KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research
Vol. 43, No. 5: 631-638/ October, 2023
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2023.43.5.0631

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2799-9629 (Online)
www.kscejournal.or.kr

Transportation Engineering 교통공학

일교통량을 이용한 통행시간 신뢰도 평가

오흥운*
Oh, Heungun*

Evaluation of Travel Time Reliability using Daily Traffic Volumes

ABSTRACT

This paper is to introduce methodologies of travel time reliability evaluation using daily traffic volumes. The methodologies include desirable speed concept, the relation between averaged daily speeds and daily traffic volumes, the standardized way in integration of travel time deviations obtained from continuous highway sections. The study began with traffic data collection from a freeway line with long lasting congestion. And then, provided establishment of the relation between averaged daily speeds and daily traffic volumes, and usability of Point estimate method (PEM) to integrate travel time deviations of sections. Based on the relation between averaged daily speeds and daily traffic volumes, it is identified that travel time reliability begins to decrease around LOS (Level of Service) C even before LOS D or F. It may be concluded that travel time reliability could be evaluated based on daily traffic volumes in highway sections using standardized PEM. The methodologies introduced in the paper, could be useful in practicing evaluation of travel time reliability during the works of highway operation or highway planning.

Keywords : Travel time, Reliability, Daily traffic, Point estimate method (PEM), Highway feasibility

초 록

본 논문은 일교통량을 이용한 통행시간 신뢰도 평가방법을 제시하고 있다. 희망속도의 도입, 일평균 통행속도와 일교통량간의 관계 설정, 구간별 통행시간편차를 대표값으로 결합하는 방법을 포함하고 있다. 지정체가 며칠 동안 지속되는 특성을 가진 고속도로 교통정보를 수집하였고, 이를 이용하여 일평균 통행속도와 일교통량과의 관계를 정립하였다. 구간별 통행시간 편차를 대표값으로 결합하는 방법인 PEM (Point estimate method) 기법을 활용하여 통계적 대표 특성을 추정하였다. 일평균 통행속도와 일교통량의 관계가 설정되었고, 일교통량이 LOS D나 F 이전인 LOS C 부근임에도 통행시간 신뢰도가 감소하기 시작하는 것이 나타났다. 일교통량만으로도 통행시간 신뢰도를 산출할 수 있게 되었고 통행시간 편차의 결합 방법이 표준화되었으므로 향후의 도로계획과 운영과정에서 통행시간 신뢰도가 용이하게 구해질 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 통행시간, 신뢰도, 일교통량, 점추정방법, 도로타당성

1. 서 론

1.1 신뢰도 개념

신뢰도 이론은 기계공학, 토목공학, 재난분야에서 구조물 및 시설물의 신뢰도를 평가하는데 적극적으로 활용되고 있다(Harr, 1987). 도로공학 혹은 교통공학에서 사용되는 네트워크 신뢰도는 연결성 신뢰도와 통행시간 신뢰도로 구분할 수 있다. 도로에서 신뢰도의 저하는 전체 도로구간 혹은 개별 도로구간의 통과가 불가함 혹은 어려움을 의미하게 된다. 일반적인 평가방법으로 교통량 대비 용량의 비율이나 확률적 표현을 사용하고 있다. 구간을 기반으로 한 평가 외에도 통행 경로와 기종점 교통량을 기반으로 한 평가도 행해진다(Bell and Lida, 1997; Asakura et al., 2003). 여러 국가에서 이미 통행시간 신뢰도를 사용하고 있고 공용중이거나 계획중인 도로의 노선 혹은 구간에 대해서도 적용하고 있다(Bell

* 정회원 · 교신저자 · 경기대학교 창의공과대학 도시·교통공학전공 교수 (**Corresponding Author** · Kyonggi University · ohheung@gmail.com)
Received October 24, 2022/ **revised** November 18, 2022/ **accepted** November 18, 2022

Copyright ⓒ 2023 by the Korean Society of Civil Engineers
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.

et al., 1999; Asakura and Kashiwadani, 1991).

1.2 통행시간 신뢰도의 적용사례

통행시간 신뢰도를 적용하는 나라는 다양하다. 여기서 분석될 국가는 네델란드, 스웨덴, 미국, 영국, 일본, 프랑스 등이다. 네덜란드의 통행시간 신뢰도의 개념은 특정 교통체계가 기대에 비하여 어느 정도의 수준을 나타내는지를 의미한다(Van der Waard, 2009). 신뢰도를 평가하기 위해 공용중인 도로에서 통행시간과 표준편차를 측정하여 사용하기도 하고(Van der Waard, 2009), 신뢰도 모델(Simulation model for analyzing the reliability of accessibility, SMARA)을 사용하기도 한다. 네덜란드 정부가 제시하는 신뢰도의 목표는 확률적으로 95퍼센트 신뢰도 범위를 기반으로 한다(Ministry of Transport, Public Works and Water Management and Ministry of Housing, 2005). 프랑스에서는 통행시간 비신뢰도 개념을 활용하여 예상하지 않은 지체를 표현하고 있다. 비신뢰도 구간에서의 시간가치는 일반적인 시간가치의 2-20배로 표현하고 있다. 대중교통의 비신뢰도에 대한 시간가치는 일반적인 시간가치의 6배로 표현하고 있다. 스웨덴에서는 불확실한 통행시간(Uncertain travel time) 개념을 사용하고 있다. 그러한 상황에서 여객의 비신뢰도 시간가치는 일반적 시간가치의 2배에서 10배로 하고 있다. 화물의 경우 비신뢰도 시간가치는 일반적인 시간가치의 2배로 가정하여 사용하고 있다(Eliasson, 2009). 영국에서는 통행시간 비신뢰도를 대중교통 분야에서 사용하고 있다. 도로에서 통행 시간가치는 일반적 시간가치의 0.8배를 사용하고 있다. 대중교통에서 연착하는 경우 시간가치는 일반적 시간가치의 3배를 사용하고 있다(Department for Transport, 2009).

호주와 뉴질랜드에서는 통행시간 신뢰도에 대해 통행시간의 신뢰도 혹은 비신뢰도를 사용하고 통행시간의 표준편차로 이를 측정하고 있다(Australian Transport Council, 2006). 승용차에 대한 시간가치는 일반적인 시간가치의 1.3배로 정하고 있다(Bates et al., 2001). 대중교통 비신뢰도 시간가치는 일반적인 시간가치의 3배로 정하고 있다. 뉴질랜드는 경제성 평가 매뉴얼에서는 네트워크 혹은 단일 도로에 대한 통행시간 표준편차를 제시하고 있다. 여기서도 비신뢰도 시간가치는 일반적인 시간가치의 0.8~1.2배로 정하고 있다(Taylor, 2009).

미국에서는 실시간 추가소요시간(Buffer time)을 이용하여 신뢰도를 정의하고 있다. 미네소타 교통국, 와싱톤주 교통국에서는 이를 사용 중이고 특정 교통사업을 할 때 개선으로 인한 추가소요시간의 증감을 평가하고 있다. 미국연방도로청에서는 두 가지 지표를 사용하고 있는데 추가소요시간지표(Buffer index)와 계획통행시간지표(Panning time index)를 사용하고 있다. 추가소요시간지표는 관찰된 통행소요시간에 추가소요시간(95% 신뢰구간)을 더한 개념이다. 계획통행시간 지표는 계획통행시간과 추가소요시간비율(95%신뢰구간)의 곱으로 표현된다(Bertini and Lyman, 2007; Elefteriadou et al., 2010). 일본에서는 통행시간 신뢰도를 95% 확률로 통행할 수 있는 통행시간 여유(Safety margin)로 정의하고 있다(Fukuda, 2009).

각국에서 통행시간 신뢰도는 도로계획과 도로운영 관점에서 사용되고 있고 희망속도에 대비한 여유시간, 비신뢰도 개념이 사용중이다. 많은 경우에 시간단위 교통량 대 용량비를 사용하고 있고 통행시간의 불확실성을 표준편차를 사용해서 표현하고 있다. 개선이 필요한 부분도 있다. 첫째로 통행시간과 그 표준편차를 사용함에 있어 개별 구간의 표준편차와 전체구간의 표준편차를 통합하는 혹은 상호 변환하는 방법론이 없거나 표준화 방법이 상세히 제시되어 있지 않다. 둘째 시간단위의 교통량 대 용량비를 이용한 방법이 주로 사용되고 있으나 장거리 통행 때문에 통행시간이 여러 시간에 걸쳐 발생한다는 경우 합리적인 고려가 어려울 수 있으므로 통행시간이 한 시간보다 더 긴 구간의 경우에는 시간단위의 평가보다는 일단위의 평가로 개선될 필요가 있다. 도로업무편람에서는 일단위 교통량(AADT 혹은 ADT)과 일단위의 서비스수준과의 관계를 언급하고도 있어 이를 활용하면 더 용이할 것으로 보인다. 본 논문에서는 통행시간 신뢰도 개념을 도로의 신뢰도 평가에 사용하기 위한 단계와 방법을 제시하고자 한다. 구체적으로 희망속도의 개념의 도입, 일단위 교통량과 일평균 통행속도와의 관계 제시, 일교통량을 이용한 표준화가 용이한 통행시간 신뢰도 평가방법론을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

본 논문에서 희망통행시간의 개념을 도입하기 위해 희망속도 개념을 활용하고자 한다. 다양한 속도의 개념이 도로설계와 도로운영에 사용되고 있다. 교통공학 혹은 도로공학에서 사용하는 속도는 관찰속도, 목표속도(Target speed), 운영속도(Operating speed/85th percentile speed), 설계속도(Design speed), 제한속도 혹은 곡선에서 제한속도(Limiting curve speed) 등이 있다. 한편 희망속도(Desired speed)는 다른 차량에 방해되지 않고 운영되는 속도로 간주할 수 있고 도로구간마다 도로 환경과 도로의 운영수준에 따라 다를 수 있다. 희망속도에 대해 운전자의 자유로운 운행에서 나올 수 있는 속도라고 정의하면서도 실제로는 도로계획자 혹은 설계자가 결정하기도 한다. 도로설계를 기준으로 희망속도는 최대로 안전하게 주행할 수 있는 속도로 정의하기도 하고 도로운영 사례에서는 희망속도는 제한속도 보다 10 km/시가 더 크다고 정의하기도 한다. 요약하면 희망속도는 도로운영자, 도로설계자 혹은 도로의 운전자가 그 속도에서 운행하기를 바라는 표준화된

Table 1. AADT-LOS Relationship in Korean Highway Task Manual

LOS		AADT by No of lanes (vehi/day/direction)			
		2	4	6	8
Freeway	LOS A	-	23,000	34,500	46,000
	LOS B	-	38,300	57,500	76,700
	LOS C	-	52,000	78,000	104,000
	LOS D	-	68,200	102,300	136,500
	LOS E	-	85,300	127,900	170,600
National highway	LOS A	1,600	13,800	20,700	27,600
	LOS B	3,300	22,000	33,000	44,100
	LOS C	5,300	32,000	48,000	64,000
	LOS D	7,300	41,300	62,000	82,800
	LOS E	10,900	55,100	82,800	110,300
Provincial highway	LOS A	1,500	13,400	20,100	26,700
	LOS B	3,200	21,400	32,100	42,800
	LOS C	5,100	31,000	44,600	62,200
	LOS D	7,000	40,200	60,300	80,300
	LOS E	10,600	53,500	80,300	107,200

속도로 간주될 수 있다.

본 논문에서는 일교통량과 통행시간 관계를 분석하고 희망통행시간이나 희망속도를 근거로 하여 특정 도로구간을 평가하고자 한다. 교통량 대 용량비는 시간 단위의 도로평가에 많이 사용되고 있다. 도로용량편람(MOLIT, 2012)에서는 시간 단위의 교통량 대 용량비를 사용하고 있고 시간 단위의 통행시간(혹은 속도)을 평가하는 방법을 포함하고 있으나 여러 구간을 통합하여 여러 시간에 걸쳐 여러 구간속도를 환산해서 통행속도를 평가하는 방법은 제시되지 않고 있다. 한편 도로업무편람(MOLIT, 2022)에서는 일교통량과 서비스 수준과의 관계를 표현하고 있다. 이는 일평균 교통용량을 이용하여 표준화된 서비스수준을 제공한다는 의미가 있고 특정노선에 대해 일평균교통량을 서비스수준으로 평가할 수 있게 하는 의미가 있다. 본 논문에서는 일교통량과 통행시간 관계를 근거로 모델을 이용하여 통행시간 표준편차를 이용하여 다중구간을 대표하는 통합적 통행시간 신뢰도 평가방안을 제시하고자 하며 간편하고 표준화된 방법으로 점추정 방법(Point estimate 혹은 Point estimate method)을 사용하고자 한다.

3. 일교통량과 통행속도와의 관계 분석

3.1 분석 개요

일교통량과 일평균 통행속도와의 관계 분석을 위하여 고속도로에서 며칠에 걸쳐 다양한 교통 특성의 흐름이 지속되며 과포화가 포함된 24시간 교통량 및 속도 자료를 수집하였다. 이를 이용하여 일단위 교통량의 크기별로 서비스수준을 도출하고 일단위 교통량의 크기별로 통행속도의 변동계수(COV, 표준편차/속도)도 도출하고자 한다. 본 분석을 위한 자료는 2015년 2월 17일부터 2월 22일(설날연휴기간)까지 중부고속도로 동서울~남이 구간중 편도 2차로 구간의 15분 교통량과 속도를 사용하였다.

3.2 일단위 서비스수준(LOS)와 통행속도의 관계 분석

일단위 서비스수준(LOS)과 일평균 통행속도의 관계 도출을 위하여 몇 가지 과정을 거쳤다. 시간교통량 대 속도 관계 그래프(중부고속도로, 15분교통량 기준)를 구하였고 일교통량 대 속도 관계 그래프(중부고속도로, 일교통량 기준)을 구하였고 이를 이용하여 일단위 서비스수준과 일평균 통행속도의 관계 모델을 정립하였다.

시간교통량과 시간평균속도 관계(중부고속도로, 15분교통량 기준)는 Fig. 1에 나타냈다. 전형적인 교통량-속도 관계 그래프를 보였다. 다만 여러 구간과 여러 시간의 교통량을 합한 그래프이기 때문에 특정구간이나 특정시간에서 발생한 그래프 보다는 표준편차가 크게 나타남을 보여주고 있다. LOS A-D 사이의 속도편차가 개략적으로 10 km/시 이내인 것으로 나타났다.

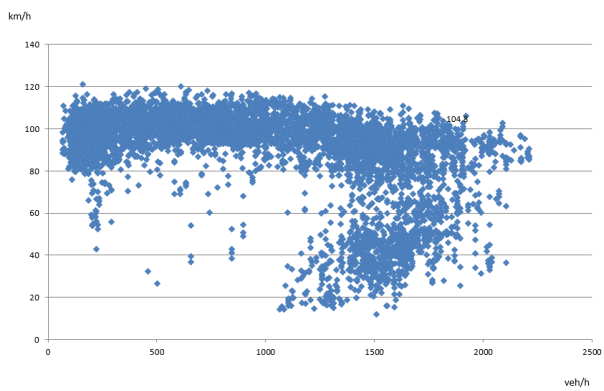

Fig. 1. Hourly Speed-Traffic Flow Relationship Observed

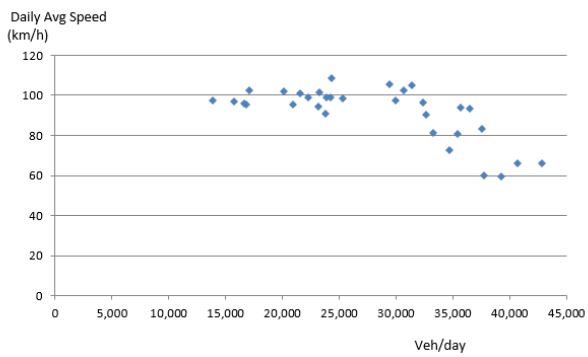

Fig. 2. Daily Traffic Flow-Avg Speed Relationship Observed

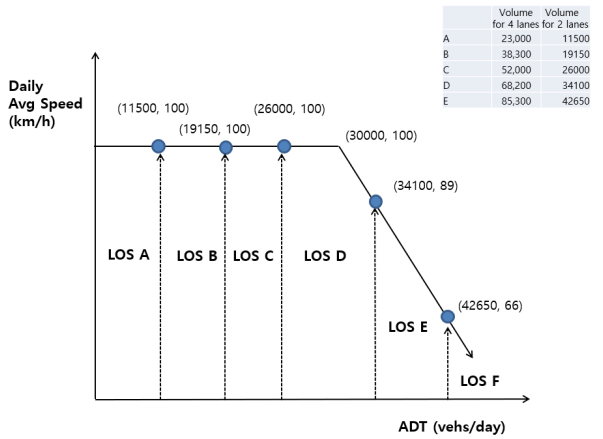

Fig. 3. Daily Traffic Flow-Averaged Speed Relationship Model Suggested

일교통량과 일평균속도의 관계를 Fig. 2에 나타냈다. 시간단위 그래프인 Fig. 1에서 나타난 전통적인 이차원적 그래프와는 달리 두 개의 직선이 조합된 것으로 보이는 형태를 보였다. LOS A-D사이에서 속도편차는 20~40 km/시로 나타났다.

일단위 서비스수준과 일평균속도의 관계 모델을 도입하였고 이는 Fig. 3에 표현하였다. 서비스수준의 상세 구분은 Table 1에 표현되었듯이 도로업무편람(MOLIT, 2022)의 구분 기준을 따랐고 이에 대응하는 일평균속도는 관찰된 값을 사용하였다. 예를 들어 LOS D에서 LOS E로 가는 경계에는 도로업무편람상에서 34,100대/일의 교통량을 나타낸다. 이에 대응한 일평균속도는 Fig. 3에서 일평균 89 km/시를 나타낸다. 이 속도는 Fig. 3에서 나타난 것처럼 관찰된 일평균속도에서 얻어진 값이다. 서비스수준 A~C 사이의 평균속도는 일관되게 100 km/시에 가까웠고 이를 희망속도라 간주할 수 있을 것으로 생각된다. 일단위 교통량을 기준으로 LOS F가 아님에도 불구하고 LOS C 부근에서 일평균 통행시간의 감소가 시작되는 것을 알 수 있다.

3.3 일평균 통행속도의 변동계수 및 표준편차 도출

통행시간 혹은 속도의 표준편차는 통행시간 신뢰도 판단에 중요한 척도이다. 일단위 속도의 표준편차는 시간단위 속도의 표준편차와 다를 것이고 일평균 통행시간이나 일단위 속도의 표준편차는 일교통량의 크기에 따라 다를 것으로 예상할 수 있다. 문헌에 의하면 교통량이나 통행속도의 크기에 따라 차량 흐름과 간격의 특성이 존재한다고 한다(May, 1990). Table 2는 일단위로 관찰된 수치들이고 평균속도와 변동계수(Coefficient of variation, COV), 표준편차를 나타낸다. 속도가 작아질수록 변동계수나 표준편차는 커지는 것을 알 수 있다.

4. 통행시간 신뢰도의 일단위 평가

4.1 통행시간 신뢰도 개요

단일 혹은 다중의 도로구간에 대하여 신뢰도를 평가한다는 것은 희망하는 통행시간에 그 구간을 주행이 가능한지 여부를 통계적으로 평가하는 것을 의미한다. 이러한 평가는 시간 단위로 평가되어질 수 있기도 하나 장거리 통행이 많은 경우에는 하루단위로 평가되는 것이 바람직할 수 있다. 도로업무편람(MOLIT, 2022)의 구분에 나타난 일단위의 서비스수준 표준과 Fig. 3에 나타난 통행속도의 관계 모델을 이용하고 Table 2의 통행시간 표준편차를 이용하여 하나의 구간 혹은 여러 다중구간을 대표하는 통합적 통행시간 신뢰도의 평가가 가능하게 된다.

본 논문에서는 일교통량기준 통행시간 신뢰도를 신뢰도 지수로도 표현한다. 이 지수는 일단위 희망속도와 관찰된 일평균 통행시간과의 관계를 나타내는 정규분포상의 지수라고 정의할 수 있고 통행시간 신뢰도(R) 혹은 실패도(F)로도 표현할 수 있다. 추가소요시간지수(Buffer index)는 일평균기준 희망통행시간에 95% 확률의 추가소요시간을 더한 시간으로 표현이 가능하다. 단일구간과는 달리 다중의 구간의 대표 신뢰도를 평가하기 위해 추가적인 방법이 필요하다. 다중구간의 경우는 여러 단일구간의 통합한 구간으로 간주하여 이를 대표한 일단위 통행시간 평균 및 표준편차를 구하게 된다. 먼저 개별 단위구간별로 해당하는 일교통량 통행시간 신뢰도지수(Z), 일단위 통행시간 신뢰도(R), 일단위 통행시간 실패도(F)를 구하게 된다. 그리고 나서 대표 구간의 통행시간 신뢰도로 합하는 통계적인 과정을 이용하여 결합된 구간으로 간주된 다중구간 일교통량 통행시간 신뢰도지수, 다중구간 일단위 통행시간 신뢰도, 다중구간 일단위 통행시간 실패도를 구하게 된다.

Table 2. Observed Daily Standard Deviations (StD) and COVs by Speeds (R^2=0.89)

Speed (km/h)	60	65	70	75	80	85	90	95	100
COV	0.39	0.35	0.30	0.26	0.22	0.17	0.12	0.08	0.04
StD (km/h)	23.7	22.8	21.4	19.5	17.2	14.5	11.3	7.6	3.6

4.2 다중구간 신뢰도의 통합 및 점추정

단일구간들을 결합하여 다중구간을 대표하는 신뢰도를 평가하는 경우 결합된 다중구간 신뢰도는 개별 구간의 평균속도를 이용한 공간속도 계산(May, 1990)을 하게 되고 통계적인 시간이나 속도의 분포에 대한 결합기법을 사용하게 된다. 이러한 결합기법은 표준화가 될 필요가 있다. 통계적 분포의 결합기법은 표준편차의 통계적 결합기법에 해당하게 되는데 몬테카를로 시뮬레이션(Monte carlo simulation), 포슴방법(First order second moment method, FOSM), 점추정법(Point estimate method, PEM) 등의 방법이 있다(Harr, 1987; Lee, 2006). 실무에 사용될 수 있는 표준화를 위해서는 계산기법이 단순한 방법론을 사용할 필요가 있어 본 연구에서는 점추정법(Point estimate method, PEM)을 사용하여 통계적 분포의 결합기법을 표현하고자 한다(Gibson, 2011).

일반적으로 통계에서 점 추정(Point estimate 혹은 Point estimate method)은 표본 데이터를 사용하여 단일 값을 계산하는 것을 포함한다(Gibson, 2011). n이 변수의 개수(도로구간 일 경우 구간의 개수)일 때 $y=f(x_1,x_2,x_3,.....x_n)$로 표현 할 수 있다(도로구간 일 경우 y는 통행시간). 변수 x_i는 두 가지의 점(Points)을 나타낸다(도로구간 i에서는 구체적으로 두가지 점 $x_{i+}=\overline{x_i}+\sigma_{xi}$ $x_{i-}=\overline{x_i}-\sigma_{xi}$을 나타낸다). 그러므로 2개의 변수의 경우(2개 도로구간일 경우)에는 22인 4개의 조합이 가능하게 된다. 그 조합은 $(\overline{x_1}+\sigma_{x1},\overline{x_2}+\sigma_{x2})$, $(\overline{x_1}-\sigma_{x1},\overline{x_2}+\sigma_{x2})$,$(\overline{x_1}+\sigma_{x1},\overline{x_2}-\sigma_{x2})$, $(\overline{x_1}-\sigma_{x1},\overline{x_2}-\sigma_{x2})$으로 구분이 가능하다. 이에 대한 기댓값, 분산, 그리고 이 경우의 확률은 수식으로 표현될 수 있다. 기댓값은 $E(y)\fallingdotseq\sum_{k=1}^{2n}p_k y_k$으로 표현이 가능하다. 분산은

$VAR(y)\fallingdotseq\sum_{k=1}^{2n}p_k y_k^2-E(y)^2$으로 표현이 가능하다. 각 경우에 대한

확률은 $p_k=\frac{1}{2^n}[1+\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}S_iS_j\rho_{ij}]$ (여기서 ρ_{ij} = 상관계수)으로 표현이 가능하다.

5. 다중구간 신뢰도 통합기법의 적용

5.1 사례의 적용

다중구간 통행시간 신뢰도 평가의 적용을 위하여 본 연구에서는 4개의 단위구간을 결합(총 길이 30.5 km)하여 대표 통행시간 신뢰도를 구하는 과정을 제시하고자 한다. 본 구간들을 선정한 이유는 하루기준으로 LOS C(2차로기준 26,000대/일), LOS D(용량상태, 2차로기준 34,100대/일), LOS F(2차로기준 42,650대/일)에 가까운 교통량이 포함되는 계산 사례를 나타내고자 함이다. 본 구간들을 100 km/시로 주행할 때 총 통행시간(희망속도 통행시간)은 0.305 시간으로 계산된다. 구간 1은 일평균교통량이 25,000대/일, 구간길이 9 km이고 통행시간 표준편차(일단위)는 0.0032로 얻어졌다. 구간 2~4에 대하여는 Table 3에 표현되어 있다.

5.2 점추정의 적용

점추정(Point estimate method)의 적용을 위해서 구간별로 평균통행시간과 두 가지 점(Points)에서 표준편차를 고려한 계산 값이 제시되었다. Table 4와 5에 나타난 바와 같이 총 4개 구간이므로 2^4인 16개 경우의 확률 및 평균통행시간이 제시되었다. Table 6에 신뢰도 지수 및 성공확률 및 실패확률이 제시되었다. Table 4에서 구간 1의 경우 평균통행시간은 관찰식에 의해 0.09시간으로 계산되었다. 통행시간 표준편차는 0.0032이고 이에 따른 두 가지

Table 3. Characteristics of 4 Sections for Reliability Calculation

	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Total length
Averaged Daily Traffic (vehs/day)	25000	31000	33000	43000	-
Length (km)	9	10	6.5	5	30.5
STD of Travel time σ(hr)	0.0032	0.0062	0.0077	0.0306	-

Table 4. Two Evaluation Points at Each Section

	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4
Averaged Travel Time (xi=Avg V), (hr) Avg V = 100- 34/12650*(ADT-30000) when ADT <30000	0.090	0.103	0.071	0.077
STD of Travel time σ(hr)	0.0032	0.0062	0.0077	0.0306
xi + σi	0.0932	0.1089	0.0784	0.1075
xi - σi	0.0868	0.0966	0.0630	0.0462

Table 5. Calculation of Probability at each Section and Average Travel Time

Cases	Probability combinations of cases by section i				Calculation				
	i=1	i=2	i=3	i=4	p_i (Probability)	y (Travel time)	y^2	$p_i \times y$	$p_i \times y^2$
1	$x_1-\sigma_1$	$x_2-\sigma_2$	$x_3-\sigma_3$	$x_4-\sigma_4$	0.063	0.293	0.086	0.018	0.005
2	$x_1+\sigma_1$	$x_2-\sigma_2$	$x_3-\sigma_3$	$x_4-\sigma_4$	0.063	0.299	0.089	0.019	0.006
3	$x_1-\sigma_1$	$x_2+\sigma_2$	$x_3-\sigma_3$	$x_4-\sigma_4$	0.063	0.305	0.093	0.019	0.006
4	$x_1+\sigma_1$	$x_2+\sigma_2$	$x_3-\sigma_3$	$x_4-\sigma_4$	0.063	0.311	0.097	0.019	0.006
5	$x_1-\sigma_1$	$x_2-\sigma_2$	$x_3+\sigma_3$	$x_4-\sigma_4$	0.063	0.308	0.095	0.019	0.006
6	$x_1+\sigma_1$	$x_2-\sigma_2$	$x_3+\sigma_3$	$x_4-\sigma_4$	0.063	0.314	0.099	0.020	0.006
7	$x_1-\sigma_1$	$x_2+\sigma_2$	$x_3+\sigma_3$	$x_4-\sigma_4$	0.063	0.320	0.103	0.020	0.006
8	$x_1+\sigma_1$	$x_2+\sigma_2$	$x_3+\sigma_3$	$x_4-\sigma_4$	0.063	0.327	0.107	0.020	0.007
9	$x_1-\sigma_1$	$x_2-\sigma_2$	$x_3-\sigma_3$	$x_4+\sigma_4$	0.063	0.354	0.125	0.022	0.008
10	$x_1+\sigma_1$	$x_2-\sigma_2$	$x_3-\sigma_3$	$x_4+\sigma_4$	0.063	0.360	0.130	0.023	0.008
11	$x_1-\sigma_1$	$x_2+\sigma_2$	$x_3-\sigma_3$	$x_4+\sigma_4$	0.063	0.366	0.134	0.023	0.008
12	$x_1+\sigma_1$	$x_2+\sigma_2$	$x_3-\sigma_3$	$x_4+\sigma_4$	0.063	0.373	0.139	0.023	0.009
13	$x_1-\sigma_1$	$x_2-\sigma_2$	$x_3+\sigma_3$	$x_4+\sigma_4$	0.063	0.369	0.136	0.023	0.009
14	$x_1+\sigma_1$	$x_2-\sigma_2$	$x_3+\sigma_3$	$x_4+\sigma_4$	0.063	0.376	0.141	0.023	0.009
15	$x_1-\sigma_1$	$x_2+\sigma_2$	$x_3+\sigma_3$	$x_4+\sigma_4$	0.063	0.382	0.146	0.024	0.009
16	$x_1+\sigma_1$	$x_2+\sigma_2$	$x_3+\sigma_3$	$x_4+\sigma_4$	0.063	0.388	0.151	0.024	0.009
-							Sum	0.340	0.117

Table 6. Calculation Results of Reliability Based Characteristics

	Equations	Calculation	Results
Variance (hr^2)	$Var[y] \approx \sum_{k=1}^{2^N} p_k y_k^2 - E[y]^2$	0,117-0.116	0.001
STD of Travel time σ(hr)	-	-	0.032
Averaged Travel Time at Averaged daily traffic (hr)	Fig. 3	-	0.34
Z (Reliability index)	$Z = \frac{Travel\ time\ by\ averaged\ daily\ traffic - Travel\ time\ desirable}{Standard\ deviation\ by\ averaged\ daily\ traffic}$	(0.34-0.305)/0.032	1.091
R (Reliability, 1=100%)	$R = 1 - \psi(Z)$	1-0.14	0.24 (24%)
F (Failure rate, 1=100%)	$F = \psi(Z)$	-	0.76 (76%)
Desirable Travel Time (hr)			0.305
Buffer time (hr)	Buffer time=1.65×σ(95% confidence)	1.65×0.032	0.053
Buffer time rate (%)	Buffer time((hr)/Desirable Travel Time (hr)	0.0528/0.305	17.3%

경우의 점에서 표준편차를 고려한 값은 0.0932와 0.0868시간으로 계산되었다. 구간 2~4에 대해 Table 4에 나타나 있다.

Table 5에는 16개 경우의 확률 및 평균통행시간이 제시되었다. 총 4개 구간이므로 16개의 점이 결정되었고 각 경우마다 확률 및 계산값이 제시되었다. 이를 통해 평균통행시간은 0.34시간으로 계산되었다.

총구간 길이 30.5 km에 대한 분산, 신뢰도지수 및 신뢰도, 실패확률 등이 계산되었다. 분산값은 0.001, 신뢰도지수는 1.0912, 신뢰도(희망시간 내에 통과확률)는 24%, 실패확률은 76%로 계산되었다. Table 6에는 Table 5를 이용한 계산결과가 요약되었다. 분산은 0.001, 표준편차는 0.032시간, 일교통량에 해당하는 평균통행시간은 0.34시간, Z(신뢰도지수)는 1.091, R(신뢰도, 성공확률)은 24%, F(실패확률)은 76%, 희망속도의 통행시간은 0.305시간,

추가소요시간은 0.053시간, 추가소요시간비율은 17.3%로 나타났다.

6. 결 론

통행시간 신뢰도의 평가를 위해 각국에서는 표준편차를 포함한 다양한 통계적 접근법을 사용하고 있다. 국내에서도 통행시간 신뢰도를 더 용이하게 평가할 수 있는 방법론이 개발될 필요성이 있다. 본 논문은 이러한 필요성에 부합하여 개선된 통행시간 신뢰도의 도입을 위한 방법을 제시하였다. 구체적으로 희망속도의 개념의 사용, 일단위 교통량과 일평균 통행속도와의 관계 정립, 다중구간에서 통계적 편차결합의 방법인 점추정법을 제시하였다.

희망속도에 대해 본 논문에서는 일단위의 희망속도를 사용하였다. 일단위 교통량과 일평균 통행속도와의 관계 정립은 과포화 구간에서 관찰된 교통량 사례를 사용하였고 여기서 일교통량단위의 통행시간에 대해 표준편차도 얻어졌다. 그 결과 일교통량기준으로 서비스수준 C-D 사이에서 일 평균 통행시간의 감소 혹은 통행시간 신뢰도의 감소가 있음이 나타났다. 통행시간 측면에서 시간단위 표준편차보다 일단위 표준편차가 크다는 것도 확인이 되었고 일교통량을 이용하면 일평균 통행시간도 계산이 가능하게 되었다. 일평균 속도가 감소할수록 그 표준편차가 커짐이 확인되었다.

하나의 구간이 아닌 여러 구간이 결합될 때는 결합된 구간의 통행시간 특성이 통계적으로 중요하게 된다. 본 논문에서는 통계분포의 결합을 위해 점추정법(Point estimate method)을 이용하였고 그 과정과 사례를 제시하였다. 점추정법은 기존의 몬테카를로 시뮬레이션의 복잡한 과정을 개선한 단순화된 방법론으로 간주가 가능하다. 구체적인 평가항목으로 Z(신뢰도지수), R(신뢰도), F(실패도), 추가소요시간, 추가소요시간비율을 제시하였다. 점추정법을 이용하여 개별 구간마다 다른 통행시간을 하나로 결합하여 표현하는 것이 용이하게 되었고 다양한 구간의 결합에 대해 대표 표준편차와 통행시간 신뢰도를 제시할 수 있게 되었다.

감사의 글

이 논문은 2022학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었습니다.

ORCID

Heungun Oh https://orcid.org/0000-0003-4147-8804

References

Asakura, Y., Hato, E. and Kashiwadani, M. (2003). "Stochastic network design problem: An optimal link investment model for reliable network." *The Network Reliability of Transport. Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability*, Emerald Group Publishing Limited, pp. 245-260, https://doi.org/10.1108/9781786359544-014.

Asakura, Y. and Kashiwadani, M. (1991). "Road network reliability caused by daily fluctuation of traffic flow." *Proceedings of the 19th PTRC Summer Annual Meeting,* Brighton, UK, pp. 73-84.

Australian Transport Council (2006). *National guidelines for transport system management in australia,* Australia.

Bates, J., Polak, J., Jones, P. and Cook, A. (2001). "The valuation of reliability for personal travel." *Transportation Research Part E: Logistic and Transportation Review*, Elsevier, Vol. 37, Nos. 2-3, pp. 191-229, https://doi.org/10.1016/S1366-5545(00)00011-9.

Bell, M. G. H., Cassir, C., Iida, Y. and Lam, W. H. K. (1999). "A sensitivity-based approach to network reliability assessment." *Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory,* Jerusalem, Israel, Pergamon, New York, USA, pp. 283-300.

Bell, M. G. H. and Lida, Y. (1997). *Transportation network analysis,* John Wiley and Sons, Chichester, UK, https://doi.org/10.1002/9781118903032.

Bertini, R. L. and Lyman, K. (2007). "Developing improved travel time reliability measures for real-time and archived ITS data applications." *Proceedings of International Meeting of ITS Europe,* Aalborg, Denmark.

Department for Transport (2009). *Values of time and operating costs (Transport Analysis Guidance (TAG), Unit 3.5.6)*. UK.

Elefteriadou, L., Li, Z., Chrysikopoulos, G., Lu, C., Jin, L. and Ryus, P. (2010). *Travel time reliability implementation for the freeway strategic intermodal system*. The Florida Department of Transportation, Flrorida, USA. https://happylibnet.com/doc/2824507/travel-time-reliability-as-a-performance-measure-.

Eliasson, J. (2009). "Reliability in Swedish CBA - current practice and what needs to be done." *Proceedings of International Meeting on Value of Travel Time Reliability and Cost-Benefit Analysis*, British Columbia, Canada.

Fukuda, D. (2009). "Reliability valuation in Japan." *Proceeding of International Meeting on Value of Travel Time Reliability and Cost-Benefit Analysis,* British Columbia, Canada. https://sites.google.com/site/benefitcostanalysis/benefits/travel-time-reliability/reliability-and-bca

Gibson, W. (2011). "Probabilistic methods for slope analysis and design." *Journal of Australian Geomechanics*, Australian Geomechanics Society, Vol. 46, No. 3, p. 29.

Harr, M. (1987). *Reliability-based design in civil engineering,* McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y.

Lee, T. W. (2006). "A study for robustness of objective function and constraints in robust design optimization." *Journal of Mechanical Science and Technology,* Springer, Vol. 20, No. 10, pp. 1662-1669, https://doi.org/10.1007/BF02916270.

May, A. (1990). *Traffic flow fundamentals,* Prentice Hall, USA.

Ministry of Transport, Public Works and Water Management and Ministry of Housing (2005). *Mobility policy document, spatial planning and the environment,* Hague Available at: www.notamobiliteit.nl (Accessed: June 6, 2012).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2012). *Highway capacity manual* (in Korean).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2022). *Highway practice guideline* (in Korean).

Taylor, M. (2009). "Reliability and benefit-cost analysis in Australia and New Zealand." *Proceedings of International Meeting on Value of Travel Time Reliability and Cost-Benefit Analysis*, British Columbia, Canada.

Van der Waard, J. (2009). "Role of reliability in policy, system planning and investment decisions." *Proceedings of International Meeting on Value of Travel Time Reliability and Cost-Benefit Analysis,* British Columbia, Canada. https://sites.google.com/site/benefitcostanalysis/benefits/travel-time-reliability/reliability-and-bca