

■ 論 文 ■

지각패널티와 변동요금에 의한 교통류 분석 연구

Traffic Flow Analysis by Delay Penalty and Road Pricing

변 완 희

(한국IBM 유비쿼터스컴퓨팅연구소 실장)

김 주 현

(안양대학교 도시정보공학과 교수)

최 병 국

(인천발전연구원 교통물류연구실 선임연구위원)

송 두 석

(서울시립대학교 전산과장)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경 및 목적
 - 2. 변동요금에 의한 교통류 관리 사례
 - 3. 경로선택에 대한 기존 연구의 고찰
- II. 지각패널티와 통행요금의 변화에 따른 교통류 분석
 - 1. 경로선택 모델과 교통류 시뮬레이션
 - 2. 패널티 고려 유무에 대한 교통류 시뮬레이션비교 분석
- 3. 지각패널티와 요금에 의한 교통류 시뮬레이션 분석
- III. 최소평균소요시간에 대한 고패널티 운전자 비율과 통행요금의 통계 분석
- IV. 결론
- 참고문헌

Key Words : 시간가치, 경로선택, 요금징수, 시뮬레이션, 지각패널티

요 약

과거 혼잡세 이론의 초기부터 주장되어온 변동요금징수 체계는 최근 텔레매틱스 산업의 발전과 더불어 기술적 제약이 해결되면서 여러 국가에서 시행되고 있다. 본 연구는 변동요금 체계와 관련하여 교통정보와 요금의 변화가 교통류에 미치는 영향을 시뮬레이션을 이용하여 분석하였고, 이로부터 변동요금에 의한 교통류 관리 방안의 가능성을 제시하고 있다.

본 연구를 통해, 고패널티 운전자와 저패널티 운전자간의 시간가치가 달라 요금에 대한 저항이 다르다는 것, 통행요금이 증가하면 운전자들의 요금저항 역시 증가하여 고속도로에서 일반도로로의 이용자 전환이 촉진되는 것을 확인하였다. 또한, 통행요금, 고패널티 운전자비율과 평균소요시간의 관계 분석을 통해서, 동일한 통행요금 체계일지라도 도로 네트워크 내의 고패널티 운전자 비율에 따라서 교통류 상태가 가변적이라는 것을 확인함으로써, 지각패널티와 통행요금에 의한 효율적인 교통류 관리방안의 가능성을 발견하였다.

With rapid development Telematics industry, the concern of dynamic road pricing system is increasing.

In this study, the change of traffic flows according to traffic information and variation of congestion road prices related to the dynamic road pricing was analyzed.

In this study, three facts were unfolded. First, high delay penalty and low delay penalty drivers are shown different reaction for the different congestion road prices.

Second, the higher congestion road prices the more drivers convert their route from toll road to non toll road.

Third, high penalty drivers are converting to toll road than low delay penalty drivers under same congestion road prices. This study has reached the conclusion that dynamic congestion pricing has a high possibility for traffic management.

1. 서론

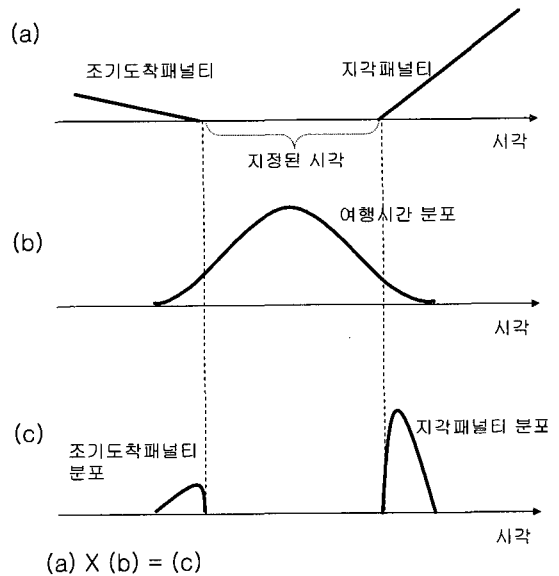
1. 연구의 배경 및 목적

경제발전과 함께 대도시를 중심으로 한 자동차 보유 대수는 크게 증가하여 왔고, 이로 인해 대용량의 교통수요를 처리해야 하는 도시 고속도로와 도시 간선도로에서는 만성적인 교통정체가 발생하고 있다. 이에 교통정체를 해소하고, 도시 내 도로 네트워크의 이용 효율성을 높이기 위한 방안의 하나로 교통정보 제공 서비스가 시행되고 있는데, 최근 들어서는 텔레매틱스를 통해서 운전자 위치에 관계없이 원하는 때에 원하는 곳의 교통정보 제공이 가능하게 되었다. 특히, 텔레매틱스 단말기나 개인휴대 단말기와 같은 매체는 실시간 요금정보 및 소요시간 정보의 획득을 가능하게 하므로 교통류 관리방안의 하나로써 변동요금 징수를 생각해 볼 수 있다.

변동요금징수 체계는 과거 혼잡세 이론의 초기부터 주장되어 왔지만 운전자가 교통정보와 요금정보를 실시간으로 제공 받고, 요금변동에 즉각적으로 대응할 수 있는 전자 요금지불체계를 필요로 하는 등 기술적인 한계를 갖고 있었다. 그러나, 최근 텔레매틱스 산업의 발전과 더불어 이러한 기술적 제약은 해결되어 가고 있다.

한편, 교통정보 제공이 가능해짐에 따라 제공정보에 따른 운전자의 경로선택 행동을 예측하는 것이 중요한 연구과제가 되고 있다. 왜냐하면, 동일한 통행에 있어서도 운전자마다 출발시간, 통행목적 등 처한 상황이 다르다면 소요시간이나 요금에 대해 운전자가 느끼는 정도가 같지 않기 때문이다.

동일 통행에 있어서 운전자의 출발시간이나 통행목적이라는 상황은 결국 운전자의 시간가치와 관련되고, 본 연구에서는 이러한 운전자 처한 상황을 지각패널티로 표현하고 있다. 지각패널티란 도착시간에 맞추어 도착하지 못해 운전자가 지불해야 할 비용으로, 상황에 따른 개인의 시간가치를 나타내기도 한다. <그림 1>은 여행시간의 확률분포를 통해 조기도착 패널티를 와 지각 패널티에 대해 설명하고 있다. <그림 1>의 (a)는 도착에 대한 지정시간 제약을 표시하고 있고, 지정된 시간 이전 혹은 이후에 도착하면, 도착시간의 크기에 비례하여 비용, 즉 지각패널티가 증대하게 됨을 보여주고 있다 (b)는 출발지로부터 목적지 도착까지에 필요한 여행시간의 확률분포를 보여주고 있다. (c)는 지각패널티와 확률분포의 곱을 표시한 것으로, 도착시간에 대응한 지연비용,



<그림 1> 조기도착 및 지각 패널티

도착비용의 기대치(또는 평균치)라고 할 수 있다. 도로 네트워크에 있어서 구간 여행시간의 변동분포를 알 수 있다면, 패널티는 여행자의 지정시각을 가능한 한 만족 시킴과 동시에 비용 최소화에 활용될 수 있을 것이라 생각된다(飯田 2002).

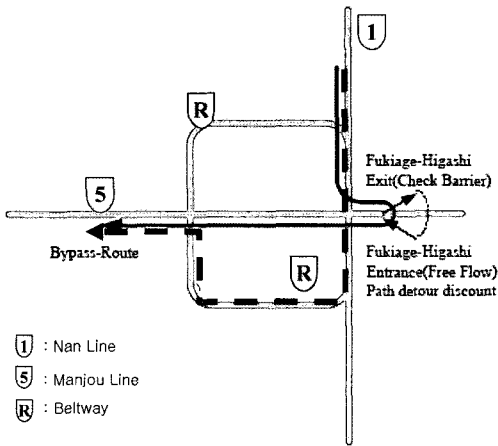
본 연구는 이러한 지각패널티와 변동요금을 변수로 하는 경로선택 모델과 동적 교통류 시뮬레이션을 이용하여 도로네트워크의 교통류를 분석하고자 한다.

2. 변동요금에 의한 교통류 관리 사례

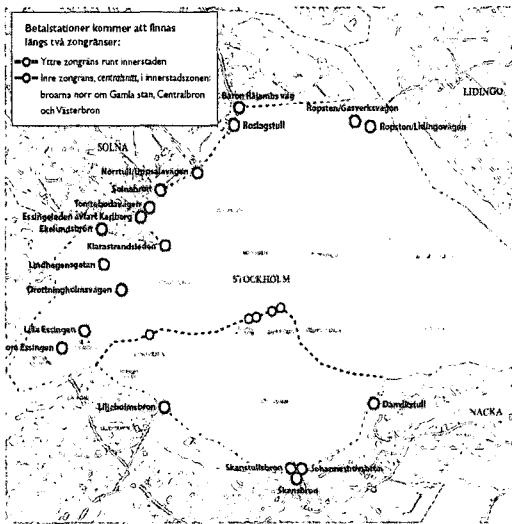
<그림 2>에서 보이는 나고야 고속도로에서는 지체구간의 교통류를 분산시키기 위해 지체구간 우회차량에 대해 요금 할인을 해주고 있다(Nagoya Expressway Public Corporation 2004).

또한, 유럽에서는 영국, 노르웨이, 스웨덴 등에서 혼잡요금 징수가 활발히 추진되고 있는데(Wersted 2004, Howell 2004, Murray-Clark 2004) 특히 최근, 스웨덴에서는 <그림 3>와 같이 스톡홀름시를 진입하는 차량에 대하여 혼잡통행료를 징수하기로 하였으며, <표 1>과 같이 시간대별로 변동 요금을 부과하기로 결정하였다(Carle 2004).

이외에도 싱가포르를 이미 사전에 조사된 교통수요를 기초로 하여 시간대별로 상이한 통행료를 도시 진입 차량에 부과하고 있고, 미국 플로리다 주에서도 'LeeWay'



〈그림 2〉 일본 나고야 고속도로의 지체구간 우회차량의 요금 할인



〈그림 3〉 스톡홀름시의 진입세 징수 지점

〈표 1〉 스톡홀름시의 시간대별 변동 혼잡요금

TIME	Charge
06:30 ~ 07:00	SEK 10
07:00 ~ 07:30	SEK 15
07:30 ~ 08:30	SEK 20
08:30 ~ 09:00	SEK 15
09:00 ~ 15:30	SEK 10
15:30 ~ 16:00	SEK 15
16:00 ~ 17:30	SEK 20
17:30 ~ 18:00	SEK 15
18:00 ~ 18:30	SEK 10
18:30 ~ 06:30	SEK 0

프로그램¹⁾이라는 이름 하에 리(Lee) 카운티 지역의 주요 교량 두 곳을 대상으로 하여 시간대별로 상이한 혼잡 통행료를 징수하고 있다.

3. 경로선택에 대한 기존 연구의 고찰

텔레매틱스와 같은 수준 높은 교통정보 제공서비스를 위해서는 제공되는 정보와 운전자의 경로선택 행동 간의 관계를 명백하게 밝히는 것이 중요하다. 이와 관련된 연구들을 다음과 같이 살펴보았다.

먼저, Iida(1999)는 정보의 정확성이 운전자의 경로선택 메커니즘에 끼치는 영향을 1OD 2Route인 간단한 도로 네트워크를 통해 실험한 결과, 운전자의 경로선택 행동 메커니즘은 정보의 제공 여부 및 제공된 정보의 정확도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 또, 운전자는 한번 형성된 자신의 경로 선택 메커니즘을 (정보의 정확도가 변해도) 쉽사리 바꾸려 하지 않는, 행동 메커니즘의 관성(inertia)이 있음을 밝혀냈다.

또한, 小川(1999)는 '운전자의 예측 소요시간과 실제 소요시간의 분포가 일치한다'라는 기존의 연구결과(Chang 1998, Hall 1983, yamasita 1996, Fujii 1999)에 근거하여 소요시간 정보의 정확도를 소요시간 정보와 운전자가 예측한 소요시간과의 차이로 정의하였고, 그 차이가 20% 이내일 때 소요시간 정보가 운전자의 경로선택 행동에 영향을 미친다는 연구결과를 제시하였다.

Karthik(1999)은 경로선택행동 메커니즘으로 compliance와 inertia를 고려한 multinomial logit model을 제안하였는데, 이를 통해, 운전자는 교통정보에 따라 경로를 선택하려는 경향(Compliance 메커니즘)과 운전자가 자신의 현 경로를 계속 고집하려는 경향(inertia 메커니즘)이 있음을 밝혀냈다. 이 연구결과는, 운전자는 혼잡이 증가하면 교통정보에 의해 경로를 선택하려는 경향이 강해지나, 교통정보의 신뢰성을 잃게 되면 교통정보를 좋아 경로를 변경하기보다는 자신의 현 경로를 유지하려는 경향이 커진다는 것을 의미한다. 이와 유사한 연구로서, Uno(2001)은 자기 자신의 경로에 어떤 심각한 문제가 있음에도 불구하고, 우회 경로에 대한 정보가 없을 때는 우회경로로의 경로 변경을 쉽게 결정하지 못하는 의사결정의 불능상태가 있음을 제시하였다.

Adler(1993)은 운전자의 경로선택 행동을 갈등과 동기 에 기초한 방법론(갈등이론)을 통해 분석하기 위한 시뮬레이

1) www.dot.state.fl.us/trafficoperations/ITS/ITSDeployment/Newsletter/issues/Nov04.htm#ITSFL

선을 제안하였다. 그들은 운전자의 경로선택은 통행목표에 의해 결정되며, 운전자의 경로 변경은 통행목표를 달성하기 위한 운전자의 판단에 의해서만 이루어진다고 생각하였다.

Nakayama(2000)는, 불확실성하에서 인간은 반드시 확률적으로 행동하는 것은 아니고, 자기의 경험에 의한 나름대로의 경로선택 원칙을 만들고 그것에 기초해 행동한다는, 즉 귀납적 추론에 기초한 경로선택 행동을 정식화하였다. 즉, 운전자는 교통환경의 변화가 적은 경우에는 경로 선택 시에 사고(思考)를 생략하고, 어떤 강한 믿음에 의한 행동이 동결되는 경로선택 행동을 모델링하였다.

시간제약과 관련된 경로선택 행동 연구로서Kuwabara(1985), Akamtsu(2000), Ran(1996)은 근무개시 시각 등의 시간제약이 있는 경우에는 통행비용을 지체 시간과 출발시각의 조정에 따른 스케줄 지연 시간으로 보고 이 통행비용이 최소가 되는 출발시각과 경로의 동시선택 문제를 정식화하는 연구를 수행하였다. 또한, 山下(1996)은 시간제약과 지각확률을 고려한 교통행동 분석으로서 공항 접근 교통을 대상으로 지각확률에 대한 지각회피 행동을 출발시각 선택행동을 통해 모델화했다. 飯田(1991)은 통근교통을 대상으로 지각확률을 고려한 출발시각 선택과 경로선택 행동을 모델화하였고, 변완희 외(2003)은 운전자의 처한 상황에 따라 시간가치가 달라지며, 따라서 동일한 교통상황 하에서도 경로선택 행동이 같지 않다는 것을 '지각패널티'에 의해 설명하였고, 이를 모델화하였다.

II. 지각패널티와 통행요금의 변화에 따른 교통류 분석시뮬레이션 분석

본 장에서는 시뮬레이션 상의 도로 네트워크에 패널티가 높은 운전자 비율(이하, 고패널티 운전자 비율)과 요금을 변화시키고, 그에 따라 달라지는 교통류의 변화를 분석하고 있다.

1. 경로선택 모델과 교통류 시뮬레이션

본장에서는 패널티를 고려한 경우와 패널티를 고려하지 않은 경우에 대한 도로 네트워크에서의 교통류 상황을 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였고, 통행요금과 패널티가 높은 운전자의 구성비율이 교통류에 미치는 영향을 분석하고 있다.

도로네트워크 내의 지각패널티가 높은(낮은) 운전자 비율과 통행요금의 변동, 그리고 이들 변수의 변화에 따

른 교통류의 변화 분석은 '변완희 외Byun(2003)'이 제시한 경로선택모델 모델과 동적 교통류 시뮬레이션을 적용하고 있다. 이 연구에서 피험자의 경로선택 행동 데이터는 앙케이트를 통해 수집하였고, 앙케이트에서 가정하고 있는 도로 네트워크는 단일 OD에 두 개의 경로로서, 경로 1은 유료의 고속도로로, 경로 2는 무료의 일반도로를 가정하고 있다.

앙케이트에서 피험자에게 두 개의 시나리오가 주어지는데, 시나리오 1의 피험자는 시나리오 2의 피험자보다 높은 시간 가치를 갖도록 하는 것이 본 시나리오 구성의 목표가 된다.

시나리오 1 :

해외출장을 위해 60분 이내에 공항에 도착해야만 하는 상황(지각패널티가 높은 피험자)

시나리오 2 :

60분 후에 친구를 백화점 1층 매장에서 만나기로 한 상황(지각패널티가 낮은 피험자)

앙케이트는 위의 두 시나리오에서 제시하고 있는 바와 같이 지각패널티의 크기가 서로 다른 상황 하에서 피험자가 <표 2>의 평균소요시간, 최대소요시간, 통행요금 정보에 의해 경로를 선택하도록 하였다. 여기서, 최대소요시간은 '평균소요시간+최대지연시간'으로서, 두 값을 통해 최대소요시간의 확률적 분포를 나타내고자 하였다. 단, 본 연구는 조기도착패널티를 고려하지 않기 때문에 최대소요시간은 평균의 오른쪽에 위치한 분포만을 의미하게 된다.

변완희 외(2003)가 제시한 경로선택 이 모델과 시뮬레이션은 그림 (4)에서 제시되고 있는 일본 한신고속도로의 이케다선과 176번 국도를 대상으로 하고 있다. 이들 도로의 거리는 대략 10km로 비슷하며, 소요시간은 중간지체에서 이케다선은 40분, 176번 국도는 45분 정도이다. 또, 통행요금은 지역마다 약간의 차이는 있지만,

<표 2> 피험자 제공정보

경로	정보	평균소요 시간(분)	최대지연 시간(분)	통행요금 (엔)
고속도로 (Expressway)		35, 45, 55	5, 10, 15	0, 500, 1000
일반도로 (Highway)		45, 55, 65	5, 10, 15	-

구간별로 500엔 혹은 700엔을 징수하고 있다. 모델은 운전자가 처한 상황에 따라 시간가치가 다르다는 사실을 밝히었고, 이로부터 동일한 교통상황 하에서 지각패널티가 높은 운전자와 낮은 운전자간의 경로선택 행동의 차이를 잘 설명해주고 있다. 그러나, 이 모델은 운전자가 처한 상황에 따른 운전자의 경로선택 행동의 차이를 밝히는 것을 주요한 목적으로 하고 있기에, 운전자가 처하는 모든 상황을 시간가치로서 설명하지는 못한다는 한계를 갖고 있다. 이 모델을 식(1)~식(5)에서 보여주고 있다. 모델을 위해 분석방법은 로짓모형을 이용하였으며, 식(1)~식(3)은 지각패널티를 고려한 모델, 식(4)와 식(5)는 지각패널티를 고려하지 않은 모델이다. 지각패널티를 고려한 모델은 지각패널티의 크기가 서로 다른 시나리오별로 피험자의 개별행태 데이터를 로짓분석한 것이고, 지각패널티를 고려하지 않은 모델은 시나리오 1과 2의 데이터를 모두 모아 함께 로짓분석한 결과이다.

〈표 3〉에서 제시한 바와 같이 모델의 파라미터 값은 최우추정법에 의해 구하며, 변수의 유의성 검정은 왈드 검정, 모델의 유의성 검정은 우도비 카이제곱 검정을 시행하였다. 또한, 이들 모델들의 적합도 비교는 Akaike 정보기준(Akaike's Information Criterion, AIC)을 사용하였고, 모델의 추정 정확도를 지표로 평가하기 위한 방법인 Receiver operating characteristic 곡선으로부터 구해지는 C 통계량을 이용해 비교 평가하였다

•지각패널티를 고려한 모델

$$U_{r,m} = \theta_0 + \sum_{k=1}^K [\delta_m \theta_{k, PB} + (1 - \delta_m) \theta_{k, PS}] x'_{k,m} \quad (1)$$

$$U_{1,m} = 0.2990 + \delta_m (-0.1443x'_{1,m} - 0.00127x'_{2,m}) + (1 - \delta_m)(-0.0747x'_{1,m} - 0.00356x'_{2,m}) \quad (2)$$

$$U_{2,m} = \delta_m (-0.1443x'_{1,m}) + (1 - \delta_m)(-0.0747x'_{2,m}) \quad (3)$$

〈표 3〉 모델의 변수 파라미터

모델	파라미터	추정값	검정 통계량	Pr > ChiSq
1	θ_0	0.2990	2.3597	0.1245
	$\theta_{2, PB}$	-0.1443	52.6596	0.0001
	$\theta_{3, PB}$	-0.00127	12.0296	0.0005
	$\theta_{2, PS}$	-0.0747	35.5981	0.0001
	$\theta_{3, PS}$	0.00356	63.1217	0.0001
2	θ_0	0.2614	2.0536	0.1518
	θ_1	-0.0887	86.0125	0.0001
	θ_2	-0.00197	51.4014	0.0001

•지각패널티를 고려하지 않은 모델

$$U_{1,m} = 0.2614 - 0.0887x'_{1,m} - 0.00197x'_{2,m} \quad (4)$$

$$U_{2,m} = -0.0887x'_{1,m} \quad (5)$$

여기서,

$U_{r,m}$: 개인 m의 경로 r에 대한 효용

$x'_{k,m}$: 개인 m의 경로 r에 대한 k항의 설명변수,

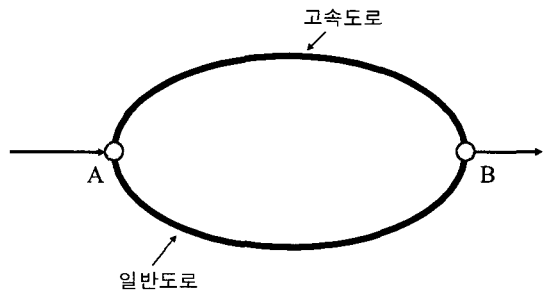
k=1은 최대지각소요시간, k=2는 통행요금

δ_m : 개인m의 패널티를 설명하는 2식 변수

$\delta_m=0$: 저패널티, $\delta_m=1$: 고패널티

변수의 유의성 검증에서 평균소요시간은 통계적으로 유의하지 않은 결과를 보였고, 통행요금과 최소소요시간은 유의한 결과를 나타내었다. 여기서, 최대소요시간 대신 최대지각소요시간을 적용한 이유는 일반적으로 운전자는 목적지까지의 최소소요시간을 알 수 없고, 대신 운전자 자신이 알고 있는 정보와 경험에 기초하여 최소소요시간을 찾기 때문이다(小川Kogawa 1999).

시뮬레이션에서 도로네트워크는 〈그림 4〉와 같이 고속도로와 일반도로를 가정하고 있다. 양도로의 특성은 〈표 4〉와 같다.



〈그림 4〉 대상 도로네트워크

〈표 4〉 경로 특성

구성	고속도로	일반도로
통행요금(엔)	0엔, 500엔, 1000엔	무료
거리(km)	10 km	10 km
차선수	2	2
임계밀도(대/km)	100 대/km	100 대/km
포화밀도(대/km)	300 대/km	300 대/km
병목	없음	있음

또, 운전자에 대해서는 지각패널티가 높은 운전자와 지각패널티가 낮은 운전자 등 2개의 그룹만이 존재한다고 가정하였다.

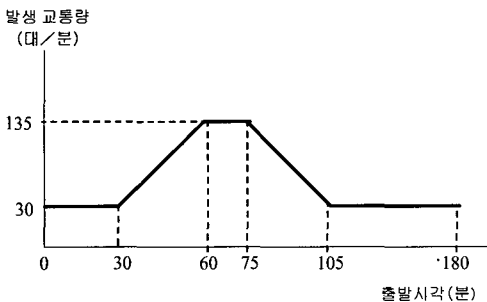
또, 시뮬레이션의 출발지 발생교통량의 시간대별 분포는 <그림 5>와 같이 주어지며, 소통 원활한 상황과 혼잡한 교통상황이 모두 나타날 수 있도록 사다리꼴 형태의 교통수요를 적용하고 있다.

시뮬레이션에서 교통류 처리 및 분석은 <그림 6>과 같이 적용이 용이하면서 교통류(특히, 교통혼잡) 현상을 잘 표현하는 블록밀도법을 적용하였다. 블록밀도법의 적용을 위해 도로네트워크는 10개의 블록으로 분할하였고, 각 블록 내의 교통 변수, 즉 밀도, 속도 등을 동적으로 처리하였다(宇野1997). <그림 6>은 분할된 도로 블록 중에서 임의의 한 블록을 취하여 표현한 것이며, 식(6)은 시간 t , 블록 j 의 평균속도를 표현한 식으로서, 자유류 속도와 밀도로부터 평균속도를 도출하는 언더우드식을 적용하고 있다.

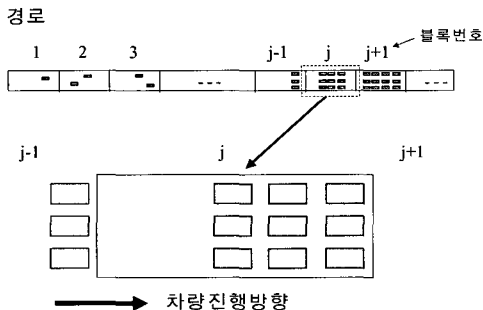
$$u_j(t) = u_f \cdot e^{-\frac{k_j(t)}{k_c}}, \text{ 단, } k_j(t) < k_c \text{의 경우}$$

$$u_j(t) = u_f, \tag{6}$$

여기서,



<그림 5> 발생교통량의 시간대 분포



<그림 6> 블록밀도법에 의한 교통류의 표현

- $u_j(t)$: 시간 t , 블록 j 에서의 속도
- u_f : 자유류 속도
- $k_j(t)$: 시간 t , 블록 j 에서의 밀도
- k_c : 임계밀도

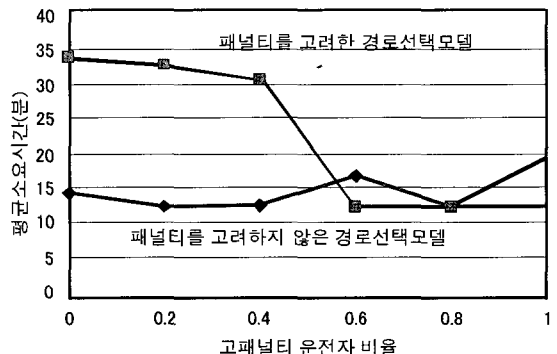
여기서, 자유류속도는 서비스 수준 A에서 관측되는 속도로서, 본 연구에서는 100km/h로 가정하였다. 또한, K_c 는 100대/km로 가정하였다.

2. 패널티 고려 유무에 대한 교통류 시뮬레이션 비교 분석

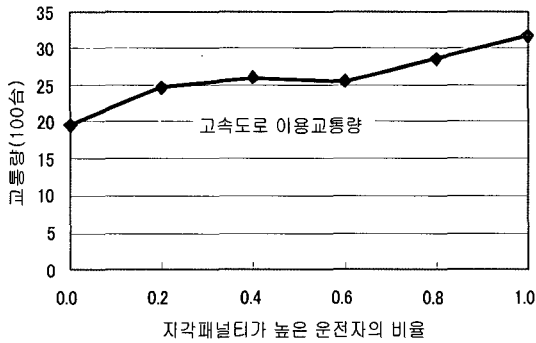
본 절에서는 지각패널티를 고려한 경로선택 모델과 지각패널티를 고려하지 않은 모델을 시뮬레이션을 통해 비교하였다.

<그림 7>은 지각패널티를 고려한 모델과 고려하지 않은 모델에 의한 교통류 시뮬레이션 결과를 제시하고 있는데, 시뮬레이션에서 고속도로의 통행요금은 500 엔, 고패널티 운전자의 구성비율은 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 변화시키며 도로 네트워크의 평균소요시간을 관찰한 것이다. 이 그림에 의하면 지각패널티를 고려하지 않은 경로선택 모델에서는 고패널티 운전자 비율이 증가해도 평균소요시간은 큰 변화를 보이지 않고 있다. 이와 같은 결과는 당연한 결과로서 이 모델은 경로선택에 있어서 운전자의 지각패널티의 크기를 고려할 수 없기 때문이다. 다만, 여기서 보이는 평균소요시간의 작은 변화들은 로짓모델의 결과로 나타난 확률 값들을 정량화하는 과정에서 생겨난 것이다.

또한, <그림 7>은 지각패널티를 고려한 경로선택 모델은 고패널티 운전자 비율이 증가하면서 전체적으로 평균소요시간이 감소하고 있음을 보여주고 있는데, 이



<그림 7> 지각패널티 고려 유무에 따른 교통류 시뮬레이션 결과



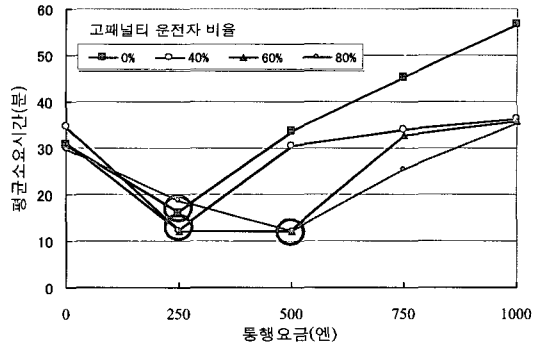
〈그림 8〉 고패널티 운전자 비율과 고속도로 이용교통량의 변화

와 같은 결과는 〈그림 8〉의 ‘고패널티 운전자 비율과 고속도로 이용교통량의 관계 그래프를 통해 설명할 수 있다. 〈그림 8〉을 보면, 고패널티 운전자 비율이 증가하면서 고속도로의 이용교통량은 증가하고 있다. 이것은 그래프 밑면 오른쪽으로 갈수록, 지각패널티가 높은 운전자가 도로 네트워크 내에 증가하게 되고, 이로 인해 네트워크 전체적으로는 요금에 대한 저항이 약해져서 많은 운전자들이 고속도로를 이용하였기 때문이다.

본 절에서는 지각패널티를 고려한 모델이 지각패널티의 크기가 서로 다른 운전자들이 혼재하고 있는 실제 네트워크의 교통류 상황을 보다 자세하게 표현할 수 있다는 것을 지각패널티를 고려하지 않은 모델과 비교함으로써 제시하였다.

3. 지각패널티와 요금에 의한 교통류 시뮬레이션 분석

본 절에서는 도로 네트워크의 고패널티 운전자 비율과 요금을 다양한 크기로 적용하고, 이때의 교통류의 변화를 시뮬레이션 분석하였다. 또한, 이를 통해 요금조정에 의한 교통류 관리 방안을 제시하고 있다. 〈그림 9〉는 고패널티 운전자 비율과 통행요금을 다양하게 변화시켜가며 수행한 시뮬레이션 결과로서, 도로 네트워크 전체 평균소요시간을 제시하고 있다. 그림을 보면, 통행요금이 낮은 0엔과 250엔의 경우에는 고패널티 운전자 비율간의 평균소요시간이 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나, 통행요금이 500엔 이상의 높은 경우에는 이들간의 차이가 커진다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 통행요금이 작으면(250엔 이하), 지각패널티가 높은 운전자나 지각패널티가 낮은 운전자 모두 요금보다는 소요시간에 더 큰 영향을 받기 때문에 고패널티 운전자 비율의 차이가 경로선택에 큰 의미를 갖지 못하며, 반대로



〈그림 9〉 통행요금과 고패널티 운전자 비율에 따른 시뮬레이션 결과

통행요금이 높으면(500엔 이상), 지각패널티가 높은 운전자와 낮은 운전자의 요금에 대해 느끼는 정도, 즉 요금저항의 정도가 크게 다르므로, 이때는 고패널티 운전자 비율의 차이가 크게 나타나기 때문이다. 다시 말해, 통행요금이 높아지면 고패널티 운전자와 저패널티 운전자간의 요금저항이 크게 달라져 선택행동 역시 차이가 난다고 할 수 있다.

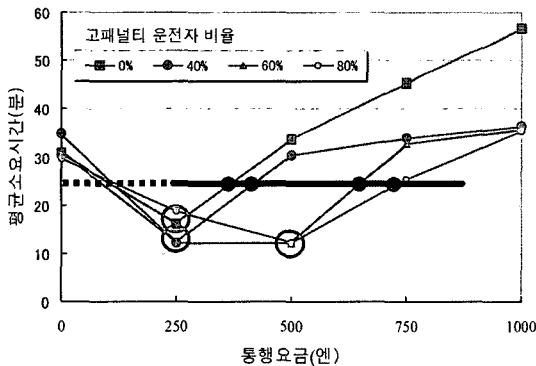
한편, 〈그림 9〉는 통행요금이 증가함에 따라 평균소요시간의 변화가 있음을 보여주고 있다. 이러한 결과는 처음 요금이 0엔일 때 고속도로를 이용하던 운전자들의 일부가 요금의 증가와 함께 일반도로로 전환함으로써 나타나는 교통량 분산의 정효과와, 계속해서 요금이 증가할 때 일반도로 이용자 역시 계속 증가하여, 결국에는 혼잡으로 이어지는 부정적 효과를 보여주고 있는 것이다.

가령, 고패널티 운전자 비율이 40% 인 경우를 보자. 250엔을 기준으로 평균소요시간의 감소와 증가를 보이고 있다. 이것은, 250엔 까지는 요금 증가로 인한 일반도로에의 이용자 증가가 분산이라는 정효과로 나타난 것이고, 250엔 이후부터는 일반도로에의 이용자 집중이라는 부효과로 나타나고 있음을 보이고 있는 것이다. 즉, 요금변동에 따라 도로네트워크의 교통류 상태가 다양한 변화를 가질 수 있음을 보여주고 있는 것이다.

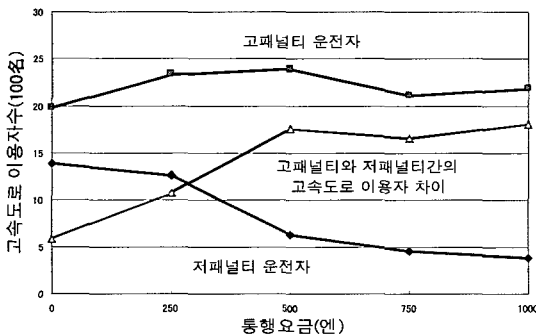
〈그림 10〉을 보면 고패널티 운전자 비율마다 요금과 평균소요시간은 오목곡선(Concave Curve)의 형태를 갖는데, 고패널티 운전자 비율이 높아질수록 이 오목곡선의 형태는 넓어지고 있음을 볼 수 있다. 다시 말해, 고패널티 운전자 비율이 높아짐에 따라 ‘동일 평균소요시간’들은 오른쪽으로 이동(요금이 높아짐) 하였다. 이것은 고패널티 운전자 비율과 요금이 네트워크 교통류 상태와 어떤 관계성이 있음을 보여주는 것이라고 생각할 수 있다.

통행요금이 운전자의 경로선택에 미치는 영향을 좀더 자세하게 파악하기 위해, 고패널티 운전자 비율이 60%인 경우에 대해, 통행요금 별 고속도로 이용교통량의 변화를 살펴보고, 이 시뮬레이션 결과를 <그림 11>에 제시하고 있다. 그림을 보면 고패널티 운전자들은 통행요금이 높아져도 큰 변화 없이 고속도로를 이용하고 있고, 저패널티 운전자들은 (일반도로로 전환하면서) 고속도로 이용자가 현저히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 통행요금이 높아짐에 따라, 요금에 민감한 저패널티 운전자가 요금에 상대적으로 덜 민감한 고패널티 운전자보다 더 많이 일반도로로 전환했기 때문이다.

본 절에서는 통행요금, 고패널티 운전자비율 그리고 평균소요시간간의 관계를 시뮬레이션 분석을 통해 살펴보고 분석결과, 동일한 통행요금 체계일지라도, 도로 네트워크 내의 고패널티 운전자 비율이 다를 경우에는 요금저항의 차이로 인해 교통류 상태는 동일하지 않다는 것을 확인하였다. 또한, 네트워크의 교통류 상태에 대해 고패널티 운전자 비율과 요금수준간에는 관계성이 있음을 알 수 있었다.



<그림 10> 동일한 평균소요시간에서의 고패널티 비율 별 요금변화



<그림 11> 통행요금 변화와 패널티 크기별 고속도로 이용자수

III. 최소평균소요시간에 대한 고패널티 운전자 비율과 통행요금의 통계 분석

본 장에서는 최소평균소요시간에 대한 고패널티 운전자 비율과 통행요금의 관계를 스피어만 순위상관계수 분석 및 회귀분석 등의 통계적 방법을 이용하여 분석하고 있다.

고패널티 운전자 비율 별로 통행요금에 따른 평균소요시간을 <표 5>에서 제시하고 있다. 여기서, 음영으로 표시한 부분이 각 고패널티 운전자 비율에서 통행요금에 대해 평균소요시간이 최소로 나타난 결과이다. 이 결과는 도로네트워크 내에 고패널티 운전자 비율이 증가할 경우, 당해 도로네트워크의 최소 평균소요시간을 기대하기 위해서는 요금수준도 함께 올려야 한다는 것을 보여주고 있다. 따라서, 이 최소평균소요시간에 대한 고패널티 운전자 비율과 통행요금의 관계를 명확히 파악할 수 있다면, 변동요금을 통한 도로네트워크의 교통관리가 가능할 것이라고 생각한다.

이러한 관계 분석을 위해 먼저, 식(7)의 스피어만(Spearman) 순위상관계수를 이용해 최소 평균소요시간에 대해 고패널티 운전자 비율과 통행요금의 관계성을 분석하였다.

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n n^2 - 1} \quad (7)$$

여기서,

r_s : 순위상관계수

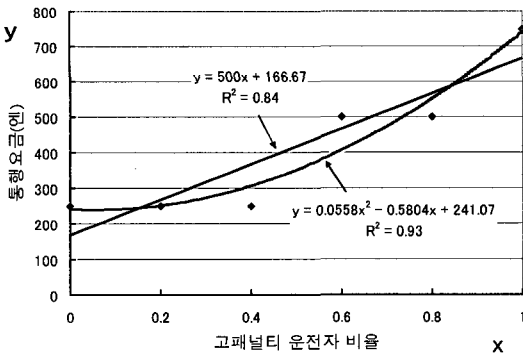
d_i : i 번째 관측 값에 대한 고패널티 운전자 비율 순위와 통행요금 순위의 차이

n : 관측데이터 수

분석결과, 순위상관계수는 0.943이고 유의수준 0.05에서의 귀무가설 기각경계는 0.829이므로 순위상관계수

<표 5> 고패널티 운전자 비율과 통행요금에 따른 평균소요시간

통행요금 \ 비율	0엔	250엔	500엔	750엔	1000엔
0%	30.8	16.1	33.7	45.3	56.7
20%	32.4	12.2	32.8	39.4	43.2
40%	34.8	12.2	30.5	34	36.4
60%	31.4	12.2	12.2	32.8	35.8
80%	29.7	18.6	12.2	25.4	35.4
100%	35.1	17.2	19.2	12.2	31.4



〈그림 12〉 최소평균소요시간에 대한 고패널티 운전자 비율과 통행요금의 회귀분석

0.943은 유의한 결과라고 할 수 있다. 즉 최소평균소요 시간에 대해 고패널티 운전자 비율과 통행요금간에는 관계성이 있다고 할 수 있다.

또, 최소 평균소요시간에 대한 고패널티 운전자 비율과 통행요금의 관계를 〈그림 12〉와 같이 회귀분석하였다.

회귀분석은 단순선형회귀분석과 중회귀분석을 수행하였고 분석 결과는 식(8)과 식(9)에서 제시하고 있는 바와 같이 선형회귀분석의 결정계수는 0.84, 2차식 중회귀분석의 결정계수는 0.93으로 나타났다.

$$y = 500x + 166.67, R^2 = 0.84 \quad (8)$$

$$y = 0.0558x^2 - 0.558x + 241.07, R^2 = 0.93 \quad (9)$$

따라서, 본 연구에서 제시한 시뮬레이션 사례에 대해서는 2차식의 중회귀분석 결과가 단순선형 회귀분석 결과에 비하여 적절한 것으로 나타났다. 식(9)는 같이 최소소요시간에 대한 고패널티 운전자 비율(x)와 요금(y)의 관계를 알 수 있다면 보다 발전된 교통류 관리가 가능할 수 있음을 보여주고 있다고 생각한다.

IV. 결론

본 연구는 교통정보와 요금의 변화가 교통류에 미치는 영향을 시뮬레이션을 이용하여 분석하였고, 이로부터 변동요금에 의한 교통류 관리 방안의 가능성을 제시하였다.

시뮬레이션 분석에서는 고패널티 운전자와 저패널티 운전자간의 시간가치가 달라 요금에 대한 저항이 다르다는 것과, 통행요금이 증가하면 운전자들의 요금저항 역시 증가하여 고속도로에서 일반도로에의 이용자 전환이 촉진되는 것

을 확인하였다. 또한, 통행요금, 고패널티 운전자비율과 평균소요시간의 관계 분석을 통해서, 동일한 통행요금 체계 일지라도 도로 네트워크 내의 고패널티 운전자 비율이 다를 경우는 교통류 상태 역시 같지 않다는 것을 확인하였다.

시뮬레이션의 도로네트워크는 고패널티 운전자 비율마다 평균소요시간을 최소로 하는 통행요금이 어떤 관계성을 보이는데, 이것을 확인하기 위해 스피어만 순위 상관계수와 회귀분석 등 통계적 분석을 수행하였고, 그 결과로서, 최소평균소요시간에 대한 고패널티 운전자 비율과 통행요금에 대한 회귀 식을 도출하였다.

본 연구는 지각패널티와 통행요금을 요인으로 하는 경로선택 모델을 통해, 교통수요뿐만 아니라 운전자의 상황까지 고려한 보다 합리적이고 효율적인 변동요금 정책에 기여할 수 있을 것이다.

그러나, 실제 운전자는 소요시간(소통상황)이나 요금, 지각패널티에 의해 경로를 선택하지만, 자신의 출발시각을 조정하기도 하며, 경제적 사회적 여건과 같이 변하지 않는 고유한 시간가치 역시 중요한 경로선택의 요인이 된다. 따라서, 본 연구결과를 보다 발전시키기 위해서는 운전자의 고유한 시간가치와 출발시각의 조정이 함께 고려된 모델 개발이 향후 연구 과제로서 필요하다고 생각한다.

참고문헌

1. 변완희·飯田恭敬·김주현·宇野伸宏(2003), 운전자의 패널티 차이가 경로선택행동에 미치는 영향의 분석 및 경로선택 모델의 개발, 대한토목학회지.
2. Akamtsu, T. and Kuwahara, M. (2000), Dynamic Network Equilibrium Model of Simulations Route/Departure Time Choice for a Many-to-One OD Pattern, submitted to Transportation Research B.
3. Chang, G.L. and H.S., Mahmassani(1998), Travel Time Prediction and Departure Time Adjustment Behavior Dynamics in a Congested Traffic System, Transportation Research, Vol, 22B, pp.217~232.
4. Fujii, S, T. Morita, R, Kitamura and M. Sugiyama.(1999), An Emprical Analysis of the Heterogeneity in Attitude toward Uncertainty and Development of a Route-Choice Model for Demand Forecasting, Infrastructure Planning Review, No. 16.
5. Hall, R. W.(1983), Travel Outcome and

- Performance the Effect of Uncertainty on Accessibility, *Transportation Research*, Vol.17B, pp.275~290.
6. Jeffrey L. Adler, Wilfred W.Recker, Michael G. McMally(1993), A Conflict Model and Interactive Simulator(FASTCARS) for Predicting Enroute Driver Behavior in Response to Real to Real-Time Traffic Condition Information, Published in *Transportation*, 20, pp.83~106.
 7. Karthik K. Srinivasan, Hani S. Mahmassani(1999), Modeling Inertia and Compliance Mechanisms in Route Choice Behavior under Real-Time Information, *Transportation Research Board and publication in Transportation Research Record*.
 8. Kristian Wærsted(2004), Urban Road Tolling-the Norwegian experience, *Stockholm City Council Seminar*.
 9. Kuwahara, M.(1985), A Time-Dependent Network Analysis for Highway Commute Traffic in a Single Core City, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, Dissertation Series, UCB-ITS-DS-85-2.
 10. Magnus Carle(2004), Congestion Charging in Stockholm, *Stockholm City Council Seminar*.
 11. Malcolm Murray-Clark(2004), Central London Congestion Charging Design & Impact, *Stockholm City Council Seminar*.
 12. Michael Howell(2004), Plans for Congestion Charging in Edinburgh, *Stockholm City Council Seminar*.
 13. Nagoya Expressway Public Corporation(2004), www.nagoya-expressway.or.jp/topic/ninka16/fukiagee tc.html.
 14. Nobuhiro Uno, Yasunori Iida, Seiichiro Kawaratani and Masumi Suganuma.(2001), An Analysis of Potential of Providing Information on Traffic Accident to Enhance Travel Time Reliability, *INSTR*, pp.65-68.
 15. Ran, B., Hall, R.W. and Boyce, D.E.(1996), A Link-Based Variation Inequality Model for Dynamic Departure Time/Route Choice, *Transportation Research 30B*, pp.31~46.
 16. Shoichiro Nakayama and Ryuichi Kitamura (2000), A Route Choice Model with Inductive Learning, *TRB 00733*, p.10.
 17. Yamashita, S. and K. Kuroda.(1996), Uncertainty Evaluation and Delay Avoidance in Mode Choice, *Journal of Infrastructure Planning and Management, Japan Society of Civil Engineers*, No.536, IV-31, pp.59-68.
 18. Yasunori Iida, Nobuhiro Uno and Tadashi Yamada(1999), Experimental Analysis of Effects of Travel Time Information on Dynamic Route Choice Behavior, In *Behavior and Network Impacts of Driver Information Systems*(Emmerink, R. and Nijkamp, P.eds), Ashgate.
 19. 飯田恭敬(2002), 道路交通情報ビジネス発展への期待, *警察学論集*第55巻第7号, pp.1~16.
 21. 飯田恭敬, 柳澤吉保, 内田敬(1991), 通勤交通の経路选择と出発時刻分布の同時推定法, *土木計画学研究论文集*, No.9, pp.93~100.
 22. 宇野 伸宏(1997), 室内実験にもとづいた交通情報提供下での経路选择行動分析と効果平価分析, *京都大学, 博士学位論文*, pp.161~166.
 23. 山下智志, 黒田勝彦(1996), 交通机关の定時性迟刻回避形效用関数, *土木学会论文集*, No.536/IV-31, pp.59~68.
 24. 小川圭一(1999.8.4), 交通情報の提供による経路选择行動への影响, *土木計画学会学术研究会, ITS研究ワークショップ*.

✉ 주 작 성 자 : 변완희

✉ 논문투고일 : 2005. 2. 12

논문심사일 : 2005. 3. 31 (1차)

2005. 6. 24 (2차)

2005. 9. 1 (3차)

심사판정일 : 2005. 9. 1

✉ 반론접수기한 : 2006. 2. 28