

■ 論 文 ■

교통정보 수집을 위한 프로브차량대수 모형 개발

A Model Development of Probe Cars for Travel Time Data Collection

고 승 영

(명지대학교 교통공학과 교수)

목 차

I. 서론	1. 프로브차량 소요대수 결정기준
II. 통행시간정보수집 시스템	2. 링크당 평균 통행시간 자료수
III. 소요 프로브대수에 영향을 주는 요소	3. 프로브차량 밀도의 최소 확률
1. 프로브차량의 특성	4. 자료 미수집링크의 허용비용
2. 시스템 신뢰도	V. 사례연구
3. 수집자료의 량 및 정확도	VI. 결론
IV. 프로브차량대수 모형	참고문헌

Key Words : 프로브차량, 통행시간, 유효수집율, 최소밀도, 자료 미수집링크

요 약

본 논문의 목적은 링크통행시간 자료를 수집하는 시스템에서 소요 프로브차량대수에 영향을 주는 요소들을 규명하고, 최적의 소요 프로브차량대수를 결정하는 모형을 개발하는데 있다.

자가용승용차, 택시, 버스, 택배차량 등 여러 종류의 차량들이 프로브차량으로 사용될 수 있다. 그러나 일정한 정확도 이상의 교통정보를 수집하기 위해서 얼마나 많은 프로브차량이 필요한지에 대한 연구는 그다지 깊이 있게 이루어지지 않았다.

적정 소요 프로브차량대수는 링크통행시간 자료수집 기술, 수집대상 링크의 공간적 범위, 프로브차량의 종류 및 운행 특성, 자료수집 시스템의 신뢰도, 수집되는 자료의 정확도 등에 영향을 받게 된다.

소요 프로브차량대수를 결정하는 링크당 평균 통행시간 자료수, 프로브차량 밀도의 최소 확률, 그리고 자료 미수집링크의 허용비용의 3가지 결정기준이 정의되었다. 또한 이러한 결정기준에 대해 소요 프로브차량대수를 산출하는 모형이 개발되었다. 일반적으로 주기당, 링크당 평균 필요 통행시간 자료수(d_R), 단위길이당 프로브차량의 대수 또는 밀도(n_{min} or α), 일정 프로브차량밀도 이상의 확률(β), 그리고 자료 미수집링크의 비율(γ) 이 클 수록 소요 프로브차량대수는 증가한다.

민간 교통정보회사의 통행시간 수집시스템에서 소요 프로브차량대수를 산정하는 사례연구가 수행되었으며, 여러 가지 조건에서 소요 프로브차량대수가 산출되었다.

I. 서론

본 연구의 목적은 교통정보 수집을 위한 구간통행 시간 자료 수집을 위해 필요한 프로브차량의 수에 영향을 주는 요소들을 도출하고, 최적 프로브차량대수 결정을 위한 모형을 개발하는데 있다.

최근 교통혼잡이 심화되고 교통정보에 대한 운전자들의 요구가 강해지면서 구간통행시간은 도로의 소통 상태를 나타내는데 지점속도 보다 더 정확하고, 교통정보의 이용자들도 구간의 소통상태에 대한 교통정보를 희망하고 있다. 따라서 첨단 교통정보수집 기술의 발달과 아울러 링크통행시간 자료에 대한 중요성이 매우 중요해지고 있다.

구간통행시간 자료를 수집하는 가장 대표적인 방법으로 프로브차량을 운행하는 기법이 사용되고 있다. 외국에서는 이미 수년 전부터 ADVANCE, PROMETHEUS 등과 같은 시스템에서 프로브차량을 이용하여 교통정보를 수집하고 있는 상태이다. 우리나라에서도 최근 몇몇 민간 교통정보회사가 구간통행시간 자료를 수집하여 교통정보를 제공하고 있는 상태이며, 이들 회사는 교통정보수집을 위하여 프로브차량들을 운행하고 있는 상태이다.

자가용, 택시, 버스 등 다양한 종류의 차량들이 프로브차량으로 이용되고 있는데, 일정한 정확도 이상의 교통정보 수집을 위해 몇 대의 프로브차량이 필요한지에 대해서는 충분한 연구가 이루어지지 않은 상태이다. 많은 프로브차량을 운행하면, 많은 링크에 대한 교통정보 수집이 가능하며, 정확성도 높아질 것이다. 반면, 많은 프로브 차량을 운행할수록 프로브차량의 유지관리비가 많아져서 교통정보 수집비용은 높아지게 된다. 즉, 프로브차량의 대수 측면에서 수집되는 통행시간 정보의 정확성과 프로브차량 운행비용 사이에는 상충성(trade-off)이 존재하게 된다. 최적 프로브차량대수는 링크통행시간 자료 수집기술, 프로브차량의 운행특성, 수집시스템의 신뢰성, 수집되는 자료의 정확도 등에 영향을 받게 된다.

프로브차량대수에 대한 기존의 연구는 그다지 많지 않은데, 미국 시카고 지역의 ADVANCE 프로젝트에서는 프로브차량대수와 프로브차량이 통과한 링크수 간의 관계를 시뮬레이션을 통해 산출한 후, 프로브차량대수와 프로브차량이 통과한 링크의 비율을 도표화한 바 있다. 국내에서는 고속도로 상 프로브차량의

밀도가 어떤 값 이상이 될 최소확률을 기준으로 소요 프로브차량대수를 산정하는 모형을 개발한 바 있다. 그러나 고속도로 소통상태 정보 수집을 위한 소요 프로브차량에 대한 연구로서 교통정보 수집주기에 대한 개념이 포함되어 있지 않고, 프로브차량밀도의 개념을 사용하여 수집되는 링크통행시간 자료수에 대한 접근이 어려운 점이 있다.¹⁾

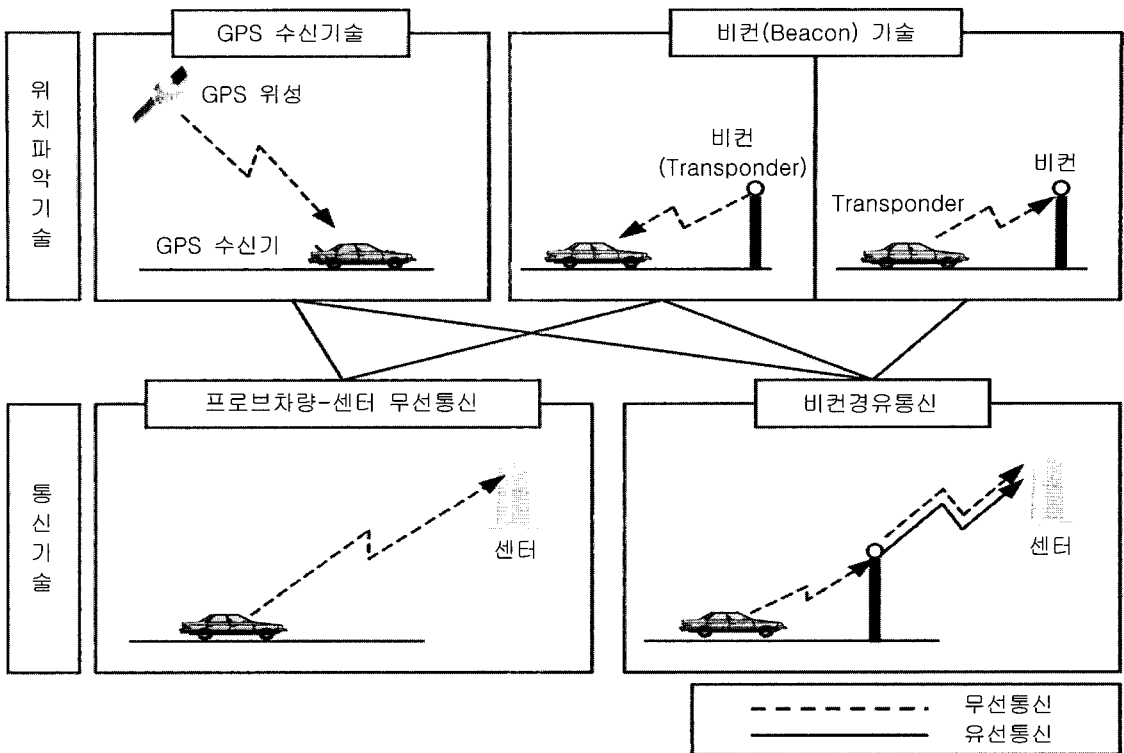
본 연구는 링크통행시간자료 수집기술을 요약·정리하고, 요구되는 프로브차량대수에 영향을 주는 요소들을 도출하며, 프로브차량대수 산정 기준(criteria)을 설정하고 이에 따른 모형을 개발하였다. 개발된 모형을 사용하여 현재 교통정보 사업을 수행하고 있는 민간교통정보회사에 대한 사례연구를 수행하였다.

II. 통행시간자료 수집 시스템

통행시간정보는 도로의 구간에 대해 정의될 수 있으며, 하나의 구간은 하나 이상의 링크로 구성될 수 있다. 따라서 기본적으로 도로망의 최소 구성단위인 링크에 대한 통행시간을 알게되면 모든 구간에 대한 통행시간 정보를 도출할 수 있게 된다. 일반적으로는 인지도 측면에서 교통정보로서의 활용성을 감안하여 간선도로와 간선도로가 교차하는 링크로서 하나의 구간을 정의하기도 한다. 이러한 구간에 대한 정의는 교통정보를 수집하는 시스템의 링크-노드 설계와 제공되는 구간교통정보의 속성 등에 따라 달라지게 되며, 실제사항에 해당된다. 본 연구에서는 이러한 구분을 하지 않고 단지 링크통행시간의 용어로 통일하여 사용하였다.

구간통행자료는 여러 가지 방법으로 수집될 수 있는데, 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 하나는 링크 중간의 하나 또는 여러 지점에 설치된 점기반(point-based) 차량검지기에서 수집되는 교통량, 점유율, 지점속도 등의 자료로부터 링크의 평균통행시간을 추정하는 방법이다. 또 다른 방법은 첨단 ITS기술을 사용하여 프로브차량으로부터 실시간으로 직접 링크통행시간을 수집하는 방법이다.

이 두 번째 방법은 프로브차량의 자동위치파악(AVL: automatic vehicle locating) 기술과 위치자료의 센터로의 송신기술이 요구된다. 이러한 기술들 중에서 가장 대표적인 시스템으로서는 위치파악기술을 기준으로 크게 비컨(Beacon)기반 시스템과 GPS수신



〈그림 1〉 링크통행시간자료 수집기술

기와 무선통신을 사용하는 GPS 기반시스템으로 대별된다.

〈그림 1〉은 통행시간자료 수집시스템의 두 가지 기술을 개념적으로 나타낸 것이다. 비컨(beacon)이나 GPS수신기를 사용하여 파악된 위치정보는 유·무선통신을 사용하여 센터로 송신되는데, 일반적으로 비컨의 경우 전용회선과 같은 유선통신을 사용하고 있다.

비컨기반시스템의 경우 비컨이 설치된 링크에 대해서만 통행시간 자료의 수집이 가능하다. GPS기반시스템은 프로브차량이 운행하는 모든 링크에 대한 통행시간자료 수집이 가능하다.

III. 소요 프로브차량대수에 영향을 주는 요소

일정한 정확도를 지닌 통행시간자료의 수집을 위해 필요한 프로브차량대수는 수많은 요소들과 관련이 있다. 이들 중 가장 결정적인 영향을 미치는 요소는 링크통행시간자료를 수집하고자하는 대상링크의 개수와 연장 등 자료수집의 공간적인 범위이다. 도시에는 수

많은 링크들이 있고, 이들 링크 모두를 통행시간자료 수집대상으로 하기에는 어려울 뿐만 아니라, 수집의 필요성도 그다지 높지 않다. 다만, 일정한 교통량 이상의 도로구간, 즉 교통정보를 제공하고자하는 구간들에 대한 통행시간자료가 요구되는 것이 일반적인데, 전체 링크들 중에서 자료수집을 하고자하는 링크의 개수와 연장 등에 대한 설계는 소요 프로브차량대수에 가장 중요한 영향을 주는 요소이다. 따라서 본 연구는 이러한 통행시간자료 수집대상 링크는 정해진 것으로 가정하고, 나머지 요소들을 도출하고 이에 대해 모형을 수립하도록 하였다.

비컨기반시스템의 경우 이러한 대상링크들에 대해서 비컨이 설치될 것이며, GPS기반시스템의 경우 프로브차량이 수집대상 링크를 주행하는 경우에만 링크통행시간자료를 송신하도록 하면 된다.

자료수집 대상링크가 주어진 상태에서 소요 프로브차량대수에 영향을 주는 요소들을 정리해보면 다음과 같다.

1) 프로브차량의 특성

- 프로브차량의 종류 : 자가용, 택시, 버스 등

- 프로브차량의 운행특성 : 1일 운행거리, 운행지역의 공간적 분포
- 2) 시스템 신뢰도
 - 시스템 오작동의 빈도
 - 오작동시 지속시간
 - 3) 수집자료의 량 및 정확도
 - 자료수집 및 교통정보 제공 주기
 - 수집자료의 정확도

위와 같은 요소들 이외에도 시스템의 특성에 따라 수많은 다른 요소들이 프로브차량 소요대수에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

1. 프로브차량의 특성

많은 종류의 차량들이 통행시간자료 수집을 위한 프로브차량으로 사용될 수 있다. 자가용, 택시, 버스, 택배차량 등 모든 차량이 프로브차량으로 가능하다.

어떤 종류의 차량이 프로브차량으로서 적절한가와 몇 대의 프로브차량이 필요한가는 여러 가지 요소들에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 요소들로서는 프로브차량 통행시간의 해당 도로구간 평균속도의 대표성, 프로브차량 운영의 용이성과 비용, 프로브차량의 운행시간(침투, 비침투 등), 프로브차량 운행지역의 공간적 분포 등이 있다.

통행시간자료를 수집하는 일반적인 목적은 도로의 소통상황을 파악하고, 이를 통해 이용자들에게 교통정보를 제공하며, 교통흐름을 원활하게 관리하는데 있다. 따라서, 이에 필요한 통행시간정보는 평균통행시간이 되어야 하는데, 이 평균통행시간은 대략 자가용승용차의 통행시간과 유사할 것이다. 이는 일반적으로 자가용이 도로상 교통류의 대부분을 차지하고 있으며, 교통정보 이용자들이 주로 자가용이용자들이라는 점에서 타당하다. 만약, 프로브차량으로 자가용 이외에 버스, 택시, 택배차량 등을 사용하는 경우, 이들의 운행특성은 자가용과는 다르기 때문에 통행시간도 달라지게 될 것이다. 이 경우 수집된 통행시간 자료를 사용하기 전에 자가용승용차의 통행시간을 추정하는 보정과정이 필요하다.

프로브차량들은 프로브차량으로 사용되는 기간에는 어떤 형태로든 유지·관리가 필요하다. 만약, 프로브차량들이 공간적으로 넓게 분산되어 있다면 이러한 유지·관리는 쉽지 않을 것이다. 또한 프로브차량으로

사용하는데 따르는 일종의 비용부담도 필요할 수도 있다. 현실적으로 프로브차량을 운행하는데는 시스템 운영자의 초기 장착비용은 물론 운영비용, 즉 프로브차량의 선택에 영향을 주게 된다.

만약, 선택된 프로브차량이 통행시간 정보가 필요한 시간대에 운행하지 않는다면 자료수집은 효율적이지 못할 것이고, 보다 많은 프로브차량이 필요할 것이다. 더욱이 운행시간이 교통정보가 필요한 시간대만큼 충분히 길지 못하다면 역시 비효율적이다. 따라서, 통행시간 자료를 수집하는 프로브차량의 운행시간은 프로브차량을 선택하는데 중요한 요소이다.

프로브차량의 운행지역도 프로브차량의 선택과 소요 차량수에 영향을 준다. 만약, 프로브차량이 통행시간을 수집하고자하는 지역 또는 링크 상을 운행하지 않는다면 필요한 자료를 수집할 수 없게 된다.

이밖에도 프로브차량의 선택과 소요 차량수를 결정하는데 있어서 프로브차량의 운행특성과 관련된 많은 요소들이 영향을 주게 된다.

2. 시스템 신뢰도

소요 프로브차량대수는 통행시간 자료의 유효수집에 영향을 받는다. 한 프로브차량이 교통정보 수집 대상 링크를 운행 중이라 하더라도 시스템 또는 프로브차량 단말기의 고장 또는 오작동으로 통행시간 자료를 수집하지 못할 수도 있다. 올바른 통행시간 자료가 센터로 송신되더라도 자료처리과정상의 오류가 발생할 수도 있다. 이러한 시스템의 신뢰도는 소요 프로브차량대수와 밀접한 관계가 있다. 신뢰도가 낮을수록 보다 많은 프로브차량이 필요할 뿐 아니라, 수집되는 교통정보의 정확도에도 영향을 준다.

3. 수집자료의 량 및 정확도

소요 프로브차량대수는 통행시간 정보를 수집하고자 하는 대상 네트워크의 크기(링크 수 및 링크길이)와 대표 통행시간 도출을 위한 통행시간자료의 샘플수에 영향을 받는다.

소요 프로브차량대수는 통행시간 자료가 필요한 링크수의 증가에 따라 많아진다. 또한 링크통행시간 정보의 갱신주기(수집 및 제공주기)는 소요 프로브차량대수에 가장 큰 영향을 미친다. 갱신주기가 짧을수록

보다 많은 프로브차량이 필요하다.

이밖에 소요 프로브차량대수는 한 대의 프로브차량이 한 주기동안 수집할 수 있는 링크통행시간 자료수에 따라 달라진다. 이 차량당, 주기당 수집자료수는 프로브차량의 주행속도, 각 링크의 연장, 그리고 링크의 교통상태에 영향을 받는다.

또한 한 주기동안 한 링크의 대표 통행시간을 도출하기 위해 필요한 자료수와도 연관이 있다. 많은 수의 자료가 필요하면, 그만큼 소요 프로브차량대수는 많아지게 되는데, 이 역시 프로브차량의 도로교통류 대표성과도 연관을 지닌다.

IV. 프로브차량대수 모형

앞서 살펴본 바와 같이, 프로브차량대수에 영향을 주는 요인들은 무수히 많고, 이러한 요인들을 모두 포괄하는 일반적인 소요 프로브차량대수 모형을 개발하기는 매우 어렵다. 또한 이러한 요인들 중 많은 부분은 설계사항에 해당하기도 한다.

본 연구에서는 이러한 많은 요인들 중에서 일반적인 상황에서 중요한 요인들을 선정하여 최적 프로브차량대수 모형을 개발하였다.

1. 프로브차량 소요대수 결정기준

모형의 개발을 위해서는 설계사항에 해당하는 소요 프로브차량대수 결정기준(criteria)을 고려해야 한다. 소요 프로브차량대수 모형은 이 결정기준에 따라 개발될 수 있다. 이 소요 프로브차량대수 결정기준은 크게 3가지로 분류될 수 있다.

- 결정기준 1 : 링크당 평균 통행시간 자료수
- 결정기준 2 : 프로브차량 밀도의 최소 확률
- 결정기준 3 : 자료 미수집링크의 허용비율

첫 번째 기준, "링크당 평균 통행시간 자료수"는 시스템이 필요로 하는 주기당, 링크당 평균 통행시간 자료수에 따라 소요 프로브차량대수를 결정하는 방법이다. 예를 들면, 하나의 링크에 대해 한 주기 동안 평균적으로 2개의 통행시간 자료를 필요로 하도록 시스템을 설계할 수 있다. 그러나 프로브차량은 한 시

점에 어떤 링크에도 위치할 수 있기 때문에, 특정 주기 동안 일부 링크 상에는 프로브차량이 없을 수도 있다. 이 결정기준을 사용하는 경우, 프로브차량의 공간적 분포에 대한 임의요소(random factor)가 소요 차량수 결정에서 배제되게 된다.

두 번째 결정기준, "일정 밀도의 최소 확률"은 단위 링크길이당 일정 프로브차량 밀도(프로브차량대수/단위길이)의 확률이 최소한의 어떤 값 이상이 되도록 소요 프로브차량대수를 결정하는 것이다. 이는 한 특정 링크상에 일정한 대수 이상의 프로브차량이 있을 확률이 최소한의 어떤 값을 지니도록 하는 것과 동일하다. 예를 들면 프로브차량 밀도가 2대/km 이상이 될 확률이 최소 0.05가 되도록 소요 프로브차량대수를 결정할 수 있다. 이 결정기준에서는 2가지의 설계요소, 밀도와 최소 확률이 결정되어야 한다.

세 번째 결정기준, "자료 미수집링크의 허용비율"은 한 링크에 대해 통행시간 자료가 올라오지 않는 확률이 일정한 값 이상이 되도록 소요 프로브차량대수를 결정하는 것이다. 이는 한 프로브차량이 모든 링크에 대해 위치할 확률이 동일하다는 전제조건 하에서, 전체 링크 중 한 주기 동안 통행시간 자료가 올라오지 않는 링크의 비율이 얼마 이상 되도록 결정하는 것과 동일하다. 예로서는 시스템 운영자는 하나의 링크에 하나의 자료만이 수집되더라도 가능한 한 많은 링크에 대한 통행시간 자료를 수집하기를 원할 수도 있다. 이 경우 자료 미수집링크의 비율이 5%가 되도록 소요 프로브차량대수를 결정할 수도 있다.

다음 절들에서는 이러한 3가지 결정기준별로 소요 프로브차량대수를 결정하는 모형을 제시하였다.

2. 링크당 평균 통행시간자료수(결정기준 1)

첫 번째 결정기준, "링크당 평균 통행시간 자료수"에 따라 소요 프로브차량대수를 결정하는 경우 모형식은 식(1)과 같다.

$$N = D/d_p \tag{1}$$

여기서,

N : 소요 프로브차량대수

D : 시스템 전체의 주기당 소요 통행시간 자료수

d_p : 주기당 한 프로브차량의 평균 링크통행 시간 수집자료수

전체 링크에 대해 한 주기당 필요한 통행시간 자료수 D 는 시스템의 전체 링크수(L)에 링크당 평균 소요 통행시간자료수(d_R)를 곱하여 구할 수 있다.

주기당 한 프로브차량의 평균 링크통행시간 수집자료수, d_p 는 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$d_p = n_p P_T P_E \tag{2}$$

여기서,

- n_p : 주기당 한 프로브차량의 평균 주행 링크수
- P_T : 프로브차량이 자료수집대상 링크를 운행 하고 있을 비율
- P_E : 유효수집율

주기당 한 프로브차량의 평균 주행 링크수, n_p 는 주기를 프로브차량의 링크당 평균주행시간으로 나누어 구할 수 있다. 여기서 프로브차량의 링크당 평균 주행시간은 평균링크길이를 프로브차량의 평균주행속도로 나누어 구할 수 있다. 따라서 결정기준 1에 따르는 소요 프로브차량대수에 대한 최종적인 모형식은 식(3)과 같다.

$$N = \frac{L d_R}{n_p P_T P_E} \tag{3}$$

이 모형을 사용하여 소요 프로브차량대수를 결정하는 경우, 일부 링크들에서는 통행시간 자료가 수집되지 않을 수도 있는데 전체 링크들 중 몇 개의, 어떤 링크에 대해 통행시간 자료를 수집할 수 있는지 예측할 수가 없다.

3. 프로브차량 밀도의 최소 확률(결정기준 2)

만약 한 프로브차량이 자료수집대상 링크를 운행하고 있다면, 한 시점에 특정 링크 i 에서 운행하고 있을 확률을 p_i 로 정의할 수 있다. 이 경우, N 대 프로브차량의 분포는 다항(multinomial)분포가 되고, 확률밀도함수(p.d.f.)는 식(4)와 같다.

$$\Pr\{X_i = x_i, i = 1, \dots, L\} = \frac{N!}{x_1! x_2! \dots x_L!} \prod_{i=1}^L p_i^{x_i}$$

$$0 \leq x_i \leq N, \sum_{i=1}^L x_i = N \tag{4}$$

여기서

- X_i : 링크 i 에서 운행중인 프로브차량수의 변수
- x_i : 링크 i 에서 운행중인 프로브차량수
- L : 자료수집 대상링크수
- N : 전체 프로브차량대수

한 프로브차량이 링크 i 에서 운행중일 확률의 분포는 성공할 확률이 p_i 인 베르누이분포이다. 또한 특정한 링크 i 상에 운행중일 프로브차량대수의 확률분포는 $B(N, p_i)$ 의 이항(binomial)분포이다.

$$\Pr\{X_i = x_i\} = {}_N C_{x_i} p_i^{x_i} (1 - p_i)^{N - x_i}, i = 1, \dots, L \tag{5}$$

이 분포로부터 링크 i 의 프로브차량의 밀도 X_i/D_i (링크 i 의 프로브차량대수/링크 i 의 단위길이)가 α 와 같거나 이보다 클 확률이 β 가 되도록 소요 프로브차량대수를 결정할 수 있다. 여기서, D_i 는 링크 i 의 길이이다. 충분히 큰 N 에 대해 중심극한이론(central limit theorem)을 적용하면 이 조건은 식(6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\Pr\left\{\frac{X_i}{D_i} \geq \alpha\right\} = \Pr\{X_i \geq \alpha D_i\}$$

$$\cong \Pr\left\{Z_i \geq \frac{\alpha D_i - N p_i}{\sqrt{N p_i (1 - p_i)}}\right\} = \beta, i = 1, \dots, L \tag{6}$$

또는 한 시점에 특정 링크상 프로브차량대수가 최소 몇 대 이상될 확률이 얼마 이상이 되도록 소요 프로브차량대수를 구할 수 있다. 예를 들면 링크 i 에서 프로브차량대수가 n_{\min} 대 이상이 될 확률이 β 가 되도록 소요 프로브차량대수를 구할 수 있다.

$$\Pr\{X_i \geq n_{\min}\} \cong \Pr\left\{Z_i \geq \frac{n_{\min} - N p_i}{\sqrt{N p_i (1 - p_i)}}\right\} = \beta,$$

$$i = 1, \dots, N \tag{7}$$

소요 프로브차량대수는 모든 링크들에 대한 N 값들 중에서 최대값이 될 것이다. ($i=1, \dots, L$) 이 모형이 적용될 수 있기 위해서는 p_i 값들이 추정되어야 한다. 이 값들은 여러 가지 방법으로 추정이 가능한데, 한 가지 방법은 전체 링크상의 교통량에 대비한 링크 i 상 교통량의 비율을 사용하는 것이다. 다른 방법도 가능한데, 예를 들면 시스템을 운영해 가면서 누적된 자료를 활용하여 경험적인 확률값을 사용할 수도 있을 것이다.

이 모형에서는 α (또는 n_{\min})과 β 값이 클수록 소요 프로브차량대수는 증가함을 알 수 있다.

이 모형에서 주기당 링크당 최소 프로브차량대수 (n_{\min})는 설계변수이다. 여기서 만약 시스템의 전체 링크를 링크길이, 혼잡도 또는 링크의 기능 등의 속성으로 그룹화할 수 있다면, 이 모형은 링크그룹에 대해서 적용될 수 있다. 즉, L 은 링크그룹의 수이고 각 링크그룹은 동일한 속성의 많은 링크로 구성되는 것이다.

4. 자료 미수집링크의 허용비율(결정기준 3)

한 특정 링크 i 상 프로브차량대수의 분포는 $B(N, p_i)$ 의 이항분포임을 설명한 바 있다.

$$\Pr\{X_i = x_i\} = {}_N C_{x_i} p_i^{x_i} (1 - p_i)^{N - x_i}, \quad i = 1, \dots, L \quad (8)$$

큰 N 값에 대해 푸아송(Poisson) 근사식을 적용하면 식(8)은 식(9)와 같이 표현될 수 있다.

$$\Pr\{X_i = x_i\} \cong \frac{e^{-Np_i} (Np_i)^{x_i}}{x_i!}, \quad i = 1, \dots, L \quad (9)$$

이 확률밀도함수로부터 링크 i 에 대한 통행시간 자료가 수집되지 않을(링크 i 에 프로브차량이 없을) 확률이 γ 가 되도록 소요 프로브차량대수를 구할 수 있다. 이는 식(10)을 만족하는 프로브차량대수가 된다.

$$\Pr\{X_i = 0\} \cong e^{-Np_i} = \gamma, \quad i = 1, \dots, L \quad (10)$$

따라서 링크 i 상 프로브차량이 없을 확률이 γ 가

되는 소요 프로브차량대수는 식(11)과 같다. (11)

$$N = -\frac{\ln \gamma}{p_i}, \quad i = 1, \dots, L$$

이 모형식에서 소요 프로브차량대수는 각 링크 ($i=1, \dots, L$)마다 다를 것이다. 만약 모든 링크에 대해 p_i 가 동일하다면, 전체 링크 중 자료가 수집되지 않는 미수집링크의 비율이 γ 가 되도록 소요 프로브차량대수를 결정할 수 있다. 이 경우, p_i 는 모든 i 에 대해서 d_p/L 가 된다. 그러나 모든 링크에 대해 p_i 가 동일하다는 것은 비현실적이다. 이를 고려하여 자료수집 대상 링크를 가상적으로 동일한 확률을 지니도록 노드-링크를 설계할 수도 있을 것이다. 이 경우 이용자들에게 제공되는 정보는 이용자 측면에서 추가의 가공을 필요로 할 것이다.

V. 사례연구

우리나라의 한 민간 교통정보회사의 링크통행시간 자료 수집시스템에 대해 소요 프로브차량대수를 산정하는 사례연구를 수행하였다. 이 시스템에서는 서울시를 대상으로 36 개 교통축을 교통정보, 즉 통행시간자료 수집대상 도로구간으로 설정하고, 이 36개 교통축 상 편도 약 1,500개 링크를 자료수집대상 링크로 설정하고 있다. 프로브차량의 종류로서는 서울시를 임의로 운행하는 택시와 자가용승용차를 사용하는 것을 가정하였다.

이 시스템 사례연구의 주요 내용은 다음과 같이 가정·정리될 수 있다.

- 링크수 : $L=1,500$
- 주기 : $C=5$ 분
- 주기당 한 프로브차량의 평균 주행링크수 : $n_p = 2$
- 대상링크 운행비율 : $P_T = 1/3$
- 유효수집율 : $P_E = 0.75$

결정기준 1, 2, 3에 의해 산출한 소요 프로브차량대수는 <표 1>, <표 2>, <표 3>과 같이 각각 나타났다. 여기서 결정기준 2와 3에 의한 소요 프로브차량대수는 모든 링크의 길이와 확률 p_i 가 식(12)와 같이 동일함을 가정한 것이다.

$$p_i = \frac{d_p}{L} = \frac{n_p P_T P_E}{L} = \frac{2 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0.75}{1500} = \frac{1}{3000} \quad (12)$$

〈표 1〉에서 주기당, 링크당 필요 통행시간 자료수 (d_R)가 많을수록 소요 프로브차량대수는 비례하여 증가함을 알 수 있다. 3,000 대의 프로브차량으로 자료 미수집링크의 비율(γ)은 약 36.8%, 자료 미수집 링크수는 552개가 될 것으로 추정되고 있다. d_R 이 증가할수록 미수집링크의 비율은 급속하게 감소함을 알 수 있다.

〈표 2〉에서 여러 β 와 n_{min} 값들에 대해 소요 프로브차량대수를 보여주고 있다. β 와 n_{min} 값이 커질수록 소요 프로브차량대수는 증가함을 알 수 있는데, 비례적으로 증가하지는 않는다. 〈그림 2〉는 이러한 결과를 그래프로 보여주고 있다. 〈표 2〉는 이러한 값들에 대해 주기당, 링크당 평균 수집자료수(d_R)와 미수집 링크의 비율(γ)도 보여주고 있다.

〈표 3〉과 〈그림 3〉은 결정기준 3에 의한 소요 프로브차량대수를 나타내고 있다. 5분 주기와 미수집 링크의 비율 5%에 대해 소요 프로브차량대수는 약

〈표 1〉 결정기준 1에 의한 프로브차량대수

d_R	1	2	3	5	10	20
N	3,000	6,000	9,000	15,000	30,000	60,000
$\gamma^{1)}$	36.8 %	13.5 %	5.0 %	0.7 %	0.005 %	0.0000002 %
미수집링크의 수	552	203	75	10	0.07	0

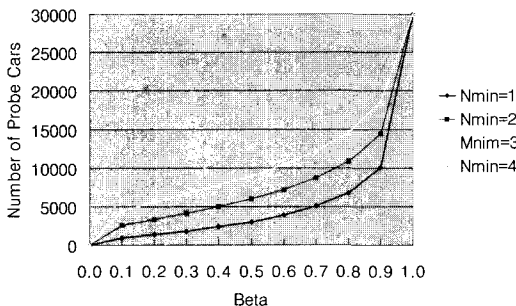
주) 1) : 모든 링크의 연장과 확률 p_i 가 동일함을 가정

〈표 2〉 결정기준 2에 의한 소요 프로브차량대수

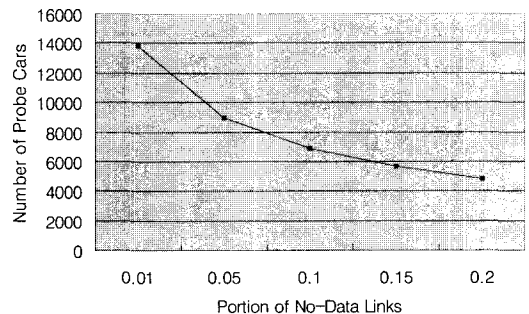
β		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
N	$n_{min}=1$	897	1,787	3,000	5,038	10,028
	$n_{min}=2$	2,494	4,150	6,000	8,675	14,430
	$n_{min}=3$	4,364	6,657	9,000	12,168	18,562
	$n_{min}=4$	6,390	9,240	12,000	15,585	22,535
$d_R (n_{min}=1)$		0.30	0.60	1.00	1.68	3.34
$\gamma (n_{min}=1)$		74.2 %	55.1 %	36.8 %	18.6 %	3.5 %
미수집링크 수 ($n_{min}=1$)		1112	827	552	280	53

〈표 3〉 결정기준 3에 의한 소요 프로브차량대수

γ	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2
N	13,816	8,987	6,908	5,691	4,828
미수집링크 수	15	75	150	275	300
d_R	4.6	3.0	2.3	1.9	1.6



〈그림 2〉 결정기준 2에 의한 소요 프로브차량대수



〈그림 3〉 결정기준 3에 의한 소요 프로브차량대수

8,987대가 됨을 보여주고 있다. 이 경우 주기당, 링크당 평균 통행시간 자료수(d_R)는 약 3.0개가 된다.

VI. 결론

본 연구는 통행시간자료 수집시스템에서 소요 프로브차량대수를 결정하는 요소들을 도출하였다. 소요 프로브차량대수는 가장 결정적으로 통행시간자료 수집기술과 자료수집 대상 공간의 범위에 영향을 받는다. 이 이외의 요소들이 프로브차량의 특성, 시스템 신뢰도, 그리고 수집자료의 량 및 정확도의 3가지로 분류되어 제시되었다.

소요 프로브차량대수를 결정하는 다음과 같은 3가지의 결정기준이 규정되었다.

- 결정기준 1 : 링크당 평균 통행시간 자료수
- 결정기준 2 : 프로브차량 밀도의 최소 확률
- 결정기준 3 : 자료 미수집링크의 허용비율

영향요소와 결정기준의 검토를 기초로 소요 프로브차량대수를 산출하는 모형들을 개발하였다. 일반적으로 주기당, 링크당 평균 필요 통행시간 자료수(d_R), 단위길이당 프로브차량의 대수 또는 밀도(n_{min} or α), 일정 프로브차량밀도 이상의 확률(β), 그리고 미수집 링크의 비율(γ)이 클 수록 소요 프로브차량대수는 증가한다.

민간 교통정보회사의 통행시간 수집시스템에서 소요 프로브차량대수를 산정하는 사례연구가 수행되었으며, 여러 가지 조건에서 소요 프로브차량대수가 산출되었다. 결정기준 3에 의해 소요 프로브차량대수를 결정하는 경우, 1,500개의 링크에서 8,987대의 프로브차량이 5분 주기로 링크당 약 3개의 통행시간 자료를 수집할 수 있으며, 약 75개의 링크에 대해서는 한 개의

통행시간 자료도 수집할 수 없음을 추정할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 모형들은 여러 조건하에서 소요 프로브차량대수의 결정이 가능하도록 해 준다. 이 모형들은 다른 수집기술에 대해서도 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

그러나 본 연구에서 다루어지지 못하였으나, 소요 프로브차량대수에 영향을 주는 한 수많은 다른 요인들이 있으며, 이러한 요인들에 대해서는 추가의 심도 깊은 연구가 필요하다. 특히, 링크길이, 각 링크의 교통조건, 링크의 기능 등 다양한 링크 특성 등에 대한 고려가 필요하다.

참고문헌

1. 박철규(1998), "실시간 고속도로 소통상황 파악을 위한 적정 Probe 차량대수 추정기법에 관한 연구," ITS 연구·개발보고서 1998, 국토연구원.
2. 고승영(1999), "A Design of Traffic Information System for SK ltd.," Research Institute of Urban Science, University of Seoul, IV84-91.
3. Seung-Young Kho(2001), "Optimal Number of Probe cars for Beacon-based Travel Time DATA Collection System," Proceedings, 9-th World Conference on Transport Research.
4. Quiroga, C. A. and Bullock, D(1998), "Travel Time Studies with Global Positioning and Geographic Information Systems : An Integrated Methodology," Transportation Research C, Vol. 6, No. 1/2, pp.101~127.
5. Turner, T., Eisele, W., Benz, R. and Holdener, D(1998), "Travel Time Data Collection Handbook," FHWA-PL-98-035, TTI, Texas A&M University System.

✉ 주 작 성 자 : 고승영

✉ 논문투고일 : 2002. 7. 5

논문심사일 : 2002. 7. 19 (1차)

2002. 7. 24 (2차)

심사판정일 : 2002. 7. 24

✉ 반론접수기간 : 2002. 12. 31