

■ 論 文 ■

확률적인 중방향 설계시간 교통량 산정 모형에 관한 이론적 해석

A Theoretical Analysis of Probabilistic DDHV Estimation Models

조 준 한

(한양대학교 교통공학과 박사과정)

김 성 호

(한양대학교 교통시스템공학과 교수)

노 정 현

(한양대학교 도시대학원 교수)

목 차

- | | |
|--|--|
| <p>I. 서론</p> <p>II. 이론적 고찰</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 전통적인 DDHV 산정 방법</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 전통적인 DDHV 산정 문제점</p> <p>III. 확률적인 DDHV 산정 모형 정립</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 교통량분포</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 링크통행시간 분포</p> | <p style="padding-left: 20px;">3. 링크통행시간 임계치</p> <p style="padding-left: 20px;">4. 현실적용에 대한 이론적 해석</p> <p>IV. 모형의 평가 및 시사점</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 모형의 평가</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 확률적인 모형의 시사점</p> <p>V. 결론 및 향후연구과제</p> <p>참고문헌</p> |
|--|--|

Key Words : 중방향 설계시간 교통량, 설계시간계수, 중방향계수, 링크통행시간 분포, 링크통행시간 임계치
Directional Design Hour Volume, Design Hourly Factor, Directional Distribution, Link Travel Time Distribution, Link Travel Time Threshold

요 약

본 연구는 전통적인 중방향 설계시간교통량 산정에 대한 개념적 내용을 살펴보고 사례연구를 통해 문제점을 도출하였으며, 이를 개선하기 위해 확률적인 중방향 설계시간교통량 산정 모형을 이론적으로 정립하였다. 도로구간의 교통혼잡을 표현하기 위해서 도로용량이 희망하는 서비스수준을 수용할 수 있도록 확률 분포를 적용한 링크통행시간과 임계치를 정립하였다. 본 연구에서 제안된 확률적인 중방향 설계시간 교통량 모형은 설계속도, 구간길이, 교통량, 차로수, 중차량계수 등을 고려하여 산정하며, 도로용량에 따른 교통혼잡과 경제성 측면을 유동적으로 고려할 수 있기 때문에 도로계획 및 설계단계에 객관적으로 반영할 수 있다. 또한, 이러한 결과는 다양한 유형의 도로에 대해 결측치가 존재하는 상시조사지점이나 수시조사지점의 중방향 설계시간 교통량 예측 모형을 포함한 여러 현실문제들의 더 나은 이해를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

This paper is described the concepts and limitations for the traditional directional design hour volume estimation. The main objective of this paper is to establish an estimation method of probabilistic directional design hour volume in order to improve the limitation for the traditional approach method. To express the traffic congestion of specific road segment, this paper proposed the link travel time as the probability that the road capacity can accommodate a certain traffic demand at desired service level. Also, the link travel time threshold was derived from chance-constrained stochastic model. Such successive probabilistic process could determine optimal ranked design hour volume and directional design hour volume. Therefore, the probabilistic directional design hour volume can consider the traffic congestion and economic aspect in road planning and design stage. It is hoped that this study will provide a better understanding of various issues involved in the short term prediction of directional design hourly volume on different types of roads.

I. 서론

도로설계과정은 교통계획과 노선계획에서 나온 결과를 도로의 기하구조에 구체적으로 적용시키는 과정을 말한다. 이때 문제점이 생기면 그 이전 단계의 결과를 조정할 수 있다. 따라서 교통계획-노선계획-실시설계는 순환과정으로서 최종계획이 확정될 때까지 서로 연관성을 갖는다(도철웅, 1998). 이러한 일련의 도로설계과정은 도로의 영향권 범위내에서 지역경제, 인구, 토지이용 등의 변화를 고려하여 장래교통수요에 부응할 수 있도록 계획되어야 한다. 장래교통량 즉, 계획교통량은 해당도로의 장래 서비스수준을 판단하게 하고 새로 건설하거나 확장할 도로의 종류와 기하구조를 결정하는데 기본적인 자료로 이용된다. 이러한 계획교통량은 장래목표년도에서 예측되는 연평균일교통량(AADT)을 이용하지만, 도로설계를 위한 교통량으로는 시간당으로 나타내어지는 설계시간교통량(DHV)을 이용한다.

건설교통부(2000)에서는 도로시설물의 설계시 하루보다 짧은 시간대를 사용해야 교통수요를 정확히 표시할 수 있으며, 특히 매일 반복되는 첨두시간 교통량을 설계에 반영하기 위해서는 설계시간교통량의 개념도입이 필수적이라고 언급하고 있다.

도로계획, 설계 및 운영목적을 위해서 사용되는 설계시간교통량의 크기는 그 교통량으로 얻을 수 있는 서비스 수준과 경제적 효율성을 함께 고려하여 결정한다. 다시 말하면 기준이 되는 설계시간교통량을 크게 책정하면 과다설계가 되어 경제적 효율성이 떨어지고, 설계시간교통량을 낮게 하면 혼잡을 겪는 시간이 많아진다(도철웅, 1998).

중방향 설계시간교통량(DDHV: Directional Design Hour Volume)은 계획목표년도에 대상 도로구간을 통과할 것으로 예상되는 중방향에 대한 한 시간 교통량을 말하며, 첨두시간의 교통량 정도를 고려해야 하는 차로수 결정과 같은 장래 도로시설의 용량에 직접적인 영향을 미친다. 중방향 설계시간 교통량은 연평균일교통량(AADT), 설계시간교통량(DHV), 설계시간계수(K계수), 중방향계수(D계수) 등에 의해 결정된다.

본 연구는 전통적인 중방향 설계시간 교통량의 문제점 및 한계에 대해 이론적인 내용을 바탕으로 사례를 통해 살펴보고, 이를 개선하기 위해 교통량에 따른 링크통행시간분포(link travel time distribution) 개념을 도

입한 확률적인 중방향 설계시간 교통량 산정 모형을 이론적으로 정립하였다. 또한, 중방향 설계시간 교통량에 대해 새롭게 정립한 확률적인 모형의 적정성 평가와 시사점 도출을 본 연구의 목표로 설정하였다.

II. 이론적 고찰

1. 전통적인 DDHV 산정 방법

1) 설계시간 교통량의 산출

설계시간교통량(DHV: Design Hour Volume)은 도로설계의 기본이 되는 장래시간 교통량으로서, 계획목표년도의 첨두시간 예상교통량을 말한다. 건설교통부(2000)는 설계시간교통량의 산출방법을 다음과 같이 제시하고 있다.

[Step 1] 대상도로 구간의 상시교통량에 나타난 1년 365일(8,760시간)의 매 시간교통량을 높은 교통량에서부터 시작하여 가장 낮은 교통량까지 순서대로 배열한다.

[Step 2] 각 시간당 교통량을 나타내는 점들을 연결하는 매끄러운 곡선을 그린다.

[Step 3] 곡선의 기울기가 급격히 변화하는 지점을 결정한 후 그 지점에 해당하는 교통량을 설계시간교통량으로 결정한다.

일반적으로 외국의 경우 곡선의 기울기가 급변하는 지점은 교통량을 높은 순서대로 배열했을 때 30번째 시간에서 발생하고 있다. 우리나라에서는 대상도로의 지역적 특성이 충분히 검토 분석된 후 결정되어야 할 일이지만 이에 대한 충분한 교통량의 자료가 없고 연구결과도 충분치 않은 현시점에서는 외국의 경우에서처럼 30번째 시간교통량을 설계시간교통량으로 하되 고속도로와 같은 연중 교통량의 변화가 심한 경우에는 특별한 고려가 필요하다 언급하고 있다(건설교통부, 2000).

또한, 1년 365일의 매시간 교통량을 측정하여 30HV(연중 30번째 높은 시간당 교통량)를 얻기란 매우 어려운 일이다. 따라서 지방부 도로의 경우 매주의 주말 최대시간 교통량을 구하여 이를 평균한 값을 30HV로 본다. 도시부 도로에서는 매주 평일 최대시간교통량을 52주간 구하여 이

를 평균한 것을 30HV로 본다. 이 평균값은 일년 중 26번째 높은 교통량과 거의 같으며, 또 30번째 교통량과도 설계에 어떤 변화를 줄 정도로 큰 차이를 나타내지 않는다. 계절별 변동이 심한 위락관광도로는 침투현상이 매우 심하게 나타나게 되어 30HV는 매우 큰 값이 된다. 이와 같이 높은 30HV를 분석시간 교통량으로 할 때 경제성이 현저히 떨어진다고 판단되면 상황에 따라 80~100번째 시간교통량을 분석시간교통량으로 사용해도 좋다(도철웅, 1998).

2) 설계시간계수의 산출

설계시간계수(Design hourly factor, K계수)는 “계획 목표연도의 연평균 일교통량에 대한 설계시간교통량의 비율(DHV/AADT)”로 정의되며, 30번째 시간교통량을 적용할 경우 설계시간계수는 K_{30} 으로 나타낸다.

건설교통부(2000)에서는 K_{30} 은 도로의 효율성 면에서 상당히 중요한 변수로서 K_{30} 을 너무 높게 산출하게 되면 설계시간교통량이 과다하게 산출되어 비경제적인 도로건설을 초래할 우려가 있고 반대로 K_{30} 을 너무 낮게 산출하면 설계시 기준으로 했던 교통량보다 높은 교통량을 기록하는 시간대가 자주 발생하여 잦은 교통혼잡을 유발하게 된다고 언급하고 있다.

설계시간계수는 대상도로의 지역적 특성에 따라 변화하지만 일반적으로 도시지역 도로보다는 지방지역 도로의 백분율이 높다. 그 이유는 지방지역 도로가 도시지역 도로에 비해 계절적인 교통량 변화가 심할 뿐 아니라 전체적인 통과교통량, 즉 연평균 일교통량 수치도 도시지역 도로에 비해 낮은 값을 나타내어 시간교통량을 백분율로 표시하는 경우 교통량의 변화에 비교적 민감하게 반응하기 때문이다(건설교통부 2000).

일반적으로 설계시간계수는 AADT가 큰 도로에서는 비교적 낮고, 교통량의 변화가 심할수록 높아지고, 개발밀도가 증가하면 감소하며, 관광위락도로, 지방부도로, 교외도로, 도시부도로 순으로 점점 작아진다. 또한, 어떤 도로의 정확한 설계시간교통량을 알기 위해서는 될수록 정확한 K계수를 찾아내야 한다. 그러기 위해서는 그 도로와 유사한 교통량 변동 특성을 가지면서 상시조사나 보정조사를 하는 도로를 찾아 그 값을 사용하는 수 밖에 없다. K계수는 장기간에 걸쳐 조금씩 변한다고 알려지고 있으나 이에 관해서는 아직 명확하게 연구된 것이 없다(도철웅, 1998).

건설교통부(2000)에서는 지방지역과 도시지역으로 구분하여 제시하고 있으며, 지방지역 도로는 0.12~

0.18, 도시지역 도로는 0.08~0.12로 제시하였다. 또한 건설교통부(2001) 도로용량편람에서는 고속도로를 지방지역과 도시지역으로 구분하였으며, 지방지역은 0.15(0.12~0.18), 도시지역은 0.09(0.07~0.11)로 제시하고 있다. 미국 도로용량편람(2000)은 지방부도로 0.10, 도시부도로 0.09로 제시하고 있다.

3) 중방향 계수의 산출

중방향 계수(Directional distribution, D계수)는 양방향도로에서 양방향 침투시간 교통량에 대한 중방향 침투시간 교통량이 차지하는 비율을 말하며, 교통량의 방향별 분포(중방향 계수)는 도로설계에서 대단히 중요하다. 양방향도로에서 하루동안 통과한 교통량은 각 방향별로 거의 같지만 침투시간의 교통량은 방향별로 큰 차이를 보이는 경우가 많다(도철웅 1989).

중방향 계수는 다차로 도로를 설계할 때 특히 중요하다. 즉, 양방향 교통량을 기준으로 설계를 하면 중방향에 대해서는 서비스 수준이 아주 낮은 도로가 된다. 그렇다고 중방향은 3차로로 하고 그 반대방향은 2차로로 할 수 없기 때문에 중방향 교통량을 한 방향의 설계교통량으로 삼는다. 한편 2차로 도로에서는 서비스수준 결정을 양방향 교통량을 기준으로 하기 때문에 이 경우에는 중방향 계수가 문제가 되지 않지만 주요 교차로의 설계, 특히 보조차로의 설치 등을 고려할 때에는 중방향 계수를 알아야만 한다. 따라서 중방향 계수는 다차로 도로에서만 필요한 것은 아니다(도철웅 1989).

일반적으로 중방향 계수는 출퇴근통행 이외에 다양한 목적통행이 혼합되어 있는 통행이 뚜렷한 도시지역 도로에서는 작아지고, 교통량이 작은 한산한 지방지역 도로에서는 커진다.

건설교통부(2001) 도로용량편람에서는 고속도로를 지방지역과 도시지역으로 구분하여, 지방지역은 0.65(0.60~0.70), 도시지역은 0.60(0.55~0.65)로 제시하였으며, 미국 도로용량편람(2000)은 도시부도로와 지방부도로 모두 0.6으로 제시하고 있다.

2. 전통적인 DDHV 산정의 문제점

1) 설계시간교통량과 설계시간계수의 문제점

기존의 일반적인 설계시간교통량과 설계시간계수의 적용에 대한 연구는 많이 이루어져 왔으나 근본적인 문제점에 대

해서는 세밀한 분석과 검토가 많이 연구되지 않았다. 전통적인 분석방법에 대한 문제점에 대해 나열하면 다음과 같다.

첫째, 일반적으로 설계시간교통량을 산정하는 경우 곡선의 기울기가 급변하게 변화되는 지점(변곡점)을 연중 30번째 높은 시간교통량에서 발생하고 있는 것으로 알려지고 있으나, 실질적으로 교통특성 및 지역특성 등에 따라 곡률이 최대가 되는 변곡점(Knee of curve)을 결정하기는 매우 어렵다.

둘째, 임성한 외 3인(2003)은 변곡점 산정방법을 수리적으로 도출하기 위해서 연평균일교통량과 설계시간계수간의 관계식을 선형모형, 대수모형, 파워모형, S모형, 지수모형 등의 단순회귀식을 통해 산출하였다. 하지만 교통특성변수(교통량, 지역특성, 여가특성 등)에 따라 다양한 변화를 보이는 설계시간계수의 특성은 정확하게 반영하지는 못하였다.

셋째, 설계시간교통량 및 설계시간계수를 산정할 때 사용하는 순위도 곡선(ranked hourly volume distribution curve)을 상위 몇 번째까지를 선정해야 변곡점을 효율적으로 찾을 수 있는지도 연구해볼아야 할 사안이다. 예를 들어 상위 8,760시간 전체의 경우와 상위 1,000번째, 상위 500번째, 상위 100번째의 경우와는 상이한 곡선 형태가 나타나기 때문에 변곡점을 통한 설계시간교통량 및 설계시간계수 산정은 고려해야 할 분석조건이 많다는 것을 염두해야 한다. 배홍준(1999)은 고속도로의 설계시간계수를 상위 1,000시간 교통량 순위도 곡선을 토대로 산정하는 것이 바람직하다고 언급하였다.

넷째, 연중 30번째 시간교통량을 기준으로 한다는 것은 1년 8,760시간 중에 29시간은 설계값에 상회하므로 혼잡을 초래한다는 것을 의미하는데 우리나라의 경우 전국적으로 대이동이 발생하는 명절이라는 독특한 교통행태특성이 있기 때문에 30HV를 그대로 사용하는 것에 대해 의구심을 가지게 된다. 이장희(2000)는 고속도로에 대해 교통혼잡을 예방하고 경제적 측면을 고려한 적정 설계시간순위를 상위 150순위로 제시하였다.

다섯째, 국민의 소득수준 향상 및 주5일제 실시에 따른 여가통행이 증가함에 따라 도로의 통행패턴 전반에 영향을 끼칠 것으로 판단된다. 따라서, 여가통행을 반영하는 설계시간교통량 및 설계시간계수의 체계적인 분석이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

2) 중방향계수의 문제점

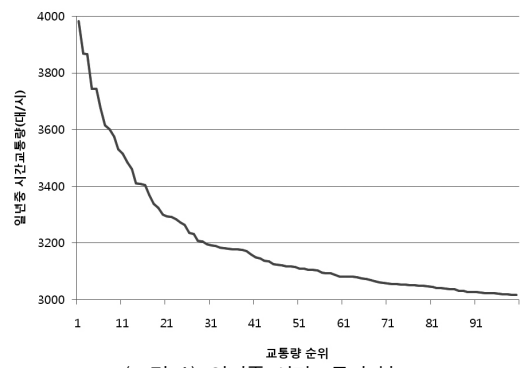
중방향계수는 차로수 산정과 같은 도로용량과 직결되는 중방향 설계시간교통량을 산출하는데 중요한 변수로

작용하며, 전통적인 방법으로 중방향 설계시간교통량을 산출한 경우 여러 문제점을 초래하는 근본적인 원인을 가지고 있는 변수이다. 하지만, 중방향계수는 설계시간 교통량과 설계시간계수에 비해 상대적으로 연구가 활발하게 이루어지고 있지 않다.

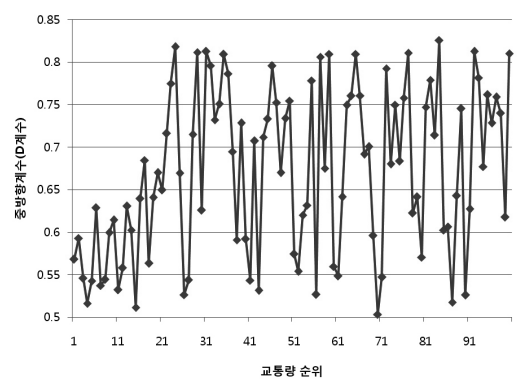
전통적인 중방향계수 산출에 대한 문제점을 사례를 통해 살펴보고자 한다. 분석자료는 2006년 일반국도 상시지점 0106-3을 사용하였으며, 조사된 지점은 전라북도 나주시 남평면 광이리에 해당되는 지방부도로이다.

<그림 1>은 교통량 순위에 대한 연중 시간교통량(양방향 교통량 기준)을 나타낸 그래프로서, 30HV가 3,196대/시이며, 연중 상위 30번째까지는 곡선의 기울기가 급격히 떨어지는 경향을 보이고 있다.

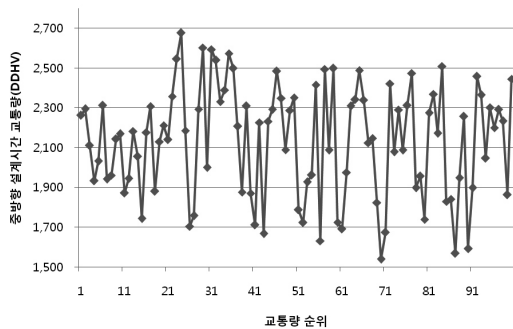
<그림 2>는 전통적인 설계시간교통량에 대한 상위 순위별 결과를 토대로 중방향계수를 구한 것으로 <그림 1>과 상이하게 계수값의 변동(fluctuation)이 심한 것을 알 수 있다. 이는 <그림 3>에 그대로 적용되어 중방향 설계시간 교통량의 순위별 변동폭이 크게 나타나고 있다. 연중 상위 30번째 교통량에 대한 중방향 계수는 0.626



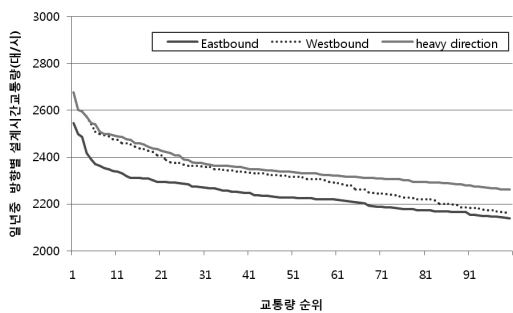
<그림 1> 일년중 시간교통량 분포



<그림 2> 중방향 계수 분포



(그림 3) 중방향 설계시간교통량 분포



(그림 4) 일일중 방향별 시간교통량 분포

으로 나타났다. <그림 3>을 근거로 도출된 상위 30번째 DDHV는 $3,196 \times 0.626 = 2,000$ 대/시로 나타났으며, 이 값을 토대로 상위 30번째까지의 혼잡시간을 산출한 결과, 20시간으로 나타났다. 이는 전통적인 중방향 설계시간 교통량(Traditional Directional Design Hour Volume, 이하 TDDHV로 명함)산정에 대한 첫 번째 문제점으로 지적되는 부분이다. 이러한 문제점이 초래되는 이유는 기본적으로 연중 상위 시간교통량을 산출할 때 양방향을 기준으로 했기 때문에 혼잡시간에 대한 판단기준인 방향별 교통량에 대해 고려하지 못했기 때문이다. 또한, 중방향 계수는 교통량에 따라 일정한 패턴을 보이지 않는 특유의 계수 특성도 이러한 결과를 초래한 또 하나의 원인이 된다.

<그림 4>는 위의 문제점을 개선하기 위해 방향별 시간교통량을 나타낸 것으로, 연중 상위 30번째 시간교통량은 2,375대/시로 나타났다. 이 값이 실제로 이 도로 구간에서 연중 29시간의 혼잡을 경험하게 하는 실질적인 중방향 설계시간 교통량이라 할 수 있다. <그림 3>에서 도출된 TDDHV의 결과값과 비교해보면, 연중 상위 30번째 시간교통량 가운데 단지 3시간만 혼잡한 것으로

나타났다. 이 부분이 TDDHV의 두 번째 문제점이다. 해당 도로구간의 실질적인 중방향 설계시간 교통량과 전통적인 중방향 설계시간 교통량과는 상당한 차이를 보이고 있다.

지금까지 전통적인 중방향 설계시간 교통량에 대한 문제점과 원인을 살펴보았다. 여기서 또 하나 간과하지 말아야 할 것은 기본적인 가정이 연중 상위 30번째 시간교통량을 토대로 산정했다는 것이다. 과연 이 “30번째”라는 기준이 적합한지에 대해서는 여전히 의문을 가지고 있으며, TDDHV의 세 번째 문제점으로 지적하고자 한다.

따라서, 본 연구에서는 위에서 설명한 문제점을 개선하기 위해서 교통량에 대한 링크통행시간분포를 이론적으로 정립한 확률적인 중방향 설계시간 교통량(Probabilistic Directional Design Hour Volume, 이하 PDDHV¹⁾로 명함) 산정 모형을 제시하고자 한다.

III. 확률적인 DDHV 산정 모형 정립

확률적인 DDHV 산정 모형 정립에 대한 접근방법은 교통 네트워크 분석을 기초로 한다. 교통 네트워크는 교차로와 도로구간을 포함하며, 교통수단이 이 공간을 이용한다. 이러한 물리적인 요소는 노드와 링크의 구성으로 바꾸어 표현이 가능하며, 링크에는 통행저항(link impedance)에 대한 함수가 포함된다. 일반적으로 통행저항 척도가 올바르게 링크의 저항을 표현하기 위해서는 교통류의 흐름 상태에 방해가 되는 매개체가 필요하다. 따라서, 각 링크의 통행량(교통량)에 대한 저항을 나타내는 적절한 척도를 그 링크를 통과하는 시간으로 볼 수 있다. 이러한 일련의 교통네트워크 분석 표현을 토대로 PDDHV 산정 모형을 정립하였다.

1. 교통량 분포

교통네트워크는 $G=(N, A)$, 즉 연속적으로 번호가 매겨진 노드의 집합(N)과 링크의 집합(A)을 포함하는 방향성이 있는 그래프로 표현된다. C 는 OD 쌍(pair)의 집합으로 정의하는데 여기서, r 은 출발지 중심(통행이 발생하는 노드)의 집합을 의미하고, s 는 목적지 중심(통행이 종결되는 노드)의 집합을 의미한다. C 는 $N \times N$ 의

1) 도로용량편람(2001)에서 언급하는 첨두 중방향 설계시간교통량(PDDHV)과는 다른 개념임.

부분집합이다.

각 OD간의 교통량은 식(1)과 같이 확률변수로 가정하였다.

$$Q_{rs} = q_{rs} + \epsilon_{rs} \quad \forall (r, s) \in C \quad (1)$$

여기서,

$$q_{rs} : \text{교통량}, \quad E[Q_{rs}] = q_{rs}$$

$$\epsilon_{rs} : \text{오차항}, \quad E[\epsilon_{rs}] = 0$$

각 OD간 교통량의 표준편차는 식(2)와 같다.

$$\sigma_q^{rs} = \sqrt{\text{Var}[Q_{rs}]} \quad \forall (r, s) \in C \quad (2)$$

위의 식(1)과 식(2)를 토대로 교통량 분포를 식(3)과 식(4)와 같이 가정하였다. 각 OD간 교통량이 정규분포(normal distribution)를 따르면,

$$Q_{rs} \sim N(q_{rs}, (\sigma_q^{rs})^2) \quad \forall (r, s) \in C \quad (3)$$

링크 교통량(link flow)도 정규분포를 따른다.

$$V_a \sim N(v_a, (\sigma_v^a)^2) \quad \forall a \in A \quad (4)$$

2. 링크통행시간 분포

교통네트워크의 서비스 수준에 따라 특정 도로구간의 통행량이 영향을 받는다. 즉, 교통량 증가에 따라 통행시간 변화를 나타내기 때문에 정확한 링크저항함수 없이는 사용자의 통행시간 또는 통행비용에 근거한 링크상의 교통류 행태를 정확하게 모형화 할 수 없다.

링크상의 통행시간은 교통량에 대해서 식(5)와 같이 단순증가함수로 표현할 수 있다.

$$T_a = t_a(V_a) \quad \forall a \in A \quad (5)$$

여기서,

$$T_a : \text{링크통행시간}$$

$$t_a(\cdot) : \text{링크통행시간 함수}$$

링크통행시간의 평균과 분산은 식(6), 식(7)과 같다.

$$t_a = E[T_a] = \int_{-\infty}^{+\infty} t_a(x) \varphi_a(x) dx \quad \forall a \in A \quad (6)$$

$$(\sigma_t^a)^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (t_a(x))^2 \varphi_a(x) dx - \left(\int_{-\infty}^{+\infty} t_a(x) \varphi_a(x) dx \right)^2 \quad \forall a \in A \quad (7)$$

여기서,

$$t_a : \text{링크 } a \text{의 평균통행시간}$$

$$\sigma_t^a : \text{링크 } a \text{의 통행시간 표준편차}$$

$$\varphi_a(\cdot) : \text{링크 교통량 } V_a \text{의 확률밀도함수}$$

만약 교통량이 정규분포를 따르면, 확률밀도함수는 식(8)과 같다.

$$\varphi_a(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_v^a} \exp\left(-\frac{(x-v_a)^2}{2(\sigma_v^a)^2}\right) \quad \forall a \in A \quad (8)$$

링크통행시간 함수는 현재 가장 많이 사용되고 있는 BPR(Bureau of Public Roads) 함수를 사용하였으며, 내용은 식(9)와 같다.

$$T_a = t_a(V_a) = t_a^0 \left(1 + \beta \left(\frac{V_a}{c_a} \right)^n \right) \quad \forall a \in A \quad (9)$$

여기서,

$$t_a^0 : \text{링크 } a \text{에서 자유상태의 통행시간}$$

$$\bar{c}_a : \text{링크 용량}$$

$$\beta, n : \text{파라미터}$$

링크통행시간 함수의 평균과 분산은 식(10)~식(17)과 같다. 수식을 간단히 하기 위해서 첨자를 각각 $t = t_a^0, \sigma = \sigma_v^a, v = v_a, \bar{c} = \bar{c}_a, T = T_a$ 로 생략하여 표현하였다.

$$E[T] = \int_{-\infty}^{+\infty} t(x) \varphi(x) dx$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} t \left(1 + \beta \left(\frac{x}{\bar{c}} \right)^n \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left(-\frac{(x-v)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (10)$$

식(10)에서 $z = \frac{x-v}{\sigma}$ 로 전환하면,

$$E[T] = \frac{t}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(1 + \beta \left(\frac{z\sigma + v}{c}\right)^n\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$$

$$= I_1 + I_2 \tag{11}$$

식(11)을 각각 I_1 과 I_2 로 나눠서 계산하면 다음과 같다.

$$I_1 = \frac{t}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = t \tag{12}$$

$$I_2 = \frac{t}{\sqrt{2\pi}} \frac{\beta}{(c)^n} \int_{-\infty}^{+\infty} (z\sigma + v)^n \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$$

$$= \frac{t}{\sqrt{2\pi}} \frac{\beta}{(c)^n} \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (z\sigma)^i (v)^{n-i} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$$

$$= \frac{t}{\sqrt{2\pi}} \frac{\beta}{(c)^n} \left(\sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (\sigma)^i (v)^{n-i} \int_{-\infty}^{+\infty} z^i \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \right) \tag{13}$$

MathWorld website (Weisstein, 2007)에서는 식(14)와 같이 정의하고 있다.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} z^i \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \begin{cases} 0 & \text{if } i \text{ is odd} \\ \sqrt{2\pi} (i-1)!! & \text{if } i \text{ is even} \end{cases} \tag{14}$$

따라서, I_2 는 식(15)와 같이 정리할 수 있다.

$$I_2 = t \frac{\beta}{(c)^n} \sum_{i=0, i=even}^n \binom{n}{i} (\sigma)^i (v)^{n-i} (i-1)!! \tag{15}$$

최종적으로, I_1 과 I_2 을 합하면 식(16)과 같다.

$$t_a = t_a^0 + t_a^0 \frac{\beta}{(c_a)^n} \sum_{i=0, i=even}^n \binom{n}{i} (\sigma_v^a)^i (v_a)^{n-i} (i-1)!!$$

$$, \forall a \in A \tag{16}$$

$$(\sigma_t^a)^2 = \left(t_a^0 \frac{\beta}{(c_a)^n} \right)^2 \left(\sum_{i=0, i=even}^{2n} \binom{2n}{i} (\sigma_v^a)^i (v_a)^{2n-i} (i-1)!! - \right.$$

$$\left. \left(\sum_{i=0, i=even}^n \binom{n}{i} (\sigma_v^a)^i (v_a)^{n-i} (i-1)!! \right)^2 \right) \forall a \in A \tag{17}$$

3. 링크통행시간 임계치(threshold)

링크 a 의 링크통행시간 임계치는 평균통행시간 t_a^{rs} 와 지체시간(delay time) d_a^{rs} 의 합으로 나타내며, 식(18)과 같다.

$$c_a^{rs} = t_a^{rs} + d_a^{rs} \quad \forall a \in A, (r, s) \in C \tag{18}$$

식(18)을 토대로 링크 통행시간 임계치는 Chance-constrained stochastic model에 의해 결정한다.

$$\min c_a^{rs} = t_a^{rs} + d_a^{rs}$$

$$s.t. \Pr [T_a^{rs} \leq c_a^{rs}] \geq \rho \quad \forall a \in A, (r, s) \in C \tag{19}$$

여기서, 링크의 평균 통행시간 T_a^{rs} 은 정규분포를 따른다.

$$T_a^{rs} \sim N(t_a^{rs}, (\sigma_t^{rs,a})^2) \tag{20}$$

식(19)의 제약조건은 식(21)과 같이 표현된다.

$$s.t. \int_{-\infty}^{t_a^{rs} + d_a^{rs}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_t^{rs,a}} \exp\left(-\frac{(x - t_a^{rs})^2}{2(\sigma_t^{rs,a})^2}\right) dx \geq \rho$$

$$, \forall a \in A, (r, s) \in C \tag{21}$$

식(21)의 수식을 간단히 하기 위해서 첨자를 각각 $c_a = c_a^{rs}$; $t_a = t_a^{rs}$; $d_a = d_a^{rs}$; $\sigma_t^a = \sigma_t^{rs,a}$ 로 생략하여 표현하였다.

식(20)에 의해 식(22)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{X - t_a}{\sigma_t^a} \sim N(0, 1) \tag{22}$$

$$\int_{-\infty}^{t_a + d_a} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_t^{rs,a}} \exp\left(-\frac{(x - t_a^{rs})^2}{2(\sigma_t^{rs,a})^2}\right) dx \geq \rho$$

$$= \int_{-\infty}^{\frac{t_a + d_a - t_a}{\sigma_t^a}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \geq \rho \tag{23}$$

식(23)에서 x 에 대해서 증가함수 형태를 보이는 표준정규누적 분포함수를 $\Phi(x)$ 로 표현하면, 식(24)와 같

이 정리할 수 있다.

$$\frac{t_a + d_a - t_a}{\sigma_t^a} \geq \Phi^{-1}(\rho) \Leftrightarrow \frac{d_a}{\sigma_t^a} \geq \Phi^{-1}(\rho) \\ \Leftrightarrow d_a \geq \sigma_t^a \Phi^{-1}(\rho) \quad (24)$$

최종적으로, 링크통행시간 임계치는 식(25)와 같이 정의할 수 있다.

$$c_a^{rs} = t_a^{rs} + \sigma_t^{rs,a} \Phi^{-1}(\rho) \quad \forall a \in A, (r,s) \in C \quad (25)$$

링크통행시간 임계치에 대해 85%의 신뢰수준으로 정의하면 식(26)과 같이 표현할 수 있다.

$$c_a^{rs} = t_a^{rs} + \sigma_t^{rs,a} \Phi^{-1}(85\%) = t_a^{rs} + 1.44 \times \sigma_t^{rs,a} \quad (26)$$

4. 현실적용에 대한 이론적 해석

확률적인 DDHV 산정 모형식은 BPR함수를 토대로 한 링크통행시간과 Chance-constrained stochastic model을 기초로 한 링크통행시간 임계치(threshold)을 비교하여 적정값을 도출할 수 있다. 링크통행시간 임계치에 대해 85%의 신뢰수준(confidence level)으로 정의한다는 것은 두 가지 의미로 해석이 가능하다. 첫째, 운전자는 기종점을 지나가는 총 통행의 85%가 정시에 도착하기 위해서 15% 통행의 지체시간(delay time)은 허락할 수 있다. 둘째, 운전자는 차량의 혼잡으로 인하여 한 달(30일 기준)에 4일 정도는 늦을 수 있다. 따라서, 85%의 신뢰수준을 가지고 확률적인 DDHV 산정 모형식을 표현하면 식(27)과 같다.

$$t_a^0 \left(1 + 0.05 \times \left(\frac{V_a^{rs}}{c_a^{rs}} \right)^{10} \right) \leq t_a^{rs} + 1.44 \times \sigma_t^{rs,a} \quad (27)$$

식(27)의 좌항에 표현된 BPR함수의 파라미터는 일반적으로 $\beta=0.15$, $n=4$ 를 권장하고 있으나, 본 연구에서는 Skabardonis and Dowling(1996)에 의해 실제 현장자료(신호교차로가 있는 간선도로)를 토대로 보정(calibration)된 파라미터인 $\beta=0.05$, $n=10$ 을 적용하고자 한다.

또한, 2절에서 언급한 전통적인 중방향계수 산정방법에 따른 설계시간교통량의 문제점을 개선하기 위해 양방향 교통량 기준이 아닌 일방향 교통량을 기초로 분석하고자 한다.

결과적으로, 확률적인 DDHV를 산정하기 위해 주어지는 자료는 설계속도, 거리, 자유통행시간, 편도차로수, 중차량계수, 도로용량, 상시조사 8,760시간 교통량이며, 이를 토대로 식(27)을 통해 적정 중방향 설계시간 교통량(Optimal DDHV)을 산출하게 된다.

IV. 모형의 평가 및 시사점

앞 절에서 제시한 확률적인 중방향 설계시간교통량(PDDHV) 산정 모형을 2006년 일반국도 상시조사 2개 지점을 토대로 적용하였다. 모형의 평가는 전통적인 중방향 설계시간교통량(TDDHV)과의 비교를 통해 본 연구에서 제시한 새로운 방법론의 적정성을 평가하였다.

1. 모형의 평가

1) 양방향 4차로 도로

분석자료는 2절에서 사용한 2006년 상시조사지점 0106-3(전라북도 나주시 남평면 광이리)을 토대로 시행하였다. PDDHV를 산정하기 위한 기본적인 설계요소(입력자료)는 <표 1>과 같다.

TDDHV와 PDDHV에 의해 산출된 값은 <표 2>와 같다. TDDHV의 적정값은 연중 상위 30번째 시간교통량을 기준으로 산출하였다. 실제혼잡시간은 적정 순위에 근거한 연중 상위 방향별 시간교통량을 토대로 산출된 실질적인 DDHV를 기준으로 계산하였다.

TDDHV인 경우, 연중 상위 첫 번째 시간교통량에 대한 V/C가 0.5953인 반면에, PDDHV인 경우는 0.7045로 나타났다. 용량에 대한 교통량 비가 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다.

TDDHV의 적정 순위에서의 V/C(TDDHV.V/C)와 PDDHV의 적정 순위에서의 V/C(PDDHV.V/C)을 보면, TDDHV의 경우 순위가 상대적으로 작음에도 불구하고 V/C가 높게 나오고 있는데 그 이유는 <그림 5>에서 찾을 수 있다. TDDHV의 경우 상위 순위에 따른 V/C 변동이 큰 것을 알 수 있다.

K계수에 대해서는 기본적으로 양방향 시간교통량을 기준

으로 산출하였으며, PDDHV의 경우는 TDDHV.V/C가 PDDHV.V/C보다 낮게 나타났는데 이는 방향별 교통량의 편차가 심하여 상대적으로 상위 순위의 D계수가 더 큰 경우에 발생할 수 있다. PDDHV의 경우는 방향별 시간교통량을 기준으로 산정하기 때문에 전통적인 K계수는 크게 의미가 없다.

실제혼잡시간을 보면 TDDHV의 경우 3시간으로 나타나 현실을 제대로 반영하지 못하는 것으로 나타났으며, 이는 PDDHV 산정 모형의 필요성을 보여주는 단적인 예라 할 수 있다.

PDDHV의 적정 순위는 전통적인 순위인 30보다 큰 68로 나타남에 따라 설계시간교통량 및 설계시간계수의 적정 순위에 대한 조정이 필요하다는 것을 시사해준다.

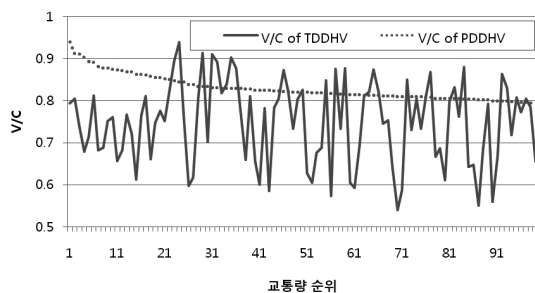
〈표 1〉 조사지점 0106-3의 설계요소

구분	적용값
설계속도	80km/h
거리	26.81km
자유통행시간	20.1분
편도차로수	2차로
중차량계수	0.95
도로용량	3,800대/시
BPR 파라미터	$\beta=0.05, n=10$
AADT	35,629대/일

〈표 2〉 조사지점 0106-3 DDHV 결과 비교

구분	TDDHV	PDDHV
1th.V/C	0.5953	0.7045
TDDHV.V/C1)	0.5263	0.6250
PDDHV.V/C2)	0.5650	0.6084
적정 DHV	3,196대/시	3,678대/시
TDDHV.K계수	0.0898	0.0817
PDDHV.K계수	0.0860	0.1032
적정 DDHV	2,000대/시	2,312대/시
적정 순위	30	68
실제혼잡시간	3	67

주: 1) TDDHV.V/C : 상위 30번째 교통량 기준
 2) PDDHV.V/C : 상위 68번째 교통량 기준



〈그림 5〉 상시지점 0106-3 V/C 비교

2) 양방향 2차로 도로

분석자료는 2006년 상시조사지점 5605-0(강원도 홍천군 화촌면 내삼포리)을 토대로 시행하였다. PDDHV를 산정하기 위한 기본적인 설계요소는 〈표 3〉과 같다.

본 조사지점은 양방향 2차로로 교통량이 매우 적은 지방부도로로서, 〈표 4〉에서 보듯이 연중 상위 첫 번째 시간교통량에 대한 V/C가 TDDHV와 PDDHV 모두 0.5189로 매우 낮다. 이 도로구간은 교통량 증가에 따른 차량지체가 거의 없는 자유상태에 가까운 교통흐름 상태를 보이고 있다.

TDDHV에서 적정 순위에 대한 V/C가 0.2446으로 매우 낮으며, PDDHV에서 적정 순위에 대한 V/C는 이보다 더 낮은 0.1653으로 나타났다. 이런 결과가 나오는 이유는 우선적으로 PDDHV의 적정 순위가 169로 나옴에 따라 V/C를 비롯하여 적정 DHV가 상대적으로 낮게 나타났다. 이 결과가 보여주는 또 다른 시사점은 교통량이 매우 적은 지방부도로의 경우에는 적정 순위를 30보다 훨씬 크게 설정하는 것이 효과적이라는 것을 보여준다.

연중 상위 첫 번째 시간교통량에 대한 V/C, TDDHV의 적정 순위에서의 V/C(TDDHV.V/C), PDDHV의 적정 순위에서의 V/C(PDDHV.V/C)을 보면, 순위가 낮아질수

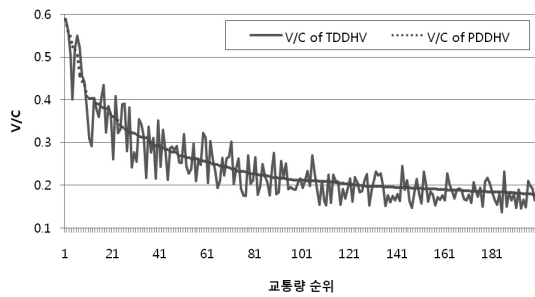
〈표 3〉 조사지점 5605-0의 설계요소

구분	적용값
설계속도	60km/h
거리	59.6km
자유통행시간	59.6분
편도차로수	1차로
중차량계수	0.95
도로용량	1,615대/시
BPR 파라미터	$\beta=0.05, n=10$
AADT	3,391대/일

〈표 4〉 조사지점 5605-0 DDHV 결과 비교

구분	TDDHV	PDDHV
1th.V/C	0.5189	0.5189
TDDHV.V/C	0.2446	0.2842
PDDHV.V/C	0.1474	0.1653
적정 DHV	643대/시	313대/시
TDDHV.K계수	0.1896	0.1354
PDDHV.K계수	0.1168	0.0923
적정 DDHV	395대/시	267대/시
적정 순위	30	169
실제혼잡시간	24	168

주1) TDDHV.V/C : 상위 30번째 교통량 기준
 2) PDDHV.V/C : 상위 169번째 교통량 기준



〈그림 6〉 상시지점 5605-0 V/C 비교

록 V/C도 낮아지는 경향을 보이는데, 이는 상시조사지점 0106-0의 패턴과 달리 일반적인 현상을 보이고 있는 것은 〈그림 6〉에서 알 수 있듯이, TDDHV의 V/C가 교통량 순위에 따라 전반적인 단조감소형태를 띄고 있기 때문이다.

TDDHV의 실제혼잡시간을 보면 24시간으로 나타났는데 이는 상시조사지점 0106-0의 결과보다는 훨씬 양호하였으며, 이 원인을 분석해보니 본 도로구간은 연평균 일교통량이 작은 2차로도로이며 중방향계수가 큰 경우로 일방향 교통량에 대한 성향이 강한 도로 특성을 보이고 있었다.

2. 확률적인 모형의 시사점

본 연구에서 제시한 확률적인 중방향 설계시간교통량 산정 모형은 2절에서 언급한 전통적인 산정방법의 여러 문제점을 보완하고, 현실을 보다 정확하게 반영하여 객관적인 결과를 도로계획 및 설계단계에 고려할 수 있도록 하는데 초점을 두었다.

확률모형을 정립하는 과정에는 Gaussian integral, Binomial expansion, Chance-constrained stochastic model 등의 확률이론이 언급되었지만, 설계시간교통량 산정을 위한 최종적인 모형식은 식(27)과 같이 간단히 정리할 수 있다. 따라서 전통적인 설계시간교통량 산정의 변수(계수)로 사용되는 설계시간계수, 중방향계수에 대한 연구뿐만 아니라, 실질적인 교통혼잡을 고려한 적정 설계시간교통량 순위도(optimal ranked design hourly volume), 확률개념이 적용된 PDDHV 산정 등을 간단한 계산식으로 도출할 수 있다.

또한, 도로용량과 직접적인 관계가 있는 경제성 측면에 대해서도 신뢰수준(confidence level)을 통해 적정값을 도출할 수 있다. 본 연구에서는 85%의 신뢰수준을 적용하였지만, 분석가의 합리적인 판단기준에 따라 신뢰수준을 75%~95%로 유동적으로 설정할 수 있다.

본 연구는 2차로, 4차로에 대해 각각 1개의 지점만을 가지고 모형의 평가를 하였으나, 모든 상시조사 지점자료를 통해 산출한다면 다양한 설계조건 및 도로유형에 따른 평균값, 중앙값, 최빈값, 분산, 표준편차 등의 다양한 평가지표들을 산출할 수 있다. 또한, Normal분포, Weibull 분포, Exponential 분포 등의 확률분포형을 결정할 수도 있다.

따라서, 본 연구에서 제안한 모형식은 실제적인 교통혼잡과 경제성 측면을 유동적으로 고려하면서 객관적인 적정 중방향 설계시간교통량을 산정할 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 전통적인 중방향 설계시간교통량 산정에 대한 개념적 내용을 살펴보고 사례연구를 통해 문제점을 도출하였으며, 이를 개선하기 위해 확률적인 중방향 설계시간교통량 산정 모형을 이론적으로 정립하였다. 도로구간의 혼잡정도는 교통량에 따른 링크 통행시간분포(link travel time distribution)를 Gaussian integral를 이용하여 표현하였으며, Chance-constrained stochastic model를 이용하여 링크통행시간 임계치(threshold)를 산정하였다. 따라서 BPR함수를 토대로 한 링크통행시간을 도출하고, 임계치는 교통혼잡수준의 판단기준으로 적용하여 적정 순위를 고려한 확률적인 중방향 설계시간교통량 산정 모형을 개발하였다.

본 연구는 설계속도, 구간길이, 교통량, 차로수, 중차량계수 등을 고려한 적정 설계시간교통량 순위도와 적정 중방향 설계시간 교통량을 산정할 수 있다. 이러한 결과는 표면적인 산정값을 도출하는데 적용될 뿐만 아니라 결측치가 존재하는 상시조사지점이나 수시조사지점의 DDHV 예측모형을 개발하는데도 크게 기여할 것으로 판단된다.

또한, 일방향 시간교통량(unidirectional hour volume)을 기반으로 산정한 설계시간교통량을 토대로 설계시간계수, 중방향계수에 대한 적정값도 기존연구와 비교분석이 가능할 것으로 판단된다.

향후 연구과제로는, 본 연구에서 모형의 평가를 2차로, 4차로에 대해 1개 지점만을 분석하였으나, 향후에는 모든 상시조사 지점자료를 대상으로 다양한 설계요소에 따른 평가지표를 통해 일반화(generalization)할 수 있는 합리적인 검토가 수반되어야 한다.

본 연구에서 사용한 BPR식은 유일해를 찾기 위해 단조증가함수 형태를 가지는 모형식으로, 포화상태일 때는 그 값이 실제 교통류보다 과대평가되는 경향이 존재한다. 이리

한 단점을 보완하기 위해 신호교차로가 있는 간선도로를 대상으로 BPR식의 적정 파라미터를 산정한 Skabardonis and Dowling(1996) 연구결과를 적용하였다. 하지만, 거시적인 모형인 BPR식의 기본적인 단점을 보완하고 한국 교통상황에 맞는 적정 파라미터 산정이 연구되어야 할 것이다.

또한, 본 연구에서 제시한 PDDHV와 다양한 교통설명변수(연평균주중교통량, 연평균주말교통량, 휴가철평균일교통량, 월변동계수, 요일변동계수, 휴가변동계수, 주중주말비율, 주말계수, 주간변동계수 등)와의 상관관계를 규명하여 일반국도뿐만 아니라 고속도로, 지방도, 도시부도로 등에 대해서도 추가적인 분석이 필요하며, 결측치가 존재하는 상시 조사지점이나 수시조사지점의 PDDHV 예측 모형을 개발하는 연구도 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부(2000), 도로의 구조·시설기준에 관한 규칙 해설 및 지침.
2. 건설교통부(2001), 도로용량편람.
3. 건설교통부(2007), 도로교통량 통계연보.
4. 도철웅(1998), 교통공학원론(상), 청문각.
5. 배홍준(1998), "고속도로의 K치 산정을 위한 시간교통량 순위도 곡선 산정", 한양대학교 석사논문.
6. 이장희(2006), "고속도로설계를 위한 권역별 K값 및 D값의 적용방안에 관한 연구", 한양대학교 석사논문.
7. 임성한·김윤섭·변상철·오주삼(2003), "AADT를 이용한 설계시간계수 추정", 대한토목학회지, 제23권 제1D호, pp19~26.
8. 문미경·장명순·강재수(2003), "설계시간교통량 산정방법 개선", 대한교통학회지, 제21권 제5호, 대한교통학회, pp.61~71.
9. 조준한·한종현·김성호·이병생(2006), "일반국도 설계시간계수의 적정 확률분포 선정 및 추정", 대한교통학회지, 제24권 제6호, pp.33~43.
10. Asakura Y, Kashiwadani M(1991), "Road network reliability caused by daily fluctuation of traffic flow", European Transport, Highway & Planning, 19, pp.73~84.
11. A. Skabardonis, R. Dowling(1996), "Improved speed-flow relationships for planning applications", Transportation research record 1572, pp.18~23.
12. B.M. Ayyub, R.H. McCuen(1997), Probability,

statistic & reliability for engineers, Boca Raton, CRC Press.

13. Chen A, Ji ZW, Reck W(2002), "Travel time reliability with risk sensitive travelers", Transportation Research Record 1783, pp.27~33.
14. Clark S, Watling D(2005), "Modeling network travel time reliability under stochastic demand", Transportation Research Part B, 39, pp.119~140.
15. Federal Highway Administration(1985,2001), Traffic Monitoring Guide, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
16. H.J. Larson(1974), Introduction to probability theory and statistical inference, New York, Wiley
17. Lo HK, Tung YK(2003), "Network with degradable links: Capacity analysis and design", Transportation Research Part B, 37, pp.45~363.
18. M. Evans, N. Hastings, J.B. Peacock(2000), Statistical distributions, New York, Willey.
19. S.C. Port(1994), Theoretical probability for applications, New York, Willey & Sons.
20. Sheffi. Y(1985), Urban transportation network: Equilibrium analysis with mathematical programming methods, Prentice-Hall, Englewood Cliff, New Jersey.
21. S.C. Sharma, Y. Wu, S.N. Rizak(1995), "Determination of DDHV from directional traffic flows", Journal of Transportation Engineering, 121(4), pp.369~375.
22. S.C. Sharma(1993), "Yearly variation of directional distribution of highway traffic", Journal of Transportation Engineering, 119(3), pp.478~484.

✉ 주 작 성 자 : 조준한
 ✉ 교 신 저 자 : 조준한
 ✉ 논문투고일 : 2008. 3. 10
 ✉ 논문심사일 : 2008. 5. 5 (1차)
 2008. 5. 29 (2차)
 ✉ 심사판정일 : 2008. 5. 29
 ✉ 반론접수기한 : 2008. 10. 31
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필