

# 도로부문 이산화탄소 배출량 추정 모델의 개발: 도로망, 건물규모, 건물용도의 공간배치를 중심으로

김영욱<sup>1</sup>, 김경용<sup>1</sup>, 박훈태<sup>2\*</sup>  
<sup>1</sup>세종대학교 건축학과, <sup>2</sup>MIM

## A development of CO<sub>2</sub> emission estimation model based on the spatial configuration of street networks, building capacity and building usages

Young-Ook Kim<sup>1</sup>, Kyoung-Yong Kim<sup>1</sup>, Hoon-Tae Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Architecture, Sejong University, <sup>2</sup>MIM Institute

**요약** 국내 교통부문 온실가스 총배출량 중 자동차 연료소비에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량은 가히 절대적인 비율을 차지하고 있는 것으로 파악된다. 본 연구는 자동차, 그 중에서도 특히 승용차의 주행거리에 영향을 미치는 도시구성요소로서 도로망의 형태 그리고 건물규모와 건물용도의 공간적 배치에 주목하고, 이들 변수를 통해 승용차의 주행거리 및 CO<sub>2</sub> 배출량을 간접 추정하는 모델을 제안한다. 모델의 개발은 연역적 방식에 의한 수리모델의 구성, 시뮬레이션을 통한 모델 행태의 평가, 그리고 국내 5개 중소도시를 대상으로 한 실제 사례분석을 통해 모델을 조정하는 순으로 진행된다. 연료소비에 기반한 하향식, 총량적 추정방식과는 대조적으로, 본 연구에서 제안되는 모델은 상향식, 미시적 성격을 갖는 것으로서, 도시구성요소 및 인간활동의 공간적 배치를 다루는 도시계획 및 설계 분야에서 그 활용도가 특히 높을 것으로 기대된다.

**Abstract** This paper presents a model to estimate the amount of CO<sub>2</sub> emitted by cars in cities. Based on the spatial configuration of street networks, building masses and usages, it first develops a deductive model to combine them in a way to account for CO<sub>2</sub> emission amount by cars. It then proceed to validate model behaviours through a series of simulations on some ideal urban settings and finally calibrate it following its real application to the five case study cities in Korea. In contrast to the conventional 'top-down' approaches, we expect our model to have high utilities, particularly in the field of urban planning and design, where we cannot but deal directly with the spatial configuration of urban components and microscopic human activities.

**Key Words** : CO<sub>2</sub> emission, compactness, spatial configuration, vehicle kilometer travelled

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

한국은 <교토의정서> 상의 온실가스 의무감축국(Annex 1)은 아니지만, 2009년 코펜하겐에서 열린 <기후변화협약(UNFCC)>에서 '2020년까지 국가 온실가스 배출 전망치(BAU) 대비 30% 감축' 목표를 발표한 바 있다. 이에 따라 온실가스 배출 통계, 온실가스 저감 정책 및

향후 계획을 담은 국가보고서(NIR)를 제출해야할 의무가 발생하였으며, 현재까지 3회에 걸쳐 보고서를 제출한 상황이다[1].

국가보고서 작성을 위한 기초자료 제공을 위해 2010년 국토해양부는 <국가 교통부문 온실가스 배출량 보고서>를 작성하였는데, 이 보고서는 1990-2008년에 걸쳐 국가 교통부문별(도로, 철도, 항공, 선박) 온실 가스 배출량을 추정하였으며, 특히 2008년 배출량은 지역별로 시

본 논문은 국토교통부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호: 11첨단도시G05)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Hoon-Tae Park(MIM Institute)

Tel: +82-2-3408-3922 email: [htpark@mim-institute.org](mailto:htpark@mim-institute.org)

Received May 16, 2014

Revised (1st June 5, 2014, 2nd June 11, 2014)

Accepted June 12, 2014

군구 단위까지 분류를 시도한 바 있다[2].

교통부문 온실가스 추정방법은 국제기준인 1996 IPCC 가이드라인 Tier 1 방법을 따르고 있는데, 이는 기본적으로 연료소비량에 연료별 IPCC 기본배출계수를 곱하여 산정하는 방식으로서, ‘하향식(top-down)’ 추정방법으로 분류되고 있다. 보고서에 따르면 교통부문 온실가스에는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 등이 포함되지만, CO<sub>2</sub>가 전체 온실가스의 90% 이상을 차지하고 있는 것으로 파악되고 있다. 또한 교통부문 중 ‘도로부문’이 전체 온실가스 배출량의 97.4%를 차지하는 것으로 드러나고 있는 바, 이는 본 연구의 대상을 도로부문에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량으로 한정하는 근거가 되었다.

상기한 ‘하향식’ 추정방식은 총량 규제를 목적으로 삼는 정책적 관점에서는 효율적일 수 있지만, 도시 인프라 및 공간구성요소들의 배치를 다루는 도시계획 및 설계 분야에서는 단지 간접적인 활용가치를 가질 수 있을 뿐이다. 따라서 이에 대응하여 개별 차량의 주행거리(VKT)와 같은 미시적 활동자료를 근거로 CO<sub>2</sub> 배출량을 추정하는 ‘상향식(bottom-up)’ 방식이 동시에 고려될 수 있다. IPCC 가이드라인이 Tier 3로 규정하는 ‘상향식’ 추정방식은 기본적으로 주행거리[km]에 차량의 연비[litre/km]를 곱하는 방식을 취하는데, 차량 주행거리는 유가 및 유류세 인상과 같은 경제적, 정책적 결정에 따라 민감하게 변동하지만, 주행이 발생하는 이상 도로교통망 및 토지이용과 같은 도시공간구조에 의해서도 상당 부분 결정되는 변수라고 볼 수 있다.

이러한 맥락에서 교통안전공단의 <2010년 자동차 주행거리 실태분석 연구>를 살펴볼 수 있다[3]. 교통안전공단은 국내 운행 자동차의 주행거리 현황에 관한 기초통계 자료를 구축하기 위해, 국내 총 등록자동차 약 1,760만대의 모집단 중 2010년 한 해 동안 정기검사를 받은 자동차(약 530만대)를 표본으로 삼아 주행거리를 조사하고, 이를 지역별, 용도별, 차종별, 연료별로 분리 집계한 바 있다. 하지만 보고서는 관찰된 주행거리를 근거로 CO<sub>2</sub> 배출량을 추정하는 내용까지는 다루지 않고 있는데, 이는 차량의 연비와 관련하여 별도의 연구 및 데이터 확보가 필요했기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구는 이러한 ‘상향식’ 추정방식을 보완하고, 궁극적으로는 ‘하향식’ 추정방식과 매개될 수 있는 접점을 찾기 위한 목적을 가지고 진행되었다. 하지만 차량 주행거리와 연비를 직접 관찰하는 방식이 아니라, 도로망 및 건

물용도와 같은 미시적 도시구성요소들의 공간적 배치를 통해 주행거리와 도로부문 CO<sub>2</sub> 배출량을 간접 추정하는 수리 모델의 개발에 우선 초점을 맞추고자 하는데, 이는 차량 주행거리에 영향을 미치는 물리적 요소들의 구조적 관계를 파악함으로써 도시계획 및 설계 분야에서 직접적인 활용가치를 갖는 도구를 마련하기 위함임을 밝힌다.

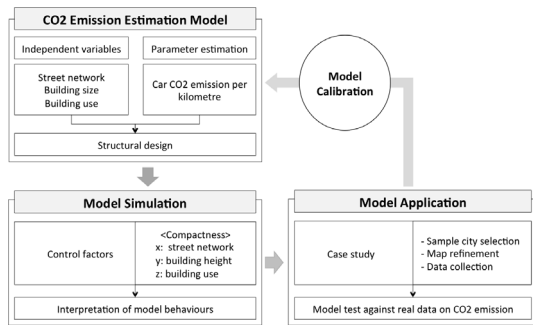
## 1.2 연구의 방법 및 절차

CO<sub>2</sub> 배출량은 차량의 이동량 및 주행거리에 비례한다. 여기서 차량의 이동량은 도시의 규모 및 대중교통 분담률 등에 의해 우선 결정되지만, 차량의 주행거리는 건물과 같은 단위기능공간의 규모 및 용도 그리고 단위기능공간들을 연결하는 도로망의 형태에 의해서도 영향을 받을 수 있다.

이처럼 ‘상향식’으로 차량 주행거리 및 CO<sub>2</sub> 배출량을 추정하려는 연구가 일부 진행되어 왔지만, 행정구역 단위 또는 토지이용계획대상 제공되는 용도지역 단위 이상의 구체적인 정보를 활용하지 못하거나[4,5], 이상적인 도시형태를 가정한 수리모델에 그치거나[6], 토지이용을 무시하고 도로망 및 건물의 규모와 같은 형태적 고정요소들의 배치만으로 설명변수를 국한하는 한계가 있는 것으로 파악된다[7].

이에 본 연구는 도로망 형태(x) 및 건물 규모(y)에 더하여 건물 용도(z)의 공간적 배치를 함께 고려함으로써 차량이동의 방향성을 반영하고, 이에 기반한 차량의 이동량 및 주행거리를 추정하는 단순 확률 모델을 구성하는데서 출발한다. 다음, 도로망 형태, 건물 규모 그리고 건물 용도의 압축도(compactness) 변화와 함께 CO<sub>2</sub> 배출량 추정값이 달라지는 방식을 일정한 인구밀도 및 연면적 조건을 가진 가상의 도시들에 적용해 봄으로써 모델의 수행성을 평가하고 그 현실적 함의를 해석한다. 마지막으로 국내 도시사례에 모델을 실제 적용해 봄으로써 각 도시별 차량주행거리 및 CO<sub>2</sub> 배출량을 추정하고, 이를 상기한 국토해양부 및 교통안전공단의 데이터와 비교 분석함으로써 모델의 조정(calibration) 과정을 거친다.

사례분석을 위한 국내 도시로는 건물의 규모 및 용도에 관한 데이터가 확보된 도시들 중 상대적으로 인접 도시와의 연담화 정도가 낮아 외부통행비율이 낮을 것으로 판단되는 원주, 여주, 전주, 공주, 서산의 5개 도시로 한정했다.



[Fig. 1] The structure and flow of the research

## 2. 상향식 CO<sub>2</sub> 배출량 추정모델의 구축

### 2.1 모델의 기본 구성

#### 2.1.1 차량 주행거리와 CO<sub>2</sub> 배출량

차량 1대가 건물 *i* 에서 건물 *j* 까지 이동하는데 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량은 다음과 같다.

$$c_{ij} = \gamma d_{ij} \quad (1)$$

여기서  $d_{ij}$ 는 해당 건물들 사이의 네트워크 최단 거리 [km]로 정의되며, GIS상에서 건물의 중심점과 접속 도로를 최단거리 기준으로 자동 링크시켜주는 기능을 탑재한 ArcGIS 확장모듈인 UNA(Urban Network Analysis)를 활용하여 측정할 수 있다[8].

한편, 비례상수  $\gamma$  은 차량의 ‘거리당 CO<sub>2</sub> 배출량 [g CO<sub>2</sub>/km]’에 해당하는 원단위로, 편의상 본 연구에서는 원단위의 변화에 가장 민감한 승용차로 차종을 한정하고 지역별 편차를 고려하지 않은 전국 대푯값을 사용하기로 한다[9]. 구체적으로는 에너지관리공단에서 제공하는 승용차 세부 모델별 거리당 CO<sub>2</sub> 배출량 데이터를 근거로 데이터의 왜도를 고려하여 그 중위값을 대푯값으로 선택하였으며, 그 값은 239 [g CO<sub>2</sub>/km]이다[10]. 대푯값은 2010년 기준 16개 광역시도에 대해 주행거리  $d$ 를 설명변수로 삼아 ‘하향식’으로 추정된 CO<sub>2</sub> 배출량  $C$ 와의 단순 회귀분석을 수행한 결과  $C = 281d$  ( $r^2 = 0.96$ )와 같은 형식의 결과를 확인할 수 있었다. 여기서 상수 281[g CO<sub>2</sub>/km]는 ‘거리당 CO<sub>2</sub> 배출량’의 대푯값으로 이해할 수 있는데, 이는 승용차 외에도 승합 및 화물차를 포함하고 있기 때문에 승용차만의 ‘거리당 CO<sub>2</sub> 배출량’에 비해 1km당 약 42g의 차이를 갖는 것으로 보인다.

#### 2.1.2 차량 통행분포와 CO<sub>2</sub> 배출량

건물 *i* 에서 건물 *j* 까지 1일  $m_{ij}$  회의 통행이 발생한다고 한다면, 왕복을 고려한 1일 총 CO<sub>2</sub> 발생량은 다음과 같다.

$$C_{ij} = 2\gamma d_{ij} m_{ij} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 통행량  $m_{ij}$ 는 차량의 유출량  $O_i$ 와 유입량  $D_j$ 에 동시에 비례하며, 유출량은 건물 *i*의 주거연면적  $x_i$  그리고 유입량은 건물 *j*의 비주거연면적  $q_j$ 에 각각 비례한다고 가정한다면, 통행량  $m_{ij}$ 는 다음과 같은 형식으로 나타낼 수 있다.

$$m_{ij} = \rho O_i D_j = kx_i q_j \quad (3)$$

이때  $P$ 를 해당 도시의 ‘총 승용차 등록대수’,  $X$ 와  $Q$ 를 각각 ‘총 주거연면적’과 ‘총 비주거연면적’을 나타낸다고 하면,  $\sum_j m_{ij} = O_i$ ,  $\sum_i m_{ij} = D_j$  그리고  $\sum_i \sum_j m_{ij} = \sum_i O_i = \sum_j D_j = P$  라는 이중제약조건에 의해  $\rho = 1/P$  또한  $k = P/XQ$ 가 된다.

결과적으로 식 (2)와 (3)을 결합하여 ‘건물 *i*에서 건물 *j* 까지 이동하는데 발생하는 1일 총 CO<sub>2</sub> 발생량’은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$C_{ij} = 2k\gamma d_{ij} x_i q_j \quad (4)$$

위 결과를 개별 목적인 건물에 대해 합산하면

$$C_j = \sum_i C_{ij} = 2k\gamma q_j \sum_i x_i d_{ij} \quad (5)$$

가 되고, 이를 ‘개별 건물의 CO<sub>2</sub> 배출 포텐셜’로 개념화해 볼 수 있을 것이다. 또한 이 값을 해당 도시의 전 건물에 대해 합산하여 ‘도시 전체의 총 CO<sub>2</sub> 배출량’을 구할 수도 있다. 즉,

$$C_{total} = \sum_j C_j \quad (6)$$

이를 다시 승용차 등록대수  $P$ 로 나눈다면 해당 도시의 ‘차량 1대당 CO<sub>2</sub> 배출량’이 되며, 이 값은 규모가 다른 도시들의 성능을 비교하기 위한 원단위로 사용될 수 있을 것이다.

## 2.2 모델의 함의

상기 모델에서 통행량을 추정하는 식 (3)은 교통계획에서 통행분포 추정을 위한 중력모델의 형식과 기본적으로 유사한데, 단 중력 모델에서 ‘거리감소효과’가 존재하지 않는 특수한 경우에 해당한다고 볼 수 있다. 중력 모델에서 거리감소효과는 유출량과 유입량의 공간적 분포

에 따른 ‘구조적’ 효과로 간주되며, 차량을 통행수단으로 전제하는 경우 그 효과는 대개 지역적 수준에서만 유의미한 효과가 있는 것으로 나타난다[11]. 따라서 도시내부의 통행만을 고려하는 본 연구에서는 거리감소효과가 존재하지 않는 것으로 간주한 것이다.

이러한 관점에서 볼 때,  $x_i/X$ 는 차량이 건물  $i$ 에 위치하고 있을 초기 확률, 그리고  $q_j/Q$ 는 그 차량이 건물  $j$ 로 이동할 조건부 확률로 이해될 수 있다. 따라서 두 확률의 곱은 차량 1대가 건물  $i$ 에서 건물  $j$ 로 이동할 확률이 되며, 여기에 총 승용차 등록대수  $P$ 를 곱한  $m_{ij}$ 는 건물  $i$ 에서 건물  $j$ 로 이동하는 승용차의 기댓값이 되는 것이다. 하지만, 이러한 결과는 해당 도시에서 등록된 승용차가 모두 이동한다는 가정을 함축하고 있다. 따라서 통행량의 기댓값은 실제보다 과잉 추정될 수밖에 없음을 알 수 있는데, 이는 물론 도시별 대중교통 분담률 등의 정보를 고려하여 재조정될 수도 있는 사항이지만, 대중교통의 도입 이전 단위기능공간의 배치가 CO<sub>2</sub> 발생에 미치는 순수 효과를 여과한다는 측면에서 여전히 그 자체로도 유용한 가치를 갖는다고 볼 수도 있을 것이다.

또한, 해당도시의 경계를 행정구역으로 설정한다면 개별 건물들의 모집단은 상대적으로 명확히 정의될 수 있지만, ‘도시 내부 통행량’과 ‘도시 외부 유출입 통행량’이 구분될 수밖에 없다. 결국 상기 모델은 ‘도시 내부 통행량’과 이와 결부된 CO<sub>2</sub> 배출량을 추정하는 목적으로만 사용될 수 있을 뿐이며, ‘도시 외부 유출입 통행량’과 결부된 CO<sub>2</sub> 배출량은 원칙적으로 알 수 없는 값으로 배제되어야 할 것이다. 기존 연구에 따르면 총 통행량 중 외부 유출입 통행량이 대략 60% 정도에 이르는 것으로 추정되고 있는데[12], 이로부터 상기 모델은 ‘도시내부 통행량’을 약 2.5배 정도 다시 한 번 과잉 추정하게 될 것임을 알 수 있다.

이상의 내용들은 본 연구의 마지막 사례분석 단계에서 실제 CO<sub>2</sub> 발생량과의 비교를 통해 모델의 조정을 위한 항목들로서 재검토될 것이다.

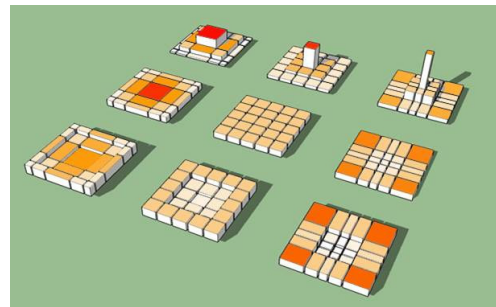
### 3. 시뮬레이션

#### 3.1 압축도 증가에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량 변화

##### 3.1.1 시뮬레이션의 기본 셋팅

본 절은 가상의 도시에 대해 모델의 행태를 시뮬레이

션해보는 단계이다. 가상의 도시는 면적, 인구밀도, 건물 총연면적 ( $X + Q$ ), 승용차 등록대수 ( $P$ ), 총 주거연면적에 대한 총 비주거연면적의 비율( $X:Q$ )은 상수로 고정되어 있으며, 다만 도로망, 건물 높이, 건물용도의 공간적 배치만 달라지는 것으로 가정된다. 좀 더 구체적으로 설명하면, 첫째 ‘도로망의 압축도( $x$ )’로 압축도가 높을수록 도시 중심부의 가구 규모가 작고 조밀해진다고 상정한다 (Fig. 1 참조). 이러한 중심부의 높은 도로망 압축도는 유기적으로 성장한 거의 모든 도시에서 관찰될 수 있는 특성이며, 이는 무엇 보다 중심부의 도로망 압축도가 도시 전체의 접근성을 향상시키는 효과를 갖기 때문인 것으로 이해되고 있다[13,14].



[Fig. 2] 9 typical cases illustrating the variations of compactness in the ideal city, at the moment when  $z=0$  (i.e. uniform land-use intensity). Colour range represents the total floor area for non-residential use in individual buildings.

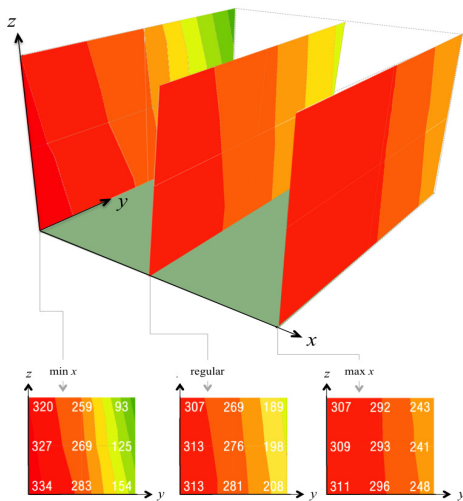
둘째, ‘건물높이의 압축도( $y$ )’로 압축도가 높을수록 도시 중심부 건물들이 고층화한다고 상정한다. 압축도시의 이미지는 좁은 면적에 고층건물이 밀집한 도시형태를 시사하는 경향이 있다. 하지만, 본 시뮬레이션에서 건물의 높이는 도로망의 형태와 독립적이기 때문에, 건물의 고층화가 반드시 건물의 연면적 증가를 의미하는 것은 아니다. 예를 들어, 중심부의 가구 규모가 작은 경우 (높은  $x$ ), 중심부 건물의 현저한 고층화에도 불구하고 (높은  $y$ ) 중심부 고층 건물의 연면적은 주변부 저층 건물의 그것에 비해 작을 수 있다.

셋째, ‘건물용도의 압축도( $z$ )’로 압축도가 높을수록 도시 중심부의 비주거연면적 비율이 증가하는 경우이다. 시뮬레이션을 위해 총 비주거연면적은 전체 가용 연면적의 30%로 고정되어 있다고 가정 할 것이다. 이때 모든 건

물들이 균일하게 30%의 비주거면적을 갖는 경우를 최소의 압축(또는 최대의 분산) 상태로 상정하면[Fig 2], 이로부터 도시 중심부의 비주거면적 비율이 증가 또는 주변부의 주거면적 비율이 증가할수록 건물용도의 압축도가 높아진다고 말할 수 있다. 위의 그림 2는 특히 건물용도의 압축도가 최소( $z=0$ )인 상태에 해당하는 것으로, 건물용도의 분포가 균일하지만 비주거면적의 크기는 다를 수 있음을 보여주고 있다.

### 3.1.2 시뮬레이션의 결과

아래 Fig 3은 ‘차량 1대당 CO<sub>2</sub> 배출량 (C/P)’의 변이를 압축도  $x, y, z$ 에 의해 구성되는 3차원 공간에 나타낸 것이다. 한 도시의 특정 상태는 이 3차원 공간에서 한 점의 장밀도로 표현될 수 있으며, 초록색일수록 ‘차량 1대당 CO<sub>2</sub> 배출량’이 낮은 것이고 빨간색에 가까울수록 그 반대가 된다.



[Fig. 2] CO<sub>2</sub> emission per car, represented three dimensionally as being dependent on the compactness of street networks, building masses and building usages

무엇보다 우선 눈에 띄는 결과는 ‘건물 높이의 압축도 (y)’와 ‘건물 용도의 압축도(z)’ 둘 다 CO<sub>2</sub> 배출량과 부의 상관관계를 보인다는 점이다. 즉, 도시 중심부 건물이 상대적으로 높고, 비주거 용도가 중심부에 집중될수록 CO<sub>2</sub> 배출량은 감소하는 것이다. 특히 CO<sub>2</sub> 배출량은 ‘건물 높이의 압축도’에 가장 민감하게 변화한다는 것을 확인할 수 있었다. 반면 건물 높이의 분포가 일정한 경우(y 고정)에

는 건물 용도의 집중과 함께 CO<sub>2</sub> 배출량은 줄어들기는 하나, 변화의 폭은 상대적으로 둔감한 경향이 있다.

이와는 대조적으로 ‘도로망의 압축도(x)’는 CO<sub>2</sub> 배출량과 양의 상관관계를 갖는 것으로 보이는데, 특히 ‘건물 높이의 압축도’가 클 때 상관성은 더욱 강해지는 경향이 있다. 이는 예상과는 반대의 결과로서, ‘도로망의 압축도’가 높아져서 전체적인 접근성이 향상되고 주행거리가 짧아질수록 CO<sub>2</sub> 배출량은 줄어들 것으로 기대할 수 있기 때문이다. 하지만 ‘건물 높이의 압축도’와 ‘토지이용의 압축도’가 낮은 경우들에서는 약하게나마 이러한 부의 상관관계가 나타나기도 한다.

종합하면 CO<sub>2</sub> 배출량은 도로망, 건물규모, 건물용도의 공간적 배치에 따라 영향을 받지만, 상호간의 관계는 단순히 기술할 수 있는 정도보다 훨씬 복잡해 보인다. 그럼에도 불구하고 CO<sub>2</sub> 배출량이 최소화되는 상태는 명백하게 드러나는데, 그것은 중심부의 도로망 압축도가 낮고, 건물 높이와 비주거 용도의 집중이 높은 상태에 해당한다. 예를 들면 이러한 상태는 상당히 큰 규모의 도시 중심부 가구를 통과이동 차량을 막음으로써 보행자 전용화하고, 동시에 상업과 업무용 고층건물들이 보행자 전용 중심부에 밀집되어 있는 상태라고 가시화해볼 수 있을 것이다.

### 3.2 압축도 측정

도로망 압축도는 흔히 단위 면적당 도로교차점의 개수로 측정이 되고는 하지만, 이런 방법으로는 도시 중심부의 도로망이 주변부에 의해 상대적으로 조밀해지는 현상을 나타내기 곤란한 문제가 있다. 그 대안으로 도로망의 ‘특성거리(characteristic distance)’라는 개념을 사용할 수 있는데, 이는 도로망 위의 한 점에서 다른 모든 점까지의 네트워크 거리를 평균하고, 각 점에 부여된 평균 거리의 평균을 다시 구한 값으로 정의된다[15]. 이를 해당 도시의 도로 총연장으로 나뉘춤으로써 0에서 1사이의 값을 갖도록 표준화시킬 수 있는데, 기존 연구에 따르면 한 도시의 특성거리는 도시 중심부의 도로망이 조밀해질수록 줄어드는 경향이 있는 것으로 파악된다[14]. 하지만 특성거리가 줄어드는 원인은 중심부 가구 규모가 작고 조밀해지는 것 외에도 도로망의 연결관계가 큰 영향을 미치기 때문에, 특성거리로 도로망의 압축도를 포착하기는 충분하지 않은 문제가 역시 존재한다.

건물규모 및 건물용도의 압축도는 보통 상이성

(dissimilarity) 지표, 타일(Theil) 지표, 허핀달-허쉬만 지표(HHI), 상대적 엔트로피(entropy) 지표 등이 사용되지만[4,16], 이 모든 지표들은 비공간적 지표로서 도시중심부의 공간적 집중도를 나타내기에는 역시 충분하지 못한 문제가 있다. 즉, 상대적 엔트로피 지표를 예로 들자면, 주변부에 건물규모 및 용도가 집중되는 것과 중심부에 집중되는 것이 동일한 엔트로피 값을 가질 수 있다.

반면, 공간적으로 중심부에 규모 및 용도가 집중되는 것을 포착하기 위해서는 Moran's I 등과 같은 자기상관계수를 사용하는 것이 가장 바람직하다. 하지만, 이 역시 문제가 없는 것은 아닌데 Moran's I와 같은 단순 상관계수는 중심이 하나인 단핵 구조인 경우에 적용될 때만 유의미한 결과를 가질 수 있기 때문이다[17]. 따라서 다핵 구조를 갖는 일정 규모 이상의 도시에서는 지구 중심별 높은 집중도에도 불구하고 Moran's I가 분산을 나타내는 음의 값을 보일 수도 있다.

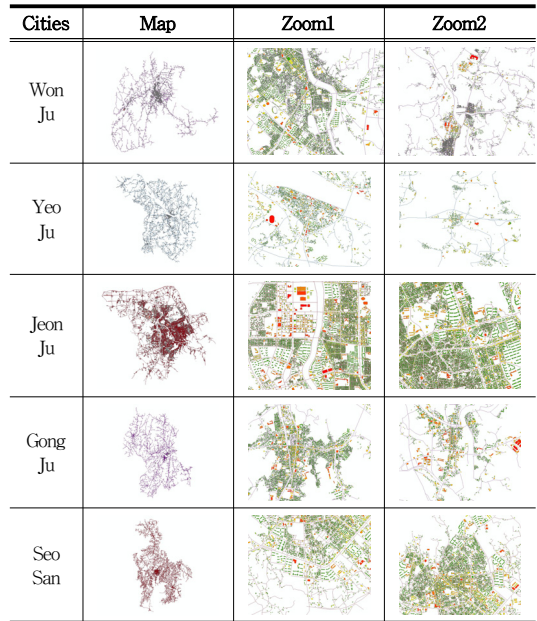
이상에서 살펴본 것과 같이, 어떤 변수로 파악하던 공간적인 압축도를 측정하는 일은 간단한 문제가 아니다. 이는 정밀한 형식화를 요하는 문제로서, 선부른 적용 이전에 별도의 연구를 통해 충분히 그 특성을 이해하는 과정을 여전히 필요로 하고 있다. 아래 계속되는 사례분석에는 따라서 압축도의 직접 측정을 시도하지는 않기로 한다.

### 4. 사례분석

본 절은 앞서 선택한 원주, 여주, 전주, 공주, 서산의 5개 도시에 대해 데이터 자료를 토대로 모델을 적용해보는 단계이다. 아래의 테이블은 각 사례 도시의 기본정보 및 본 연구의 모델에 의해 추정된 도시별 CO<sub>2</sub> 배출량 결과를 보여주고 있다. 참고로 CO<sub>2</sub> 배출량의 단위는 [ton CO<sub>2</sub> eq]로, 도시면적 및 연면적의 단위는 [km<sup>2</sup>]로 통일하였다. 또한, 아래의 Fig 4은 분석에 사용된 사례도시들의 도로망 및 건물들의 공간적 배치, 그리고 개별 건물들의 CO<sub>2</sub> 배출 포텐셜을 보여주고 있다. 일부 확대된 지도에서 개별 건물의 CO<sub>2</sub> 배출 포텐셜이 높을수록 붉은색, 낮을수록 초록색으로 표현되었다.

[Table 1] Basic information on the five sample cities and their estimation results

Cities	Won Ju	Yeo Ju	Jeon Ju	Gong Ju	Seo San
Area	867.4	608.3	206.2	940.5	740.5
# of Registered cars	105,031	36,054	216,377	35,084	53,388
# of Buildings	46,284	43,905	67,113	47,055	38,754
Total residential gross floor area	10.4	4.4	27.7	5.0	7.7
Total non-residential gross floor area	8.3	6.4	19.0	5.6	4.8
Daily total CO <sub>2</sub> emissions (C <sub>total</sub> )	505,708	248,047	557,441	292,020	339,250
CO <sub>2</sub> emissions per car	4.8	6.9	2.6	8.3	6.4
CO <sub>2</sub> emissions per area	538.0	407.8	2,703.4	310.5	458.1



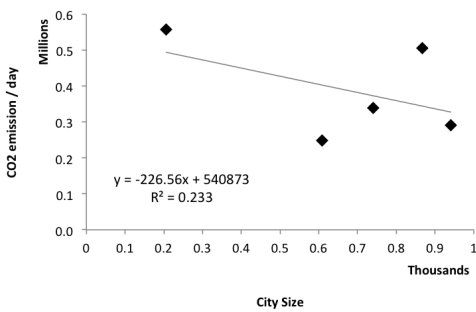
[Fig. 4] The graphical representation of the estimation results for the five sample cities

결과에서 볼 수 있는 바와 같이, 우선 각 도시의 CO<sub>2</sub> 배출량은 도시면적과는 상관성을 갖지 않는 것으로 보인다[Fig 5 (a)]. 이는 본 연구의 기본 전제대로 도시의 총

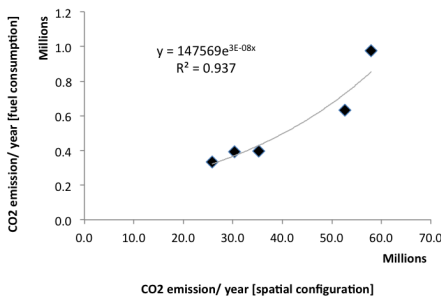


량적 규모보다는 도시구성요소들의 공간적 배치가 CO<sub>2</sub>의 발생량에 보다 중요한 영향을 미칠 수 있음을 시사하고 있다. 하지만, 단위면적당 CO<sub>2</sub> 배출량은 도시면적이 가장 좁은 전주가 압도적으로 가장 낮은 것으로 보아, 도시지역의 압축도가 도로부문 승용차의 CO<sub>2</sub> 배출량의 감소에 미치는 일차적인 효과를 가늠해 볼 수도 있을 것이다.

아래의 Fig 5 (b)은 본 연구의 모델이 추정한 도시별 연간 CO<sub>2</sub> 배출량에 대한 국토해양부에서 연료소비량에 근거해 추정한 도시별 연간 CO<sub>2</sub> 배출량의 회귀분석 결과를 보여주고 있다. 이는 도시구성요소들의 공간적 배치 만으로도 실제 CO<sub>2</sub> 배출량 변이의 94%(p<0.01)를 설명할 수 있음을 나타낸다. 연간 CO<sub>2</sub> 배출량의 추정을 위해서는 모델이 직접 추정한 일일 배출량에 일 년 중 주말을 제외한 일수 260을 곱했다.



(a)



(b)

[Fig. 5] The regression analysis for the estimated amount of CO<sub>2</sub> emission

하지만, 이상의 회귀분석 결과에는 몇 가지 주목할 점이 있다. 첫째, 앞서 언급한 바와 같이 본 공간배치 모델의 추정량은 실제 CO<sub>2</sub> 배출량을 과잉 추정하고 있다. 이는 도시내부 통행량을 전체의 40%로만 한정하고, 평균적

으로 등록 승용차 100대당 단지 13대만 매일의 운행에 참여한다고 보는 것과 유사한 수준의 과잉 추정이다. 그러나 이보다 더 중요한 이유는 거리에 상관없이 도시 내 건물들의 연면적에만 비례하여 통행이 발생한다는 모델의 기본 가정이라고 볼 수 있다. 따라서 주행거리가 과잉 추정되게 되는 것이며, 이는 향후 연구에서 거리감소효과를 도입할 필요성의 근거가 된다.

마지막으로 주목할 만한 사실은 본 연구의 모델이 추정한 도시별 CO<sub>2</sub> 배출량과 실제 CO<sub>2</sub> 배출량 사이에 선형적 관계가 아닌 지수적 관계가 존재한다는 것이다. 이는 전주와 같이 차량의 이동량이 많은 곳에서는, 단순한 왕복 이동이 아닌 차량 이용 양태에 일종의 양의 피드백 고리가 형성되어 있음을 함의하고 있다. 따라서 이동량과 CO<sub>2</sub> 배출량 사이에 단순한 선형적 관계를 가정한 본 연구 모델은 이러한 복잡성을 반영하지 못하고 있는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구는 도시의 물리적 구성요소들의 공간적 배치를 변수로 도로부문 차량 이동에 의해 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 추정하는 모델을 개발하는 목적을 가지고 진행되었다. 모델의 적용을 통해 확인된 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 차량의 주행거리 및 CO<sub>2</sub> 배출량은 도로망의 형태, 건물의 규모 및 용도의 공간적 배치에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. 특히, CO<sub>2</sub> 배출량은 건물 규모의 중심부 압축도에 가장 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 상식적으로 이해할 수 있는 바와 같이, 도시 중심부 건물 규모와 비주거계 용도의 압축도가 높을수록 CO<sub>2</sub> 배출량은 줄어드는 경향이 있다. 하지만, 도시 중심부 도로망의 압축도가 높을수록 CO<sub>2</sub> 배출량은 반대로 늘어나며, 이는 도시 중심부 차량이동을 근본적으로 억제해야 할 필요성을 함의하고 있는 것으로 판단된다.

둘째, 거리감소효과를 반영하지 못한 이유로 발생한 과잉 추정의 문제, 그리고 실제 CO<sub>2</sub> 배출량 데이터와 선형이 아닌 지수적 관계를 갖는 이유를 설명하지 못하는 문제 등의 분명한 한계에도 불구하고, 본 연구가 제안한 모델은 실제 주행거리와 차량 연비에 대한 관찰 없이도 상향식 관점에서 도시 도로부문 CO<sub>2</sub> 배출량의 발생 패턴

을 상당한 정밀도(precision)로 예측할 수 있는 능력을 갖춘 것으로 보인다. 따라서 기존 연료소비량 대비 하향식 추정방식에 대응하여, 도시계획 및 설계 단계에서 유용한 가치를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 도로망의 형태, 건물의 규모 및 용도의 공간적 배치를 관리 및 조정하는 행위를 통해 CO<sub>2</sub> 발생량의 저감 정도를 가늠하는 수단으로 활용해 볼 수 있을 것이다.

향후 진행될 연구에서는 무엇보다 현재 다섯 개로 제한된 사례 도시를 늘려, 보다 충분한 샘플과 함께 모델의 성능을 재검증해 볼 필요가 있다. 또한 압축도 지표에 대한 연구를 통해 도로망과 건물의 규모 및 용도의 압축 정도를 정확히 나타냄으로써 CO<sub>2</sub> 배출량 추정의 통계 변수로서 도입하고, 이를 통해 보다 완전한 계량 모델의 구성을 시도해볼 수 있을 것이다. 마지막으로 앞서 언급한 것과 같이, 거리감소효과를 모델에 도입하여 가까운 거리에 보다 빈번한 통행이 발생하는 현상을 모델이 구현할 수 있다면, 본 모델이 현재 지니고 있는 과잉추정 문제를 해소하고 정성적 측면 뿐 아니라 정량적 측면에서도 모델의 정확도(accuracy)를 크게 제고할 수 있을 것으로 기대 본다.

## References

[1] Republic of Korea Government, *The 3rd National Report according to UNFCC* (in Korean), 2011

[2] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, *The Annual Report on the Green Gas Emission in the Transportation Sector of Korea*, 2010

[3] Korea Transportation Safety Authority, *The Annual report on the Current State of Vehicle Distance Travelled in Korea*, 2010

[4] K.C. Nam, H.S. Kim, M.S. Son, "A study on the correlation between compact of population and transport energy: an approach of compact index", *Journal of Korea Planners Associations*, v43, n2, 155-168, 2008

[5] S.H. Lee, "Space allocation simulator in early urban design stage to reduce carbon emissions: focused on the prediction of the travel distance using land use and transportation plan", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, v12, n11, 5321-5329, 2011

[6] H.J. Yang, M.J. Choi, "Compact city and carbon emissions: an integrated approach of building, transport and

greenfield", *Journal of Korea Planners Associations*, v46, n3, 281-292, 2011

[7] H.T. Park, M.H. Kim, Y.O. Kim, "Beyond compact city: a spatial configuration model for carbon emission reduction", *Proceedings of 9th Space Syntax Symposium*, Sejong University Press, 2013

[8] A. Sevtsuk, M. Mekonnen, "Urban network analysis toolbox." *International Journal of Geomatics and Spatial Analysis*, v22, n2, 287-305, 2012

[9] H.B. Kim, J.K. Kim, "Calculating carbon dioxide emissions in the city and key sectors for low-carbon city", *Journal of Korea Planners Associations*, v45, n1, 35-48, 2010

[10] Korea Energy Management Corporation, "Car CO<sub>2</sub> emission" ([http://bpms.kemco.or.kr/transport\\_2012/car/car\\_choice.aspx](http://bpms.kemco.or.kr/transport_2012/car/car_choice.aspx)), Accessed 10 March 2014

[11] A.S. Fotheringham, "Spatial structure and distance-decay parameters", *Annals of the Association of American Geographers*, v71, n3 425-436, 1981

[12] C.H. Yi, B.H. Kim, S.I. Lee, Influence factors on transportation energy consumption of municipality variation types by population and workers, *Journal of Korea Planners Associations*, v49, n1, 281-297, 2014

[13] A. Siksna, "The effects of block size and form in North American and Austrian City Centres", *Urban Morphology*, v1, 19-33, 1997

[14] B. Hillier, "Centrality as a process: accounting for attraction inequalities in deformed grids", *Urban Design International*, v4, n3, 107-127, 1999

[15] D. J. Watts, S. H. Strogatz, Collective dynamics of 'small world' network, *Nature* v393, 440, 1998

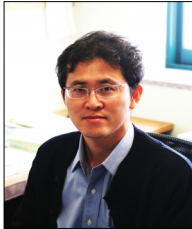
[16] S.N. Kim, K.H. Lee, K.H. Ahn, "The effects of compact city characteristics on transportation energy consumption and air quality", *Journal of Korea Planners Associations*, v44, n2, 231-246, 2009

[17] L. Li, D. Alderson, R. Tanaka, J.C. Doyle, W. Willinger, Towards a theory of scale-free graphs: definition, properties, and implications (extended version), *Internet Mathematics*, v2, n4, 431-523, 2005



**김 영 옥(Young-Ook Kim)**

[정회원]



- 1986년 2월 : 미국콜로라도대학교 대학원 도시설계학과 (도시설계석사)
- 1999년 10월 : 런던대학교 대학원 건축학과 (건축학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 세종대학교 건축학과 교수

<관심분야>

공간분석, 건축계획, 단지 및 도시설계

---

**김 경 용(Kyoung-Yong Kim)**

[정회원]



- 2012년 9월 ~ 현재 : 세종대학교 대학원 건축학과

<관심분야>

공간분석, 건축 및 도시설계

---

**박 훈 태(Hoon-Tae Park)**

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 대학원 도시공학과 (공학석사)
- 2014년 5월 : 런던대학교 대학원 건축학과 (건축학박사)
- 2012년 6월 ~ 현재 : MIM 매핑 및 모델링 연구소 책임연구원

<관심분야>

공간분석, 도시설계