

■ 論 文 ■

통행시간 신뢰성 지표 개발 및 산정에 관한 연구

A Measure for Travel Time Reliability

장 수 은

(한국교통연구원 육상교통연구본부
책임연구원)

강 지 혜

(한국교통연구원 육상교통연구본부
연구원)

이 승 준

(한국도로공사 도로교통연구원
책임연구원)

목 차

- I. 서론
- II. 선행연구 고찰
 - 1. 통계적 범위
 - 2. 완충시간
 - 3. 지각통행
 - 4. 시사점
- III. 통행시간 신뢰성 지표 개발
- IV. 통행시간 신뢰성 지표 산정
 - 1. 철도부문
 - 2. 도로부문
- V. 결론
- 참고문헌

Key Words : 신뢰성, 정시성, 로그정규분포, 계획 통행시간, 실제 통행시간, 타당성조사
Reliability, Punctuality, Lognormal distribution, Planned travel time, Actual travel time, Transport appraisal

요 약

통행시간 신뢰성은 통행자가 예측하기 힘든 통행시간의 변동을 설명하는 개념이다. 본 연구는 통행시간 신뢰성을 측정할 수 있는 지표를 개발하고, 국내 도로 및 철도 이용 실적자료를 바탕으로 통행시간 신뢰성 지표 원단위를 산정한다. 통행시간 신뢰성 측정 지표로 수정형 완충시간 지표를 제안하며, 신뢰성/비신뢰성의 임계점으로는 로그정규통행시간분포를 기반으로 한 계획 통행시간과 실제 통행시간의 차이를 측정한다. 이를 통해 철도는 상수형, 도로는 음의 포물선형 통행시간 신뢰성 지표함수를 개발한다. 본 연구의 결과가 도로 및 철도 투자사업의 신중한 의사결정에 일조할 수 있기를 기대한다.

The term, travel-time reliability, refers to variations in journey time that travelers cannot predict. The purpose of this paper is to suggest a standard way to measure travel time reliability. A modified buffer time indicator is proposed. The index is represented by the difference between planned and actual travel times based on lognormal type travel time distribution. Using this framework, a constant function for railways and a negative parabola function for roads are discussed. The model developed is applied to the real data of Korean road and rail usages to empirically verify the methodology proposed. In this process, the unit value of travel time reliability for each group is estimated. The result of this research is expected to be helpful of conducting more cautious economic feasibility studies of transport.

I. 서론

통행시간 신뢰성(travel time reliability)은 정시성(punctuality) 등의 명칭으로 철도교통의 대표적인 편익으로 인식되어 왔으나 계량화 방법론이 정립되어 있지 않아(예비)타당성조사에서 고려하고 있지 못하던 항목이다(장수은·정규화, 2007). 그동안 통행시간 신뢰성은 교통부문의 경제적 타당성 평가에서뿐만 아니라 교통학의 다양한 영역에서 관심의 대상이었다. 예를 들면, 미국의 San Diego시는 유·무료 도로 간 효율적 운영을 위한 동적 가치창출 요금징수(dynamic value pricing) 정책에서 통행시간 신뢰성 지표를 정책의 평가지표로 활용하고 있다(Supernak et al., 2003). 또한 미국 Los Angeles에서는 도로의 서비스 수준 측정 지표가 밀도, 통행시간, 지체 등에 머물고 있는 한계를 보완하고자 신뢰성 개념이 포함된 90% 통행시간(the 90th percentile travel time)을 새로운 지표로 활용하고 있다(Chen et al., 2003). 그러나 이러한 다양한 관심에도 불구하고 통행시간 신뢰성에 대한 표준적 계량화 방안은 사실상 부재한 실정이다.

국내 교통학계에서는 통행시간의 정시성(punctuality)과 신뢰성(reliability)에 대한 개념이 명확하게 정립되어 있지 않다. 철도 등 대중교통수단의 경우는 정시성은 편성시간표 대비 지연된 정도를, 신뢰성은 운행이 취소된 횟수를 의미한다(UK Strategic Rail Authority, 2003). 승용차 등 개인교통수단의 경우는 편성 시간표가 없고 통행 취소 등을 계량하기 어려우므로, 정시성이란 개념은 성립하기 힘들다. 개인교통수단의 통행시간에 대해서는 신뢰성이란 용어로 통행시간의 불확실성(uncertainty)이나 가변성(variability) 등을 설명(Cambridge Systematics Inc. et al., 2003; Emam and Al-Deek, 2006)할 수 있다. 본 연구에서는 통행시간 신뢰성을 대중교통수단 및 개인교통수단의 통행시간의 정시성과 신뢰성을 모두 포함하는 개념으로 사용한다. 통행시간 신뢰성이 낮을수록 통행 목적지 도착시간을 예측하기 어려우므로 위험과 비용이 증가하는 것으로 해석할 수 있다(Chen et al., 2002). 이는 곧 특정 사업시행으로 통행시간 신뢰성이 이전보다 개선될 경우 편익이 발생함을 의미한다.

통행시간 신뢰성을 통행시간의 불확실성이나 가변성과

연관하여 정의하였으므로, 통행시간 절감과 관련된 지체(delay)와 신뢰성과 관련된 지체를 구분할 필요가 있다. 통행시간 절감과 관련된 지체는 혼잡 등에 의한 만성적 지체(recurrent delay)로서 일상생활에서 비교적 안정적으로 나타나므로(day-to-day delay) 통행자가 사전에 인지하고 있는 비용이다. 반면, 신뢰성과 관련된 지체는 돌발상황(incident) 등의 예기치 못한 상황에 의해 초래되는 교통시설의 용량 감소로 나타나는 우연적 지체(non-recurrent delay)¹⁾로서 통행자가 사전에 인지하지 못하는 비용이다(Bremmer et al., 2004; Cambridge Systematics Inc. et al., 2003).

본 연구는 이러한 인식을 바탕으로 통행시간 신뢰성을 측정할 수 있는 표준적 방법론을 제시하고자 한다. 이를 위하여 먼저 통행시간 신뢰성 지표와 관련된 선행연구를 검토한다. 다음으로 통행시간 신뢰성 지표 모형을 제시하며, 이어서 국내 도로 및 철도 이용 실적자료를 바탕으로 통행시간 신뢰성 지표 원단위를 경험적으로 산출한다. 마지막으로 결론에서는 본 연구의 성과, 한계 및 향후 연구과제를 논의한다. 단, 본 연구는 도로와 철도 등 육상 교통수단의 통행시간 신뢰성만을 연구대상으로 설정하며, 교통수요분석에 활용할 수 있는 거시적·집합적(macro) 지표 산출을 목적으로 한다.

II. 선행연구 고찰²⁾

국내·외 교통학계에서는 통행시간 신뢰성 지표에 대하여 지속적으로 논의하여 왔다. 특히 '통계적 범위(statistical range)', '완충시간(buffer time)', '지각통행(tardy trip)' 등 세 가지 지표가 주된 관심의 대상이었다.

1. 통계적 범위(statistical range)

통계적 범위는 완충시간이나 지각통행 지표에 비해 보다 이론적 또는 개념적(theorized or conceptualized)인 지표이다. 통상 이 지표는 통행시간 분포(travel time distribution)와 통행시간의 표준편차(standard deviation)를 이용하여 통행시간의 불확실성을 설명한다. 예컨대 통행시간 분포를 정규분포(normal distribution)로 가정

1) 우연적 지체의 원인으로 돌발상황(incidents), 작업구간(work zones), 날씨(weather), 수요변동(fluctuations in demand), 이벤트(special events), 교통운영시설(traffic control devices), 기본용량부족(inadequate base capacity) 등의 7가지 원인이 자주 거론(Cambridge Systematics Inc. et al., 2003; Emam and Al-Deek, 2006; Oh and Chung, 2006)된다.

2) 본 장은 Cambridge Systematics Inc. et al.(2003)의 연구내용을 중심으로 논의를 진행한다.

할 경우, 평균(mean) 기준 좌우 1 표준편차를 적용하면 68%의 통행량을, 좌우 2 표준편차를 적용하면 95%의 통행량을 통행시간 측면에서 신뢰성 있는 수으로 간주하고, 그 외 나머지는 신뢰할 수 없는 통행량으로 인지한다. 이 범주의 지표로는 통행시간 창(travel time window), % 변동비(percent variation), 변동지수(variability index) 등이 있다.

먼저, 통행시간 창은 통행시간 변동의 절대값을 측정하는 지표이다.

$$TTW = ATT \pm \alpha \cdot SD \quad (1)$$

여기서, TTW 는 통행시간 창 지수, ATT 는 평균 통행시간(average travel time), SD 는 통행시간의 표준편차, α 는 승수(multiplier)이다. 승수는 통계적 범위 내의 통행량 고려 범위를 결정한다.

둘째, 통행시간 창이 통행시간 불확실성의 절대값을 측정하는 지표라면, %변동비는 통행시간 변동의 비율에 주목하는 지수이다.

$$PV = \frac{SD}{ATT} \times 100 \quad (2)$$

여기서, PV 는 %변동비이다.

%변동비는 기종점 간 평균 통행거리의 차이 등 다양한 통행특성과 무관하게 적용할 수 있는 표준화된 지표이다. 개별 기종점의 ATT 를 알 경우, 이 지표를 활용한다면 실제 통행시간을 파악할 수 있다. 그러나 개별 기종점의 ATT 를 파악하기는 일반적으로 쉽지 않다.

마지막으로 변동지수 VI 는 첨두/비첨두 간 통행시간 변동의 차이를 측정한다. 통상 첨두와 비첨두 통행시간 분포의 95% 신뢰구간(confidence intervals)의 차이를 계산한다.

$$VI = \frac{U_{95}^p - L_{95}^p}{U_{95}^o - L_{95}^o} \quad (3)$$

여기서 U_{95} 와 L_{95} 는 통행시간분포의 상하위 95%값이며 p 와 o 는 첨두와 비첨두이다.

2. 완충시간(buffer time)

완충시간은 정시도착(on-time arrival)을 위해 고려

해야할 추가시간(extra time) 또는 여유시간(time allowance)를 의미한다. 즉, 일상생활에서 겪게 되는 조기출발 패널티(early start penalty)와 유사한 개념으로서, 연구자들 내에서 통행시간 신뢰성을 측정할 수 있는 가장 무난한 지표로 인식되고 있다(Cambridge Systematics Inc. et al., 2003). 이 범주에는 완충시간(buffer time), 완충지수(buffer index) 등의 지표가 있다.

첫째, 완충시간은 통행시간 분포의 상위 95% 신뢰구간 값과 평균 통행시간의 차이로 측정한다.

$$BT = U_{95} - ATT \quad (4)$$

여기서 BT 는 완충시간(buffer time)이다.

둘째, 완충지수는 절대 통행시간(예, BT) 대신 백분율(percentage)과 통행율(travel rate)을 이용한다. 여기서 통행율은 단위 거리당 통행시간으로 정의한다. 예컨대 평균 통행율은 단위 거리당 평균 통행시간을 의미한다.

$$BI = \frac{U_{95} - ATR}{ATR} \times 100 \quad (5)$$

여기서 BI 는 완충지수(buffer index), U_{95} 는 상위 95% 신뢰구간 통행율, ATR 은 평균 통행율이다.

3. 지각통행(tardy trip)

지각통행 지표는 전체 통행량 중 용인할 수 없이 늦은(unacceptably late) 통행규모를 측정한다. 이 범주에는 플로리다 신뢰성 통계량(FRS: Florida reliability statistic), 정시도착율(OTA: on-time arrival), MI(misery index) 등의 지표가 있다.

첫째, FRS는 전체 통행 중 통행시간 신뢰성이 낮은 통행규모를 측정한다.

$$FRS = 100\% - T_u \quad (6)$$

여기서, T_u 는 전체 통행량 중 예상 통행시간 보다 늦게 도착한 통행량의 비율(%)이다.

둘째, OTA는 평균 통행비율과 정시도착 초과 통행비율의 차이로 측정한다.

$$OTA = 100\% - T_{110} \quad (7)$$

여기서, T_{110} 은 전체 통행량 중 통행율이 평균 통행율의 110% 이상인 통행량의 비율(%)이다.

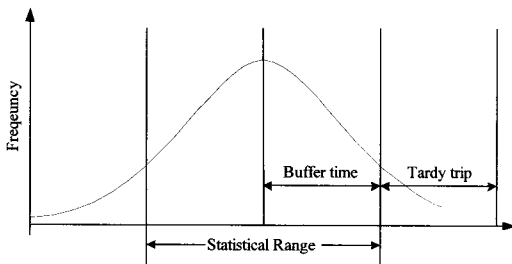
셋째, MI는 평균 통행율과 최악의(worst) 통행율과의 차이로 측정한다.

$$MI = \frac{T_{20}^* - ATR}{ATR} \quad (8)$$

여기서, T_{20}^* 은 가장 늦게 도착한 20%의 평균 통행율이다.

4. 시사점

지금까지 통행시간 신뢰성 지표와 관련된 선행연구를 통계적 영역, 완충시간, 지각통행의 세 가지로 유형으로 검토하였다. <그림 1>은 이를 도해한 것이며, 이로부터 몇 가지 시사점을 도출할 수 있다.



<그림 1> 선행연구 도해

첫째, 평균 통행시간 보다 먼저 도착한 영역을 고려할 것인지 여부를 결정하여야 한다. 통계적 영역 지표의 경우 통행시간 불확실성의 측정 범위로 평균 통행시간 보다 빨리 또는 늦게 도착한 통행규모를 동일하게 고려하고 있다. 실제 통행시간은 평균 통행시간보다 빠를수도 늦을수도 있으며, 합리적 통행자라면 이 양자의 비용을 비대칭적(asymmetric)으로 인지할 것이다. 실제 통행시간이 평균 통행시간보다 빠를 경우 통행시간 예측의 불확실성이란 측면에서 비용으로 볼 수 있다. 그러나 절대 통행시간이 줄어들었다는 측면에서 효용으로 해석할 수도 있다. 이 경우 통행시간 절감과의 중복추정 우려도 있다.

둘째, 불확실성 판단의 객관적 임계점 설정이 중요하

다. 통계적 영역 지표가 적용하는 표준편차는 자료의 통계적 분류에는 유용할 수 있으나, 일반 통행자가 직접 인지하는 불확실성과 반드시 일치하지 않는다. 완충시간 지표의 95% 신뢰구간 값 또한 표준편차 적용과 동일한 문제점을 내포한다. 특히 지각통행 지표의 '용인할 수 있는 지각시간(acceptable lateness time)' 개념은 매우 임의적이다.

셋째, 실제 통행시간 분포에 대한 검토가 필요하다. 통행시간 분포를 정규분포로 가정할(Oh and Chung, 2006) 경우 앞서 언급한 바와 같이 평균 대비 ± 1 표준편차를 적용하면 68%, ± 2 표준편차를 적용하면 95%의 통행규모를 고려할 수 있다. 그러나 통행시간 분포는 로그정규분포(Lognormal distribution)나 감마분포(Gamma distribution)처럼 오른쪽으로 꼬리가 긴(a longer tail to the right) 형태를 띠는 것으로 알려져 있다. Emam and Al-Deek (2006)은 Anderson-Darling 통계량을 이용하여 와이블(Weibull), 지수(exponential), 로그정규(lognormal), 정규(normal)분포를 경험적으로 비교한 결과 로그정규분포가 가장 적합한 것으로 보고하고 있다. 이는 여러 연구에서 로그정규분포 등 오른쪽으로 꼬리가 긴 분포를 이용하여 통행시간 분포를 설명(Cambridge Systematics Inc. et al., 2003; Lam and Small, 2001; Lint and Zuylen, 2005; US Florida Department of Transportation, 2000)하는 것과 무관치 않을 것이다.

이상의 논의를 바탕으로 본 연구는 다음 세 가지 원칙을 기준으로 통행시간 신뢰성 지표를 개발한다.

첫째, 보수적 계량화와 중복추정 배제를 위해 평균 통행시간 보다 늦게 도착한 통행규모로 통행시간의 불확실성을 측정한다. 따라서 본 연구에서 제안하는 지표는 수정형 완충시간 지표(a modified buffer time measure)로 해석될 수 있다.

둘째, 통행시간 불확실성의 판단의 임계점은 외생적으로 결정하지 않고, 통행시간 불확실성의 정의에 충실하게 계획 통행시간과 실제 통행시간의 차이로 측정한다.

$$R = t_a - t_p \quad (9)$$

s.t. $t_a \geq t_p$

여기서 R 은 통행자의 통행시간 신뢰성 지표, t_p 와 t_a 는 통행자의 기종점 $\{o, d\}$ 간 계획 통행시간(planned travel time) 및 실제 통행시간(actual travel time)이다.

셋째, 통행시간 분포는 로그정규분포로 설정한다. 단, 지표개발 시 통행시간 분포의 규모(scale)와 모양(shape)을 결정하는 파라미터는 동일한 것으로 가정한다.

이어서 제III장에서는 철도와 도로의 통행시간 신뢰성 지표 모형을 각각 제시한다. 버스를 어떻게 고려할 것인지에 따라, '도로 vs. 철도', '승용차 vs. 대중교통', '승용차 vs. 버스 vs. 철도' 등으로 구분할 수 있으나, 버스 통행시간의 불확실성이나 가변성은 승용차 통행과 유사한 것으로 간주할 수 있으므로 도로로 통합하기로 한다.

III. 통행시간 신뢰성 지표 개발

1. 철도부문

제II장에서 통행시간 신뢰성 지표를 계획 통행시간 대비 실제 통행시간의 차이로 정의했으며, 통행시간 분포는 로그정규분포 등 오른쪽으로 꼬리가 긴 분포로 가정했다. 철도통행의 경우 계획 통행시간은 역간 편성시간표로, 실제 통행시간은 역간 실제 도착시간으로 정의할 수 있으며 이는 철도의 정시 도착율(on-time performance)이나 운전시격 준수(headway adherence)에 의해 결정된다. 따라서 철도의 통행시간 신뢰성 지표는 편성시간표 대비 지연시간과 동일한 개념으로 설정할 수 있다(〈그림 2〉 참조).

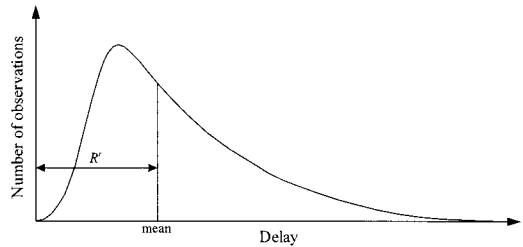
$$R^r = t_a - t_p = t_a - t_s = t_d \quad (10)$$

s.t. $t_d \geq 0$

여기서 R^r 은 철도의 통행시간 신뢰성 지표, t_s 는 역간 편성시간표 통행시간(scheduled travel time), t_d 는 편성시간표 대비 지연시간이다.

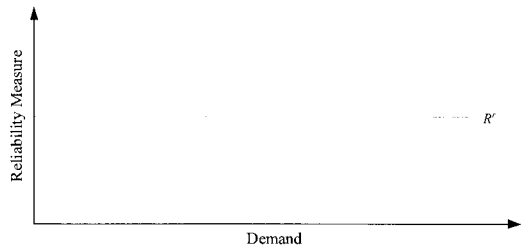
이 지표를 적용하기 위해서는, 지역 간 철도와 도시부 철도의 특성을 고려하여야 한다. 지역 간 철도는 이용자가 출발역을 기준으로 정차역 또는 도착역까지의 운행계획시간을 인지하고 있다. 따라서 이용자가 인식하는 신뢰성은 역간 운행계획시간 대비 지연시간이다. 즉 A역과 B역 간의 운행계획 시간이 50분일 경우, 실제 통행시간이 60분이었다면, 이 열차를 탑승한 통행자의 비신뢰성은 지연시간인 10분으로 산정한다는 것이다. 반면, 도시부 철도는 역간거리가 짧고 운행회수가 빈번하므로 이용자는 역간 운행계획시간보다는 운전시격(headway)를 인지하고 있다. 따라서 이용자들이 인식하는 신뢰성은

계획 운전시격과 실제 운전시격의 차이로 나타난다. 예컨대 어떤 역에서 광역철도의 운행계획이 오전 침두시에 5분에 1회 배차되기로 예정되었으나, 실제로는 10분에 1회 운행되었다면 운전시격 지연시간인 5분으로 통행자의 비신뢰성을 측정한다는 것이다. 즉 지역 간 철도는 도착 지연시간으로, 도시부 철도는 운전시격의 지연시간으로 통행시간 신뢰성 지표를 산정할 수 있다.



〈그림 2〉 철도의 통행시간 신뢰성 지표 산정 개념도

지연시간은 이용수요와 독립적 관계로 설정하여도 큰 무리가 없으므로, 철도의 통행시간 신뢰성 지표를 상수로 가정할 수 있다(〈그림 3〉 참조). 그러나 지연시간은 열차의 서비스 수준별로는 차이가 있을 수 있으므로 본 연구에서는 열차의 서비스 수준별 통행시간 신뢰성 지표를 산정한다(제IV장 참조).

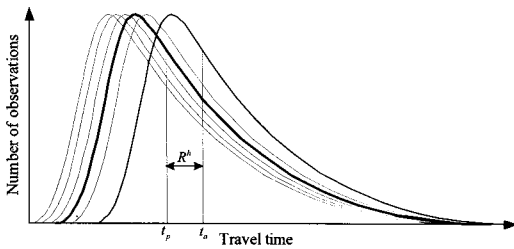


〈그림 3〉 철도의 통행시간 신뢰성 지표 개념도

2. 도로부문

도로의 통행시간 신뢰성 지표 또한 철도와 마찬가지로 계획 통행시간과 실제 통행시간의 차이로 측정한다. 그러나 도로부문의 경우 철도와 달리 시차표가 존재하지 않으므로 계획 통행시간을 정의하기가 쉽지 않다.

〈그림 4〉는 본 연구에서 제안하는 계획 통행시간과 실제 통행시간을 산정하는 개념도이다. 도로 이용자들은 동



〈그림 4〉 도로의 통행시간 신뢰성 지표 산정 개념도

일 기준점, 유사한 서비스 수준(LOS: Level of Service)³⁾의 통행에서도 서론에서 언급한 7가지 이유로 통행시간의 변동을 경험한다. 따라서 실제 통행시간 t_a 의 분포(〈그림 4〉의 '가는 선')는 다양하게 나타난다. 이 때 각 분포들의 모양(shape) 및 규모(scale) 파라미터는 동일한 것으로 가정한다.

실제 통행시간 t_a 는 각 통행시간분포의 평균값으로 정의할 수 있다. 계획 통행시간 t_p 는 각 실제 통행시간 분포들의 평균분포(〈그림 4〉의 '굵은 선')의 평균값으로 정의한다.

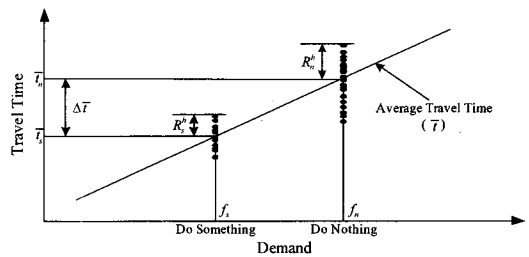
$$t_p = \frac{\sum_{a=1}^N t_a}{N} \quad (11)$$

여기서 N 은 관측된 실제 통행시간분포의 개수이다. 따라서 도로의 통행시간 신뢰성 지표 R^h 는 식(12)와 같이 정의할 수 있다.

$$R^h = t_a - t_p = t_a - \frac{\sum_{a=1}^N t_a}{N} \quad (12)$$

그런데 동일 기준점 간 통행에서도 서비스수준이 변화하면(본 연구에서는 교통량의 변화) 도로의 통행시간 신뢰성도 변화한다. 〈그림 5〉는 도로의 서비스 수준 변화와 통행시간 신뢰성과의 관계를 도시한 것이다.

교통량이 증가하면 일반적으로 통행시간도 늘어난다. 〈그림 5〉에서는 이를 선형으로 단순화하였다. 특정 교통량 수준에서 개별 차량의 통행시간 분포(〈그림 5〉의 '점')는 평균통행시간(〈그림 5〉의 '선') 주변에 다양하게

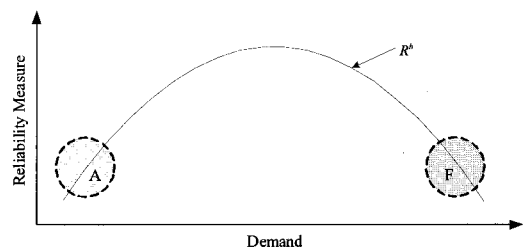


〈그림 5〉 교통량 수준별 통행시간 신뢰성 변화 개념도

분포할 것으로 예상할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 평균통행시간 보다 먼저 도착한 통행(〈그림 5〉에서 선 아래 분포하는 점들)은 통행시간 신뢰성 논의에서 배제한다.

도로의 서비스 수준이 일정 수준 이하로 떨어지면, 기존 도로를 확장하거나 신규 도로를 건설하게 된다. 이 경우 경로전환에 따라 해당 링크의 교통량이 f_n 에서 f_s 로 줄어들고, 평균 통행시간 또한 t_n 에서 t_s 로 감소한다. 현행 교통부문(예비)타당성조사에서는 사업 시행에 따른 감소된 통행시간, 즉 ΔT 를 통행시간 절감편익이라는 항목으로 고려하고 있다. 그러나 사업시행의 효과는 평균 통행시간의 증감뿐만 아니라 통행시간의 신뢰성을 R_n^h 에서 R_s^h 로 변화시킨다.

개별 차량의 통행시간 분포는 도로의 서비스 수준과 깊은 연관이 있다. LOS가 매우 높거나 낮아(예컨대 A 또는 F) 교통류의 차두간격(headway)이 상대적으로 균일하게 나타날 경우, 앞서 언급한 우연적 지체의 7대 원인에 대한 개별 차량의 대응 편차는 크지 않을 것이다. 따라서 통행시간 분포는 좁게 형성될 것으로 판단된다. 반면, LOS가 중간 수준일 경우, 교통류의 차두간격은 비균일적으로 나타난다. 그 결과 우연적 지체에 따른 개



〈그림 6〉 도로의 통행시간 신뢰성 지표 개념도

3) 도로의 서비스 수준은 도로 유형별로 여러 지표로 측정되나, 이를 결정하는 가장 중요한 변수는 교통량이다(건설교통부, 2001). 본 연구에서도 교통량을 기준으로 도로의 서비스 수준을 논의한다.

별 차량의 대응 편차는 크게 형성되고 통행시간 분포 또한 넓게 나타날 것으로 예상된다. 이상의 논의로부터 통행시간 신뢰성 지표는 교통량과 음의 포물선 관계를 형성할 것으로 예상할 수 있다(〈그림 6〉 참조).

IV. 통행시간 신뢰성 지표 산정

1. 철도부문

국내 철도운행 실적자료를 이용하여 철도의 통행시간 신뢰성 지표 원단위를 산정한다. 제Ⅲ장에서 논의한 바와 같이 지표를 계획 통행시간 대비 실제 통행시간의 차이(지연시간)로 산정하되, 지역 간 철도와 도시부 철도의 특성을 고려한다. 즉, 지역 간 철도는 역간 도착 지연 시간으로, 도시부 철도는 역간 운전시격의 지연시간으로 통행시간 신뢰성 지표를 산정한다.

지역 간 철도의 통행시간 신뢰성 지표 원단위를 산출하기 위해 2007년 1월 1일부터 2007년 12월 31일까지 경부선, 호남선(이상 고속열차 및 일반열차), 중앙선(일반열차)을 운행하는 개별열차의 주요 시·종착역간 계획시간 대비 지연시간 자료를 수집하였다. 개별 열차의 지연시간을 조사대상 역간 운행거리로 나누어 km당 지연시간을 산출하였다(〈표 1〉 참조). 단, 거리에 따른 규모(scale)의 효과는 무시할 수 있는 수준으로 가정하였다.

〈표 1〉 지역 간 철도의 통행시간 신뢰성 지표 원단위 (단위 : 초/km)

구분	원단위	조사대상 시종착역
고속 철도	경부선	서울, 대전, 동대구, 부산
	호남선	용산, 광주, 목포
	평균	-
일반 철도	경부선	서울, 대전, 동대구, 부산
	호남선	용산, 서대전, 익산, 광주, 목포
	중앙선	청량리, 제천, 안동
	평균	0.384

도시부 철도의 통행시간 신뢰성 지표 원단위를 산출하기 위해 2007년 10월 10일의 부산 3호선, 대구 2호선의 첨두 1시간(오전 8~9시)과 비첨두 1시간(오후 2~3시)의 역간 계획 운전시격(planned headway)과 실제 운전시격(actual headway)의 자료를 수집하였다. 이를 역간 운행거리로 나누어 km당 운전시격의 지연시간을 산출하였다(〈표 2〉 참조).

〈표 2〉 도시부 철도의 통행시간 신뢰성 지표 원단위 (단위 : 초/km)

구분	원단위	
첨두	부산3호선	3.115
	대구2호선	1.784
	평균	2.450
비첨두	부산3호선	2.749
	대구2호선	1.560
	평균	2.155
평균	2.303	

2. 도로부문

1) 개요

국내 도로운행 실적자료를 이용하여 도로의 통행시간 신뢰성 지표 원단위를 산정한다. 도로 이용은 교통류 특성에 따라 연속류와 단속류로, 통행권역에 따라 지역 간과 도시부 통행으로 분류할 수 있다. 보다 정밀한 분석을 위해서는 기종점별 구분이나 도로의 각종 운영요소가 고려되어야 할 것이다. 그러나 서론에서 언급한 바와 같이 본 연구가 교통수요분석에 활용할 수 있는 거시적·집합적(macro)인 통행시간 신뢰성 지표개발을 목적으로 하므로, 교통류 및 통행권역에 따른 분류가 본 연구의 목적에 부합하는 적정 수준인 것으로 판단된다.

본 연구에서 정의하는 통행시간 신뢰성 지표를 산정하기 위해서는 통행시간 분포를 파악할 수 있어야 하고, 이는 다시 개별 차량의 통행시간 정보를 필요로 한다. 현재 국내에서 개별 차량의 통행시간 정보를 조사하고 있는 자료는 고속국도 TCS(Toll Collection System), 일반국도 AVI(Automatic Vehicle Identification), 서울시 ROTIS(Road Traffic Information Systems), 대전시 ITS(Intelligent Transportation System) 검지차량 자료 등이 있다. 이중 일반국도 AVI 자료는 '공공기관의개인정보보호에관한법률' 및 '위치정보의보호및이용등에관한법률'에 의거 차량번호판 매칭 후 자동으로 삭제하고 있으며, 대전시 ITS 검지차량 자료는 개별 차량의 통행시간 원자료를 가공한 후 링크 평균통행시간 자료만을 구축하고 있으므로 이용할 수 없다. 따라서 본 연구는 지역 간 단속류를 제외하고 〈표 3〉과 같은 분류기준으로 도로의 통행시간 신뢰성 지표를 산출한다.

〈표 3〉 도로의 통행시간 신뢰성 지표 산정 시 적용된 자료

통행권역	교통류	자료
지역간	연속류	TCS(Toll Collection System) 자료
도시부	연속류	ROTIS(Road Traffic Information Systems) 자료
	단속류	

2) 지역 간 도로

2008년 1월 1일~2008년 1월 31일 간 경부고속도로 서울TG~오산IC와 서해안고속도로 서서울TG~발안IC 구간을 대상으로 버스전용차로제가 시행되는 주말을 제외한 평일 교통량 및 속도 자료를 수집하였다(〈표 4〉 참조). 조사대상 구간은 국내 고속국도 중 이용율이 가장 높은 지역이므로 교통량 수준이 다양하게 관측될 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 통행시간 신뢰성 지표 모형을 적용하기에 가장 적합한 구간으로 판단된다. 교통량은 해당 구간별 지점검지기(VDS: Vehicle Detection System) 자료를 바탕으로 검지기 간 거리를 기중평균하여 구간 교통량으로 산출하고, 속도는 구간거리와 IC간 개별 차량의 TCS 자료(통행시간)를 이용하여 구간평균값으로 산정하였다.

〈표 4〉 지역 간 도로의 통행시간 신뢰성 지표 조사구간

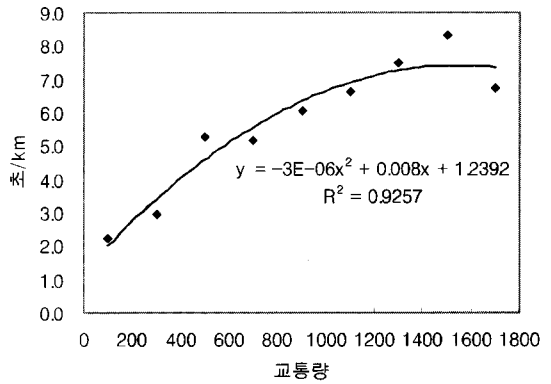
구분	설계속도	조사구간(양방향)
경부고속도로	100km/h	서울-수원, 수원-기흥, 기흥-오산
서해안고속도로	120km/h	발안-비봉, 비봉-매송, 매송-서서울

제Ⅲ장에서 제시한 방법론을 적용하여 지역 간 도로의 통행시간 신뢰성 지표를 산정하였다(〈표 5〉 참조). 여러 시행착오(trial and error) 통해 교통량을 200대/시-차로 단위로 구분할 때 최적의 적합도(best fit)가 나타나도록 발견하였다. 다만, 이러한 노력은 근본적으로 정산(calibration)의 과정이므로 발견된 계급(200대/시-차로)가 절대적 최적치인지에 대한 통계적 근거는 없다.

제Ⅲ장에서 예상한 바와 같이 도로의 통행시간 신뢰성 지표는 교통량과 음의 포물선 관계를 형성하고 있다. 그러나 교통량이 1,400대/시-차로 이상인 구간의 표본수는

〈표 5〉 지역 간 도로의 통행시간 신뢰성 지표 원단위

교통량 (대/시-차로)	경부(초/km)		서해안(초/km)		평균 (초/km)
	원단위	표본수	원단위	표본수	
200 이하	2.33	84	2.06	87	2.20
200~400	3.57	140	2.33	160	2.95
400~600	5.01	102	5.59	132	5.30
600~800	4.93	181	5.45	171	5.19
800~1,000	5.38	278	6.76	242	6.07
1,000~1,200	5.38	535	7.82	150	6.60
1,200~1,400	6.35	484	8.68	142	7.52
1,400~1,600	7.64	217	9.06	67	8.35
1,600 이상	6.71	27	-	-	6.71



〈그림 7〉 지역 간 도로의 통행시간 신뢰성 지표 함수

많지 않고, 1,600대/시-차로 이상은 거의 관찰되지 않고 있다. 교통량이 용량 상태까지 관측될 경우 음의 포물선 관계는 보다 명확해질 것으로 판단된다(〈그림 7〉 참조).

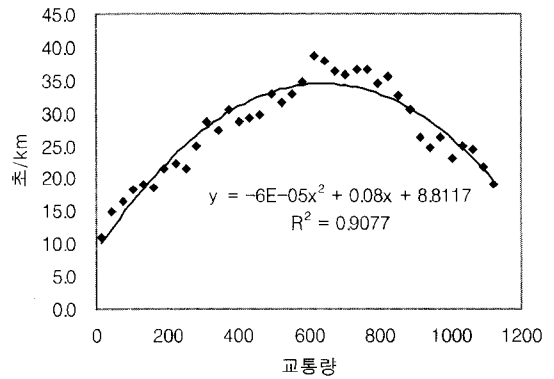
3) 도시부 도로

도시부 도로의 통행시간 신뢰성 지표 원단위를 산정하기 위하여 서울시를 대상으로 2006년 1월 1일~12월 31일 간 교통량 및 속도 자료를 수집하였다. 교통량 자료는 서울시 교통량 조사지점(118개 지점)의 시간당 지점교통량 자료이다. 속도 자료로는 교통량 자료와 동일한 지점을 포함하는 최소거리 링크의 구간 통행속도를(주)ROTIS로부터 구매하였다. 이때, 연속류는 경부고속도로, 올림픽대로, 내부 순환로, 동부/서부간선도로, 교량에서 수집된 자료를 포함하고, 그 외 나머지는 단속류로 분류하였다.

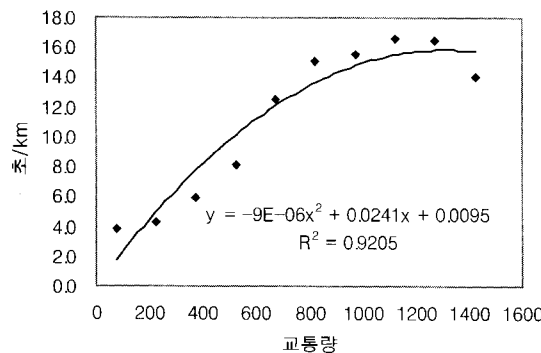
지역 간 자료와 마찬가지로 도시부 자료의 경우도 교통량과 속도 자료의 수집 단위가 일치하지 않고 있다. 즉, 교통량은 지점 단위로, 속도는 구간 단위로 구축되었다. 본 연구의 분석대상인 통행시간 신뢰성이 근본적으로 구간별 지표이므로 지점 교통량을 구간 교통량으로 환산하여 단위의 불일치 문제를 해소하여야 한다. 앞서 언급한 바와 같이 지역 간 도로 자료의 경우는 지점 교통량 자료를 검지기 간 거리로 기중평균하여 구간 교통량을 추정하였다. 그러나 도시부 자료는 분석대상 구간길이가 상대적으로 짧고 또 해당 링크에는 일반적으로 검지기가 하나만 설치되어 있으므로 지점 교통량을 구간 교통량으로 전환하는 데에 한계가 있다. 이에 따라 본 연구는 속도 자료를 최소거리 링크의 속도로 산출함으로써 지점 교통량이 구간 교통량의 근사치가 되도록 설정하여 단위의 불일치 문제를 완화하였다.

〈표 6〉 도시부 연속류 도로의 통행시간 신뢰성 지표 원단위

교통량 (대/시-차로)	원단위 (초/km)	표본수
150 이하	3.79	280
150~300	4.35	595
300~450	5.90	511
450~600	8.09	519
600~750	12.49	667
750~900	15.04	674
900~1050	15.56	437
1,050~1,200	16.60	273
1,200~1,350	16.51	244
1,350 이상	14.08	238



〈그림 9〉 도시부 단속류 도로의 통행시간 신뢰성 지표 함수



〈그림 8〉 도시부 연속류 도로의 통행시간 신뢰성 지표 함수

〈표 7〉 도시부 단속류 도로의 통행시간 신뢰성 지표 원단위

교통량 (대/시-차로)	원단위 (초/km)	표본수	교통량 (대/시-차로)	원단위 (초/km)	표본수
0~30	10.89	66	570~600	34.61	843
30~60	14.90	189	600~630	38.64	766
60~90	16.45	522	630~660	37.89	667
90~120	18.35	726	660~690	36.18	628
120~150	18.98	721	690~720	35.77	586
150~180	18.44	758	720~750	36.56	547
180~210	21.42	733	750~780	36.66	452
210~240	22.34	735	780~810	34.29	424
240~270	21.55	728	810~840	35.38	346
270~300	24.97	805	840~870	32.45	275
300~330	28.61	864	870~900	30.46	171
330~360	27.17	864	900~930	26.32	143
360~390	30.36	951	930~960	24.66	145
390~420	28.50	1,031	960~990	26.31	96
420~450	29.13	974	990~1020	23.03	87
450~480	29.78	984	1,020~1,050	24.97	111
480~510	32.72	832	1,050~1,080	24.45	58
510~540	31.52	884	1,080~1,110	21.59	50
540~570	32.73	865	1,110 이상	19.14	223

또한 교통량과 속도 자료의 공간적 범위가 일치하지 않는 데이터는 제외하였으며, 해당 지점별 통행 속도가 통상적인 범위를 벗어나는 이상치의 경우 평균 통행시간 수준으로 보정하였다. 여러 시행착오를 통해 연속류는 150대/시-차로(〈표 6〉, 〈그림 8〉 참조), 단속류는 30 대/시-차로(〈표 7〉, 〈그림 9〉 참조)로 구분할 때 최적의 적합도가 나타남을 발견하였다. 지역 간 도로에서와 마찬가지로 교통량과 통행시간 신뢰성은 음의 포물선 관계를 형성하고 있다.

V. 결론

지금까지 육상교통수단(도로 및 철도)의 통행시간 신뢰성 지표 개발에 관한 내용을 살펴보았다. 이를 위하여 먼저 선행연구 검토를 통해 지표개발의 3대 원칙을 도출하였다. 3가지 기준은 수정형 완충시간 지표를 바탕으로 통행시간 신뢰성을 측정하되, 신뢰성/비신뢰성 구분의 임계점은 계획 통행시간과 실제 통행시간의 차이로 결정하며, 통행시간분포는 오른쪽으로 꼬리가 긴 로그정규 분포를 가정하는 것이었다. 다음으로 3대 원칙을 바탕으로 도로와 철도의 통행시간 신뢰성 지표를 개발하였다. 철도의 경우 편성 시각표 대비 지연시간으로 산정하되, 지역 간 철도(고속 및 일반철도)는 도착 지연시간으로, 도시부 철도(광역 및 도시철도)는 운전시각의 지연시간을 제안하였다. 도로의 경우 실제 통행시간으로는 개별 통행분포의 평균값을, 계획 통행시간으로는 평균 통행시간 분포의 평균값을 제안하였다. 마지막으로 개발된 통행시간 신뢰성 지표 모형을 국내 도로 및 철도이용 실적 자료에 적용하여 통행시간 신뢰성 지표를 산정하였다. 이때 신뢰성 지표를 분석대상 거리로 나누어 단위 거리

당 통행시간 신뢰성 지표 원단위를 제시하였다.

이 연구는 통행시간 신뢰성 편익 산정방안 연구의 전반부에 해당하며, 현재 후속연구로 통행시간 신뢰성 가치 산정 연구가 진행중이다. 후속연구의 결과와 본 연구의 내용을 결합할 경우 (예비)타당성조사와 연계된 통행시간 신뢰성 편익의 계량화방안을 마련할 수 있을 것으로 예상된다. 모조록 본 연구의 결과가 철도 및 도로 투자사업의 신중한 의사결정에 일조할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

1. 건설교통부(2001), 도로용량편람.
2. 장수은·정규화(2007), 철도사업 (예비)타당성조사의 사회경제적 가치 평가 항목 연구, 교통정책브리프 2007-05, 한국교통연구원.
3. Bremmer, D., Cotton, K., Cotey, D., Prestrud, C., and Westby G. (2004), Measuring congestion: learning from operational data, Transportation Research Record, 1895, pp.188~196.
4. Cambridge Systematics, Inc., Texas Transportation Institute, University of Washington, and Dowling Associates(2003), Providing a Highway System with Reliable Travel Times Study 3-Reliability, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 20-58(3), Transportation Research Board.
5. Chen, A., Ji, Z., and Recker, W. (2002), Travel time reliability with risk-sensitive travelers, Transportation Research Record, 1783, pp.27~33.
6. Chen, C., Skabardonis, A., and Varaiya, P. (2003), Travel-time reliability as a measure of service, Transportation Research Record, 1855, pp.74~79.
7. Emam, E. and Al-Deek, H. (2006), Using real-life dual-loop detector data to develop new methodology for estimating freeway travel time reliability, Transportation Research Record, 1959, pp.140~150.
8. Lam, T. and Small, K. (2001), The value of time reliability: measurement from a value pricing experiment. Transportation Research Part E, 37E, pp.231~251.
9. Lint, J. and Zuylen, H. (2005), Monitoring and predicting freeway travel time reliability: using width and skew of day-to-day travel time distribution, Transportation Research Record, 1917, pp.54~62.
10. Oh, J. and Chung, Y. (2006), Calculation of travel time variability from loop detector data, Transportation Research Record, 1945, pp.12~23.
11. Supernak, J., Kaschade, C., and Steffey, D. (2003), Dynamic value pricing on I-15 in San Diego: impact on travel time and its reliability, Transportation Research Record, 1839, pp.45~54.
12. UK Strategic Rail Authority (2003), Appraisal Criteria.
13. US Florida Department of Transportation (2000), The Florida reliability method in Florida's mobility performance measures program, Working Paper.

- ✉ 주 작성자 : 장수은
- ✉ 교신저자 : 장수은
- ✉ 논문투고일 : 2008. 6. 30
- ✉ 논문심사일 : 2008. 8. 18 (1차)
2008. 8. 27 (2차)
- ✉ 심사판정일 : 2008. 8. 27
- ✉ 반론접수기한 : 2009. 2. 28
- ✉ 3인 익명 심사필
- ✉ 1인 abstract 교정필