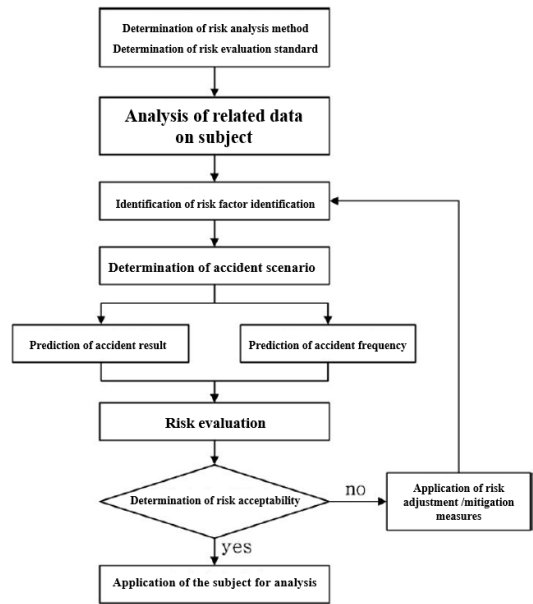


Fig. 1. QRA design process

2. 국내 QRA 사례 분석

QRA(Quantitative Risk Analysis)는 통계데이터를 기반으로 위험을 수치적으로 계산하고 그 결과를 평가기준과 비교하여 적절한 수준의 위험도를 만드는 과정으로 Fig 1과 같은 설계흐름을 가진다. 대부분의 QRA기법에서는 위험요소들에 대한 정량적인 특성부여를 위해 통계 데이터를 적용한다. 그러나 통계는 과거를 기반으로 현재와 미래를 예측하는 방식으로 새롭게 발생할 통계량이나 위험요소에 대해서는 정량화된 통계데이터를 적용할 수 없는 한계를 가진다(임재현 외 3명, 2006). 이러한 단점으로 인하여 최근에는 모의실험 또는 전산유체역학을 이용한 수치해석을 통하여 그 한계를 보완하고 있다.

터널에서 발생할 수 있는 위험에 대한 평가를 사람의 부상이나 사망으로 가정하면 터널의 위험요소는 터널붕괴에 의한 피해, 열차충돌 및 탈선시 충격에너지에 의한 피해, 화재사고에 의한 피해 등으로 간주할 수 있다. 이 중 통계적으로 화재사고에 의한 인명피해가 가장 크게 발생한다. 사고 시나리오, 사고통계 분석자료, 화재/피난 해석 등의 분석과정을 거쳐 터널의

정량적 위험 평가는 F-N curve로 나타낼 수 있다. 이 F-N curve는 위험을 정량적인 수치인 “사고확률x사망자수”의 관계로 표현한 도표로써 위험의 적정수준인 ALARP영역을 함께 나타낸다(임재현 외 3명, 2006). 국내에서 QRA가 수행되어 방재기준에 적용된 대표적인 사례는 호남고속철도이다. 호남고속철도는 철도시설 안전기준에 관한 규칙에 따라 제정하여 방재시설을 계획하여 대피통로가 대피거리 5 km 이상일 경우 설치되고 연결수송관은 피난대피 안전에 미치는 영향이 거의 없으므로 설치되지 않았다. 그 외 수도권과 영남권 등 방재보강 보고서에서 제시된 철도터널 정량적 위험도 사례분석 결과를 Table 1에 도시하였다. 4 km 이상의 터널에서 경사도가 큰 경우 ALARP영역을 초과하는 결과를 보였으며, 경사도가 Risk Index에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 그리고 국내의 몇몇 터널에 대하여 화재사고 발생시의 안전성 분석을 수행한 결과, 대부분의 터널에서 사회적 위험기준을 만족하는 방재시설이 계획되었거나 위험기준을 만족하도록 적절한 보강계획이 수립되었다고 분석되나, 일부 터널의 경우 제연설비 미설치

Table 1. QRA results for safety reinforcement in capital and Yeongnam area

Tunnel	Length (m)	Gradient (%)	Elevation difference (m)	Cross-sectional area (m ²)	Risk Index
Capital area 1	2,656	0.4	1.0	58.9	9.93E-04
Capital area 2	1,114	6.0	6.7	58.9	0.27E-04
Capital area 3	4,265	-12.6	-53.8	55.2	28.90E-04
Capital area 4	4,954	-2.3	-11.3	55.2	5.03E-04
Capital area 5	4,520	-0.3	-1.5	63.24	15.80E-04
Capital area 6	1,050	-4.0	-4.2	63.24	0.97E-04
Yeongnam Area 1	3,685	-2.0	-7.4	72.63	5.65E-04
Yeongnam Area 2	3,865	-2.0	-7.4	72.63	0.58E-04

시 사회적 위험기준을 초과하는 것으로 나타났다. 이에 대해 추가적인 방재시설 설치검토가 필요하다고 판단되어 제연설비 설치, 자연환기구 설치 및 피난방

향 유도 및 탈출용 방독면 비치 등의 추가적인 방재시설을 설치하였을 경우의 안전성 분석을 수행하였다. 그 결과 제연설비 설치시에는 위험의 분포가 2.8901×10^{-3} (1,000년간 2.89명의 사망자 확률)에서 0.8421×10^{-3} (1,000년간 0.84명의 사망자 확률)로 현저하게 감소하는 결과가 나타났다. 반면, 자연환기구 설치시에는 사회적 위험크기가 거의 저감되지 않아 설치시 효과가 미미한 것으로 분석되었다.

이를 통해 철도터널 방재시설 중 재연설비 설치시 위험도 저감효과가 높은 것으로 판단되며 터널 내 화재시 사회적 위험기준을 만족하는 효과적인 방재계획 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

3. 터널연장에 따른 방재시설별 비용 산출

국내외 터널 방재기준은 주로 터널 연장을 기준으로 방재설비 설치 여부를 결정하고 있으며 이에 따라 설치되는 방재시설별 비용을 산출할 수 있게 된다.

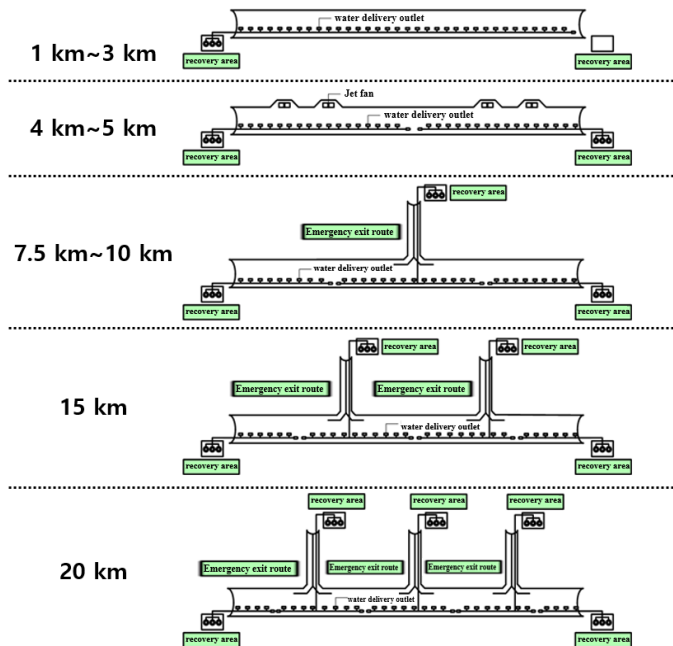


Fig. 2. Schematic diagram for calculating the cost of construction

Table 2. Design specification for calculating the cost of installation of each safety facility

Classification	Design data								
	1.0 km	2.0 km	3.0 km	4.0 km	5.0 km	6.0 km	7.0 km	8.0 km	9.0 km
Tunnel length	1.0 km	2.0 km	3.0 km	4.0 km	5.0 km	6.0 km	7.0 km	8.0 km	9.0 km
Vertical gradient	+ 5.0 %								
Tunnel cross section area	68.2 m ²								
Tunnel circumference	31.5 m								

본 장에서는 대표적인 국내 고속철도 터널 방재기준인 경부고속철도와 호남고속철도의 방재시설 설치비용을 비교 분석 하였다. 이에 대한 설계제원과 개요도를 Table 2와 Fig. 2에 정리하여 나타냈으며, QRA 분석이 수행된 호남고속철도와 QRA 분석 없이 설계된 경부고속철도 방재기준을 구분하여 분석한 결과를 Fig. 3에 그래프로 나타냈다. 20 km 터널 연장에 대한 환기방재시설의 공사비용을 산정한 결과, 경부고속철도 방재기준 적용시 총 공사비용은 약 15,343백만원이며, 호남고속철도 방재기준 적용시 총 공사비용은 약 9,124백만원으로 산출되었다. 그 결과 QRA를 수행한 방재기준인 호남고속철도 방재기준의 경우 경부고속철도 방재기준이 적용된 공사비용에 비해 약 6,130백만원의 총 공사비 절감효과를 나타내는 것으로 분석되었다.

따라서, 적절한 QRA 분석으로 터널 방재시설을 검토하여 합리적인 방재설비가 설치된다면 최적화된 방재설비의 구축을 통한 터널의 위험도 저감효과 및 신뢰성을 확보할 수 있으며, 또한 경제적으로도 상당한 효과를 가져 올 것으로 판단되었다.

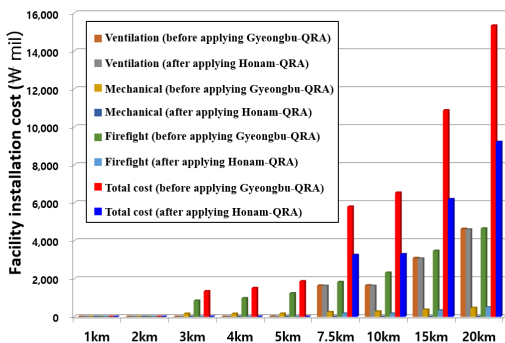


Fig. 3. The cost of Safety facility according to tunnel distance

4. AHP를 통한 방재시설 경제성 분석

4.1 AHP(Analytic Hierachy Process) 기법 분석 및 평가

AHP(Analytic Hierachy Process)기법은 1970년 초 미국 펜실베니아 Thomas L. Saaty 교수에 의해 제시된 의사결정 모델로서 각 목적요소에 대하여 일련의 쌍대비교방식을 통해 우선순위를 도출하여 정성적인 요소와 정량적인 요소를 결합한 의사결정을 가능하게 한다(이경미 외 1명, 2013). 이 기법을 적용함으로써 분석 대상인 터널 방재시설의 효과적인 우선순위를 제시하기 위해 터널 방재 시설의 중요시설을 계층화시켜 이에 대한 쌍대비교를 하게 된다. 산-학-연으로

Table 3. Reliability assessment and weight decision of safety facility through AHP decision-making

- Result after incorporating evaluation comment on tunnel life safety AHP weighting

	Emergency route	Emergency lighting	Smoke control system	water pipe
Emergency route	1.00	1.75	1.08	1.72
Emergency lighting	0.57	1.00	0.78	1.31
Smoke control system	0.93	1.28	1.00	1.89
Water pipe	0.58	0.76	0.53	1.00

- Review of significance on AHP weighting evaluation

	Emergency route	Emergency lighting	Smoke control system	Water pipe
Weight	0.325	0.211	0.295	0.168
Consistency Index				0.0038

구성된 전문가들의 의사결정을 통해 각 요소에 대한 중요도의 가중치를 산정하였으며, 그 결과를 바탕으로 터널 방재시설의 중요도를 도출하였다(김순진 외 2명, 2006). 또한, 터널 방재시설의 설치기준 합리화 방안을 수립하기 위해 AHP의 인자를 대피통로, 대피로, 비상조명, 제연설비, 송수관설비, 표지판 등의 6가지 항목으로 선정하였으며, 그 중 대피통로, 비상조명, 제연설비, 송수관설비를 상위기준으로 재선정하여 터널 방재시설의 경제성분석을 위한 가중치 인자를 도출하였다. 도출된 의견수렴 결과의 신뢰성을 분석하여 Table 3에 나타냈으며, 그로부터 Consistency Index가 0.0038로 분석되어, 얻어진 결과에 대한 신뢰성이 있는 것으로 평가되었다.

4.2 터널 방재시설의 위험도 저감효과 분석

도출된 터널 방재시설의 가중치를 통해 방재시설별 위험도 저감효과 분석을 수행하였다. 위험도 저감효과 분석방법은 터널연장별 방재비용 산출결과 중 터널연장 10 km를 기준으로 하여 누적공사비를 Y축으로 산정하고, 방재시설의 가중치에 대한 누적가중치를 X축으로 산정하여 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 4의 Safety-Cost Curve 선도와 Table 4에 도시하였다.

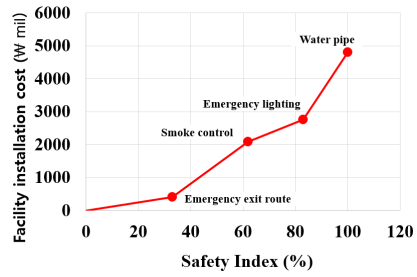


Fig. 4. Safety-cost curve of tunnel safety facility

Fig. 4는 방재시설의 가중치와 설치비용의 상관관계를 나타내고 있으며, 선도의 기울기가 완만할수록 비용대비 효과가 높은 것을 나타낸다. 분석 결과 경부고속철도 기준에 따른 방재시설에서는 대피통로와 비상조명이 비용대비 효과가 가장 높은 것으로 분석되었다. 또한, 경부고속철도 방재기준으로는 안전효과에 비해 송수관 설비비용이 과다하게 나타나 방재설비 중 송수관설비의 비용대비 효과가 현저히 떨어지는 것으로 판단되었다. 이는 경부고속 기준에서는 송수관 설비가 과다하게 설계되어 이에 대한 설치비용이 높기 때문이며, 송수관설비의 비용대비 효과가 가장 떨어지는 것으로 분석된다. QRA를 수행한 방재기준 적용 시에는 적용 전에 비해 방재시설의 설치비용의 절감효과를 볼 수 있을 것으로 판단되며, 합리적

Table 4. Economic analysis for safety facility of railway tunnel

Life safety upper-level standard	Work details	Cost (₩ mil)		Accumulated cost (₩ mil)		Weighting	Accumulated weighting
		Gyeongbu	Honam	Gyeongbu	Honam		
Emergency exit route	Ventilation at blocked area	73.05	51.39	445.65	214.79	0.325	0.33
	Fire door	372.60	163.4				
Smoke control system	Shaft ventilation	1,581.05	1,581.05	2,113.71	1,850.84	0.296	0.62
	Equipment room ventilation duct	32.01	-				
	T.A.B	55.00	55.00				
Emergency lighting	Auto control	677.37	677.37	2,791.08	2,528.21	0.211	0.83
Water pipe	Tunnel firefight equipment	65.32	5.75	4,811.02	2533.96	0.168	1.00
	Tunnel equipment room fire piping	120.12	-				
	Tunnel fire duct	1,766.33	-				
	Equipment room piping	68.17	-				

인 방재시설의 설계가 가능할 것이다.

방재시설의 중요인자 중 하나인 제연설비의 경우 Safety-Cost Curve선도에서는 안전효과(Safety Index) 대비 설치비용이 높은 것으로 분석되었지만, 선행 되었던 터널별 정량적 안전성 분석에 따른 방재시설 적정성 검토 분석결과를 보면 화재시 사회적 위험도를 낮추기 위한 가장 효과적으로 나타났다. 이러한 결과를 고려하여, 방재시설별 비용대비 위험도 저감 효과 분석을 통한 방재시설의 우선순위를 정하면 송수관설비, 비상조명, 대피통로, 제연설비의 순으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구에서는 정량적 위험도 분석 기법인 QRA (Quantitative Risk Analysis)를 터널에서의 방재설계에 적용하고자 국내 QRA 사례분석을 수행하였고, QRA 기법의 적용 유무에 따른 비용 산출을 통해 그 효과를 비교하였다. 그리고 AHP(Analytic Hierachy Process)기법을 사용하여 터널 방재시설의 위험도 저감 효과를 분석하였다.

1. 비교대상이었던 경부고속철도와 호남고속철도중 호남고속철도 방재기준을 적용한 방재시설의 설치 비용의 경우 QRA를 수행하기 전 방재기준인 경부고속철도 방재기준과 비교하여 공사비용의 절감효과가 크게 나타났다.
2. 따라서, 적절한 QRA 분석을 통한 터널 방재시설 검토를 통해 합리적인 방재설비가 설치된다면, 최적화된 방재설비의 구축을 통한 터널의 위험도 저감효과 및 신뢰성을 확보할 수 있으며, 경제적으로도 효과가 향상될 것으로 평가되었다.
3. AHP 기법을 통해 대피통로, 비상조명, 제연설비, 송수관설비 등을 터널 방재시설 합리화 방안을 도출하기 위한 상위기준으로 선정하여 경제성 분석을 위한 가중치 인자를 도출하였으며, 그 결과 Consistency Index가 0.0038로 산출되어 신뢰성이

유의한 것으로 판단되었다.

4. QRA가 적용되지 않은 경우 대피통로와 비상조명이 비용대비 효과 가장 높게 나왔으나, QRA를 수행한 방재기준 적용 시에는 적용 전에 비해 방재시설의 설치비용 절감효과를 볼 수 있을 것으로 판단되었으며 방재시설별 비용대비 위험도 저감효과의 우선순위는 송수관설비, 비상조명, 대피통로, 제연설비 등의 순으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Kim, D.S., Kim, D.H., Kim, W.S., Lee, D.H., Lee, H.S. (2006), “Extimiation of safety in railway tunnel by using quantitative risk assessment”, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 16, No. 5, pp. 357-367.
2. Knoflachner, H., Pfaffenbichler, P.C. (2004), “A comparative risk analysis for selected austrian tunnels”, International Conference, Tunnel Safety and Ventilation.
3. Lim, J.H., Kim, Y.G., Kim, D.H., Jung, C.M. (2006), “Estimation of safety in railway tunnel by using quantitative risk analysis”, Spring Conference of the Korean Society for Railway, pp. 21-31.
4. Lee, K.M., Chung, J.H. (2013), “A study on the weight evaluation of sustainable urban planning indicatrors using AHP”, Korea Real Estate Policy Association, Vol. 14, No. 2, pp. 137-153.
5. Kim, S.J., Lee, B.C., Kim, K.Y. (2006), “Aligning BSC perspectives and strategic objectives of public corporation using the analytic hierarchy process”, Korean Governmental Accounting Review, Vol. 4, No. 1, pp. 137-153.