

# 중력모형을 이용한 온실가스 배출량추정 및 탄력성분석

A Green House Gas Emission Estimation Based on Gravity Model and Its Elasticity

## 임 용 택

(전남대학교 물류교통학전공 교수)

### 목 차

- |                       |                      |
|-----------------------|----------------------|
| I. 서론                 | 5. 중력모형의 수요탄력성       |
| II. 기존 온실가스 배출모형      | IV. 추정방법의 평가 및 탄력성분석 |
| III. 온실가스 배출량 추정식     | 1. 분석대상              |
| 1. 온실가스 추정 기본식        | 2. 분석결과              |
| 2. 통행비용 계산            | V. 결론 및 향후연구         |
| 3. 중력모형을 이용한 온실가스 추정식 | 참고문헌                 |
| 4. 배출가스 탄력성           |                      |

Key Words : 온실가스, 배출량추정모형, 중력모형, 민감도, 탄력성, 온실가스통행료

Green House Gas, Emission Model, Gravity Model, Sensitivity, Elasticity, Greenhouse Gas Pricing

### 요 약

교통부문의 지속가능성(sustainability)을 유지하기 위하여 대중교통중심의 도시개발(transit oriented development, TOD), 자전거나 보행 등 녹색 교통수단의 이용활성화, 그리고 차량운행시 배출되는 온실가스(green house gas)를 감축하는 정책 등 다양한 방안들이 제시되고 있다. 이중 온실가스 배출량에 대한 다양한 연구들이 제시되고 있으나, 교통측면의 행태적인 분석에는 한계를 가지고 있다. 본 연구는 교통측면에서 좀 더 행태적인 측면을 고려한 온실가스 배출량 추정식을 제시하는 것이 연구의 목적이다. 즉, 특정 존에서 발생하는 차량으로 인한 온실가스 배출량을 기종점간 통행수요(travel demand for each OD pair)와 통행거리(travel distance)를 반영하여 결정한다. 여기서 기종점간 통행수요는 통행비용의 함수로 중력모형(gravity model)을 이용하여 구해지며, 통행거리는 평균 통행거리가 아닌 기종점간 실제 통행거리를 고려한다는 점이 기존 연구와 차이가 된다. 또한, 본 연구에서 제시하는 온실가스 추정식의 적용성과 활용성을 검토하기 위하여 통행비용에 대한 온실가스 배출량의 민감도(sensitivity)와 탄력성(elasticity)을 유도하며, 정책적 측면에서 온실가스를 감축하기 위한 온실가스 통행료(green house gas pricing)의 부과 효과에 대해서도 검토해 본다.

Many policies, such as transit-oriented development, encouraged use of bicycle and pedestrian, reduction of green house gas (GHG) and etc., have been deployed to support transport sustainability. Although various studies regarding GHG were presented, no one has yet adequately explained the behavior of travelers. This paper proposes a GHG emission model by highlighting its sensitivity, elasticity with regard to such travel cost as travel time, travel fare, and GHG pricing, introduced to reduce the amount of GHG in transportation system. For better estimation of GHG, the proposed model adopts (1) a production-constrained gravity model and (2) the travel distance from the origin and the destination (OD). The gravity model has a merit that it considers travel pattern between OD pairs. The model was tested with an example, and the promising results confirmed its validation and applications.

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2010-0029445)

## I. 서론

교통부문의 지속가능성(sustainability)을 유지하기 위한 접근방법으로 대중교통중심의 도시개발(transit oriented development, TOD)과 자전거나 보행등 녹색 교통수단의 이용활성화, 그리고 차량운행시 배출되는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 등 온실가스(green house gas)를 감축하는 정책들이 주로 대두되고 있다. 이중 온실가스 배출량은 지속가능한 교통뿐만 아니라, 1997년 채택되고 2005년 발효된 교토의정서(Kyoto Protocol)에 의거 선진국과 개발도상국간의 온실가스 감축목표를 설정하고 이를 이행할 의무를 제시하고 있다. 따라서, 이런 온실가스 감축목표를 달성하기 위해서는 먼저, 정확한 온실가스 배출량을 산정하는 방법이 제시되어야 하는데, 현재 주로 사용되고 있는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 방법은 교통측면의 행태적인 분석에 한계를 가지고 있다. 즉, IPCC가 제안한 3가지 방법들(Tier 1,2,3)은 단순히 온실가스 배출계수에 연간 연료소비량이나 평균 주행거리를 곱하여 배출량을 계산하는 단순한 방법에 의존하고 있다(기존 IPCC 방법과 한계에 대해서는 제2장에서 구체적으로 기술한다). 그러나, 실제 온실가스 배출량은 평균 통행거리가 아닌 기종점간의 통행거리에 비례하고, 차종별 및 차속별로도 달라지기 때문에 이를 고려할 수 있는 방법론이 요구되고 있다(실제 링크 통행거리를 고려하여 온실가스 배출량을 산정하는 방법론은 한국개발연구원(2008)에서 제시하고 있으나, 본 연구와는 차이가 있다).

본 연구는 교통측면에서 좀 더 행태적인 측면을 고려한 온실가스 배출량 추정식을 제시하는 것이 연구의 목적이다. 즉, 특정 존에서 발생하는 차량으로 인한 온실가스 배출량을 기종점간 통행수요(travel demand for each OD pair)와 통행거리(travel distance)를 반영하여 결정한다. 여기서 기종점간 통행수요는 통행비용의 함수로 중력모형(gravity model)을 이용하여 구해지며, 통행거리는 평균 통행거리가 아닌 기종점간 실제 통행거리를 고려한다는 점이 기존 연구와 차이가 된다. 본 연구에서 제안하는 온실가스 배출량 추정식은 IPCC의 Tier 3와 유사하나, Tier 3이 연간 평균 주행거리를 적용하는데 반해, 본 연구는 실제 통행거리를 고려하며, 통행수요도 중력모형을 이용하여 좀 더 교통 현실에 적합하게 구한다는 점이다.

또한, 본 연구에서 제시하는 온실가스 추정식의 적용

성과 활용성을 검토하기 위하여 통행비용에 대한 온실가스 배출량의 민감도(sensitivity)와 탄력성(elasticity)을 유도하며, 정책적 측면에서 온실가스를 감축하기 위한 온실가스 통행료(green house gas pricing)의 부과 효과에 대해서도 검토해 본다. 온실가스는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 이산화질소(N<sub>2</sub>O) 등 다양하게 있으나, 대부분의 온실가스가 이산화탄소이기 때문에 본 연구에서는 이산화탄소만을 온실가스로 고려한다. 즉, 본 연구에서 온실가스란 이산화탄소만을 의미한다. 다음 장에서는 IPCC에서 제안하는 온실가스 배출량 추정식과 그 한계를 살펴보고, 제Ⅲ장에서 본 연구에서 제안하는 새로운 온실가스 배출량 추정식을 설명하고 추정식에 대한 민감도와 탄력성을 유도한다. 또한, 통행수요에 대한 탄력성도 검토해 본다. 제Ⅳ장에서는 본 연구에서 제시한 온실가스 배출량 추정식을 간단한 예제를 통하여 평가해 보며, 제Ⅴ장에서는 결론 및 향후 연구과제에 대하여 기술한다.

## II. 기존 온실가스 배출모형

현재 주로 사용되는 온실가스 배출량 추정모형을 제시한 IPCC는 1988년 11월 유엔 산하 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 기후변화와 관련된 전 지구적인 환경 문제에 대처하기 위해 각각 3천여명의 환경관련 전문가들로 구성된 정부간 기후변화 협의체이다. 그동안 IPCC는 국제적 온실가스 배출량의 추정 기준을 정립한 가이드라인(guideline)을 제시하였으며, 현재 미국·일본·호주·유럽 등지의 국가에서 온실가스 배출량을 산정하는데 IPCC guideline을 사용하고 있다. 현재 IPCC guideline에서 제시하는 이산화탄소 배출량 산정 방법은 활용데이터와 분류 기준에 따라서 각각 Tier1, Tier2, Tier3 으로 구분되며 각 국가별로 보유하고 있는 배출계수와 이와 관련된 활동도(activity) 자료의 종류와 형태 등을 고려하여 적절한 것을 사용하도록 권고하고 있다.

먼저, Tier1은 주로 기초자료가 미비할 때 사용하는 방법으로 에너지 소비량에 배출계수를 곱하여 산출하는 가장 기본적인 산출방식이다(표1참조). 이에 반해, Tier2, Tier3은 좀 더 정밀한 추정이 가능한 방법으로 Tier2은 연료소비를 기술 및 표본에 따라 구분하는 방법이며, Tier3은 주행거리라는 활동도 자료를 기초로 하여 측정된 배출계수와 곱으로 계산하는 방법이다. Tier2

와 Tier3 방법을 정확히 구분하는 것은 어려우나, 정교성과 추정과정의 구체성에 따라 구분할 수 있다. Tier2 방법은 대표적인 배출계수 적용이 가능하도록 차속별 연료소비량을 이용하는데 반해, Tier3 방법은 활동도(교통부문의 주행거리나 ton/km 등)와 연료 혼합비율 등의 자료를 기초로 하여 추정한 배출계수를 사용하여 온실가스 배출량을 산정하는 방법이다. IPCC의 온실가스 배출량 계산식을 정리하면 <표 1>과 같다.

이런 IPCC 모형은 몇 가지 한계를 갖고 있는데, 먼저, Tier1, Tier2의 경우 활동도 자료에서 보듯이 연료 소비량과 차종별 등록대수에 의존하여 산출됨에 따라 차량의 통행여부 등 교통특성이 전혀 반영되지 않으며, Tier3의 경우 주행거리를 고려하지만 차종별 연간 평균주행거리를 고려하기 때문에 통행자의 행태를 제대로 고려하지 못하는 한계가 있다. 즉, 기존 온실가스 배출모형은 대부분 환경·에너지 분야에서 온실가스 배출량을 산정하기 위하여 생산된 수식들이기 때문에 교통분야에서 중요시여기는 통행자의 행태를 제대로 고려하지 못하고 있다. 이에 반해, 본 연구에서 제시하는 온실가스 배출량 추정식은 통행자의 공간적인 통행수요 분포와 통행거리를 명시적으로 고려하기 때문에 좀 더 현실적이라고 볼 수 있다.

이외에 국내외 온실가스 배출량에 대한 다양한 연구들이 진행되어 왔는데, 강중호외(2007)는 이들 연구동향과 시사점을 정리하였으며, 한국개발연구원(2008)에서는 실제 링크 통행거리를 고려하여 온실가스 배출량을 산정하는 방법론을 제시하고 있으나 통행배정결과를 이용한다는 점에서 본 연구와는 차이가 있다.

### III. 온실가스 배출량 추정식

#### 1. 온실가스 추정 기본식

여기서는 본 연구에서 새롭게 제시하는 온실가스 배출량 추정식에 대하여 설명한다. 새로 제시되는 추정식은 통행자의 공간적인 통행분포와 온실가스 배출량에 직접적인 영향을 미치는 통행거리를 명시적으로 고려하게 된다. 본 연구의 온실가스 배출량 추정식은 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 이 식은 <그림 1>과 같이 출발 기점  $r$ 의 발생통행량에 기종점  $rs$ 간 선택비율과 통행거리 및 온실가스 배출계수를 곱하여 구하는 형태이다.

$$E_{rs}^m = O_r^m P_{rs}^m d_{rs} E_{rs}^m \quad (1)$$

<표 1> IPCC Guideline의 CO2 배출량 계산방법 및 활동도 자료

구분	계산방법	활동도 자료
Tier 1	$= (\ell \times \text{tonC/TOE} \times \text{산화율}) \times 44/12$ - $\ell$ : 연료소비량(TOE로 환산) - tonC/TOE: 탄소 배출계수 - 산화율 : 석유제품(0.99), 가스(0.995) * 차종별, 연식별, 구분시 등록대수 이용	- 연료 소비량 - 차종별 등록대수
Tier 2	$= \text{차속별 교통량(km/yr)} / \text{연비(km/\ell)}$ $\rightarrow \text{연료소비량}$ $= (\ell \times \text{tonC/TOE} \times \text{산화율}) \times 44/12$ - 연비: 차속별 연식별 연비계산	- 차종별 속도별 교통량 - 차종별 등록대수
Tier 3	$= \text{배출계수(g/km)} \times \text{주행거리(km/yr)}$ - 배출계수: 차속별 - 주행거리: 차속별	- 차종별 속도별 교통량

자료: 환경부문 온실가스 배출량 inventory 작성 및 배출계수 개발 (II)-2차년도 보고서(2007), 국립환경과학원

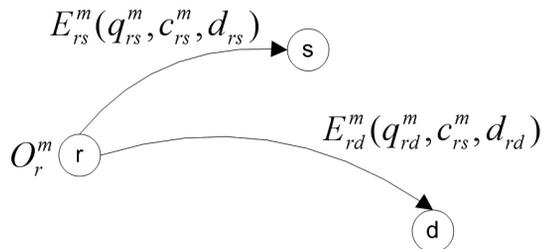
여기서,  $E_{rs}^m$ 는 존 $r$ 에서 발생하여 존 $s$ 로 통행하는 동안 교통수단 $m$ 의 온실가스 배출량[단위: g]이며,  $O_r^m$ 은 존 $r$ 에서 발생하는 교통수단 $m$ 의 차량수[대],  $P_{rs}^m$ 는 교통수단 $m$ 이 존 $r$ 에서 존 $s$ 로 통행하는 비율(probability)이며,  $d_{rs}$ 는 기종점  $rs$ 간 통행거리(km)이다. 또한,  $E_{rs}^m$ 는 배출계수로서 교통수단 $m$ 의 km당 온실가스 배출량(g/km)을 의미한다.

본 연구에서는 온실가스 배출량산정시 다음과 같은 기본가정을 전제한다.

[기본가정]

① 출발존 $r$ 의 통행발생량( $O_r^m$ )은 고정된 것으로 가정한다. 통행시간, 요금 등 교통조건에 따라 통행발생량이 변할 수도 있지만, 통행발생량은 주로 해당존의 인구수, 소득수준, 차량보유대수 등 사회경제지표에 주로 영향을 받기 때문에 이를 고려하지 않는 본 연구에서 통행발생량은 고정된 것으로 가정한다.

② 온실가스 배출계수( $E_{rs}^m$ )은 평균속도의 배출계수 값으로 가정한다. 즉, 온실가스 배출계수는 차종별, 속도별로 다르지만, 본 연구에서는 논의를 단순화시키기 위



<그림 1> 온실가스 배출량 기본관계

하여 평균속도로 주행하는 경우의 배출계수값을 적용한다. 평균속도를 적용한 이유는 속도별 배출계수를 적용하기 위해서는 기종점쌍간 차량 혼잡으로 인한 효과(congestion effect)를 고려해야 하는데, 이를 위해서는 통행배정(traffic assignment)과정이 포함되어야 하기 때문에 본 연구에서는 단순히 평균 통행속도로 가정한다.

그러나, 본 연구에서 제시한 기본 추정식(1)도 속도에 따른 배출가스계수를 포함하는 형태로 확장할 수 있는데, 이 경우 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{rs}^m = \sum_v O_r^m P_{rs}^{m,v} d_{rs} E u^{m,v}$$

여기서,  $v$ 는 통행속도이며,  $P_{rs}^{m,v}$ 는 교통수단 $m$ 이 통행속도 $v$ 로 존 $r$ 에서 존 $s$ 로 통행하는 비율(probability)이며,  $E u^{m,v}$ 는 배출계수로서 교통수단 $m$ 이 통행속도 $v$ 로 운행할때 km당 온실가스 배출량(g/km)이 된다. 따라서, 이런 형태로 배출가스 추정식이 수정되면, 속도변화에 따른 배출계수를 추정식내에 명시적으로 고려할 수 있게 된다.

위 관계식(1)으로부터 존 $r$ 로 부터 유발되는 교통수단 $m$ 의 온실가스 배출량( $E_r^m$ )과 존 $r$ 로 부터 유발되는 온실가스 배출량( $E_r$ ) 및 총 온실가스 배출량( $E$ )은 다음과 같이 계산된다. 여기서,  $S$ 는 목적지(destination)집합이며,  $M$ 은 교통수단 집합이고  $R$ 은 기점 집합이다.

$$E_r^m = \sum_{s \in S} O_r^m P_{rs}^m d_{rs} E u^m = \sum_s E_{rs}^m$$

$$E_r = \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} O_r^m P_{rs}^m d_{rs} E u^m = \sum_m \sum_s E_{rs}^m$$

$$E = \sum_{r \in R} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} O_r^m P_{rs}^m d_{rs} E u^m = \sum_r \sum_m \sum_s E_{rs}^m$$

## 2. 통행비율 계산

출발존 $r$ 로부터 목적지존 $s$ 로의 통행분포는 중력모형(gravity model)을 통하여 구할 수 있다. 통행분포는 성장인자모형, Fratar모형, 중력모형 등 다양한 모형들이 제시되고 있지만, 중력모형에 포함된 TLFDF(trip length frequency distribution)패턴이 가장 현실적으로 기종점간 통행행태를 표현할 수 있기 때문에(Ortuzar et al., 1994; 윤대식, 2001), 본 연구에서는 중력모형을 통행분포모형으로 적용한다.

따라서, 위 온실가스 추정식에서 교통수단 $m$ 이 존 $r$ 에서 존 $s$ 로 통행하는 비율( $P_{rs}^m$ )은 식(2)와 같은 유출제약 중력모형(production-constrained gravity model)으로부터 얻을 수 있다. 여기서, 유출제약 중력모형을 적용한 이유는 출발지를 기준으로 온실가스 배출량을 산정하기 때문에 출발지 통행량의 제약조건만을 만족시키면 되기 때문이다. 그러나 이를 다수의 기종점쌍으로 확장하는 경우, 유출 및 유입제약조건을 모두 만족시켜야 한다.

$$q_{rs}^m = k_r^m O_r^m D_s^m \exp(-\beta c_{rs}^m) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \sum_s q_{rs}^m = O_r^m$$

여기서,  $q_{rs}^m$  기종점 $rs$ 간 교통수단 $m$ 의 통행수요이며,  $D_s^m$ 은 종점 $s$ 로 유입량되는 교통수단 $m$ 의 통행량(trip attraction)이고,  $c_{rs}^m$ 는 기종점 $rs$ 간 교통수단 $m$ 의 통행비용이다. 또한,  $k_r^m$ 은 교통수단 $m$ 의 기점 $r$ 와 관련된 조정계수(balancing factor)로 제약조건식으로 부터 다음과 같이 구해진다.

$$k_r^m = \frac{1}{\sum_s D_s^m \exp(-\beta c_{rs}^m)} \quad (3)$$

따라서, 유출제약 중력모형으로부터 통행비율  $P_{rs}^m$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{rs}^m = \frac{q_{rs}^m}{O_r^m} = k_r^m O_r^m D_s^m \exp(-\beta c_{rs}^m) / O_r^m$$

## 3. 중력모형을 이용한 온실가스 추정식

앞에서 기술한 온실가스 추정기본식(1)과 중력모형을 통하여 산출된 통행비율을 이용하여 최종적으로 도출된 온실가스 추정식은 다음과 같다. 이들 식은 앞에서 기술한 바와 같이 중력모형을 기초로 하고 있다.

$$E_{rs}^m(c_{rs}^m) = k_r^m O_r^m D_s^m \exp(-\beta c_{rs}^m) d_{rs} E u^m$$

$$= q_{rs}^m(c_{rs}^m) d_{rs} E u^m \quad (4)$$

$$E_r^m(c_{rs}^m) = \sum_s q_{rs}^m(c_{rs}^m) d_{rs} E u^m \quad (5)$$

$$E_r(c_{rs}^m) = \sum_m \sum_s q_{rs}^m(c_{rs}^m) d_{rs} E u^m \quad (6)$$

4. 배출가스 탄력성(elasticity)

1)  $E_{rs}^m$ 의 탄력성

여기서는 통행비용에 포함된 속성변수의 변화에 대한 온실가스 배출량의 변화를 살펴보자. 온실가스 배출량의 변화는 탄력성(elasticity)을 통하여 분석되는데, 탄력성은 속성변수의 변화율에 대한 온실가스 배출량의 변화율로 정의된다.

먼저, 통행비용은 다음과 같은 속성변수로 구성되었다고 가정한다.

$$c_{rs}^m = \sum_k x_{rsk}^m = x_{rs1}^m + x_{rs2}^m + \dots + x_{rsk}^m$$

여기서,  $x_{rsk}^m$  은  $k$ 번째 속성변수로 임의의  $k$ 번째 속성변수  $x_{rsk}^m$  에 대한 온실가스 배출량의 탄력성은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial E_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} = \frac{\partial E_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m} \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m}$$

그런데,  $\frac{\partial E_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m}$ 는 식(2)와 식(4)로부터

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m} &= \frac{\partial q_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m} d_{rs} E u^m \\ \frac{\partial q_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m} &= k_r^m O_r^m D_{rs}^m \exp(-\beta c_{rs}^m) (-\beta) \\ &= (-\beta) q_{rs}^m \end{aligned}$$

따라서,

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} &= (-\beta) q_{rs}^m d_{rs} E u^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= (-\beta) E_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \quad \text{[배출가스 민감도]} \quad (7) \end{aligned}$$

그러므로 탄력성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_{x_{rsk}^m}^{E_{rs}^m} &= \frac{x_{rsk}^m}{E_{rs}^m} \frac{\partial E_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= \frac{x_{rsk}^m}{E_{rs}^m} \cdot (-\beta) E_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= -\beta x_{rsk}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \quad \text{[배출가스 탄력성]} \quad (8) \end{aligned}$$

2)  $E_r^m$ 과  $E_r$ 의 탄력성

위의 동일하게  $E_r^m$ 의 탄력성도 구할 수 있다. 식(5)로부터,

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_r^m}{\partial x_{rsk}^m} &= \frac{\partial E_r^m}{\partial c_{rs}^m} \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= \frac{\partial q_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m} d_{rs} E u^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= (-\beta) q_{rs}^m d_{rs} E u^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= -\beta E_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \end{aligned}$$

따라서, 탄력성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_{x_{rsk}^m}^{E_r^m} &= \frac{x_{rsk}^m}{E_r^m} \frac{\partial E_r^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= \frac{x_{rsk}^m}{E_r^m} \cdot (-\beta) E_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= -\beta x_{rsk}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \frac{E_{rs}^m}{E_r^m} \\ &= \mu_{x_{rsk}^m}^{E_{rs}^m} \frac{E_{rs}^m}{E_r^m} \end{aligned}$$

동일한 방법으로  $E_r$ 의 탄력을 구할 수 있으며, 이를 정리하면 <표 2>와 같다.

탄력성을 좀 더 구체적으로 살펴보기 위해 통행비용함수가 다음과 같은 속성변수로 구성되어 있다고 가정하자.

$$c_{rs}^m = \alpha t_{rs}^m + p_{rs}^m + g p_{rs}^m \delta_{rs}^m$$

여기서,  $t_{rs}^m$ 는 기종점  $rs$ 간 교통수단  $m$ 의 통행시간(time)이며,  $\alpha$ 는 시간을 비용으로 환산하는 시간가치(value of time, VOT)이다. 또한  $p_{rs}^m$ 는 기종점  $rs$ 간 교

<표 2> 온실가스 배출량의 민감도와 탄력성

배출량 추정식	민감도	탄력성
$E_{rs}^m$	$\frac{\partial E_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} = -\beta E_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m}$	$\mu_{x_{rsk}^m}^{E_{rs}^m} = -\beta x_{rsk}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m}$
$E_r^m$	$\frac{\partial E_r^m}{\partial x_{rsk}^m} = -\beta E_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m}$	$\mu_{x_{rsk}^m}^{E_r^m} = \mu_{x_{rsk}^m}^{E_{rs}^m} \left( \frac{E_{rs}^m}{E_r^m} \right)$
$E_r$	$\frac{\partial E_r}{\partial x_{rsk}^m} = -\beta E_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m}$	$\mu_{x_{rsk}^m}^{E_r} = \mu_{x_{rsk}^m}^{E_{rs}^m} \left( \frac{E_{rs}^m}{E_r} \right)$

〈표 3〉 속성변수별 온실가스 배출량 탄력성

탄력성	속성변수( $x_{rsk}^m$ )		
	$t_{rs}^m$	$p_{rs}^m$	$gp_{rs}^m$
$\frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m}$	$\alpha$	1	$\delta_{rs}^m$
$\mu_{x_{rsk}^m}^{E_{rs}^m}$	$-\alpha\beta t_{rs}^m$	$-\beta p_{rs}^m$	$-\beta gp_{rs}^m \delta_{rs}^m$
$\mu_{x_{rsk}^m}^{E_r^m}$	$-\alpha\beta t_{rs}^m \left(\frac{E_{rs}^m}{E_r^m}\right)$	$-\beta p_{rs}^m \left(\frac{E_{rs}^m}{E_r^m}\right)$	$-\beta gp_{rs}^m \delta_{rs}^m \left(\frac{E_{rs}^m}{E_r^m}\right)$
$\mu_{x_{rsk}^m}^{E_s^m}$	$-\alpha\beta t_{rs}^m \left(\frac{E_{rs}^m}{E_r^m}\right)$	$-\beta p_{rs}^m \left(\frac{E_{rs}^m}{E_r^m}\right)$	$-\beta gp_{rs}^m \delta_{rs}^m \left(\frac{E_{rs}^m}{E_r^m}\right)$

비용함수 :  $c_{rs}^m = \alpha t_{rs}^m + p_{rs}^m + gp_{rs}^m \delta_{rs}^m$

통수단 $m$ 의 유류비, 통행료 등과 같은 비용항이며,  $gp_{rs}^m$ 는 온실가스 배출량을 줄이기 위한 온실가스통행료(green house gas pricing)으로 온실가스 통행료가 부과되면  $\delta_{rs}^m$ 는 1이고, 그렇지 않으면 0으로 설정되는 더미변수이다.

만약, 속성변수가  $x_{rsk}^m = t_{rs}^m$ 이면,  $\frac{\partial c_{rs}^m}{\partial t_{rs}^m} = \alpha$  이므로  $\mu_{t_{rs}^m}^{E_{rs}^m} = -\alpha\beta t_{rs}^m$  이 된다. 이와 동일하게 속성변수가  $p_{rs}^m$  이나  $gp_{rs}^m$  인 경우도 〈표 3〉과 같이 정리된다.

### 5. 중력모형의 수요 탄력성(elasticity)

#### 1) 직접 탄력성(direct elasticity)

여기서는 속성변수의 변화에 대한 중력모형의 통행수요 변화를 살펴보자. 통행수요 탄력성을 살펴보는 이유는 온실가스통행료 도입 등 정책변수 변화에 대한 수요 변화를 알 수 있기 때문이다.

$$\frac{\partial q_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} = \frac{\partial q_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m} \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m}$$

이므로 식(2)로부터

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m} &= k_r^m O_r^m D_s^m \exp(-\beta c_{rs}^m) (-\beta) \\ &= -\beta q_{rs}^m \end{aligned}$$

이므로

$$\frac{\partial q_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} = -\beta q_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \quad \text{[직접민감도]} \quad (9)$$

따라서, 탄력성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_{x_{rsk}^m}^{q_{rs}^m} &= \frac{x_{rsk}^m}{q_{rs}^m} \frac{\partial q_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= \frac{x_{rsk}^m}{q_{rs}^m} (-\beta) q_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= -\beta x_{rsk}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \quad \text{[직접탄력성]} \quad (10) \end{aligned}$$

#### 2) 교차탄력성(cross elasticity)

앞에서는 기종점 $rs$ 간 속성변수( $x_{rsk}^m$ )의 변화에 대한 통행수요( $q_{rs}^m$ )의 변화를 살펴보았다. 여기서는, 이와 달리 기종점 $rs$ 간 속성변수( $x_{rsk}^m$ )의 변화에 대한 기종점 $rd$ 간 통행수요( $q_{rd}^m$ )의 변화를 살펴보자. 즉, 교차탄력성(cross elasticity)은 다음과 같이 유도할 수 있다. 먼저, 기종점 $rd$ 간 유출제약 중력모형의 통행수요( $q_{rd}^m$ )는 식(2)의 제약조건으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$q_{rd}^m = O_r^m - \sum_{s-d \in S} q_{rsk}^m$$

여기서,  $s-d \in S$ 는 목적지 집합 $S$ 에서  $d$ 가 제외된 요소를 의미한다. 따라서,

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{rd}^m}{\partial c_{rs}^m} &= 0 - \frac{\partial}{\partial c_{rs}^m} (k_r^m O_r^m D_s^m \exp(-\beta c_{rs}^m)) \\ &= -(k_r^m O_r^m D_s^m \exp(-\beta c_{rs}^m)) (-\beta) \\ &= \beta q_{rs}^m \end{aligned}$$

그러므로,

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{rd}^m}{\partial x_{rsk}^m} &= \frac{\partial q_{rd}^m}{\partial c_{rs}^m} \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= \beta q_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \quad \text{[교차민감도]} \quad (11) \end{aligned}$$

따라서, 교차탄력성은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_{x_{rsk}^m}^{q_{rd}^m} &= \frac{x_{rsk}^m}{q_{rd}^m} \frac{\partial q_{rd}^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= \frac{x_{rsk}^m}{q_{rd}^m} \beta q_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \\ &= \beta x_{rsk}^m \frac{q_{rs}^m}{q_{rd}^m} \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} \quad \text{[교차탄력성]} \quad (12) \end{aligned}$$

이상의 내용을 정리하면 〈표 4〉와 같다.

〈표 4〉 중력모형의 수요민감도와 탄력성

	민감도(sensitivity)	탄력성(elasticity)
직접 (direct)	$\frac{\partial q_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m} = -\beta q_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m}$	$\mu_{x_{rsk}^m}^{q_{rs}^m} = -\beta x_{rsk}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m}$
교차 (cross)	$\frac{\partial q_{rd}^m}{\partial x_{rsk}^m} = \beta q_{rs}^m \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m}$	$\mu_{x_{rsk}^m}^{q_{rd}^m} = \beta x_{rsk}^m \frac{q_{rs}^m}{q_{rd}^m} \frac{\partial c_{rs}^m}{\partial x_{rsk}^m}$ $= -\mu_{x_{rsk}^m}^{q_{rs}^m} \left( \frac{q_{rs}^m}{q_{rd}^m} \right)$

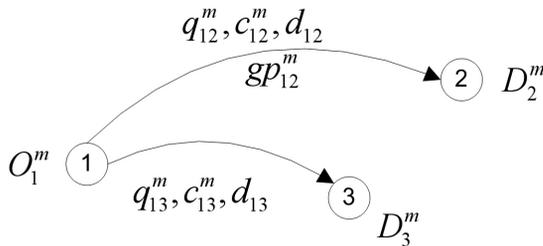
#### IV. 추정방법의 평가 및 탄력성분석

##### 1. 분석대상

본 연구에서 제시한 배출가스 추정식과 이에 따른 민감도 및 탄력성 등의 유용성을 살펴보기 위하여 〈그림 2〉와 같은 단순한 예제를 이용한다. 그림에서 보듯이 출발존1에서 2개의 도착지 존으로 통행이 이루어지며, 1번존의 통행발생량  $O_1^m = 100$ 통행이며, 2번존과 3번존의 통행유입량은  $D_2^m = 50$ 통행,  $D_3^m = 50$ 통행으로 가정한다. 나머지 입력자료는 〈표 5〉와 같은데, 기종점 1→2간 거리가 1→3간 거리보다 먼 장거리로 설정한다.

##### 2. 분석결과

먼저, 온실가스 통행료( $gp_{rs}^m$ )가 부과되지 않은 경우에 대하여, 중력모형과 온실가스 배출량 추정식을 통하여 산출된 기종점 통행수요와 온실가스 배출량은 〈표 6〉과 같다.



〈그림 2〉 평가 예제

〈표 5〉 예제 입력자료

기종점	통행비용 $c_{rs}^m (= \alpha t_{rs}^m + p_{rs}^m)$	통행거리 (km) $d_{rs}$	기타
1→2	10	30	$\beta = 0.1$ $Eu^m = 0.15 [kg/km]$
1→3	5	20	

〈표 6〉 통행수요 및 온실가스 배출량( $gp_{rs}^m = 0$ 인 경우)

기종점	통행수요 ( $q_{rs}^m$ )	배출량(kg) ( $E_{rs}^m$ )	비고
1→2	37.75	169.89	$k_1 = 0.020525$
1→3	62.25	186.74	
계	100.00	356.63	

##### 1) 온실가스 통행료( $gp_{rs}^m$ ) 부과시

온실가스 배출량을 줄이기 위하여 온실가스 통행료를 부과하는 경우를 살펴보자. 온실가스는 통행거리에 비례하기 때문에 먼저, 통행거리가 먼 1→2존의 통행비용에 온실가스 통행료( $gp_{12}^m = 2$ )를 부과한 경우, 분석결과가 〈표 7〉에 나와 있다. 표에서 보듯이 온실가스 통행료가 부과됨에 따라 기종점 1→2간 통행수요는  $q_{12}^m = 37.75$ 통행에서 33.18통행으로 감소한 반면, 1→3간은  $q_{13}^m = 62.25$ 에서 66.82로 증가하며, 온실가스 배출량도 기종점 1→2간은 줄어든 반면, 기종점 1→3간은 약간 증가한다. 그러나 전체 배출량은  $E_{rs}^m = 356.63 [kg]$ 에서 349.77[kg]으로 감소함을 알 수 있다.

이번에는 온실가스 통행료를 기종점 1→3간에 동일한 값으로 부과한 경우(즉,  $gp_{13}^m = 2$ )의 분석결과가 〈표 8〉에 있다. 이 경우에는 총 온실가스 배출량이 오히려 늘어나는데, 이는 단거리 통행(기종점 1→2간)에 온실가스 통행료가 부과됨에 따라 장거리 통행(기종점 1→3간)이 증가하여 배출량이 늘어나기 때문이다. 따라서, 온실가스 통행료는 장거리 통행위주로 부과해야 효과적임을 알 수 있다.

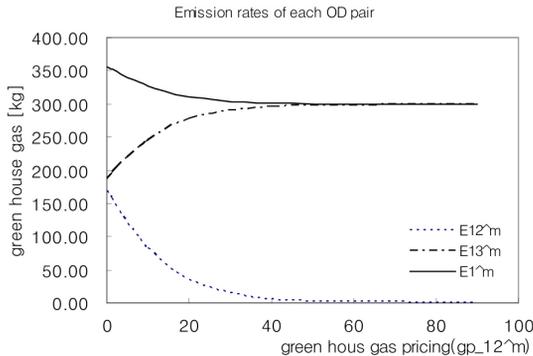
마지막으로 〈그림 3〉은 기종점 1→2간 온실가스 통행료를 점진적으로 증가시킨 경우, 온실가스 배출량의 변화를 보여주고 있다. 예상했던 대로  $E_{12}^m$ 가 지속적으로 감소하는 반면,  $E_{13}^m$ 는 증가하며, 총 배출량  $E_{rs}^m$ 은 감소하다가  $gp_{12}^m = 50$ 정도에 이르면 더 이상 감소하지 않고

〈표 7〉  $gp_{12}^m = 2$ 를 부과한 경우 통행수요 및 온실가스 배출량

기종점	통행수요 ( $q_{rs}^m$ )		배출량(kg) ( $E_{rs}^m$ )	
	미부과시	부과시 ( $gp_{12}^m = 2$ )	미부과시	부과시 ( $gp_{12}^m = 2$ )
1→2	37.75	33.18	169.89	149.32
1→3	62.25	66.82	186.74	200.46
계	100.00	100.00	356.63	349.77

〈표 8〉  $gp_{13}^m=2$ 를 부과한 경우 통행수요 및 온실가스 배출량

기종점	통행수요 ( $q_{rs}^m$ )		배출량(kg) ( $E_{rs}^m$ )	
	미부과시	부과시 ( $gp_{13}^m=2$ )	미부과시	부과시 ( $gp_{13}^m=2$ )
1→2	37.75	42.56	169.89	191.50
1→3	62.25	57.44	186.74	172.33
계	100.00	100.00	356.63	363.83



〈그림 3〉 온실가스 통행료 부과에 따른 온실가스 배출량의 변화

일정한 값을 유지한다. 이는  $gp_{12}^m=50$ 정도가 되면  $q_{12}^m$ 이 0에 가까워지며 대부분의 통행이  $q_{13}^m$ 으로 배분되기 때문이다.

## 2) 민감도 및 탄력성 분석결과

### (1) 온실가스 배출량 탄력성

통행비용에 대한 온실가스 배출량의 민감도와 탄력성이 〈표 9〉에 나와 있다. 표의 민감도에서 보듯이 기종점 1→2의 경우 단위 통행비용이 증가하면 기종점 1→2간의 온실가스 배출량( $E_{rs}^m$ )이 16.989kg감소하는 반면, 기종점 1→3의 경우 18.674kg이 감소하게 됨을 의미한다. 또한, 각 기종점쌍별로 통행비용에 대한 온실가스 탄력성이 각각 -1.0과 -0.5로 나타나 기종점 1→2가 좀 더 탄력적임을 알 수 있다. 이런 경향은 기점  $r$ 의 온실가스 배출량( $E_r^m$ )에 대한 탄력성( $\mu_{c_{rs}^m}^{E_r^m}$ )에서도 동일하게 나타나고 있다. 표에서 기종점  $rs$ 간의 탄력성( $\mu_{c_{rs}^m}^{E_{rs}^m}$ )보다 기점  $r$ 의 탄력성( $\mu_{c_{rs}^m}^{E_r^m}$ )이 작게 나타나는 것은 특정 기종점쌍의 통행비용이 증가하면 해당 기종점쌍의 배출량은 줄어들지만, 다른 기종점쌍의 배출량은 증가하기 때문이다.

〈표 9〉 온실가스 배출량의 민감도 및 탄력성

기종점 ( $rs$ )	$E_{rs}^m$		$E_r^m$	
	민감도 ( $\frac{\partial E_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m}$ )	탄력성 ( $\mu_{c_{rs}^m}^{E_{rs}^m}$ )	민감도 ( $\frac{\partial E_r^m}{\partial c_{rs}^m}$ )	탄력성 ( $\mu_{c_{rs}^m}^{E_r^m}$ )
1→2	-16.989	-1.000	-16.989	-0.476
1→3	-18.674	-0.500	-18.674	-0.262

〈표 10〉 중력모형의 수요 민감도와 탄력성

탄력성	기종점(1→2)		기종점(1→3)	
	민감도	탄력성	민감도	탄력성
직접	-3.775	-1.000	-6.225	-0.500
교차	3.775	0.607	6.225	0.824

### (2) 중력모형의 수요탄력성

통행비용에 대한 중력모형의 민감도와 탄력성이 〈표 10〉에 있다. 먼저, 민감도의 경우 단위 통행비용의 증가에 대한 통행수요의 변화로 해석할 수 있으며, 기종점 1→2의 경우 -3.775로 나타나 단위 통행비용이 증가하면 기종점 1→2간 3.775통행이 감소함을 의미한다. 교차탄력성의 경우 부호만 다르고 동일한 값을 갖는데, 이는 감소된 통행이 모두 다른 기종점(여기서는 기종점 1→3)으로 전환하기 때문이다. 기종점 1→3의 경우도 동일한 패턴을 갖고 있다.

또한 각 경우의 탄력성도 표에 주어져 있다. 예를 들어 기종점 1→2간 통행비용이 10%증가하면 통행량은 10%감소하고(직접탄력성), 다른 기종점쌍(여기서는 기종점 1→3)의 수요는 6.07%증가(교차탄력성)함을 의미한다. 이를 〈표 6〉의 통행수요를 가지고 설명하면, 기종점1→2간 통행비용이 10%증가함에 따라 통행량이 3.775통행 감소하고, 이 통행이 기종점 1→3으로 전환되면서 기종점 1→3간 통행이 증가하는데 이 증가분이 기존 1→3간 통행량(62.25)의 6.07%에 해당하게 된다.

## V. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 온실가스 배출량을 추정할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. IPCC모형으로 대표되는 기존 모형들은 교통측면에서 도출된 모형이 아니라 환경·에너지 분야에서 도출된 모형이다 보니 통행자의 행태를 제대로 고려하지 못하는 한계가 있다. 이에 비해 본 연구는 비록 존 단위이기도 하나 통행자의 행태를 고려했다는 점에 차이가 있다. 즉, 기존 모형과의 주된 차이는 통

행자의 행태를 중력모형을 적용하여 고려했다는 점과 온실가스 배출량에 직접적인 영향을 미치는 통행거리를 명시적으로 반영했다는 점이다. 또한, 배출량 추정식의 민감도와 탄력성을 수리적으로 유도하였으며 이를 예제에 적용하여 평가하였다. 평가결과, 기대했던 결과를 도출하여 본 연구에서 제시한 추정식이 합리적임을 알 수 있었으며, 온실가스 통행료를 부과한 경우의 효과 등 몇 가지 의미있는 결과를 도출하였다.

그러나 본 연구는 교통계획측면에서 바라본 온실가스 배출량 추정식의 초기 연구로서 연구의 한계와 다양한 향후 연구들이 남아 있다. 먼저, 본 연구에서는 하나의 기점에 대해서만 평가했지만 이를 다수의 기중점쌍으로 확대하는 연구가 요구되는데, 이 경우 이중제약 중력모형(doubly constrained gravity model)을 적용해야 할 것으로 보이며, 중력모형 대신 로짓모형(logit model) 등 다른 형태의 수요함수를 시험해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 기점의 통행발생량을 고정된 것으로 가정하였으나, 이를 완화시킨 연구도 필요하며, 통행속도 역시 평균속도가 아닌 차종별로 다른 속도를 고려한 배출계수를 적용한 연구도 필요하다. 속도별로 다른 배출계수를 적용하기 위해서는 기중점쌍간 도로상의 차량 혼잡으로 인한 효과를 고려해야하며, 이를 구현하기 위해서는 통행배정(traffic assignment)과정을 포함해야 할 것으로 보인다. 마지막으로 온실가스 배출

량을 최소화시키는 최적 온실가스 통행료(optimal green house gas pricing)를 결정하는 교통망설계문제(network design problem)에 대한 연구도 남아 있다.

### 참고문헌

1. 강중호·이청원(2007), 교통환경분야의 국내외 연구동향 및 시사점 (차량배출량 관련 연구를 중심으로), 대한교통학회지, 제25권 제6호, 대한교통학회, pp.7~18.
2. 국립환경과학원(2007) 환경부문 온실가스 배출량 inventory 작성 및 배출계수 개발 (Ⅱ)-2차년도 보고서.
3. 윤대식(2001) 교통수요분석, 박영사.
4. 한국개발연구원(2008) 도로·철도 부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완연구(제5판).
5. ICF Consulting(2006), Assessment of Greenhouse Gas Analysis Techniques for Transportation Projects.
6. IPCC(2006), "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2 Energy".
7. Ortuzar, J., L. G. Willumsen(1994) Modelling Transport, Wiley.

✉ 주 작성자 : 임용택

✉ 교신저자 : 임용택

✉ 논문투고일 : 2011. 1. 17

✉ 논문심사일 : 2011. 3. 28 (1차)

2011. 6. 2 (2차)

2011. 7. 13 (3차)

2011. 7. 14 (4차)

✉ 심사판정일 : 2011. 7. 14

✉ 반론접수기한 : 2011. 12. 31

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필