교통 네트워크 분석 시 유료도로 요금 가중치 차등화 적용 연구

박상준^{1*} · 김익기²

¹한국개발연구원 공공투자관리센터 전문위원, ²한양대학교 교통물류공학과 교수

Differentiating Weights of Toll Based on Highway Link Characteristics in Transportation Network Analysis

PARK, Sangjun^{1*} · KIM, Ikki²

¹Specailist, Public and Private Infrastructure Investment Management Center, Korea Development Institute, Sejong 30149, Korea

²Professor, Department of Transportation & Logistics Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 15588, Korea

*Corresponding author: sparks@kdi.re.kr

Abstract

During the process of transportation demand forecasting for future, a network calibration is performed to represent well the pattern of the route choice in the base year. In this process, it is necessary to accurately reflect relative magnitude of the path costs in the route choice behavior model, which the travelers actually perceived. KTDB data distributed by Korea Transportation Institute (KOTI) uses BPR function as highway performance function. The BPR function representing the link cost recognized by travelers consists of free flow speed, capacity and toll. This study explained possibility of distortion in the results of transportation network analysis due to errors in flow and speed relationship function if parameters α and β in the BPR function was arbitrarily adjusted during the network calibration including toll roads by using KTDB data. Therefore, the study tried to reduce the errors by introducing the concept of differentiated weight within the link performance function to reflect different preference in route choice behavior by highway functional hierarchy. The influence of toll on route choice have been analyzed by using the value of time (VOT) based on the average wage until the present days in South Korea. Therefore, in this study, validation analysis was performed with the observation data of web-navigation whether the wage-based-VOT adequately expresses the level of impedance in the transportation network analysis. The study showed that the VOT, which is actually perceived by the travelers in choosing path, is larger than the VOT presently used in network analysis in the South Korea. In other words, this study explained the necessity of λ^{type} ($0 < \lambda^{type} \leq 1$) as the differentiated weight of the toll, because this study found that the effect of toll on the route choice is actually less than that of the previous analysis.

Keywords: network calibration, road hierarchy, toll road, volume-delay function, weighting factor

초록

장래의 교통수요예측과정에서 기준년도의 경로선택 패턴을 모사하기 위해 네트워크 정산을 수행하게 된다. 이때 통행자가 현실적으로 인식하고 있는 경로간의 상대적 비용을 경로선택 행

J. Korean Soc. Transp.
Vol.36, No.5, pp.371-382, October 2018
<https://doi.org/10.7470/jkst.2018.36.5.371>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

ARTICLE HISTORY

Received: 22 June 2018

Revised: 18 July 2018

Accepted: 20 September 2018

Copyright ©
Korean Society of Transportation

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.

태에 정확하게 반영할 필요가 있다. 교통장래의 교통수요예측과정에서 기준년도의 경로선택 패턴을 모사하기 위해 네트워크 정산을 수행하게 된다. 이때 통행자가 현실적으로 인식하고 있는 경로간의 상대적 비용을 경로선택 행태에 정확하게 반영할 필요가 있다. 교통연구원(KOTI)에서 배포하고 있는 KTDB 자료는 도로 서비스 성능(Performance) 함수로써 BPR 함수를 적용하고 있으며, 통행자가 인식하는 경로비용을 반영하는 링크 서비스 성능 함수는 자유속도, 용량과 유료도로의 경우 통행요금으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 KTDB를 활용하여 교통수요분석 시 유료도로의 정산을 위해 BPR 함수의 파라메타 α , β 값을 임의 조정할 시에 교통량과 속도 관계의 오류로 인해 네트워크 정산 결과에 왜곡을 야기할 수 있는 점을 지적하였다. 그래서 본 연구에서는 도로위계별로 경로선택에 있어 도로 특성별 선호의 차등화 반영을 위해 불편비용(γ^{type})의 개념을 도입한 분석 방법을 제안하여 오류의 규모를 줄이고자 하였다. 또한, 본 연구에서는 임금율법에 산출된 시간가치를 기준으로 통행요금이 경로선택에 주는 저항 정도가 적합한가를 내비게이션 관측 자료를 가지고 검증 분석을 수행하였다. 분석 결과 통행자들의 경로선택 시 실제 인지하는 시간가치가 기존 우리나라 네트워크에서 사용되고 있는 시간가치에 비해 더 크다는 판단이 나왔다. 즉 통행요금이 경로선택에 주는 영향이 기존 분석에서보다 적다고 분석 결과가 나와 유료도로의 가중치에 λ^{type} ($0 < \lambda^{type} \leq 1$) 적용 필요성을 제시하였다.

주요어: 네트워크 정산, 도로위계, 유료도로, 통행량-지체 함수, 요금 가중치

서론

예산의 효율적인 배분을 위해 국가재정법은 대규모 SOC 사업의 기획 단계부터 장래의 교통수요예측을 통한 (예비)타당성조사를 요구하고 있다. (예비)타당성조사의 장래 교통수요예측은 기준년도의 관측된 통행패턴이 장래에도 유지된다고 가정하기 때문에 교통수요예측 모형은 기준년도의 관측된 통행패턴을 잘 설명할 수 있도록 네트워크 정산과정이 필요하며, 예비타당성조사 표준지침(Korea Development Institute, 2008)과 교통시설투자 평가지침(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2017)은 네트워크 정산을 요구하고 있다.

네트워크 정산은 기준년도의 경로선택 행태를 모사하기 위해 도로 위계별 상대적 서비스 성능(Performance) 차이로 대안 경로간의 경로 선택 행태를 통행배정 모형으로 모형화 하며, 통행배정 결과는 관측된 교통량과 비교하여 모형이 모사하는 대안 경로간의 선택 행태가 현실을 잘 반영하는지 평가하는 절차로 진행된다.

경로선택 행태는 통행배정 모형에서 구현되고 있으며 링크의 성능함수(Link Performance function)는 링크에 배정되는 교통량의 규모에 따라 달라지는 통행시간을 산출하고 있다. 국내외 교통수요예측에서는 링크의 성능함수(Volume-delay function, VDF)로 BPR 함수식이 주로 사용되고 있으며, Korea Development Institute(2008)는 (예비)타당성조사에서 사용하는 링크의 성능함수로 KOTI(2012)에서 배포하고 있는 BPR 함수식의 기본 구조로 하는 Equation 1을 제시하였다.

$$T = t_o \left(1 + \alpha \left(\frac{v}{c} \right)^\beta \right) + \text{구간거리} * \text{가중치} \quad (1)$$

여기서, 가중치=(통행요금/km)/(차종별 시간가치)

KTDB는 교통량 지체 함수(VDF)를 고속도로, 도시고속도로, 비연속류도로 등 도로위계별로 구분하고 VDF별 α , β 와 함께 자유속도와 용량의 기준값과 정산 시 고려할 조정범위를 제시하고 있다. KTDB가 자유속도와 용량의 조정범위를 제시하는 이유는 정산과정에서 교통량과 통행시간의 관계식에서 추정된 계수 α , β 를 조정할 경우 통행시간에 왜곡이 발생하므로 자유속도와 용량을 통한 정산을 권고하고 있는 것으로 보인다.

한편, Equation 1의 구간거리*가중치는 유료도로의 통행요금을 반영하기 위한 항목으로 통행요금을 통행의 시간가치를 통해 통행시간으로 변환하고 이를 링크의 통행시간에 더해주고 있다. 이를 통해 유료도로에서 통행요금의 저항 정도를 시간단위로 변환하여 네트워크 분석에 반영함으로써 유료도로와 무료도로간 통행요금이 경로선택에 미치는 영향을 현실적으로 반영할 수가 있게 된다. 이때 통행의 시간가치는 통행목적, 통행거리와 같이 통행속성과 무관하게 임금률법에 의해 산출된 시간가치를 일률적으로 적용하게 하고 있어 실무적으로 현실적 현상을 모사하는데 어려움이 있으며, 이는 α , β 를 통한 과도한 정산으로 이어질 개연성이 높다.

본 논문에서는 유료도로 분석 시 통행시간가치를 일률적으로 적용할 경우 통행배정결과의 왜곡을 가져올 수 있음을 지적하고, 이를 개선하기 위해 네트워크 분석 시 도로의 위계를 고려하기 위한 정산 파라메타(γ^{type})와 유료도로 가중치 조정을 위한 정산 파라메타(λ^{type})를 통한 네트워크 정산을 제안하였다.

기존 문헌의 고찰

수요예측단계에서 통행배정 모형은 통행자들의 경로선택 행태를 모사하기 위한 것으로 모든 통행자가 완벽한 정보를 갖고 합리적 판단에 따라 개인의 통행시간을 최소화하는 경로를 선택한다는 Wardrop(1952)의 제 1원칙에 따른 사용자 균형 상태(User Equilibrium)를 표현하는 것이다. 이러한 사용자 균형 상태는 통행자가 인식하는 경로의 일반화 비용에 대한 선호 정도를 반영한 상태를 의미하며, 이를 위해서는 통행자들의 경로선택 행태를 모형화하는데 통행자 개개인이 인식하고 있는 각 경로의 일반화 비용을 어떻게 구성하는지가 매우 중요하다.

Sheffi(1985)는 출발지에서 도착지까지의 통행시간으로 일반식을 설명하였으며, 통행시간과 함께 연료비, 통행료 등 금전적 비용을 시간단위로 전환된 일반화 비용에 포함시켜 모형을 구성하기도 한다. Roy Thomas(1991)의 경우는 통행자의 경로선택 선호도에 영향을 줄 수 있는 요소로 통행시간과 통행비용과 더불어 통행거리, 지도, 표지판, 노선에 대한 인지도, 대기행렬, 신호등 개수, 도로의 경관 등 노선의 외부적인 요소를 들고 있으며, 이와 함께 통행자의 나이, 성별 등 통행자 개인의 속성의 다양한 요소들이 통행자들의 노선선택에 영향을 주고 있음을 설명하고 있다. 특히, Mahmassani and Chen(1993)은 도로위계 구조가 노선선택 행태에 미치는 영향을 서술적으로 강조한 바 있다. 이에 착안하여 Kim(1995)는 도로위계구조를 고려한 통행배정기법을 소개하면서 도로위계상의 속성을 각 링크의 일반화비용에 통행시간단위로 계량화된 효용가치로 반영하기 위해 다음과 같은 성능함수를 통행배정모형에 반영하고 있다.

$$G_{ij}^R = \sum_L [CV_L - H_{hL}] D_L^* \sigma_{ij}^{RL} + \sum_n Q_{nst}^{ij} \quad (2)$$

여기서, G_{ij}^R : 기점 i에서 종점 j에 이르는 노선 R의 일반화 비용(분)

CV_L : 링크 L이 교통량 V_L 상태에서의 단위 거리당 통과 통행시간(분/km)

H_{hL} : 링크 L이 속하는 도로위계등급 h의 단위 거리당 선호정도(분/km)

D_L : 링크 L의 길이(km)

σ_{ij}^{RL} : 0 or 1 (만일 기점 i에서 종점 j에 이르는 최단 노선 R이 링크 L를 포함하면 1,

그렇지 않으면 0)

Q_{nst}^{ij} : 기점 i에서 종점 j에 이르는 최단노선에서 n번째로 도로의 위계등급 s에서 t로 바꿀 때의 불편(Penalty) 정도(분)

Equation 2의 통행비용 함수식 구조는 통행배정모형 정산 시 교통량 지체 함수(VDF)의 α , β 의 조정을 통한 교통량 정산이 아니라 도로 위계별 속성을 별도의 항목으로 반영하고자 경로선택을 위한 해당 링크의 속성을 토대로 통

행시간을 결정하게 되는 링크의 통행량과 해당 링크가 전체 도로네트워크 상에서 갖는 도로위계상의 선호도 그리고 경로선택과정에서 도로위계의 변화에 따른 불편비용으로 구성하였다.

국내 (예비)타당성조사의 교통수요분석에 기초자료로 활용되고 있는 KTDB에서도 교차로 밀도를 고려한 도로 위계에 따라 교통량 지체 함수(VDF)를 차등화 하여 배포하고 있으므로 Equation 2를 실무적으로 적용하는데 큰 어려움은 없을 것으로 판단된다.

한편, KTDB에서 배포하고 있는 교통량 지체 함수(VDF)는 자유속도, 용량, 통행요금으로 도로의 위계를 구분하고 그 조정범위를 제시하고 있다. 특히, 유료도로의 경우 금전적인 통행요금에 대해서 통행자의 시간가치를 적용한 일반화 비용을 구성하게 되는데 시간가치를 통행목적, 통행거리와 같이 통행속성과 무관하게 획일적인 시간가치를 적용하는 것은 유료도로의 경로선택 행태를 모사하는데 한계가 있다고 판단된다.

유료도로의 경우 유료도로 간의 통행요금 차이에 따른 경로선택 행태를 현실적으로 모사하는 것이 중요하다. 도시부 고속도로(유료도로)와 다르게 지방부 고속도로의 경우 비교적 장거리의 지역간 통행에 의해 이용되고 있으며, 이와 같은 장거리 통행의 경우 요금에 의한 경로선택 확률 탄력성이 비교적 적은 것이 일반적인 논리적 추론이다.

이와 관련하여, Kim(2003)은 수도권 지역과 천안-논산 고속도로 일대에서 수집한 잠재선호의식(SP)자료에 기초하여 다양한 시장분할로 통행시간가치를 산출하고 통행시간거리가 증가할수록, 소득수준이 높아질수록 통행시간가치도 증가하는 경향을 보이므로 통행시간가치의 보정이 이루어져야 함과 통행시간거리에 따른 원단위 제시가 바람직함을 제시하고 있다. Yook(2018)은 통행소요시간별로 통행시간가치가 변화할 수 있음을 이론적 및 행태적 측면에서 검토하고, 국내외 실증적 조사 자료를 통해 제시하고 통행소요시간별 통행시간가치의 변화를 직접적으로 통행시간절감편의 산정에 적용하는 방안을 제안하고 있다. Kim(2014)은 서울시내 도로 이용자를 대상으로 한 설문 조사를 통해 유료도로 이용자의 통행요금의 시간가치를 산출한 결과 장거리 통행자의 시간가치가 단거리 통행자의 시간가치보다 높음을 확인하고 있다. 조사결과는 서울시내 도로 이용자를 대상으로 하고 있어 두 집단 간에 확연한 차이를 보이고 있지는 않으나 지역 간 통행의 경우 장거리 통행 시 고속도로의 쾌적성, 연비향상효과, 안전성 등의 요소가 함께 고려될 경우 그 차이가 커질 것으로 예상하고 있다. 또한 유료도로 이용자의 요금인상에 따른 수요의 탄력성을 분석한 결과 0.559로 가격변화에 비해 수요의 변화가 덜 민감한 것을 확인하였다. 유료도로의 요금탄력성과 관련해서 FHWA(2005)는 경험적 추정치를 통해 미국 내 단일요율의 통행요금에 대한 요금 탄력성은 0.1에서 0.31의 범위내로 추정하고 있다. Kim(2009)은 유료도로의 일반화 비용 산정을 위한 통행시간가치의 차등화 필요성을 강조하면서 통행자의 소득수준별로 통행시간가치를 차등화 하는 방안을 제안하고 있다. 이 연구는 통행배정 단계에서 통행자의 속성에 따라 시간가치를 차등화 하여 궁극적으로 경로선택을 위한 유료도로와 무료도로의 상대적 서비스 성능을 구현하고 있다는 측면에서 의미를 갖는다고 할 수 있다. Gim(2013)은 DSRC 경로 관측 자료를 활용하여 고속도로 노선선택 분석을 분석하여 고속도로 이용자의 경로선택 요인을 확인하고 있다. 하지만, 해당 연구에서는 유료도로의 요금수준의 차이가 경로선택에 미치는 영향에 대해서는 고려하지 못하고 있다.

한편, Kumar and Peeta(2011)는 “상대적으로 높은 비용의 경로를 여행하는 운전자는 최소 경로 비용에 더 가까운 여행시간을 갖는 경로를 여행하는 경로에 비해 경로를 변경하려는 경향이 강하다”는 사회적 압력(social pressure) 개념에 따른 통행배정 방법을 제안하고 경로간의 비용차이의 민감도를 이용하여 경로 선택과정의 행태적 근거를 제시하고 있다.

이상의 기존문헌조사에 따르면 통행시간가치는 통행속성에 따라 다양하고, 통행거리가 증가할수록 통행시간가치는 대체로 증가한다는 것이 일반적인 견해이며, 수요예측 시 이에 대한 반영의 필요성을 확인할 수 있다.

본 논문은 도로의 위계를 고려하기 위한 정산에 있어서 상대적으로 높은 통행시간가치를 보이는 장거리 통행이 갖는 지방부 고속도로에 대해 민자 고속도로와 재정 고속도로의 요금수준의 차이가 경로선택에 미치는 영향을 통행배정 단계에서 고려하기 위한 방법을 제안하고자 한다.

유료도로의 경로선택 행위

기존문헌 조사(Kim, 2003; Kim, 2014; Yook, 2018)는 소요통행시간이 증가할수록(통행거리가 증가할수록) 통행시간가치가 증가함을 지적하고 있다.

이는 장거리 통행의 경로선택과정에서 통행요금이 미치는 영향이 크지 않음을 의미하며 본 논문에서는 이를 실증적으로 확인하기 위해 유료도로를 이용하는 통행자의 노선선택 행태를 분석하여 통행요금 수준에 따라 경로선택에 차이가 있는지 확인하였다.

요금 수준의 차이를 명확히 구분할 수 있도록 경로상에 천안논산 민자 고속도로를 포함하는 기종점 쌍을 검토의 대상으로 하였다. 검토 대상이 되는 기종점 쌍과 비교되는 대안 경로는 Table 1과 같다.

Table 1. Information of examine OD and alternative expressway routes

Origin	Destination	Route	Via	Length	Time	Fare
Cheonan	Nonsan	Route 1	Gyeongbu-Cheonan Nonsan-Honam	95.0km	63min	11,400won
IC-Cheonan JC	JC-Iksan IC	Route 2	Gyeongbu-Honamji-Honam	110.0km	66min	8,200won

분석에 활용된 자료는 SK의 2017년 4월 16일-4월 22일까지 관측된 7일간의 내비게이션 자료이며, SK 내비게이션 자료는 Figure 1과 같이 암호화된 개별통행의 고유ID와 수집일시, 통행의 순서, 통행경로(KS 표준링크)와 링크의 진입, 진출시간으로 구성되어 있다.

ID	RDATE	RTIME	SEQ	KS_LINK_ID	IN_TIME	OUT_TIME
1	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	1	3260041601	2017-04-22 18:29:37
2	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	2	3260039800	2017-04-22 18:34:49
3	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	3	3260036602	2017-04-22 18:35:10
4	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	4	3260036601	2017-04-22 18:38:20
5	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	5	3260036000	2017-04-22 18:40:07
6	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	6	3260031501	2017-04-22 18:40:24
7	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	7	3260030400	2017-04-22 18:42:29
8	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	8	3260182200	2017-04-22 18:42:50
9	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	9	3260181400	2017-04-22 18:43:21
10	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	10	3260021603	2017-04-22 18:43:45
11	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	11	3260021503	2017-04-22 18:43:57
12	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	12	3260021501	2017-04-22 18:45:02
13	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	13	3260028601	2017-04-22 18:45:09
14	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	14	3260027602	2017-04-22 18:46:03
15	000013b85485d0d4d240c0ec6cb4943a	20170422	182934	15	3260027900	2017-04-22 18:46:09

Showing 1 to 16 of 75,376,611 entries

Figure 1. SK navigation data

내비게이션의 위치정보를 활용하여 수집된 통과한 링크의 정보(KS_LINK_ID)를 확인하여 경부 고속도로 안성 JCT-천안JCT 구간과 호남 고속도로 익산IC-익산JCT 구간을 통과한 차량(ID)을 구분하고 이들 차량의 통행순서(SEQ)와 링크정보(KS_LINK_ID)를 구성하여 경로를 추적하였다.

2017년 4월 16일-4월 22일을 기준으로 검토 대상이 되는 기종점을 통과하는 차량의 이동 경로를 추적한 결과, Table 2와 같이 천안논산 고속도로만을 이용한 차량은 4,338대/일주일, 호남 고속도로지선만을 이용한 차량은 4,560대/일주일, 2개 경로를 모두 이용한 차량은 4,436통행/일주일로 경로선택에 있어서 큰 차이를 보이지 않았다.

Table 2. Result of route choice

Date	Route 1 (Gyeongbu-Cheonan Nonsan-Honam)	Route 2 (Gyeongbu-Honamji-Honam)	Route 1+Route 2
4-16	562	592	577
4-17	532	554	541
4-18	680	712	694
4-19	604	632	617
4-20	674	704	688
4-21	560	578	566
4-22	726	788	753
Sum	4,338	4,560	4,4365
Average	619.71	651.43	633.71

경로 관측 자료를 이용한 노선선택 행태를 분석한 결과, 경로 2를 선택한 차량이 경로 1을 선택한 차량보다 근소하게 많은 것으로 나타났으나 ANOVA 분석결과 Table 3과 같이 P-Value>0.05로 경로간의 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 검토되었다.

Table 3. Result of ANOVA

Source of variance	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between groups	3536.381	2	1768.19	0.278991	0.759759	3.554557
Within groups	114080.6	18	6337.81			
Total	117617	20				

경로간의 통행비용을 비교할 경우 Table 1과 같이 통행요금을 고려한 일반화비용에서 경로 2가 유리한 경로가 되는데, 경로 1 (경부-천안논산-호남)의 경우 경로 2 (경부-호남지선-호남)보다 통행요금에 있어서 3,200원을 추가로 지불해야하며, 이는 승용차 기준의 시간가치(2014년 전국권 시간가치 19,892원)로 요금을 시간단위로 전환할 경우 약 10분에 해당하기 때문이다. 하지만, 내비게이션 자료에서는 경로 간에 차이의 유의성을 통계적으로 확인할 수 없는데 이는 기존문헌의 견해와 같이 장거리통행의 통행의 시간가치가 높아짐에 따라 통행요금이 경로선택과정에서 크게 영향을 주고 있지 않기 때문인 것으로 판단된다.

통행배정 과정에서는 통행요금의 수준에 따른 일반화비용의 차이가 노선선택에 직접적으로 영향을 주게 되기 때문에 기존문헌의 견해를 내비게이션 자료를 통해 확인한 바와 같이 통행의 속성에 따라 통행의 시간가치를 적절히 반영되지 못할 경우 현실의 노선선택 행태의 왜곡을 초래할 수 있다.

유료도로의 요금 차등화 방법

1. 유료도로 요금 차등화의 필요성

현재 국내의 (예비)타당성조사에서는 KTDB의 자료를 활용하고 있으며, KTDB는 교통량 지체 함수(VDF)의 α , β , 자유속도, 용량 등을 도시부 도로와 지방부 도로로 구분하여 수치를 제시하고, 도로위계는 고속도로, 도시고속도로, 비연속류도로로 구분하고 있다. 이와 함께 고속도로의 경우 통행자가 지불해야할 통행요금을 반영하기 위해 요금가중치를 통행수단(승용차, 버스, 트럭 등)별 시간가치를 고려하여 적용하고 있다.

한편, 국내 유료도로는 1999년 이후 민간투자사업으로 고속도로사업을 추진하게 되면서 재정 고속도로와 민자고속도로의 2가지 형태로 운영이 되고 있으며, 재정고속도로와 민자고속도로 간에는 많게는 1.3배 이상의 통행요금 차이를 보이고 있다.

현재의 분석 방법에 따라 민자 고속도로와 재정 고속도로의 통행요금을 지침서에서 제시한 임금을 기준의 시간가치로 일률적으로 적용하게 되면, 통행속성(통행목적, 통행거리 등)에 따른 시간가치의 차이가 통행요금이 고려된 일반화 비용에 주는 영향을 차등화하지 못함에 따라 현실의 통행자 경로선택 행태에 왜곡이 생길 수 있다.

기본문헌의 통행의 속성별로 통행시간가치에 차이가 있고, 장거리 통행의 통행시간가치가 높다는 결과는 유료도로의 기능에 따라 장거리 통행의 경로선택에 있어서 통행료가 주는 영향이 낮을 수 있으므로 유료도로의 요금 차등화가 필요하다는 점을 시사한다. 따라서 현재 KTDB 자료와 지침서의 시간가치를 일률적으로 적용하는 네트워크 분석방법은 통행료가 상대적으로 비싼 유료도로는 이용하지 않으려는 경향으로 통행배정 분석에 반영됨에 따라 현실의 유료도로 간의 경로선택 행위를 모사하는데 어려움이 예상된다.

2. 통행배정 모형의 VDF 구성

통행비용 함수식은 경로선택 과정에서 통행자가 경험하게 되는 효용가치 개념에서 Equation 3과 같이 표현할 수 있다.

$$G = CV - \gamma^{Type} \quad (3)$$

여기서, $CV = t_o(1 + \alpha(\frac{v}{c})^\beta) + length \times Factor^{Type}$

γ^{Type} : 다른 위계 도로와의 상대적 서비스 성능을 반영하기 위한 불편(Penalty) 정도(분)

$Type$: 도로의 위계 등 VDF를 구분하는 기준(ex, 지방도, 국도, 고속국도(재정), 고속국도(민자) 등)

$Factor^{Type}$: 유료도로 가중치

이때, γ^{Type} Equation 2의 H_{hL} 와 Q_{nst}^{ij} 로 설명할 수 있다.

Equation 3에서 유료도로 가중치에 대한 $Factor^{type}$ 은 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$Factor^{type} = penalty^{재정} + (penalty^{민자} - penalty^{재정}) * \lambda^{type} \quad (4)$$

여기서, $penalty^{type} = \frac{Toll^{type}}{VOT}$

네트워크 정산 시 통행배정 단계의 경로선택과정에서 다른 위계 도로와의 상대적 서비스 성능을 반영하기 위한 γ^{Type} 와 유료도로의 가중치 조정을 위한 λ^{type} 는 각각이 설명하는 부분을 고려하여 구분되어 정산되어야 한다. 이는 네트워크 정산이 논리적 과정을 통해 합리적 결과를 도출할 필요가 있기 때문이며, 무분별하고 과도한 파라메타의 조정을 방지하기 위함이다.

3. 도로 위계별 상대적 서비스 수준 정산을 위한 γ^{Type} 의 조정 범위

유료도로 요금가중치에 대한 차등화는 유료도로간의 경로선택 행태 정산을 목적으로 하지만, 유료도로 요금가중치를 조정하는 정산과정에서 요금가중치를 고려하지 않는 도로 위계와 기하구조적 특징에 따른 경로선택 행태가 함께 정산될 필요가 있다.

γ^{Type} 는 통행요금을 제외한 도로의 위계와 기능, 표준적인 링크 속성과 차이가 나는 도로의 기하구조적 특징(자유 속도, 도로의 용량, 차로폭원, 가변차로, 노변 주차 허용 정도) 등을 통한 정산을 대표하며, 유료도로를 포함한 모든

위계의 모든 도로에 적용될 수 있다. 이미 KTDB는 교통량 지체 함수(VDF)의 자유속도, 용량 등을 도로 위계별로 차등 적용하고 그 조정범위를 함께 제시하고 있어 KTDB가 제시하는 자유속도와 용량 범위 내에서 네트워크 정산을 수행하는 것은 γ^{Type} 를 일정 부분 반영하고 있는 사항이라 할 수 있으며, 네트워크 정산과정에서 자유속도와 용량의 관계로 설명하기 어려운 경로선택 행태에 대해서 γ^{Type} 를 통해 추가적인 정산을 수행할 수 있다고 판단된다.

도로의 위계와 기하 구조적 정산과정을 γ^{Type} 로 대표하고자 하는 이유는 BPR 함수의 α , β 를 통한 과도한 정산이 통행배정 결과를 왜곡시킬 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해서이다. BPR 함수의 α , β 는 도로의 선형 및 물리적 설계 구조와 관련하여 교통량 변화함에 따른 통행시간(속도)과의 함수의 계수 값으로 네트워크상의 통행자의 경로선택 행태와는 직접적인 관련이 없는 계수 값이다. 그러므로 단지 링크의 교통량과 통행시간과의 관계식의 계수인 α , β 를 네트워크 정산 과정에서 무분별하게 조정 변경할 경우, 교통량과 통행시간과의 관계식에 변화가 발생(기울기의 변화)하며 이는 통행배정 분석 결과에 왜곡을 가지고 올 수가 있다. 따라서 네트워크 정산을 위해서 교통량 지체 함수(VDF)를 조정할 경우는 교통량과 통행시간의 관계식에서 추정된 계수 α , β 를 조정하기 보다는 통행자의 경로선택 행태에 영향을 주는 속성을 조정하는 것이 바람직하다.

네트워크 정산 시에 링크 위계별 가중치 γ^{Type} 값 규모에 대해 도로위계별 상대적 값에 대한 논리적 검증이 필요하며, 가중치 γ^{Type} 은 해당 링크의 통행이 없는 상태에서는 결국 초기속도에서 도로 위계별 상대적 경로선택 선호 정도로 해석될 수 있으므로 KTDB를 적용하여 자유속도와 용량의 범위 값을 참고할 때 VDF 1를 예로 보면 γ^{Type} 의 범위가 자유속도 100.7km/h와 자유속도의 최대-최소 조정범위(95-110km/h)의 차이에 해당하는 $-5.7 \sim 9.3$ km/h 범위의 값이 됨을 알 수 있다.

4. 유료도로 통행요금 가중치 정산을 위한 λ^{Type} 의 조정 범위

기존연구에서 유료도로의 요금수준은 통행목적 등에 영향을 받으며, 통행거리가 증가할수록(통행소요시간이 증가할수록) 통행시간가치는 증가한다는 것이 일반적인 견해이며, 유료도로 요금 가중치를 일률적으로 적용할 경우 이와 같은 요소를 고려하지 못하는 한계가 있다. 예를 들어 장거리 통행이 잦은 지방부 고속도로의 경우, 기존연구 결과에서 확인하는 바와 같이 장거리 통행의 통행시간가치가 높기 때문에 실질적으로 통행 요금 수준의 차이가 경로 선택에 미치는 영향이 크지 않음에도 불구하고 경로 선택 과정에서 매우 높은 수요 변화를 보이고 있는데 이는 통행요금 가중치 산정시 임금율법에 따른 시간가치를 일률적으로 적용하고 있기 때문으로 판단된다.

λ^{Type} 은 상기와 같은 경로선택에 있어서 유료도로 요금에 의한 경로선택 행태의 영향을 융통성 있게 반영하고자 하는 변수로써 현재 통행요금 가중치 산정을 위해 일률적으로 임금율법에 의한 시간가치를 적용함에 따른 정산의 제약을 다소 완화하기 위함이다. 따라서 λ^{Type} 은 요금수준의 차이가 발생하는 도로 간에 적용해야 함을 전제로 한다.

λ^{Type} 은 경로선택에 있어서 요금규모가 경로선택에 미치는 영향을 현실적으로 모사하기 위한 정산 파라메타로 KTDB는 동일한 유료도로에 현재 징수중인 다양한 요금수준이 입력되어 있으나 현실의 유료도로의 경로선택 과정에서는 요금수준의 차이보다는 통행 목적, 통행 거리 등 통행의 특성에 따른 시간가치가 중요한 요소로 판단되기 때문이다. 궁극적으로는 경로선택 과정의 시간가치를 통행 목적, 통행 거리 등 통행속성에 따른 차별화된 시간가치를 적용하는 방안을 고려해야 할 것이나 이와 관련된 연구가 진행되지 못하고 있는 현실에서 λ^{Type} 을 고려한 경로선택의 현실적 모사가 현실적인 대안이라 판단된다.

Equation 4의 λ^{Type} 은 기존 (예비)타당성조사 지침에서 제시하고 있는 시간가치를 적용할 경우, 통행료의 시간단위 가중치(penalty weight)와의 차이를 보정해 주기 위한 상대적인 요소로 $0 < \lambda^{Type} \leq 1$ 의 범위를 갖도록 설정할 수 있다. λ^{Type} 은 재정 고속도로와 민자 고속도로의 요금 차이를 경로선택 행태에 적합한 시간가치로 조종하는 보정계수로써, $\lambda^{Type} \cong 0$ 일 경우 유료도로의 요금차이가 경로선택 행태에 전혀 영향을 주지 않는 것을 의미한다. 또한, $0 < \lambda^{Type} < 1$ 사이의 값을 가질 경우는 지침서의 시간가치보다 더 큰 시간가치로, 즉 요금이 주는 영향이 지침서보다

더 적게 경로 선택 행태에 영향을 주는 것을 의미한다. $\lambda^{type} = 1$ 일 경우는 통행요금에 경로선택에 미치는 영향 즉 시간가치가 지침서와 동일하다는 것을 의미하는 것이다. 이는 기존의 지침서의 내용을 최대한 준용하기 위함이며, λ^{type} 의 범위에 대해서는 추가적인 연구를 수행할 필요가 있을 것으로 보인다. 다만, 요금에 의한 경로선택 확률은 일반적인 경우에 요금탄력성을 고려할 수 있으며, 경험적으로 요금탄력성은 비탄력적이므로 FHWA(2005)의 연구 결과를 준용할 경우 0.1-0.3 수준에서 고려함이 합리적일 것이다. 하지만 비교적 국토의 면적이 적어 통행거리가 미국보다 상대적으로 작을 수가 있다는 점을 고려할 때 우리나라에서의 요금에 대한 경로선택의 탄력성에 대한 추가적인 기초 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사례 분석

1. 대상사업

천안논산 고속도로는 민간투자사업으로 추진되어 2002년 개통된 고속도로로 경부고속도로와 호남고속도로를 연결하고 있다. 천안논산 고속도로는 왕복 4차로로 운영 중에 있으며, 총 연장 81km, 분기점을 포함하여 11곳의 유출입시설이 운영 중에 있다. 통행요금은 최장거리를 기준으로 9,400원(2016년 4월 현재)¹⁾을 징수 중에 있어 동일한 연장의 재정고속도로 요금(4,500원=기본요금(900원)+주행거리(81km)×44.3원/km)²⁾의 약 2.0배 수준이다. 천안논산 고속도로의 통행량은 남풍세IC와 정안IC 구간을 기준으로 2015년 57,501대/일의 평균일교통량을 보이고 있어 차로 당 14,375대/일/차로가 이용하고 있는 것으로 조사되고 있다. 주변의 경부 고속도로 천안JC와 옥천IC의 교통량이 86,716대/일 수준으로 차로 당 14,453대/일을 보이는 것과 비교 했을 때 유사한 수준의 이용률을 보이고 있는 것으로 조사되었다. 본 검토에서는 경부 고속도로, 서해안 고속도로, 중부 고속도로 등과 일부 경쟁관계에 있는 천안논산 고속도로의 교통량 정산을 위한 λ^{type} 를 추정하고자 한다. 교통량 정산과정은 Figure 2와 같다.

Figure 2. Process of calibration

네트워크 정산은 우선 γ^{type} 정산을 통해 도로의 위계와 기능, 도로의 기하구조적 특징(자유속도, 도로의 용량, 차로폭원, 가변차로, 노변 주차 허용 정도) 등을 고려한 정산을 수행하였으며 이는 순수하게 통행요금의 영향을 파악하기 위함이다. 이를 전제로 λ^{type} 정산을 통해 유료도로간의 정산을 수행하고 결과를 RMSE로 확인하였다.

1) 천안논산고속도로 통행료 안내(http://www.cneway.co.kr/sub/sub02/sub_0202.jsp)

2) 한국도로공사 통행요금요금 안내(<http://www.ex.co.kr/>)

2. 수요분석 전제

λ^{Type} 를 통한 유료도로 정산 사례 분석은 국가교통DB센터에서 배포한 전국 지역간 여객 OD 및 네트워크를 활용하여 2013년 기준년도를 대상으로 분석을 수행하였다.

통행배정방법은 승용차, 버스, 화물차를 구분하여 다차종 통행배정(multi-modal assignment)기법을 적용하였으며, 첨두시(7.0%, 10시간)·비첨두시(2.5%, 9시간)·심야(5시간)로 구분하여 수행하였다. 민자 및 유료도로는 통행요금을 별도로 반영하였다. 일반화 비용 산출을 위해 적용되는 시간가치는 「도로·철도 부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완(5판), 한국개발연구원, 2008.12」에서 제시된 시간가치를 적용하였다. 배정된 교통량은 도로교통량 통계연보의 관측교통량과 비교하였으며, 천안논산 고속도로 주변의 고속도로 147개 조사지점, 일반국도 240개 조사지점의 교통량과 비교하였다.

3. λ^{Type} 정산 결과

λ^{Type} 정산 결과, Table 4와 같이 λ^{Type} 값이 작을수록 천안논산 고속도로의 배정 교통량은 증가함을 확인할 수 있으며 이는 λ^{Type} 값이 0에 가까울수록 통행자가 체감하는 민자 고속도로와 재정 고속도로의 통행 요금에 대한 차이가 적어짐을 대변한다고 판단된다. 2번 관측 지점(천안논산)을 살펴보면, λ^{Type} 값이 0.9일 때 35,042(대/일)로 배정되었으며 λ^{Type} 값이 0.3일 때 47,732(대/일)로 배정되어 관측 교통량 50,808(대/일)에 점점 가까워짐을 확인할 수 있다. 이와 반대로 1번, 3번, 4번 관측 지점의 배정 교통량은 λ^{Type} 값이 작을수록 감소하여 관측 교통량과의 오차율이 개선됨을 확인할 수 있다. 이는 통행자가 민자 고속도로와 재정 고속도로 간 통행 요금 차이가 적게 체감하여 서해안 고속도로, 경부 고속도로, 중부 고속도로보다 천안논산 고속도로를 선택하여 배정됨을 의미한다.

Table 4. The result of calibration

Point	Route	Section	Observation	$\lambda^{type}=0.0$		$\lambda^{type}=0.3$		$\lambda^{type}=0.6$		$\lambda^{type}=0.9$	
				Assignment	Error	Assignment	Error	Assignment	Error	Assignment	Error
1	West coast	Haemi IC-Seosan IC	34,821	34,293	-1.5	35,873	3	37,191	6.8	38,504	10.6
2	Cheonan-nonsan	Jeongan IC-South cheonan IC	50,808	54,241	6.8	47,732	-6.1	42,709	-15.9	35,042	-31.0
3	Gyeongju	Cheongju IC-Mecheon IC	82,328	94,992	15.4	96,363	17	97,426	18.3	98,486	19.6
4	Joongbu	West chungju IC-Ochang IC	61,770	55,980	-9.4	56,719	-8.2	57,865	-6.3	58,881	-4.7
5	West coast	Daecheon IC-Gwangcheon IC	27,101	30,068	10.9	31,805	17.4	33,148	22.3	34,551	27.5
6	Seocheon-gongju	West gonghu IC-West gonghu JC	17,164	19,569	14	19,197	11.8	19,297	12.4	19,059	11.0
7	Cheonan-nonsan	South gonghu IC-Gonghu JC	35,301	42,088	19.2	37,638	6.6	32,478	-8.0	26,769	-24.2
8	Dangjin-youngdeok	West sejong IC-South sejong IC	28,874	29,868	3.4	29,820	3.3	29,800	3.2	29,746	3.0
9	West coast	Moochangpo IC-Daecheon IC	27,712	30,404	9.74	32,140	16	33,494	20.9	34,912	26.0
10	Seocheon-gongju	East secheon IC-West buyeo IC	13,055	13,587	4.1	13,922	6.6	14,482	10.9	15,514	18.8
11	Cheonan-nonsan	West nonsan IC-tancheon IC	33,712	40,855	21.2	36,494	8.3	30,947	-8.2	25,087	-25.6
12	Honam	Gyeryong IC-West daejeon JC	41,308	47,125	14.1	48,227	16.8	49,734	20.4	51,293	24.2
13	Joongbu	Chubu IC-South daejeon IC	29,149	34,749	19.2	34,949	19.9	35,344	21.3	35,782	22.8

Table 5를 통해 전체 네트워크 상의 관측교통량과 비교를 통해 RMSE를 확인한 결과 유료도로의 경우 $\lambda^{Type}=0.3$ 에서 RMSE가 가장 낮은 수치로 검토되고 있으며, 일반도로의 경우 λ^{Type} 에 따라 RMSE의 변화는 크지 않아 λ^{Type} 의 영향은 유료도로간의 경로선택에 더 큰 영향을 주는 것으로 보인다.

Table 5. The RMSE of calibration

OBS			$\lambda^{Type}=0.0$		$\lambda^{Type}=0.3$		$\lambda^{Type}=0.6$		$\lambda^{Type}=0.9$	
			Assignment	Error	Assignment	Error	Assignment	Error	Assignment	Error
RMSE	Expressway	147	12,658		12,656		13,022		13,625	
	National highway	240	14,414		14,394		14,361		14,343	

결론

국내 유료도로는 1999년 이후 민간투자사업으로 고속도로사업을 추진하게 되면서 재정 고속도로와 민자 고속도로의 2가지 형태로 운영이 되고 있으며, 재정고속도로와 민자고속도로 간에는 많게는 1.3배 이상의 통행요금 차이를 보이고 있다. 이와 같은 현황을 Wardrop(1952)의 균형이론에 따라 통행배정을 수행할 경우, 유료도로의 요금 수준은 경로선택 행위에 결정적인 영향을 미치게 된다. 특히 도로의 기능이나 도로를 이용하는 통행의 특성과 무관하게 도로의 운영주체(재정, 민자)에 따라 통행요금에 차이가 발생할 경우, 통행배정 모형의 경로선택의 결과는 현실의 경로선택 결과와 차이가 발생할 개연성이 높다. 이와 같은 원인은 통행배정 모형에서 유료도로간의 요금의 영향 차이를 현실적으로 모사하고 있지 못하기 때문으로 판단되며, 이는 기존 문헌조사를 통해 통행거리가 증가할수록(통행소요시간이 증가할수록) 통행시간가치는 증가한다는 것이 일반적인 견해를 확인하였고, 본 연구에서는 내비게이션자료를 통해 유료도로의 서로 다른 요금수준이 경로선택에 영향을 주지 못함을 확인하였다.

본 논문에서는 도로위계별 네트워크 정산 시 통행속성에 따른 통행시간가치를 고려하지 못하는 현행의 네트워크 정산과정에서 서로 다른 요금수준의 유료도로간의 경로선택 행태를 교통량과 통행시간과의 관계식의 계수인 α , β 를 무분별하게 조정 변경할 경우, 교통량 변화에 따른 통행시간의 변화가 현실과 차이 나서 통행배정 분석 결과에 왜곡을 가지고 올 수가 있는 점을 지적하였다. 이를 개선하기 위해 본 논문은 불편비용(γ^{Type})을 통한 도로위계별 정산방안과 유료도로의 요금수준이 경로선택에 미치는 영향을 네트워크 정산과정에서 고려하기 위한 유료도로의 가중치에 λ^{Type} 를 적용하는 방안을 제안하였다.

도로위계에 따른 불편비용(γ^{Type})과 유료도로의 가중치 보정계수(λ^{Type})로 구분한 네트워크 정산은 네트워크 정산의 과정에 대한 논리적 배경을 설명하고 합리적 결과를 도출하는데 기여함과 동시에 무분별하고 과도한 파라메타의 조정을 방지하는데 기여할 것으로 예상된다.

γ^{Type} 는 유료도로간의 요금차이를 조정하는 효과로 동일한 네트워크 조건 하에서는 유료도로의 통행량이 증가하는 요인으로 작용할 수 있는 바, 고속도로의 수요 예측 과다를 우려하는 주장이 있을 수도 있다. 하지만 본 논문에서 제기하는 바와 같이 γ^{Type} 는 통행자가 인식하는 유료도로간 요금의 영향 차이를 경로 선택 행태에 현실적으로 모사할 수 있도록 모형에 반영한 것으로 개별 사업 분석에 있어서 과대 혹은 과소 수요 예측이 발생하지 않도록 네트워크 정산 과정에서 현실적 반영이 되도록 주의가 필요하다.

알림

본 논문은 대한교통학회 제73회 학술발표회(2015.10.16)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

ORCID

PARK, Sangjun <http://orcid.org/0000-0001-5332-383X>

KIM, Ikki <http://orcid.org/0000-0002-2057-4840>

References

- Amit Kumar, Srinivas Peeta (2011), An Improved Social Pressure Algorithm for the Static Deterministic User Equilibrium Traffic Assignment Problem, 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- FHWA (2005), HERS-ST Technical Report, Washington, DC, USA.
- Gim J. O. (2013), Expressway Route Choice Analysis by using the Observed Data from DSRC system, Hanyang University, Master Dissertation.
- Kim I. K., Kim T. J. (1995), Traffic Assignment Incorporating Route Choice Behavior in Hierarchical Highway Structure, J. Korean Soc. Transp., 13(3), Korean Society of Transportation, 19-33.
- Kim J. Y., Shon E. Y., Chang Y. (2009), A Review about the Need for Modelling Toll Road with Different Value of Travel Time, J. Korean Soc. Transp., 27(4), Korean Society of Transportation, 31-40.
- Kim S. J. (2014), Estimating the Value of Travel Time for Toll Road Demand Forecast, The Korea Spatial Planning Review, 82, Korea Research Institute for Human Settlements, 37-47.
- Kim T. H. (2003), The Value of Travel Time for Toll Roads, Korea Research Institute for Human Settlements.
- Korea Development Institute (2008), A Study on Roadway · Railway Part Feasibility Study Standard Guideline Supplementation and Amendment (5th Edition), South Korea.
- KOTI (2012), Inter-regional (Passenger) Travel Demand Forecasting, South Korea.
- Mahmassani H. S., Chen P. S. T. (1993), An Investigation of Reliability of Real time Information for Route Choice Decisions in a Congested Traffic System, Transportation, 20(2), 157-178.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017), Transportation Facility Investment Evaluation Guidelines(The Preparation of the 6th), South Korea.
- Roy Thomas (1991), Traffic Assignment Techniques, Avebury Technical (The Academic Publishing Group).
- Sheffi Y. (1985), Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis With Mathematical Programming Methods, Prentice-Hall Inc, englewood cliffs, USA.
- Wardrop J. G. (1952), Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, Proceedings of Institute of Civil Engineering, part 2, 325-378.
- Yook D. H., Kim N. S. (2018), Enhancing the Economic Benefit Assessment of Roadway Investment Through the Application of Value of Time by Trip Length, Transport Policy, 68, 28-36.