

# 고속도로 통행량 예측을 위한 새로운 동적 알고리즘

이광연 · 박기섭<sup>†</sup>

## A New Dynamic Prediction Algorithm for Highway Traffic Rate

Gwangyeon Lee · Kisoeb Park<sup>†</sup>

### ABSTRACT

In this paper, a dynamic prediction algorithm using the cumulative distribution function for traffic volume is presented as a new method for predicting highway traffic rate more accurately, where an approximation function of the cumulative distribution function is obtained through numerical methods such as natural cubic spline interpolation and Levenberg-Marquardt method. This algorithm is a new structure of random number generation algorithm using the cumulative distribution function used in financial mathematics to be suitable for predicting traffic flow. It can be confirmed that if the highway traffic rate is simulated with this algorithm, the result is very similar to the actual traffic volume. Therefore, this algorithm is a new one that can be used in a variety of areas that require traffic forecasting as well as highways.

**Key words** : highway traffic rate, cumulative distribution function, natural cubic spline, Levenberg-Marquardt, random number generation algorithm

### 요약

본 논문에서는 고속도로 통행량을 보다 정확하게 예측하기 위한 새로운 방법으로 통행량에 대한 누적분포함수를 이용한 동적 예측 알고리즘을 제시한다. 여기서 누적분포함수의 근사함수를 수치적 방법인 내추럴 큐빅 스플라인(natural cubic spline) 보간법과 레벤버그-마퀴트(Levenberg-Marquardt) 방법을 통해 얻는다. 이 알고리즘은 금융수학에서 활용하는 누적 분포함수를 이용한 난수 생성 알고리즘을 통행량 예측에 알맞도록 새롭게 구조화한 것이다. 이 알고리즘으로 고속도로 통행량을 시물레이션하면 실제 통행량과 매우 흡사한 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 이 알고리즘은 고속도로뿐만 아니라 통행량 예측이 필요한 다양한 분야에서 활용할 수 있는 새로운 알고리즘이다.

**주요어** : 고속도로 통행량, 누적 분포 함수, 내추럴 큐빅 스플라인, 레벤버그-마퀴트, 난수 생성 알고리즘

## 1. 서론

우리나라 고속도로 각 톨게이트를 출입하는 차량 대수를 조사하여 산출되는 고속도로 전체 통행량 자료는 합리적인 고속도로 교통계획 수립과 사회간접자본 투자 분석에 필수적인 기초자료로 활용되고 있다. 하지만 현재의

톨게이트 통행량을 통계적으로 정리한 결과는 점 추정치(point estimate)를 제공(배용귀 등, 2016)하므로 미래에 대한 추정의 불확실성 측면을 제대로 반영하지 못한다. 이와 같은 추정 방법으로는 명절, 교통사고, 기상 조건 등의 특별하고 예외적인 날의 통행량을 정확하게 예측하기 쉽지 않다. 그런데 고속도로 통행량을 명절, 기상 조건, 여가 시기, 교통사고 등에 따라 달라지는 정도를 분석할 수 있어야 하고 이를 바탕으로 앞으로의 통행량을 추정하는 것은 매우 중요하다. 이때 단순히 톨게이트를 통과하는 교통량 데이터를 고속도로 교통에 대한 여러 가지 타당성 평가를 위한 예측 자료로 이용한다면, 예측 교통량은 실제 교통량과 비교하여 기대하지 않은 오차를 발생시킬 수 있다. 교통 수요의 과대 또는 과소 추정에 따

\* 이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2017R1E1A1A03070225)

Received: 4 May 2020, Revised: 16 August 2020,

Accepted: 18 August 2020

<sup>†</sup> Corresponding Author: Kisoeb Park

E-mail: kisoeb@gmail.com

Dept. of Mathematics, Incheon National University, Korea

라 사회간접자본의 부적절한 투자로 민자사업의 경우 우발채무가 발생할 수도 있고, 불필요한 투자가 발생할 수도 있다. 이는 결국 비효율적인 국가 예산의 집행으로 이어지게 된다. 교통 분석가 또는 교통정책 입안자나 결정자들이 교통 관련 시설에 대한 투자를 결정할 때 합리적인 의사결정을 할 수 있도록 하기 위해서는 발생 가능성이 높은 교통량의 추정 혹은 원하는 미래 시점에서 교통량의 범위를 가능하면 정확하게 추정하는 것이 필요하다. 따라서 정확한 추정은 교통량의 불확실성을 감소시켜 교통뿐만 아니라 관련된 모든 분야에서 매우 중요하게 활용할 수 있다(김성환 등, 2010; 이광연 등, 2018; 이광연 등, 2019).

많은 선행 연구에서 기상 조건과 관련된 교통량 분석이 이루어졌고, 기상 데이터를 이용하여 특정 지역 고속도로 교통혼잡을 예측한 모델도 제시하였다(곽하영 등, 2015; 김강수 등, 2009; 김태곤 등, 2012; 채정표 등, 2019). 특히 김경현 등(2015)은 교통량을 예측하기 위해 예전부터 사용하고 있는 교통 수요 모형에서 예측 오차에 문제점이 있음을 지적하고 이를 개선하기 위하여 TCS (Toll Collection System) 자료를 기초로 한 유전자 알고리즘을 제시하였다. 그러나 이 알고리즘으로도 다양한 상황에 따른 교통량의 변화를 예측하기는 쉽지 않다.

본 논문에서는 기존의 예측(유정훈 등, 2011; 임용택, 2010; Mahmassani, 2001)보다 정확한 추정을 위하여 실제 우리나라 고속도로 통행량 자료의 누적분포함수(cumulative distribution function; CDF)의 근사함수를 이용하여 고속도로에 대한 통행량을 예측할 수 있는 새로운 동적 예측 알고리즘을 제시하고자 한다. 이때 CDF의 근사함수를 추정하기 위하여 수치적 방법인 보간법 중에 흔히 활용되는 내추럴 큐빅 스플라인(natural cubic spline; NCS) 보간법(Gerald, 1999)과 비선형 최소 자승(nonlinear least squares) 문제를 푸는 가장 대표적인 방법으로 레벤버그-마퀴트(Levenberg - Marquardt; L-M) 방법(Levenberg, 1994; Marquardt, 1963)을 사용한다. 특히 실제 통행량의 분포 특성을 반영한 CDF의 근사함수를 활용하여 난수(random number)를 생성하고, 이 난수들을 이용(Charnes, 2002; Papoulis 등, 2002)하면 여러 가지 돌발 상황에서도 정확한 고속도로 통행량을 예측할 수 있다.

본 논문의 본문에서는 연구에 필요한 기본적인 개념을 소개하고, NCS 보간법과 L-M 방법을 이용하여 CDF의 근사함수를 구하는 방법을 제시한다. 이를 활용하여 난수 생성 알고리즘(random number generation algorithm;

RNGA)을 이용한 고속도로 통행량 예측 시뮬레이션 과정을 제시한다. 특히 상대오차를 이용하여 통행량 추정어느 정도 정확한지에 대한 확신을 가질 수 있도록 한다. 결론에서는 본 연구의 전체적인 결과를 바탕으로 교통량을 추정하는 방법과 문제점 등을 제시한다.

## 2. 본론

### 2.1 CD의 히스토그램

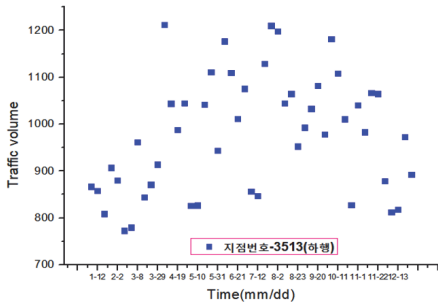
지금까지 교통모형에 대하여 많은 연구가 진행되었고 다양한 결과가 도출되었지만 고속도로 통행량 예측 알고리즘에 대한 연구는 상대적으로 미흡하다. 게다가 보다 현실적이고 실제적인 현상을 활용하여 예측하는 방법은 많지 않기 때문에 이에 대한 연구가 좀 더 활발하게 진행될 필요가 있다.

이와 같은 요구에 본 연구에서는 고속도로 통행량에 대한 새로운 예측 알고리즘을 제시하기 위하여 먼저 실제 우리나라 고속도로 통행량 자료를 누적분포(cumulative distribution; CD)와 히스토그램으로 표현한다. 이때 실제 교통량 자료를 사용하기 위하여 교통량 정보제공 시스템<sup>1)</sup>에서 임의로 고속도로 지점을 선정하고, 시간에 따른 통행량을 산점도로 나타내고 이에 대응하는 CD의 히스토그램을 그린다. 완성된 히스토그램을 이용하여 실제 통행량 자료의 CD에 대하여 수치적 기법인 보간법과 비선형 최소 자승 방법을 적용한 CDF의 근사함수를 생성한다. 이렇게 얻은 CDF의 근사함수로부터 역변환법(inverse transform method)과 시뮬레이션기법을 활용하면 고속도로 통행량이라는 확률변수를 생성하는 최적화된 동적 예측 알고리즘을 구조화할 수 있다.

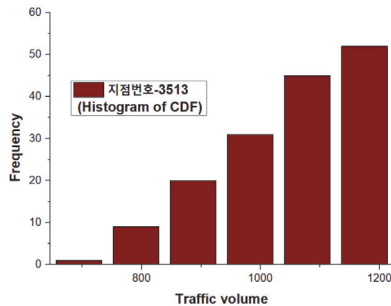
본 연구에서는 통행량의 CD를 결정하기 위하여 중부·대전통영고속도로의 지점번호-3513인 톨게이트의 하행 방향을 선정하고, 2016년 매주 화요일 7시부터 8시까지와 매주 토요일 10시부터 11시까지 톨게이트의 통행량 자료를 이용하였다.

실제로 Fig. 1(a)와 1(c)는 중부·대전통영고속도로(지점번호-3513) 하행방향의 2016년 매주 화요일 7시부터 8시까지와 토요일 10시부터 11시까지의 시간에 따른 통행량을 산점도로 나타낸 것이고, Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)에 대한 52개 실제 통행량 자료의 CD에 대한 히스토그램이고 Fig. 1(d)는 Fig. 1(c)에 대한 47개 실제 통행량 자료의 CD에 대한 히스토그램이다.

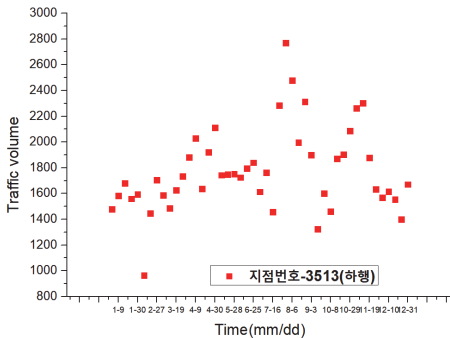
1) 교통량 정보제공 시스템 (<http://www.road.re.kr/main/main.asp>)의 자료



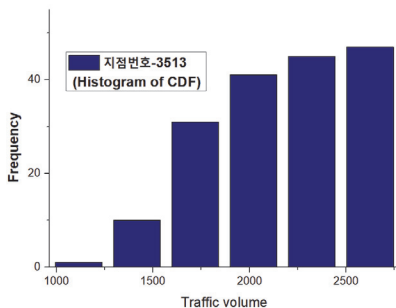
(a) Actual Traffic Distribution (every Tue. (7~8, 2016))



(b) CD(Cumulative Distribution) of (a)



(c) Actual Traffic Distribution (every Sat. (10~11, 2016))



(d) CD(Cumulative Distribution) of (c)

Fig. 1. Jungbu Expressway (Daejeon-Tongyeong Line) - ID 3513 (downbound)

## 2.2 NCS 보간법과 LV 방법을 이용한 CDF

이제 실제 통행량 자료의 CD에 대한 히스토그램으로부터 수치적 방법인 보간법 중에 가장 널리 이용되는 부분적인 근사 다항식을 이용하는 NCS 보간법과 비선형 최소 자승 문제를 푸는 가장 대표적인 방법인 L-M 방법으로 CDF의 근사함수를 구하자. 두 가지 방법 중에서 NCS 보간법은 고정된 자료에 대하여 매끄러운 곡선과 고차원 다항식 보간법의 특성상 진동하는 습성을 가지고 있지 않기 때문에 스플라인 함수 중 가장 활용빈도가 높다. 그래서 NCS에 대하여 먼저 알아보자. 일반성을 잃지 않고  $n+1$ 개의 점  $(x_0, y_0), \dots, (x_n, y_n) (x_0 < \dots < x_n)$ 에 대하여,  $F(x_i) = y_i (0 \leq i \leq n)$ 를 만족하는 NCS 함수  $F(x)$ 를 다음과 같이 정의한다.

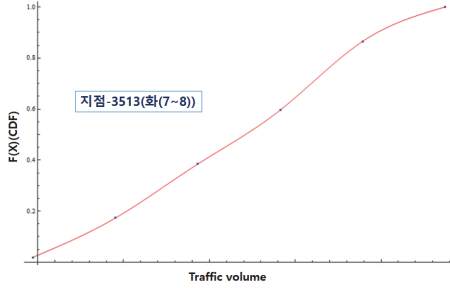
$$F(x) = F_i(x), x_i \leq x \leq x_{i+1} (i = 0, \dots, n-1)$$

여기서 각각의  $F_i(x)$ 는 3차 다항함수이다.

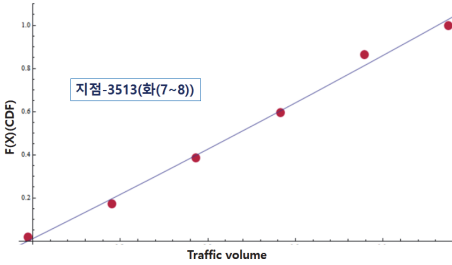
NCS 보간법의 장점은 각 구간마다에서 실제 자료에 매우 근접한 매끄러운 근사함수를 구할 수 있다는 것이다. Fig. 1(b)와 1(d)로부터, 제한된 점에서 CDF의 근사함수를 얻기 위하여 두 단계를 거친다. 첫째, 통행량에 대한 최댓값( $x_0$ )과 최솟값( $x_n$ )을 정한다. 둘째, 닫힌 구간  $[x_0, x_n]$ 을  $n$ 개의 등간격으로 나눈다. 여기서, 각 구간  $[x_{i-1}, x_i]$ 에 대한 누적상대도수  $\beta_i (\sum_{i=1}^n \beta_i = 1)$ 와  $\alpha_i = (x_{i-1} - x_i)/2$ 로부터 제한된 점  $(\alpha_i, \beta_i) (i = 1, \dots, n)$ 를 각각 얻는다. 이런 과정으로부터 NCS 보간법에 의해 제한된 점들을 지나는 CDF의 근사함수  $F(x)$ 를 얻을 수 있다. 실제로 Fig. 2(a)와 2(c)는 Fig. 1(b)의 CD ( $N=52, n=6$ )와 Fig. 1(d)의 CD ( $N=47, n=6$ )에 대한 각각의 히스토그램을 NCS 보간법을 적용하여 얻은 CDF의 근사함수  $F(x)$ 의 그래프이다. NCS 보간법은 하나의 근사함수가 아닌  $n$ 개의 구간 각각에서 CDF의 근사함수를 구하는 방법이다.

이와 대조적으로 L-M 방법은 하나의 근사함수로 실제 통행량 자료에 대한 동적 예측 알고리즘을 구현하는 것이다. L-M 방법은 가우스-뉴턴법(Gauss - Newton method)과 경사하강법(gradient descent method)이 결합된 것으로 해로부터 멀리 떨어져 있을 때는 경사하강방식으로, 해 근처에서는 가우스-뉴턴 방식으로 해를 찾는 것이다. 그런데 L-M 방법은 가우스-뉴턴법보다 초기값이 해로부터 멀리 떨어진 경우에도 해를 찾을 확률이 높다. 또 안

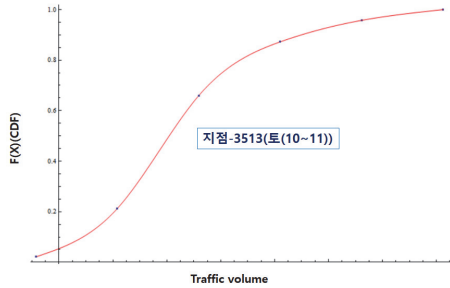
정적으로 해를 찾을 수 있으며 비교적 빠르게 해에 수렴하기 때문에 비선형 최소 자승 문제와 비선형 함수 최적화 문제에서 가장 널리 쓰이는 방법이다. L-M 방법의 1차 적용은 최소 제곱 곡선 적합 문제에 있다.



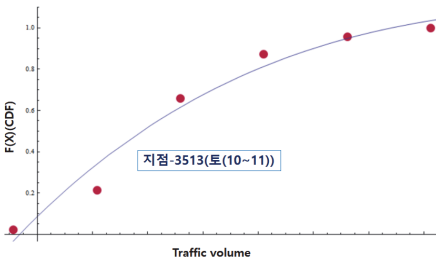
(a) NCS interpolation(every Tue. (7~8))



(b) L-M Method (every Tue. (7~8))



(c) NCS interpolation(every Sat. (10~11))



(d) L-M Method (every Sat. (10~11))

Fig. 2. The CDF of Traffic on Highway

NCS 보간법으로부터 얻은 점  $(\alpha_i, \beta_i) (i = 1, \dots, n)$ 에 대해 편차  $r_i = y_i - f(x, \mathbf{p}) (i = 1, \dots, n)$ 의 제곱합이 최소화 되도록 CDF의 근사함수  $F(x) = f(x, \mathbf{p})$ 의 매개변수  $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ 를 찾는 방법이다. 실제로 Fig. 2(b)와 2(d)는 Fig. 1(b)의  $CD(N=52, n=6)$ 와 Fig. 1(d)의  $CD(N=47, n=6)$ 에 대한 각각의 히스토그램을 L-M 방법을 적용하여 얻은 CDF의 근사함수  $F(x)$ 의 그래프이다.

### 2.3 RNGA를 이용한 통계적 시뮬레이션

이제 NCS 보간법과 L-M 방법을 이용한 우리나라 고속도로 통행량에 대한 동적 예측 알고리즘인 난수생성 알고리즘을 건설해 보자.

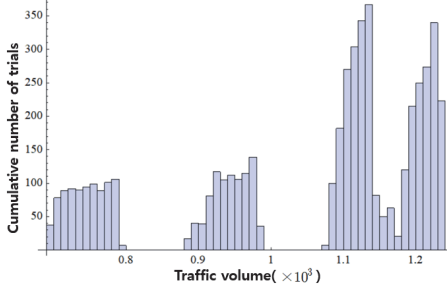
먼저, 앞에서 구한 CDF의 근사함수  $F(x)$ 와 구간  $[0, 1]$ 에서의 균등분포(uniform distribution; UD)를 이용하여 생성한 난수  $R$ 에 대하여  $R = F(x)$ 라 놓으면 역함수  $x = F^{-1}(R)$ 를 구할 수 있다. 이 역함수를 이용하여  $k$ 번 시뮬레이션하면 통행량을 의미하는 확률변수  $x_i (i = 1, \dots, k)$ 를 얻을 수 있고, 이 확률변수들의 평균값을 이용하여 특정시점의 고속도로 통행량을 예측할 수 있게 된다.

난수 생성으로 샘플링한  $k$ 개의 확률변수  $x_i$ 를 구하는 난수 생성 알고리즘(random number generation algorithm; RNGA)은 다음과 같은 단계로 구성된다.

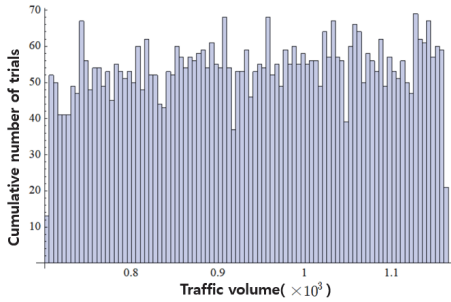
- ① 확률변수  $x$ 에 대한 CDF의 근사함수  $R = F(x)$ 를 수치적 방법인 NCS 보간법과 L-M 방법을 이용하여 구한다.
- ②  $R = F(x)$ 의 역함수  $x = F^{-1}(R)$ 를 구한다.
- ③ 확률변수  $x_i (i = 1, \dots, k)$ 를 구하기 위하여 시뮬레이션 횟수  $k$ 를 정한다.
- ④ 구간  $[0, 1]$ 에서 UD를 이용하여 난수  $R_1, R_2, \dots, R_k$ 을 생성하고 확률변수  $x_i = F^{-1}(R_i) (i = 1, \dots, k)$ 를 구한다.
- ⑤ 단계 ④에서 구한 확률변수  $x_i$ 의 평균값을 고속도로의 평균 통행량(traffic volume; TV)이라 한다. 즉,

$$TV = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i.$$

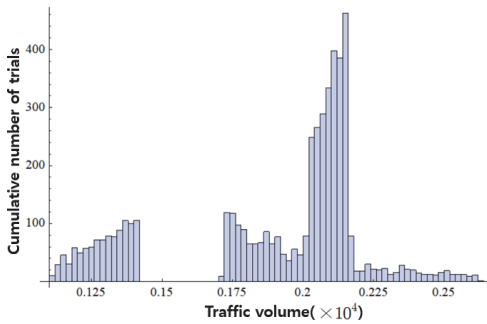
위의 알고리즘으로부터 구한 TV값이 우리가 원하는 어느 시점의 고속도로 예측 통행량이다. 이 예측 통행량



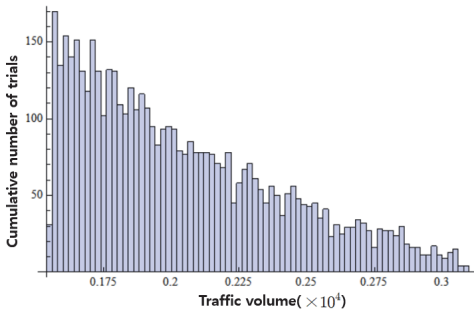
(a) NCS interpolation(every Tue. (7~8))



(b) L-M Method (every Tue. (7~8))



(c) NCS interpolation(every Sat. (10~11))



(d) L-M Method (every Sat. (10~11))

Fig. 3. The random variable of TV

이 얼마나 정밀한지 확인하기 위하여 다음과 같이 정의되는 평균값의 정밀도(precision; PCS)를 이용한다.

$$PCS = 1.96 \times MSE$$

PCS에서 1.96은 95% 신뢰수준의 반구간을 나타내고 MSE는 평균 가치평가의 정밀한 측정 중의 하나인 평균 제곱오차(mean squared error, MSE)로 다음과 같이 정의된다.

$$MSE = \frac{s}{\sqrt{k}} \quad \text{또는} \quad k = \frac{s^2}{MSE^2}$$

여기서  $s^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k [x_i - TV]^2$ 은 통행량의 분산 추정치이다.

따라서 PCS의 정의로부터 PCS의 값이 작을수록 RNGA의 결과가 정밀하게 예측되었다는 것을 알 수 있다.

이제 위에서 제시된 RNGA를 이용하여 고속도로 통행량을 실제로 예측해 보기 위하여, 중부·대전통영고속도로(지점번호-3513) 하행방향의 2016년 매주 화요일 7시부터 8시까지와 토요일 10시부터 11시까지의 실제 통행량을 사용하자.

Fig. 3은  $k = 5000$ 일 때 시뮬레이션을 수행하여 생성된 확률변수(즉, 통행량)를 히스토그램으로 나타낸 것이고, Table 1은 RNGA를 이용하여 NCS 보간법과 L-M 방법에 대한 매주 화요일 7시부터 8시까지와 토요일 10시부터 11시까지의 시간에 따른 평균 통행량, 표준편차, PCS를 나타낸 것이다.

Table 1. Traffic volume and PCS using RNGA (단위, 대)

	Tuesday		Saturday	
	NCS	L-M	NCS	L-M
Average	1048.54	938.87	1897.36	1668.61
Standard Deviation	168.20	131.47	343.46	359.89
PCS	4.662	3.644	9.52	9.976

Table 1로부터 중부·대전통영고속도로(지점번호-3513) 하행방향의 2017년 매주 화요일 7시부터 8시까지와 토요일 10시부터 11시까지의 통행량 예측을 정리하면 다음과 같다.

- ① 화요일 7시부터 8시까지의 통행량이 약 939대 ~ 약 1049대 사이에 있다고 예측할 수 있다. 여기서 NCS 보간법의 PCS는 4.662이고 L-M 방법의 PCS는 3.644이므로 PCS값이 낮은 L-M 방법을 통해 얻은 약 939대가 실제 통행량에 더 근접할 것이라고 예측할 수 있다.
- ② 토요일 10시부터 11시까지의 통행량은 약 1669대 ~ 약 1897대 사이에 있다고 예측할 수 있다. 여기서 NCS 보간법의 PCS는 9.52이고 L-M 방법의 PCS는 9.976이므로 PCS값이 낮은 NCS 보간법을 통해 얻은 약 1897대가 실제 통행량에 더 근접할 것이라고 예측할 수 있다.

한편, RNGA의 값과 2017년 실제자료(Real Data, RD)의 값의 비율인 다음과 같이 정의되는 상대오차(Relative Error; RE)를 이용하면 실제 통행량을 예측할 때 상황에 따라 NCS 보간법과 L-M 방법 중에서 보다 효과적인 방법을 선택할 수 있다.

$$RE(\%) = \frac{|RNGA - RD|}{RNGA} \times 100$$

여기서 RNGA는 NCS 보간법과 L-M 방법을 이용하여 얻은 예측 통행량 값을 의미하고, RD는 2017년 실제 고속도로 통행량 자료이다.

Table 2는 2017년 실제 통행량과 RNGA를 통해 얻은 예측 통행량 값 사이의 RE를 나타낸 것이다.

**Table 2.** Relative error between real data and RNGA

	NCS	L-M	RD (Real Data, 2017)
Average	1048.54	938.87	955.44
RE(%)	8.88	1.76	

(a) every Tue. (7~8) (단위, 대)

	NCS	L-M	RD (Real Data, 2017)
Average	1897.36	1668.61	1857.43
RE(%)	2.1	11.32	

(b) every Sat. (10~11) (단위, 대)

Table 2(a)에서 NCS 보간법과 L-M 방법의 RE가 각각 약 8.88%와 1.76%가 됨을 확인할 수 있는데, 우리가

예측한 결과와 같이 L-M 방법을 통해 얻은 화요일 7시부터 8시까지의 통행량인 약 939대에 더 근접한 약 955대임을 확인할 수 있다. 따라서 화요일 통행량의 경우는 NCS 보간법보다 L-M 방법이 보다 정확하게 통행량을 예측했음을 의미한다.

Table 2(b)에서는 L-M 방법과 NCS 보간법의 RE가 각각 약 11.32%와 2.1%가 됨을 확인할 수 있는데, 앞에서 예상한 결과와 같이 NCS 보간법을 통해 얻은 토요일 10시부터 11시까지의 통행량인 약 1897대에 더 가까운 약 1857대임을 확인할 수 있다. 따라서 토요일 통행량의 경우는 L-M 방법보다 NCS 보간법이 보다 정밀하게 통행량을 예측했음을 의미한다.

### 3. 결론

본 논문에서는 우리나라 고속도로에 대한 통행량을 예측하기 위하여 RNGA를 제안하였다. 이 알고리즘은 통행량의 동적인 경향을 유지하기 위하여 우리나라 고속도로 통행량의 실제 자료에 대한 CDF의 근사함수를 이용한다. 통행량의 누적 분포에 대한 CDF의 근사함수는 수치적 기법인 NCS 보간법과 L-M 방법을 이용하였다. 우리나라 고속도로 통행량의 특성을 반영한 중부·대전통영고속도로(지점번호-3513) 하행방향의 2016년 매주 화요일 7시부터 8시까지와 토요일 10시부터 11시까지의 통행량 자료에 대한 CDF의 근사함수로부터 RNGA를 이용하여 난수를 생성하였고 역변환법을 적용하여 통행량이라는 확률변수를 얻어 우리나라 고속도로 통행량을 예측하였다. 우리의 동적 예측 RNGA가 얼마나 정확한지 확인하기 위하여 중부·대전통영고속도로(지점번호-3513) 하행방향의 2017년 매주 화요일 7시부터 8시까지와 토요일 10시부터 11시까지의 실제 통행량을 이용하였다.

그 결과 NCS 보간법과 L-M 방법 중에서 PCS이 작을 수록 RNGA를 통해 얻은 예측 통행량이 실제 통행량에 흡사하다는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 예측 통행량의 산포도가 작다는 것은 그만큼 예리하게 예측되었음을 의미한다. 이를 확인하기 위하여 RE를 이용하면 화요일 통행량의 경우는 NCS 보간법보다 L-M 방법이 더 정확하게 예측되었음을 알 수 있었고, 토요일 통행량의 경우는 L-M 방법보다 NCS 보간법이 보다 정밀하게 예측되었음을 확인할 수 있었다. 따라서 두 가지 방법 중 상황에 따라 적절한 방법으로 시뮬레이션 할 수 있다.

본 논문에서 제안한 우리나라 고속도로 통행량에 대한 동적 예측 알고리즘인 RNGA를 이용하면 기존의 여러

방법보다 효율적이고 정확하게 통행량을 예측할 수 있다. 또한, 고속도로 통행량 예측 모형의 알고리즘에 대한 시스템을 구축함으로써 다양한 상황에 보다 효과적이고 빠르게 대처할 수 있으며, 통행량 예측뿐 만 아니라 다양한 분야에 활용하고 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- 곽하영, 조창현, “강우와 통행량이 교통사고 발생에 미치는 영향 연구: 동해고속도로와 영동고속도로의 교통사고 발생 분석을 사례로”, 기후연구, 제10권, 제3호, pp. 263-272, 2015.
- 김강수, 김진석, 조혜진, “기종점 통행량 변화에 따른 링크 교통량 추정치의 불확실성에 관한 연구 (국가교통 DB를 이용한 구간 링크 교통량 추정을 중심으로)”, 대한교통학회지, 제27권, 제1호, pp. 117-127, 2009.
- 김경현, 윤정은, 박재범, 남승태, 류종득, 윤일수, “고속도로 교통수요모형 구축을 위한 유전자 알고리즘 기반 TCS 차종별 최적 승용차환산계수 산정”, 한국도로학회 논문집, 제17권, 제3호, pp. 97-105, 2015.
- 김성환, 백승걸, 한동희, “고속도로 통행량과 경제성장률 관계”, 대한교통학회지, 제7권, 제4호, pp. 75-79, 2010.
- 김태곤, 정연우, 류기홍, 박배성, “통행량이 적은 고속도로에 있어서 밀도와 점유율사이의 관계 연구: 부산을 산고속도로를 대상으로”, 대한토목학회 학술대회, pp. 2220-2223, 2012.
- 배용귀, 이성로, “선박 통행량의 확률론적 예측”, 한국구조물진단유지관리공학회, 제20권, 제2호, pp. 294-295, 2016.
- 유정훈, 이무영, “실제 통행기록 자료를 활용한 고속도로 Corridor 시간대별 O-D 구축”, 대한토목학회논문집, 제31권, 제2호, pp. 185-192, 2011.
- 이광연, 박기섭, “접근성 지표의 알고리즘을 이용한 2011년과 2017년의 우리나라 고속도로 분석”, 한국시물레이션학회 논문지, 제27권, 제4호, pp. 9-18, 2018.
- 이광연, 박기섭, “채권 옵션의 가격결정을 위한 이자율 모형의 관계에 대한 알고리즘과 몬테 카를로 시뮬레이션”, 한국시물레이션학회 논문지, 제28권, 제3호, pp. 49-56, 2019.
- 임용택, “균형 통행분포모형연구”, 대한교통학회지, 제28권, 제6호, pp. 159-166, 2010.
- 채정표, 성현곤, “도로 네트워크와 통행량 기반의 공간 접근성 지수가 주택가격에 미치는 영향”, 대한국토·도시계획학회, 제54권, 제2호, pp. 76-83, 2019.
- Charnes, J.M., “Sharper estimates of derivative values”, Financial Engineering News, Vol. 26, pp. 6-8, 2002.
- Gerald, C.F., Applied Numerical Analysis, Addison-Wesley, 1999.
- Levenberg, K., “A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares”, The Quarterly of Applied Mathematics, Vol. 2, pp. 164-168, 1944.
- Mahmassani, H.S., “Dynamic Network Traffic Assignment and Simulation Methodology for Advanced System Management Applications”, Networks and Spatial Economics volume, Vol. 1, pp. 267-292, 2001.
- Marquardt, D.W., “An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters”, Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol. 11, pp. 431-441, 1963.
- Papoulis, A. and Pillai, S.U., Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 4th Edition, McGraw-Hill, 2002.



**이 광 연** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-9097-8744> / [gylee@hanseo.ac.kr](mailto:gylee@hanseo.ac.kr))

1987 성균관대학교 수학과 학사  
1989 성균관대학교 수학과 석사  
1992 성균관대학교 수학과 박사  
1996~ 1997 미국 와이오밍주립대학교 박사후과정  
2004~ 2006 미국 아이오와주립대학교 방문연구교수  
1992~ 현재 한서대학교 수학과 교수

관심분야 : 산업수학, 조합론, 수학사

---



**박 기 섭** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-4427-0865> / [kisoeb@gmail.com](mailto:kisoeb@gmail.com))

1999 한서대학교 수학과 학사  
2001 성균관대학교 수학과 석사  
2007 성균관대학교 수학과 박사  
2008~ 2010 King's College London(영국) 학진해외포닥  
2013~ 2016 성균대학교 수학과 초빙교수  
2016~ 현재 인천대학교 수학과 객원교수

관심분야 : 산업수학, 데이터분석&시뮬레이션, 금융수학, 편미분방정식