

# 비관측 이질성을 고려한 고속도로 교통사고 지속시간 영향인자 분석

경연식<sup>1\*</sup> · 김상수<sup>2</sup>

<sup>1</sup>영남대학교 도시공학과 부교수, <sup>2</sup>영남대학교 도시공학과 석사과정

## Identification of Critical Factors for Crash Duration with Consideration of Unobserved Heterogeneity

CHUNG, Younshik<sup>1\*</sup>  · KIM, Sangsu<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Associate Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

<sup>2</sup>Master's Student, Department of Urban Planning and Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

\*Corresponding author: tpgist@yu.ac.kr

### Abstract

To reduce non-recurrent congestion, it is necessary to understand of crash duration and its causal factors. Therefore, there have been various efforts to develop crash duration models since 1980s. Specifically, regression type models based on survival analysis have mainly been applied to this area. However, most of them have applied general survival analysis models, in which durations with the same value of the covariates are assumed to have the same distribution. Unlike previous studies, the purpose of this study is to develop a crash duration with the consideration of unobserved heterogeneity. To carry out this purpose, we used a 1-year (2018) crash data set collected from the entire Korean freeway system, and estimated a frailty model for crash duration. As a result, 11 variables were statistically significant. Of these, eight variables exhibited an increasing duration: crashes that occurred in tunnel, crashes that occurred in section without street lighting, crashes with trailer-truck or specially equipped vehicle, crashes involved in completely damage vehicle, vehicle status was in off-road, rollover, or fire after crash. Conversely, crashes in the vicinity of tollgate, crashes including property damage only and crashes reported by freeway service patrol contributed to decreasing crash duration.

**Keywords:** crash duration, frailty model, freeway crash, survival analysis, unobserved heterogeneity

### 초록

비반복적 발생 혼잡을 감소시키기 위해서는 사고 지속시간에 대한 이해와 사고 지속시간에 영향을 미치는 인자에 대한 파악이 필요하다. 이를 위해 1980년대 이래 다양한 연구가 수행되어왔다. 특히, 생존분석 기반 회귀분석을 적용한 연구가 주류를 이루고 있으나, 대부분의 연구에서는 비관측 이질성을 고려하지 않고 모형을 구축했다. 따라서 본 연구의 주요 목적은 비관측 이질성(unobserved heterogeneity)의 영향력을 고려한 고속도로 사고 지속시간 모형을 구축하는 것이다. 분석을 위해 2018년 전국 고속도로에서 발생한 교통사고 자료가 활용되었으며, 프레이리티(frailty) 모형 기반 사고 지속시간 모형을 구축하였다. 분석결과, 11개의 변수가 사고 지

J. Korean Soc. Transp.  
Vol.38, No.6, pp.536-546, December 2020  
<https://doi.org/10.7470/jkst.2020.38.6.536>

pISSN : 1229-1366  
eISSN : 2234-4217

#### ARTICLE HISTORY

Received: 7 September 2020

Revised: 4 October 2020

Accepted: 11 October 2020

Copyright ©  
Korean Society of Transportation

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.

속시간에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 사고 지속시간을 증가시키는 요인은 터널에서 발생한 사고, 트레일러 및 특수차량의 사고, 차량이 완파된 사고, 도로이탈 추락이 발생한 사고, 전도 및 화재가 발생한 사고, 조명이 없는 도로구간에서 발생한 사고로 나타났다. 반면, 톨게이트에서 발생한 사고, 대물피해가 발생한 사고, 고속도로 순찰대의 순찰중 제보된 사고는 사고 지속시간을 감소시키는 요인으로 나타났다.

**주요어:** 사고 지속시간, 프레일티 모형, 고속도로 교통사고, 생존분석, 비관측 이질성

## 서론

교통 혼잡은 교통수요가 도로의 용량을 초과하는 경우 발생하며, 반복적 발생 혼잡(recurrent congestion)과 비반복적 발생 혼잡(non-recurrent congestion)으로 구분된다. 반복적 발생 혼잡은 정해진 시공간에 대하여 규칙적으로 혹은 반복적으로 발생하는 혼잡을 말하며, 출퇴근 시간에 발생하는 혼잡이 대표적이다. 반면, 비반복적 발생 혼잡은 특정 도로 구간의 용량이 일시적으로 감소하거나 일시적으로 교통수요가 급증하여 발생하는 혼잡을 말하며, 주로 교통사고, 차량고장, 도로공사, 기상악화, 대규모 행사와 같은 돌발상황으로 인해 발생한다. 국내의 경우 돌발상황 중 교통사고가 차지하는 비율은 44% 수준에 이르는 것으로 조사되었다(Kim and Lee, 2015; Lee et al., 2015).

교통사고로 인한 비반복적 발생 혼잡을 감소시키기 위해 많이 노력들이 이루어지고 있다. 특히 교통사고는 발생 시간과 장소에 대한 예측이 어렵기 때문에, 돌발상황관리 시스템(incident management systems)과 같은 교통사고 발생한 이후 신속한 사고의 대응분야에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다(Chung et al., 2010; Chung, 2017). 이 중 교통사고 관리 시스템(accident management system)의 주요 목적은 교통사고를 신속하게 처리하여 교통 혼잡을 최소화하는 것이다. 교통사고를 신속하게 처리하기 위해 운영자는 교통사고를 신속하게 파악(검지)하고 현장에 투입되는 인원과 장비를 적절하게 배치해야 한다. 즉, 신속한 교통사고 검지와 처리가 기본이며, 이렇게 사고의 검지와 처리 과정에 소요된 시간을 사고 지속시간(crash duration)이라 부른다.

결과적으로 교통사고로 인한 비반복적 발생 혼잡의 감소를 위해서는 사고 지속시간에 대한 이해가 필요하다. 또한, 사고 지속시간에 대한 이해는 사고 지속시간에 영향을 미치는 인자에 대한 파악이 기본이며, 이를 기반으로 제어 혹은 관리 가능한 인자의 구분 및 해석이 동반되어야 한다. 이러한 결과는 교통사고에 대한 처리 전략 수립은 물론 교통사고로 인한 비반복적 발생 혼잡의 감소 전략 수립에 활용된다. 이러한 배경으로 교통사고 지속시간에 대한 연구는 1980년대부터 전세계적으로 꾸준히 진행되어 왔다. 대부분의 연구는 회귀분석을 기반으로 진행되었으며, 일부 인공지능 기법이나 전문가 시스템을 기반으로 수행되었다. 회귀분석 기반 접근 방식의 경우, 사고 지속시간에 대한 분포는 좌우 대칭인 정규분포 보다는 로그 정규분포(log-normal distribution)와 같이 양의 왜도값(positive skewness)을 가진 분포를 형성하는 경우가 일반적이다. 따라서 생존분석(survival analysis) 혹은 지속시간 모형(duration model)을 주로 적용해 왔다. 특히, 모수적(parametric) 생존분석 모형을 적용한 대부분의 연구는 비관측 이질성(unobserved heterogeneity)을 모형에 고려하지 않았다. 즉, 공변량(covariate) 값이 동일한 개별 교통사고 지속시간의 분포는 동일할 것이라는 가정하에 모형을 구축한 것이다. 그러나 지속시간에 영향을 미칠 수 있는 모든 공변량이 모형에 포함된 것은 아닐 수 있다. 즉, 비관측 이질성이 존재할 수 있다는 것이다.

본 연구의 목적은 기존 연구들과 다르게 비관측 이질성을 고려하여 고속도로 교통사고 지속시간에 영향을 미치는 인자를 파악하는 것이다. 이를 위해 2018년 전국 고속도로에서 발생한 7,646건의 교통사고 자료를 기반으로 비관측 이질성을 고려한 프레일티(frailty) 모형을 구축하였다.

## 문헌고찰

### 1. 사고 지속시간 정의

사고 지속시간에 대한 정의는 다음과 같이 4단계로 정의할 수 있다(TRB, 1994; Nam and Mannering, 2000; Chung et al., 2007; Chung, 2010; Chung et al., 2010; Chung and Kim, 2017). (1)사고 검지 및 제보시간(사고가 발생한 후 검지 및 제보 될 때까지의 소요시간), (2)대응시간(사고가 접수된 후 사고 처리 팀이 현장에 도착할 때까지의 소요시간), (3)처리시간(사고 처리 팀이 현장에 도착한 후 처리를 완료할 때까지의 소요시간), (4)회복시간(사고 처리가 완료된 후 정상 교통류로 회복될 때까지의 소요시간). 본 연구에서 사고 검지 및 제보시간, 대응시간, 처리시간까지 3단계를 사고 지속시간으로 정의하였다. 즉, 사고 지속시간은 사고 검지 및 제보시간, 대응시간, 처리시간에 따라 결정된다.

### 2. 사고 지속시간 선행연구

국외의 경우, Golob et al.(1987)은 캘리포니아 고속도로에서 트럭이 포함된 사고를 분석하였고, 사고 지속시간은 로그-정규 분포를 따른다는 것을 연구하였다. Khatkhatk et al.(1995)은 Time sequential procedure 방법을 활용하여 시카고 고속도로 사고 지속시간을 분석하였다. Smith and Smith(2002)는 비모수 회귀 모형, 의사결정나무를 활용하여 버지니아 고속도로 사고 처리시간을 분석하였다. Ozbay and Noyan(2006)은 베이지안 네트워크(Bayesian Networks) 방법을 활용하여 버지니아 사고 처리시간을 분석하였다.

Jones et al.(1991)은 시애틀 고속도로에서 사고 지속시간을 생존분석을 활용하여 분석하였고, 이후 사고 지속시간에 대한 연구에서 생존분석이 많이 활용되었다. Nam and Mannering(2000)은 생존분석을 활용하여 워싱턴 고속도로 사고를 분석하였다. 사고 검지 및 제보시간(와이블 분포), 대응시간(와이블 분포), 처리시간(로그-로지스틱 분포) 각 시간별로 모형을 정립하였다. Chung(2010)은 생존분석을 활용하여 한국 고속도로 사고 지속시간을 분석하였다. 시간이 지남에 따라 사고 지속시간 패턴이 변하기 때문에 시간적 이전 가능성(temporal transferability)을 평가하였다. Al Kaabi et al.(2011)은 생존분석을 활용하여 아부다비 도시의 사고 처리시간을 분석하였다. AIC(Akaike Information Criterion) 테스트를 통해 와이블 분포를 선택하였다. Al Kaabi et al.(2012)은 생존분석을 활용하여 아부다비 고속도로의 사고 대응시간을 분석하였고, 비관측 이질성을 고려하였다. Hojati et al.(2013)은 생존분석을 활용하여 퀸스랜드 고속도로 사고 지속시간을 분석하였다. 충돌(Crash), 위험물(Hazard), 정차 차량(Stationary vehicle)으로 분류하여 모형을 정립하였고, 임의의 파라미터(random parameter)와 고정 파라미터(fixed parameter)를 사용하였다.

국외뿐만 아니라, 국내에서도 지속시간에 대한 다양한 연구가 이루어졌다. Shin and Kim(2002)은 다중회귀분석을 활용하여 주야간, 사상자 유무, 통합모형으로 분류하여 고속도로 돌발상황 지속시간을 분석하였다. Shin(2004)은 의사결정나무 방법을 활용하여 고속도로 돌발상황 지속시간을 분석하였다. Chung et al.(2007)은 생존분석을 활용하여 고속도로 사고 지속시간에 대해 분석하였다. Lee et al.(2015)은 의사결정나무와 K-Nearset Neighbor(KNN) 모형을 융합한 hybrid 모형을 활용하여 고속도로 사고 처리시간을 분석하였다. Chung and Kim(2017)은 Cox 모형을 활용하여 고속도로 사고 처리시간에 영향을 주는 인자를 분석하였다.

### 3. 선행연구와의 차별성

결과적으로 사고 지속시간에 관련된 연구에서는 생존분석을 주로 적용해 왔으며, 대부분의 선행 연구는 비관측 이질성을 무시하고 모형을 구축해왔다. 그러나 생존분석을 활용하여 사고 지속시간을 연구할 때, 비관측 이질성이란 불리는 중요한 변수를 생략하게 되면, 편향된(biased) 추정으로 이어질 수 있다(Hensher and Mannering, 1994;

Chung et al., 2015; Washington et al., 2020). 이러한 한계점을 극복하기 위해, 비관측 이질성을 고려한 사고 지속 시간 연구가 진행되었다(Al Kaabi et al., 2012; Chung et al., 2015; Liu et al., 2020). 국내에서도 사고 지속시간에 대한 연구는 꾸준히 진행되고 있지만, 비관측 이질성을 고려한 연구는 전무한 것으로 조사되었다. 이를 통해 본 연구에서는 생존분석 기법 중 비관측 이질성을 고려할 수 있는 프레이리티 모형을 활용하여 교통사고 지속시간에 영향을 미치는 요인을 분석하고자 한다.

#### 4. 이론적 고찰

프레이리티는 관측되지 않는 변수 때문에 가지는 이질성을 다룰 수 있는 접근법이다. 프레이리티 용어는 Vaupel et al.(1979)에 의해 처음 도입되었으며, 프레이리티 모형은 음이 아닌 프레이리티 파라미터  $\varnothing$ 를 위험 함수에 추가함으로써 다음과 같은 조건부 프레이리티가 된다.

$$h_f(t | \varnothing) = \varnothing h(t) \quad (1)$$

$h(t)$ 는 음이 아닌 임의의 변수  $t$ 를 가지는 위험 함수를 나타낸다. 그리고  $h_f$ 는 프레이리티를 포함함으로써 수정된 위험 함수를 의미한다. 만약,  $\varnothing > 1$  일 경우, 해당 위험 수준은 평균 보다 커진다. 반면,  $\varnothing < 1$  일 경우, 해당 위험 수준은 평균 사고 보다 작아지며 덜 “연약(frail)” 함을 나타낸다.

위험 함수와 생존 함수의 관계로부터, 프레이리티를 조건으로 하는 생존 함수는  $S_f(t | \varnothing) = S(t)^\varnothing$  와 같이 나타낼 수 있으며,  $S(\cdot)$ 은 로그-정규(log-normal), 로그-로지스틱(log-logistic), 와이블(Weibull), 고펜페르츠(gompertz) 분포와 같은 표준 모수적 모형의 생존 함수이며,  $f$ 는 프레이리티를 나타낸다. 또한, 관측되지 않는  $\varnothing$ 를 적분함으로써 모집단 생존 함수를 얻을 수 있다. 만약  $\varnothing$ 가 확률 밀도 함수  $g(\varnothing)$ 를 가질 경우, 비조건부 생존 함수는 다음과 같다.

$$S_f(t) = \int_0^\infty \{S(t)\}^\varnothing g(\varnothing) d\varnothing \quad (2)$$

수학적으로 다루기 쉽기 때문에,  $g(\varnothing)$ 는 감마 분포와 역-가우시안(inverse-Gaussian) 분포가 주로 사용된다. 만일,  $\varnothing$ 가 감마 분포를 따를 경우, 평균 1, 편차  $\theta$ 를 가진다.

$$g(\varnothing) = \frac{\varnothing^{1/\theta-1} \exp(-\varnothing/\theta)}{\Gamma\left(\frac{1}{\theta}\right) \theta^{1/\theta}} \quad (3)$$

그리고 비조건부 생존 함수는 다음과 같다.

$$S_f(t) = [1 - \theta \{\ln S(t)\}]^{-1/\theta} \quad (4)$$

$\varnothing$ 가 역-가우시안 분포를 따를 경우 다음과 같으며,

$$g(\varnothing) = \left(\frac{1}{2\pi\theta\varnothing^3}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2\theta}\left(\varnothing - 2 + \frac{1}{\varnothing}\right)\right] \quad (5)$$

이에 따른 비조건부 생존 함수는 다음과 같다.

$$S_f(t) = \exp\left[\frac{1}{\theta}\left(1 - [1 - 2\theta \ln\{S(t)\}]^{\frac{1}{2}}\right)\right] \quad (6)$$

## 사고 자료

### 1. 자료의 특성

본 연구는 2018년 1월부터 12월까지 전국 고속도로에서 발생한 총 8,636건의 교통사고 자료를 활용하였다. 고속도로에서 발생하는 교통사고들은 한국도로공사에서 관리하고 있으며, 자체적인 양식에 따라 입력된 자료이다. 입력된 자료는 (1)사고시간, (2)시간적 특성(계절, 시간), (3)사고 특성(사고 위치, 사고 유형, 차량 유형, 차량 피해, 사고 후 차량 위치, 사고후 차량 상태, 사고 심각도, 사고차량수), (4)환경적 특성(작업 구간, 기상 상태, 조명시설), (5)운영적 특성(사고제보 유형)으로 구분하여 분석에 활용하였다. 총 8,636건의 자료가 수집되었으나, 사고 자료의 일부 속성 정보가 누락되었거나 혹은 정보가 부정확한 경우 연구에서 제외하였다<sup>1)</sup>. 결과적으로 총 7,646건의 교통사고 자료만을 연구에 활용하였다.

### 2. 변수의 설정

변수는 자료의 형태에 따라 정량적 변수(quantitative variable)와 정성적 변수(qualitative variable)로 구분하였다. 정량적 변수로 사고차량수를 적용하였고, 나머지 정성적 변수들은 모두 더미변수(dummy variable)를 이용하여 분석에 적용하였다. 본 연구에서는 사고 지속시간을 종속변수로 사용하였으며, Table 1은 한국도로공사에서 관리하는 교통사고 자료를 기반으로 구축한 후보 변수들을 정리한 것이다. 이 표에서 계절에 대한 변수는 Chung et al.(2010), Chung(2010)에서 구분한 것과 같이 겨울(11월 29일-03월08일), 봄(03월09일-06월02일), 여름(06월 03일-09월18일), 가을(09월19일-11월28일)로 정의하였다. 시간에 대한 구분은 오전첨두(07:01-09:00), 주간(09:01-17:00), 오후첨두(17:01-20:00), 야간(20:00-07:00) 4가지 시간대로 구분하였다. 사고 심각도에 대한 변수는 사망(사망 1명 이상 발생), 중상(중상 1명 이상 발생), 경상(경상 1명 이상 발생), 대물피해로 구분하였다. 나머지 변수들은 한국도로공사에서 입력한 자료를 기반으로 구분하였으며, 관련항목에서 자료의 수가 충분하지 않을 경우 유사한 항목 혹은 기타 항목에 포함하여 정의하였다.

Table 1. Candidate variables

Category	Variable	Crashes	Type	
Temporal characteristics	Season	Winter	1,481	Dummy
		Spring	1,980	Dummy
		Summer	2,141	Dummy
		Fall	2,044	Dummy
	Time of day	AM peak	819	Dummy
		Midday	3,323	Dummy
		AP peak	967	Dummy
		Night	2,537	Dummy

1) "정보가 부정확한 경우"는 사고의 속성 정보 항목이 서로 일치하지 않는 경우를 의미함(예, 사고 관련 차량이 '화물차'로 분류되었지만, 관련 사고에 대한 기술자료는 '승용차' 관련 사고로 기술된 경우).

**Table 1. Candidate variables (continued)**

Category		Variable	Crashes	Type	
Crash characteristics	Location	Main lane	5,111	Dummy	
		Tunnel	315	Dummy	
		Ramp	1,189	Dummy	
		Tollgate	883	Dummy	
		Others*	148	Dummy	
	Crash type	Vehicle-facility	4,408	Dummy	
		Vehicle-person	37	Dummy	
		Vehicle alone	1,152	Dummy	
		Rear-end	1,421	Dummy	
		Collision	146	Dummy	
		Others	482	Dummy	
	Vehicle type	Sedan	3,906	Dummy	
		SUV	877	Dummy	
		Van	311	Dummy	
		Bus	80	Dummy	
		Small truck	476	Dummy	
		Midsized truck	1,153	Dummy	
		Large truck	376	Dummy	
		Truck with trailer	390	Dummy	
Specially equipped vehicle		77	Dummy		
Vehicle damage	Complete damage	272	Dummy		
	Severe damage	900	Dummy		
	Minor damage	2,904	Dummy		
	Slight damage	3,570	Dummy		
Crash characteristics	Vehicle location after crash	Main lane	3,859	Dummy	
		Median	113	Dummy	
		Shoulder	2,916	Dummy	
		Off-road	40	Dummy	
		Opposite direction	13	Dummy	
		Other locations	705	Dummy	
	Vehicle status after crash	Stop	6,913	Dummy	
		Rollover	365	Dummy	
		Overturn	167	Dummy	
		Fire	201	Dummy	
	Injury severity	Fatality	178	Dummy	
		Severe injury	85	Dummy	
		Minor injury	459	Dummy	
		Property damage only	6,869	Dummy	
		Number of vehicles involved		7,646	Number
Environmental characteristics	Work zone	Work zone	98	Dummy	
		No work zone	7,548	Dummy	
	Weather	Sunny	4,872	Dummy	
		Cloudy	689	Dummy	
		Rainy	1,793	Dummy	
		Snowy	272	Dummy	
		Foggy	20	Dummy	
	Street lighting facility	No applicable (midday)	3,513	Dummy	
		No street lighting	848	Dummy	
		Street lighting	3,285	Dummy	
Operational characteristics	Reporter type	CCTV	255	Dummy	
		Customer	851	Dummy	
		Traffic center	778	Dummy	
		Freeway service patrol	2,646	Dummy	
		Freeway information service provider	644	Dummy	
		Related agency	1,761	Dummy	
		Call center	386	Dummy	
		Others	325	Dummy	

\*Rest area.



## 모형의 추정 및 해석

### 1. 프레일티 모형 구축 및 평가

모수적 기법을 적용함에 있어서 위험 함수에 대한 적합한 분포를 선정해야 한다. 주로 사용되는 분포는 지수(exponential), 와이블(Weibull), 고펜퍼츠(Gompertz), 로그-정규(log-normal), 로그-로지스틱(log-logistic) 등이 있으며, 가장 적합한 분포를 선정하기 위해 AIC(Akaike's Information Criterion) 방법이 활용된다(Chung et al., 2007; Chung et al., 2010; Al kaabi et al., 2011; Al Kaabi et al., 2012). AIC 방법은 Akaike(1974)에 의해 제시되었으며, AIC 값이 낮을수록 우수한 모형으로 평가된다. AIC는 Equation 7을 통해 구할 수 있다.

$$AIC = 2(\log - likelihood) + 2k \tag{7}$$

여기서, log-likelihood는 모형의 적합도를 나타내는 척도이며, k는 모형에서 상수항을 포함한 변수의 수를 나타낸다. 본 연구에서는 AIC 값 기반 최종적으로 와이블 분포를 선정하였다.

또한, 비관측 이질성에 대한 영향력을 평가하기 위해 감마(gamma)와 역-가우시안(inverse-Gaussian) 프레일티 분포를 적용하였다. 그 결과, 이전 연구와 마찬가지로(Chung, 2011; Chung and Recker, 2015) 감마 프레일티 와이블 모형이 최종적으로 선정되었으며, Table 2는 추정된 감마 프레일티 와이블 모형을 나타낸다. 이 모형에서 감마 프레일티 파라미터는 0.367으로 추정되었으며, 이 값은 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 결과적으로 추정된 모형에서 비관측 이질성에 대한 효과는 유의한 것으로 평가되었다.

**Table 2. Weibull model with gamma frailty on estimated crash duration**

Variable	Coefficient	Standard error	p-value
Crash location: tollgate	-0.113	0.026	0.000
Crash location: tunnel	0.138	0.040	0.001
Vehicle type: truck with trailer	0.308	0.038	0.000
Vehicle type: specially equipped vehicle	0.291	0.081	0.000
Vehicle damage: complete damage	0.211	0.046	0.000
Vehicle location after crash: off-road	0.369	0.113	0.001
Vehicle status after crash: rollover	0.371	0.038	0.000
Vehicle status after crash: fire	0.371	0.054	0.000
Injury severity: property damage only	-0.190	0.027	0.000
Street lighting facility: no street lighting	0.137	0.028	0.000
Reporter type: freeway service patrol	-0.202	0.017	0.000
Constant	4.029	0.028	0.000
$\theta$ (frailty parameter)	0.367	0.024	0.000
Initial log likelihood	-8724.203	-	-
Log likelihood at convergence	-7924.196	-	-
Total number of freeway crash=7,646			
Likelihood-ratio test of $H_0:\theta=0$ :chibar2(01)=472.14			
Prob $\geq$ chibar2=0.000			

한편, 비관측 이질성을 고려하지 않은 와이블 기반 모형의 AIC 값은 16,346.53이며, 비관측 이질성을 고려한 감마 프레일티 와이블 모형의 AIC 값은 15,876.39로 나타났다. 즉, 비관측 이질성을 고려한 모형이 비관측 이질성을 고려하지 않은 모형에 비해 AIC 값이 우수한 것으로 나타났다. 마지막으로, 추정된 모형에 대한 적합성 평가를 위해 콕스-스넬 잔차(Cox-Snell residuals)를 활용하였다. 즉, 콕스-스넬 잔차에 대한 누적 위험 추정치가 원점을 지나며 기울기가 1인 그래프가 형성된 경우 추정된 모형은 적합한 것으로 평가한다(Cleves et al., 2008). Figure 1에

제시된 것처럼, 콕스-스넬 잔차에 대한 누적 위험 추정치 그래프는 비교적 기울기가 1인 그래프 방향으로 형성되었기 때문에, 사고 지속시간에 대한 모형이 적합하다고 평가할 수 있다.

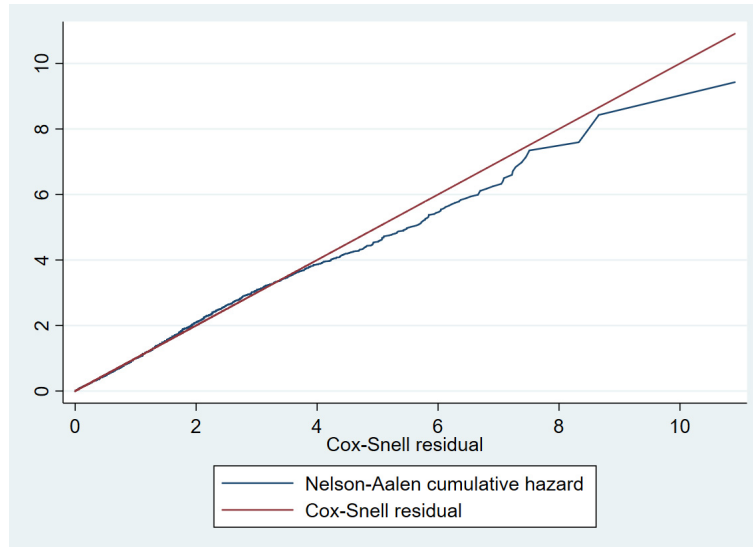


Figure 1. Graph on cumulative hazard of Cox-Snell residual

## 2. 모형의 해석

Table 2는 프레이티 모형으로 교통사고 지속시간을 추정된 결과를 요약한 것이며, 각 변수들은 유의수준 5%에서 유의한 것으로 나타났다. 모형에서 추정된 각 변수의 계수 값은 지수함수를 취함으로써 시간 비율(time ratio)로 해석하는 것이 일반적이다. Table 3은 각 변수에 대한 시간 비율 값을 제시한 것이다. 추정된 계수 값이 양이거나 시간 비율이 1보다 큰 경우 사고 지속시간은 증가하고, 계수 값이 음이거나 시간 비율이 1보다 작은 경우 사고 지속시간은 감소하는 것으로 해석한다.

사고 특성 변수들 중 톨게이트에서 발생한 사고의 경우, 추정 계수값은  $-0.113$ 이다. 이 값에 지수함수를 취하면  $\exp(-0.113)=0.893$ 가 되며, 톨게이트에서 발생한 교통사고는 다른 장소에서 발생한 교통사고에 비해 지속시간은 10.7% 감소하는 것으로 해석한다. 즉, 이러한 결과는 톨게이트 주변에서 사고가 발생할 경우, 견인차, 앰블런스 등과 같은 응급차량과 사고처리 팀의 접근성이 용이하여 지속시간이 감소한 것으로 추정된다. 다른 변수들도 동일한 방식으로 해석할 수 있다. 이를 토대로, 터널에서 발생한 교통사고는 다른 장소에서 발생한 교통사고에 비해 지속시간이 14.8% 증가하는 것으로 나타났다. 터널의 경우 장소의 특성상 밀폐되어 있어, 사고 처리 차량의 이동이 원활하지 못하여 작업시간이 길어져 사고 지속시간이 증가하는 것으로 볼 수 있다. 이전 연구 결과(Chung et al., 2007; Chung, 2010)와 같이 트레일러와 특수차량은 다른 유형의 차량 사고에 비해 사고 지속시간이 각각 36.1%, 33.8% 증가하는 것으로 나타났다. 트레일러와 특수차량의 경우 일반 차량에 비해 차량이 크기 때문에, 이를 견인하기 위해 대형견인차량이 필요하게 되어 사고 지속시간이 증가하는 것으로 볼 수 있다. 차량이 완파된 사고는 다른 유형의 차량 피해 사고에 비해 사고 지속시간이 23.5% 증가하는 것으로 나타났으며, 도로이탈 추락이 발생한 사고는 다른 유형의 차량 위치에 비해 사고 지속시간이 44.6% 증가하는 것으로 나타났다. 사고 후 차량의 상태가 전도 혹은 화재가 발생한 교통사고는 다른 유형에 비해 사고 지속시간이 44% 이상 증가하는 것으로 나타났다. 차량이 완파된 사고, 도로이탈 추락이 발생한 사고, 사고 후 전도 혹은 화재가 발생할 경우, 사고차량에 대한 견인 및 별도의 조치와 화재 진압이 필요하여 사고 지속시간이 증가하는 것으로 볼 수 있다. 대물피해가 발생할 경우 사망자 혹은 부상자가 발생한 교통사고에 비해 사고 지속시간이 17.3% 감소하는 것으로 나타났다. 대물피해가 발생한 사고의 경우, 사고차량



에 대한 처리만 이루어지고 인명 구조에 추가적인 조치가 필요하지 않기 때문에 사고 지속시간이 감소하는 것으로 볼 수 있다.

환경적 특성 변수들 중 조명이 없는 사고는 조명이 있거나 주간에 발생한 교통사고에 비해 사고 지속시간이 15.1% 증가하는 것으로 나타났다. 조명이 없을 경우 사고를 처리하는 과정에서 제한적인 시야 확보로 인해 사고 지속시간이 증가하는 것으로 볼 수 있다. 마지막으로, 운영적 특성 변수들 중 고속도로 순찰대의 순찰중 제보된 사고의 경우 다른 사고 제보 유형에 비해 사고 지속시간이 18.4% 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 순찰대의 즉각적인 교통사고 현장의 정리 및 제어의 결과로 추정된다.

**Table 3.** Estimated time ratio and percentage changes

Variable	Time ratio	Percentage change
Crash location: tollgate	0.893	-10.7
Crash location: tunnel	1.148	14.8
Vehicle type: truck with trailer	1.361	36.1
Vehicle type: specially equipped vehicle	1.338	33.8
Vehicle damage: complete damage	1.235	23.5
Vehicle location after crash: off-road	1.446	44.6
Vehicle status after crash: rollover	1.449	44.9
Vehicle status after crash: fire	1.449	44.9
Injury severity: property damage only	0.827	-17.3
Street lighting facility: no street lighting	1.147	14.7
Reporter type: freeway service patrol	0.817	-18.3

## 결론


본 논문은 고속도로에서 발생한 교통사고 지속시간에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위해 프레일티 모형을 적용하였다. 그 결과 감마 프레일티 와이블 모형(Weibull model with gamma frailty)을 기반으로 사고 지속시간에 대한 모형이 추정되었으며, 총 11개의 변수가 사고 지속시간에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이중, 터널에서 발생한 사고, 트레일러 혹은 특수차량의 사고, 차량이 완파된 사고, 도로이탈 추락이 발생한 사고, 사고 후 전도 혹은 화재가 발생한 사고, 조명이 없는 곳에서 발생한 사고는 사고 지속시간을 증가시키는 요인으로 나타났다. 반면, 톨게이트에서 발생한 사고, 대물피해가 발생한 사고, 고속도로 순찰대의 순찰중 제보된 사고는 사고 지속시간을 감소시키는 요인으로 나타났다.


본 연구는 기존 연구와 달리 관측되지 않았지만 모형에 영향을 줄 수 있는 랜덤 효과(random effect)를 고려하기 위한 프레일티 모형을 적용하였다. 이 모형은 랜덤 효과를 고려하지 않은 일반 모형보다 설명력이 우수한 것으로 나타났다. 그 결과 한국도로공사에서는 기존 연구 결과를 보완하여 사고 지속시간을 감소시키기 위한 전략의 수립도 가능할 것으로 판단한다. 한편, 본 연구는 1년간 전국 고속도로에서 발생한 교통사고 자료를 기반으로 수행되었다. 비록 8천여 건에 이르는 대규모 교통사고 자료를 기반으로 모형을 구축하였으나, 일부 변수에는 충분하지 못한 사고 자료를 포함하기도 하였다. 이러한 한계로 인해 다양한 변수들 간의 상호작용(interaction) 효과에 대한 분석은 진행하지 못했다. 그러나 다년간의 사고 자료를 확보하여 변수들 간의 상호작용 효과에 대한 분석을 통해 흥미로운 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 사고 지속시간은 사고의 검지, 사고 현장에의 출동 및 처리 시간에 직접적인 영향을 받으며, 이러한 영향은 교통혼잡이나 도로의 기하구조, 지역에 따라 다르게 형성될 수 있기 때문에, 본 연구에서 고려하지 못한 이러한 인자들을 별도로 혹은 동시에 고려한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

## Funding

This work was supported by the 2020 Yeungnam University research grant.

## ORCID

CHUNG, Younshik  <http://orcid.org/0000-0002-6855-9340>

KIM, Sangsu  <http://orcid.org/0000-0002-1130-2018>

## References

- Akaike H. (1974), A New Look at the Statistical Model Identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723.
- Al Kaabi A. M. S., Dissanayake D., Bird R. (2011), Analyzing Clearance Time of Urban Traffic Accidents in Abu Dhabi, United Arab Emirates, with Hazard-based Duration Modeling Method, *Transportation Research Record*, 2229(1), 46-54.
- Al Kaabi A. M. S., Dissanayake D., Bird R. (2012), Response Time of Highway Traffic Accidents in Abu Dhabi: Investigation with Hazard-based Duration Models, *Transportation Research Record*, 2278, (1), 95-103.
- Chung Y. (2010), Development of an Accident Duration Prediction Model on the Korean Freeway Systems, *Accident Analysis & Prevention*, 42(1), 282-289.
- Chung Y. (2011), Assessment of Non-recurrent Traffic Congestion Caused by Freeway Work Zones and its Statistical Analysis with Unobserved Heterogeneity, *Transport Policy*, 18(4), 587-594.
- Chung Y. (2017), Identification of Critical Factors for Non-recurrent Congestion Induced by Urban Freeway Crashes and Its Mitigating Strategies, *Sustainability*, 9(12), 2331.
- Chung Y., Kim S. J. (2017), Crash Clearance Time Analysis of Korean Freeway Systems using a Cox Model, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 37(6), 1017-1023.
- Chung Y., Song S., Choi K. (2007), A Prediction Model on Freeway Accident Duration using AFT Survival Analysis, *J. Korean Soc. Transp.*, 25(5), Korean Society of Transportation, 135-148.
- Chung Y., Recker W. W. (2015), Frailty Models for the Estimation of Spatiotemporally Maximum Congested Impact Information on Freeway Accidents, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(4), 2104-2112.
- Chung Y., Walubita L. F., Choi K. (2010), Modeling Accident Duration and Its Mitigation Strategies on South Korean Freeway Systems, *Transportation Research Record*, 2178(1), 49-57.
- Chung Y.-S., Chiou Y.-C., Lin C.-H. (2015), Simultaneous Equation Modeling of Freeway Accident Duration and Lanes Blocked, *Analytic methods in accident research*, 7, 16-28.
- Cleves M., Gould W., Gould W. W., Gutierrez R., Marchenko Y. (2008), *An Introduction to Survival Analysis using stata*, Stata press.
- Golob T. F., Recker W. W., Leonard J. D. (1987), An Analysis of the Severity and Incident Duration of Truck-involved Freeway Accidents, *Accident Analysis & Prevention*, 19(5), 375-395.

- Hensher D. A., Mannering F. L. (1994), Hazard-based Duration Models and Their Application to Transport Analysis, *Transport Reviews*, 14(1), 63-82.
- Hojati A. T., Ferreira L., Washington S., Charles P. (2013), Hazard Based Models for Freeway Traffic Incident Duration, *Accident Analysis & Prevention*, 52, 171-181.
- Jones B., Janssen L., Mannering F. (1991), Analysis of the Frequency and Duration of Freeway Accidents in Seattle, *Accident Analysis & Prevention*, 23(4), 239-255.
- Khattak A. J., Schofer J. L., Wang M.-H. (1995), A Simple Time Sequential Procedure for Predicting Freeway Incident Duration, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2(2), 113-138.
- Kim H. W., Lee Y. I. (2015), Developing Incident Response Time Prediction Model for Highway by KNN Algorithm, *The 73rd Conference of KST, Korean Society of Transportation*, 197-202.
- Lee S. B., Chang H. H., Lee Y. I. (2015), Development Hybrid Model for Incident Clearance Time Prediction in Highway, *The 73rd Conference of KST, Korean Society of Transportation*, 281-286.
- Liu Z., Wu H., Li R. (2020), Effects of the Penalty Mechanism Against Traffic Violations in China: A Joint Frailty Model of Recurrent Violations and a Terminal Accident, *Accident Analysis & Prevention*, 141, 105547.
- Nam D., Mannering F. (2000), An Exploratory Hazard-based Analysis of Highway Incident Duration, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 34(2), 85-102.
- Ozbay K., Noyan N. (2006), Estimation of Incident Clearance Times using Bayesian Networks Approach, *Accident Analysis & Prevention*, 38(3), 542-555.
- Shin C. H. (2004), Development of Decision-trees for Freeway Incident Duration Prediction, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 24(5d), 681-689.
- Shin C. H., Kim J. H. (2002), Development of Freeway Incident Duration Prediction Models, *J. Korean Soc. Transp.*, 20(3), Korean Society of Transportation, 17-30.
- Smith K., Smith B. L. (2002), *Forecasting the Clearance Time of Freeway Accidents*.
- TRB (1994), *Highway Capacity Manual: Special report 209*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.
- Vaupel J. W., Manton K. G., Stallard E. (1979), The Impact of Heterogeneity in Individual Frailty on the Dynamics of Mortality, *Demography*, 16(3), 439-454.
- Washington S., Karlaftis M. G., Mannering F., Anastasopoulos P. (2020), *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis* CRC press.