

고속도로 터널 내 화재사고 발생 시 대피행동 지연 요인에 관한 연구

조재환*
*서울시설공단

A Study on the Delayed Factors in Evacuation Behavior in the Case of Fire Accidents in Highway Tunnels

Jae-Hwan Cho*

*Safety Department of Seoul Facilities Corporation

Abstract

This paper attempted to analyze the correlation between the risk image of the evacuees in the tunnel and the variables that affect the evacuation behavior due to the closed feeling. As to whether there is a difference in the level of recognizing the tunnel risk image according to the distribution of jobs, the null hypothesis was rejected at the significance probability of 0.002, so it can be said that the level of recognition of the tunnel risk image varies depending on the job group. In the distribution difference between gender and tunnel risk image recognition level, the significance probability was 0.012, indicating that the null hypothesis was rejected, indicating that the tunnel risk recognition distribution according to gender was different. As a result of analyzing the distribution difference between the tunnel's closed feeling and the tunnel risk perception level, the significance probability was 0.001, and the null hypothesis was rejected, indicating that there was a difference in the tunnel risk image level.

Keywords : Fire Accident, Highway Tunnel, Evacuation Behavior

1. 서론

지난 2020년 2월 17일 12시23분경 전북 남원시 순천-완주고속도로 사매2터널 내에서 질산 1만8,000L를 실은 탱크로리 화물차가 전도되어 차량 31중 연쇄 추돌 사고가 발생하였다. 이 사고로 5명이 사망하고 40여 명이 부상을 입었고, 다음 날 오전까지 사고 구간이 통제되는 등 매우 심각한 피해를 겪었다. 이 사고는 질산 탱크로리 화물차가 전도된 뒤 뒤따르던 PVC 수송 화물차와 곡물 수송 화물차가 사고행렬을 덮치며 화재가 확대된 것이다. 사고 신고를 받은 소방관은 터널 입구에서 검은 연기가 치솟아 구조와 화재진압에 어려움을 겪었고, 터널 내부에서도 질산이 지속적으로 유출되어 화재가 지속되어 내부진입 및 화재진압이 어려움을 겪었다. 이러한 화재는 국내 뿐 아니라 해외에서도 빈번히 발생하고 있는데, 대표적인 사고가 1999년 3월 24일에 몽블랑 터널 내에서 앞차가

던진 담배꽂이가 뒤 따르던 트레일러의 공기흡입구에 들어가면서 차량 화재가 발생하였다. 이 사고로 화재 발생 인지를 늦게한 운전자가 급히 화재를 진압하려 했으나, 불길이 확산된 상태에서 터널 내에서 폭발하여 탈출한 사고이다. 사고의 결과는 실로 비참했는데, 총 39명이 터널 내의 대피소에서 사망한 채로 발견되었다. 대피소 자체가 장시간 대피할 수 없도록 설계되었고, 설계오류로 대피소 환풍구로 유독가스가 유입되는 바람에 질식사 한 것이다. 이 사고로 개통 후 34년 동안 무사고 기록이 깨졌고, 사고발생 53시간이 지나서야 완전 소화가 이루어졌으며, 터널 내 강한 불길은 터널 내 콘크리트를 녹일 정도였다. 이후 몽블랑 터널은 3년간 폐쇄되며, 총 4억1천만 달러의 복구 비용을 발생하였다.

최근 자동차 성능 향상으로 인한 고속화와 건설 기술의 발달은 장대터널 건설을 빈번해지고 있지만, 여전히 터널 내 대피로의 활용성은 떨어지고 화재 확산 속도에 따른 터

†Corresponding Author : Cho Jae-hwan, 202-3703, Grand City Xi 2nd, Haeyang 5-ro 17, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, E-mail: jhjo80255@naver.com



※ 출처 : 중앙일보

[Figure 1] The scene of a serial collision at Samae-2 Tunnel

널 외부로의 대피가 가장 확실한 탈출 방법이라 할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 터널 내 대피자가 화재 발생으로 인한 위험 이미지와 밀폐된 느낌으로 인한 대피 행동에 영향을 미치는 변수별 상관관계에 대해 분석하고자 하였다.

2. 이론적 배경

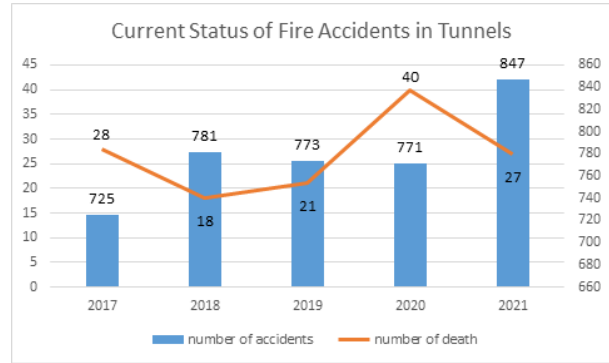
2.1 터널 사고통계 현황

도로교통공단의 교통사고분석시스템인 TAAS (Traffic Accident Analysis System)를 활용하여 년도별 터널 내 사고발생 현황을 살펴보았다.

<Table 1>에서 터널 내 사고발생 건수는 2017년 725건, 2018년 781건, 2019년 773건, 2020년 771건으로 700건 중후반건이 발생했으나, 2021년에는 847건이 발생하여 큰 증가세를 보였다. 이에 비해 터널 내 사고 사망자 수는 2017년 28명에서 2018년 18명으로 크게 감소했으나, 서론에서 설명한 바와 같이 순천-완주고속도로 터널 화재사고 등으로 인해 40명이 사망하여 큰 폭으로 증가하였다. 그리고 2021년에는 27명의 사망자가 터널 내 사고로 사망한 것으로 조사되었다.

<Table 1> Status of fire accidents in tunnels

	2017	2018	2019	2020	2021
number of accidents	725	781	773	771	847
number of death	28	18	21	40	27



[Figure 2] Status of fire accidents in tunnels

2.2 사전연구

이미 많은 연구자들이 터널 내 화재사고 예방 및 대피의 필요성에 많은 관심을 가지고 연구를 수행해 왔으며, 대표적인 연구 논문은 다음과 같다.

박진옥 외 1명(2022)은 수소연료전지 자동차의 보급 호가대에 따라 터널에서 발생할 수 있는 수소차 사고의 화재 위험성을 분석하고 안전대응 기술을 확보하기 위한 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 1단계 : 반밀폐공간 내 수소차 가스 누출 및 화재·폭발 위험요인 분석을 위해 교통 인프라 중 대표적 반밀폐공간인 터널 및 지하주차장에 대한 설치 및 운영현황을 조사하고, 2단계 : 반밀폐공간 내 수소차 가스 누출 및 화재·폭발 사고 위험성 평가 및 안전기준을 마련하였다. 마지막 3단계는 반밀폐공간 내 수소차 가스 누출 및 화재·폭발 실증시험 및 사고대응 매뉴얼을 개발하였다.

최윤혁(2021) 지속적인 도로 위험물질 수송사고에도 불구하고 아직 위험물 수송차량의 통행방법과 규제사항이 도로법에 명시되어 있지 않음을 지적하고 있다. 국내의 위험물 관련 법령이 10개 부처 13개 법령이 개별적으로 관리됨으로 인해 효율적인 통제가 어려운 실정이며, 일본의 경우 도로법에서 위험물질 수송심의위원회를 규정하여 다양한 전문가가 함께 모여 위험물질 수송차량의 통행 금지와 제한 여부를 결정할 수 있도록 공청회 등을 시행하고 있음을 알 수 있었다.

유용호(2005) 등은 장대 터널 화재 시 연기의 거동 특성 파악과 피난연락갱의 설치간격을 결정하기 위해 축소 모형 실험을 위해 Froude 상사를 기본으로 한 1/50으로 축소하여 20m 모형 터널을 제작하여 실험하였다. 터널 내부에 20MW 규모의 화재가 발생했을 때 일산화탄소(CO)의 전파 속도(velocity와 거리(distance)와의 관계를 이용해 피난 연락갱의 적정 위치를 검토한 결과, 승객의 피난시간은 6분이 적절하지만, 화재 발생 시 승객들의 심리적 상태를 고려하여 지체시간 1분을 고려했을 때, 실제 적용 가능한 피난시간은 5분 정도 소요될 것으로 판단되며,

최대 250m로 대인용 피난연락갱을 설치하는 것이 바람직하다는 결론을 제시하고 있다.

3. 실증 분석

3.1 터널위험 이미지와 표본 특성의 교차분석

교차분석의 특징은 종속변인의 척도가 명목척도로 구성되어 있고, 연구변인들의 적합한 분포를 이루고 있는지 분포 상태를 확인할 수 있다. 운전자의 터널입구에 대한 심리적 이미지에 대한 평가를 위한 샘플은 다음의 [Figure 3]과 같다.



[Figure 3] Evaluation of the psychological image of a driver's tunnel entrance

3.1.1 직업군과 터널 위험 이미지

직업의 분포에 따라 터널 위험 이미지를 인식하는 수준에 차이가 있는지에 대한 실증분석을 시행하였다. 터널의 위험한 이미지 인식 수준에 직업군은 영향을 미친다는 연구가설을 설정하였다.

Ho : 독립변수에 따라 종속변수의 비율은 유의한 차이가 없다.

H1 : 독립변수에 따라 종속변수의 비율은 유의한 차이가 있다.

<Table 2>에서 총 설문응답자 388명 중 일반사무직 중 44명(62.9%)는 A유형 터널 위험인식 26명(37.1%) 이 A유형 터널 위험인식을 응답 하였으며, 교육자 직업군 중 A유형 터널 위험인식 65명(72.2%), B유형 터널 위험인식 22명(37.1%), D유형 터널 위험인식 3명(3.3%)으로 분포되어 있다.

다음으로 기대빈도와 잔(殘) 차를 보면, 일반 사무직은 B유형 터널 위험인식이 10.7명 많다. 교육자 직업군에서도 B유형 터널 위험인식이 2.3명으로 많이 나타났다. 공무원 직업군에서는 A유형 터널 위험인식 164명(76.3%), B유형 터널 위험인식 37명(17.2%), D유형 터널 위험인식 14명(6.5%)로 응답하였으며, 기대 빈도와 잔(殘) 차를 살펴보면, A유형 5.5명, D유형 4.6으로 나타나 A유형에 더 많은 응답 비율을 나타내고 있다. 마지막으로, 기타의 응답에서 A유형 13명(100%) 기대빈도와 잔(殘) 차를 살펴보면 3.4명으로 A유형 터널의 위험 이미지에만 분포하는 것으로 나타났다.

χ^2 분석 결과 유의확률 0.002에서 귀무가설이 기각되어 직업군에 따라 터널 위험이미지 인식 수준은 다르다고 할 수 있다.

3.1.2 성별과 터널 위험 이미지

성별과 터널 위험 이미지 인식 수준의 분포차이가 있는지 살펴본 결과, 남성 중 A유형 터널 위험인식 255명

<Table 2> Analysis of observation frequency and expected frequency of occupational group and tunnel risk image level

		Recognition of Tunnel Hazard Images			χ^2	P
		A	B	D		
a general office job	N	44	26	.0	21.341	.002
	expected frequency	51.6	15.3	3.1		
	one's profession %	62.9%	37.1%	.0%		
	total residuals%	11.3%	6.7%	.0%		
	residual	-7.6	10.7	-3.1		

		Recognition of Tunnel Hazard Images			X ²	P
		A	B	D		
an educator	N	65	22	3	21.341	.002
	expected frequency	66.3	19.7	3.9		
	one' s profession %	72.2%	24.4%	3.3%		
	total residuals%	16.8%	5.7%	8%		
	residual	-1.3	2.3	-.9		
164		37	14			
a public official	N	158.5	47.1	9.4		
	expected frequency	76.3%	17.2%	6.5%		
	one' s profession %	3.6%	100.0%	3.6%		
	total residuals%	5.5	-10.1	4.6		
	residual	13	0	0		
etc	N	9.6	2.8	.6		
	expected frequency	100.0%	.0%	.0%		
	one' s profession %	3.4%	.0%	.0%		
	total residuals%	3.4	-2.8	-.6		
	residual	286	85	17		
the entire	N	286.0	85.0	17.0		
	expected frequency	73.7%	21.9%	4.4%		
	one' s profession %	73.7%	21.9%	4.4%		
	total residuals%					

***p<.00

(75.0%), B유형 터널 위험인식 74명(21.8%), D유형 터널 위험 인식 수준 11명(3.2%) 터널 위험 인식에 대해 응답하였고, 여성 중 31명(64.62%) A유형 터널 위험 인식 11명(10.5%), B유형 터널 위험 인식, 6명(12.5%), D유형 터널 위험 인식 수준으로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 기대빈도와 잔(殘) 차를 살펴보면, 남성은 A유형 4.4명으로 높게 분포하고 있으며, 여성은 B유형 .5, D유형 3.9명으로 각각 나타나 A유형은 여성 보다 남성에서 많은 분포를 나타냈다. 카이제곱 분석결과 유의확률이 0.012로 나타나 귀무가설이 기각되어 성별에 따른 터널 위험 인식 분포가 다르게 나타났음을 알 수 있다.

3.1.3 터널의 밀폐위험 느낌과 터널 위험 이미지

터널의 밀폐 느낌과 터널 위험인식 수준의 분포차이 분석 결과, 터널 밀폐 위험 느낌 중 66명(62.9%) A유형 터널 위험인식, 31명(29.5%) B유형 터널 위험인식, 8명(7.6%) D유형 터널 위험인식 수준 정도로 분포하고 있고, 밀폐 위험 느낌 B형 중 58명(75.3%) A유형 터널 위험인식 12명(15.6%), B유형 터널 위험인식 7명(9.1%), D유형 터널 위험 인식 수준이 분포하는 것으로 나타났다. 밀폐 위험 느낌 D형 중 162명(76.3%), A유형 터널 위험인식

42명(17.2%), B유형 터널 위험인식 2명(6.5%), D유형 터널 위험 인식 수준이 응답분포를 나타내고 있다. 각각 유형별 기대빈도와 잔차를 살펴보면, 밀폐 D형 중 잔(殘) 차가 A유형에서 가장 많이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 카이제곱 분석 결과 유의확률이 0.001로 나타나 귀무가설이 기각되어 밀폐 위험 느낌에 따라 터널 위험 이미지 수준에 차이가 있는 것으로 나타났다.

3.1.4 평균운전 시간과 터널 위험 이미지

평균 운전시간 30분 미만 중 9명(28.1%), 밀폐위험 느낌 A유형 23명(71.9%), 밀폐위험 느낌 D유형으로 분포 비율을 나타내고 있으며, 기대빈도와 잔차를 살펴보면 밀폐 위험 느낌 A유형 3명이 각각 분포하고 있고 밀폐위험 느낌 D유형 6명으로 나타나 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 다음으로 30분 이상~1시간미만 운전 중 64명(32.2%), 밀폐위험 느낌 A유형 33명(16.6%), 밀폐위험 느낌 B유형 102명(51.3%), 밀폐위험 느낌 D유형으로 분포하고 있으며, 1시간 이상~3시간 미만의 운전 중 75명(50.3%), 밀폐위험 느낌 D유형 44명(29.5%), 밀폐위험 느낌 B유형 30명(20.1%), 밀폐위험 느낌 A유형 순으로 각각 분포하고 있는 것으로 조사되

었다. 마지막으로 3시간 이상~5시간 미만 운전 중 6명 (75.0%) 밀폐위험 느낌 D유형 2명(25.0%), 밀폐위험 느낌 A유형 기대빈도와 잔 차와의 분석 결과, 1.8명으로 밀폐위험 느낌 D유형에 가장 많이 분포하는 것으로 조사되었다.

3.2 집단 간 독립표본

연구 모형의 설명변수에 대한 변인을 두 집단으로 구분하여 두 집단의 평균과 표준편차의 분산이 동일한지 확인하기 위해 교통준수수준, 사회규범 준수 수준, 차선위반 등의 각각 집단의 대피행동 점수는 같은가를 확인하기 위해 독립표본 검증을 실시하였다.

3.2.1 교통준수 수준에 따른 대피행동 단계

교통준수 수준에 따른 대피행동 단계 평균차를 확인하기 위해, 교통준수 수준 집단을 긍정집단과 보통집단으로 구분하여 독립표본 t-test를 실시하였다. 교통준수 수준 집단에 따라 대피행동1 가속화·지연, 대피행동2 가속화·지연, 대피행동3 가속화·지연에 대한 대피행동에 차이가 있을 것이다. 에 대한 연구문제를 분석한 결과 다음의 <Table 3>과 같다.

대피행동1 가속화의 t값은(2.453, p<0.015), 대피행동1 지연 t값 3.133p<0.002으로 나타나 대피행동 1단계에서는 가속화와 지연 모두에서 유의미한 교통준수 수준 차이가 나타났다. 다음으로 대피행동 2단계로 가속화의 t값은(3.471, p<0.001), 지연의 t값 1.886, p<0.060)으로 나타나 대피행동 2단계의 가속화에서 교통준수 수준에 따라 차이가 유의미하게 나타났다.

대피행동 3단계의 교통준수 수준에 따른 차이를 확인한 결과, 대피행동3 가속화의 t 값은 1.767, p<0.072)로 나

타나 차이가 없는 것으로 나타났으며, 대피행동3 지연의 t 값 2.287, p<0.023)으로 나타나 대피행동3의 지연은 교통준수 수준에 따른 집단 간의 평균차이가 유의미하게 나타났다.

3.2.2 사회규범 수준에 따른 대피행동

사회규범 준수 수준에 따른 대피행동 1단계 가속화와 지연, 대피행동 2단계 가속화와 지연, 대피행동 3단계 가속화와 지연에 평균차가 있을 것이다. 라는 연구문제를 분석한 결과, 대피행동 1단계 가속화의 t값은(2.854, p<0.005), 지연의 t값은(3.133, p<0.042)으로 나타나 대피행동 1단계 모두에서 유의미한 차이가 나타났다. 다음으로 대피행동 2단계 가속화의 t값은(3.121, p<0.002), 지연의 t값은(1.849, p<0.060)으로 나타나 가속화에서만 유의미한 차이가 나타났다. 마지막으로 대피행동 3단계 가속화의 t값은(1.767, p<0.065), 지연의 t값은(1.898, p<0.060)으로 나타나 유의미한 차이는 보이지 않았다.

3.2.3 터널 내 차선위반 수준에 따른 대피행동

터널 내 차선 위반 준수 수준에 따른 대피행동 단계에 대한 평균과 표준편차의 분산차이를 확인하기 위해 실증 분석을 실시한 결과, <Table 3>과 같이 대피행동1 가속화의 t값은(-2.081, p<0.039), 지연의 t값은(-2.337, p<0.020) 으로 나타나 대피행동 1단계 모두에서 유의미한 차이가 나타났다. 다음으로 대피행동 2단계 가속화의 t값은(-1.837, p<0.067), 지연의 t값은(-2.116, p<0.035)으로 나타나 지연에서만 유의미한 차이가 나타났다. 마지막으로 대피행동 3단계 가속화의 t값은(-.503, p<0.651), 지연의 t값은(-.479, p<0.633)으로 나타나 대피행동 3

<Table 3> The results of independent sample verification on the average difference in evacuation behavior according to the level of traffic compliance

Sortation	Average		Standard Deviation		t-value	p-value
	Tunnel Traffic Compliance Positive Group (N=276)	Tunnel Traffic Compliance Common Group (N=112)	Tunnel Traffic Compliance Positive Group	Tunnel Traffic Compliance Common Group		
Evacuation Action1 Accelerated	17.18	16.44	2.769	2.636	2.453	0.015
Evacuation Action1 delayed	17.04	16.11	2.692	2.547	3.133	0.002
Evacuation Action2 Accelerated	20.82	19.43	3.265	3.709	3.471	0.001
Evacuation Action2 delayed	16.63	16.07	2.584	2.858	1.886	0.060
Evacuation Action3 Accelerated	18.01	12.45	2.798	2.794	1.767	0.072
Evacuation Action3 delayed	17.68	16.95	2.952	2.631	2.287	0.023

단계 모두에서 유의미한 차이는 나타나지 않았다.

4. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 터널 내 대피자가 화재 발생으로 인한 위험 이미지와 밀폐된 느낌으로 인한 대피행동에 영향을 미치는 변수별 상관관계에 대해 분석하고자 하였다.

설문 응답자는 총 388부의 설문 회수를 통해, 남성이 340명(988%), 여성이 48명(12%)로 구성되어 있다.

직업의 분포에 따라 터널 위험 이미지를 인식하는 수준에 차이가 있는지에 대한 실증분석에서 터널의 위험한 이미지 인식 수준에 직업군은 영향을 미친다는 연구가설을 설정하였다. X^2 분석 결과 유의확률 0.002에서 귀무가설이 기각되어 직업군에 따라 터널 위험이미지 인식 수준은 다르다고 할 수 있다.

성별과 터널 위험 이미지 인식 수준의 분포차이가 있는지 살펴본 결과, 남성 중 A유형 터널 위험인식 255명(75.0%), B유형 터널 위험인식 74명(21.8%), D유형 터널 위험 인식 수준 11명(3.2%) 터널 위험 인식에 대해 응답하였고, 여성 중 31명(64.62%) A유형 터널 위험 인식 11명(10.5%), B유형 터널 위험 인식, 6명(12.5%), D유형 터널 위험 인식 수준으로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 기대빈도와 잔(殘) 차를 살펴보면, 남성은 A유형 4.4명으로 높게 분포하고 있으며, 여성은 B유형 .5, D유형 3.9명으로 각각 나타나 A유형은 여성 보다 남성에서 많은 분포를 나타냈다. 카이제곱 분석결과 유의확률이 0.012로 나타나 귀무가설이 기각되어 성별에 따른 터널 위험 인식 분포가 다르게 나타났음을 알 수 있다.

터널의 밀폐 느낌과 터널 위험인식 수준의 분포차이 분석 결과, 유의확률이 0.001로 나타나 귀무가설이 기각되

어 밀폐 위험 느낌에 따라 터널 위험 이미지 수준에 차이가 있는 것으로 나타났다.

평균운전 시간과 터널 위험 인식 수준분석결과 3시간 이상~5시간 미만 운전 중 6명(75.0%) 밀폐위험 느낌 D유형 2명(25.0%), 밀폐위험 느낌 A유형 기대빈도와 잔차와의 분석 결과, 1.8명으로 밀폐위험 느낌 D유형에 가장 많이 분포하는 것으로 조사되었다.

이러한 연구분석 결과에 대해 운전자와 승객의 터널 진입 시 터널 입구 설계에 해당 내용의 반영은 물론, 내부 소방설비 구성에도 참고할 필요가 있을 것이다.

5. References

- [1] J. W. Park, Y. H. Yoo(2022), "Analysis and response technology of fire risk of hydrogen car accidents in tunnels." Korean Facilities Engineering Association, 51(6):38-43.
- [2] Y. Choi(2021), "Review of policy direction to prevent road dangerous substances transportation accidents-Focusing on Samae 2." Tunnel Fire Accidents, 9(1):78-87.
- [3] Y. Yu, C. Yoon, S. Yoon, J. Kim(2006), "An experimental study on the installation interval of evacuation liaison gangs in long-length transportation tunnels." Journal of Korean Rock Engineering, (15):61-70.
- [4] Y. Choi(2021), "Review of policy directions for prevention of road dangerous substances transportation accidents (Fire Accidents in Samae 2 Tunnel)." Korea Dangerous Substances Association, 9(1):78-87.

저자 소개



조 재 환

동국대학교 안전공학과 박사 취득. 현재 서울 시설공단 안전처 재직중.

관심분야 : 건설산업안전, 안전모델연구 개발, 안전교육연구