

지구단위에서 CO₂ 배출량 최소화를 위한 토지이용-교통모형에 관한 연구

진장원^{1*}

¹한국교통대학교 교통대학원 교통계획학과

A Study on Land Use-Transportation Model for Minimization of CO₂ Emission Volumes in District

Jang-Won Jin^{1*}

¹Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation

요 약 지구(district)는 도시를 형성하는 기본 단위로 모든 도시활동이 시작되는 장소이다. 따라서 본 연구에서는 지구단위에서의 교통과 토지이용패턴의 결합 형태에 따른 270개의 시나리오를 가정하고 CO₂ 배출량을 분석한 후 CO₂ 배출량을 최소화하는 토지이용-교통모형을 작성하고자 하였다. 그 결과 균등 또는 외곽을 고밀도로 개발하는 토지이용패턴이 지구의 중간부나 1개 중앙존만을 개발하는 것보다 CO₂ 배출량 감소에 유리한 것으로 파악되었다. CO₂ 배출량 감소에 가장 영향을 많이 주는 것은 교통수요관리정책으로, 특히 개발밀도가 높은 상태일수록 CO₂를 감소시키기 위해서 교통수요관리는 필수적인 것으로 판단되었다. 고밀개발이 아닌 경우에 주어진 가상 네트워크에서는 2차로도로에 차량통행금지를 시키고 보행자도로로 전환시킬 경우 CO₂ 배출량을 감소시킬 수 있음을 알게 되었다. 한편, 제시된 토지이용-교통 회귀모델은 지구설계시 CO₂ 배출량을 줄이기 위한 최적대안 선정시 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract District is not only a place that every urban activities are executing but also basic unit that are forming urban structure. Therefore this study tried to make land use-transportation model through analyzing CO₂ exhausting volumes by assuming 270 scenarios those are postulated various land use patterns and transport policies in District. As results, this study shows best District Unit Design technique is the policy that develop equally all blocks or only outer blocks and introduction of car free zone to inner 2 way streets. Most important policy in order to reduce CO₂ gas is to introduce Transportation Demand Management especially in case of hyper high density development. In case of low density development, policy of car free streets in 2 ways roads is efficiency for reducing CO₂ gas. And suggested land use-transportation model will be good for choosing alternatives those are able to reduce CO₂ in District Unit.

Key Words : District, CO₂ Gas Reduction, Scenario, Land use-Transportation Model

1. 서론

1.1 연구목적

세계 에너지소비량의 약 20%를 교통부문이 사용하고

그중 약 98%는 휘발유와 경유 등의 화석연료에 의존하고 있으며 자동차교통에 의한 CO₂ 배출량은 약 25.0%를 차지하고 있다[1,7]. 이에 지구온난화문제 해결을 위해서는 CO₂ 배출량 비율이 높은 승용차 교통량을 감소시키는

본 논문은 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2012년 첨단도시개발사업(과제번호:07 도시재생/B01)의 지원에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Jang-Won Jin(KNUT)

Tel: +82-31-462-8725 email: jangwon@ut.ac.kr

Received June 11, 2013

Revised July 1, 2013

Accepted July 11, 2013

것이 중요한 과제로 대두되고 있다. 주요 선진국에서는 토지이용과 교통을 결합한 집적도시(compact city)와 같은 온실가스 배출이 적은 도시구조로의 개편 등을 꾀함으로써 CO₂ 배출이 적은 삶의 방식을 지향하고 있으며 우리나라에서도 저탄소도시계획과 관련한 다양한 연구들을 진행하고 있다. 부캐년의 예기대로 지구(District)는 작은 규모이지만 도시의 세포(방)처럼 도시활동의 모든 시작과 끝이 이루어지는 가장 중요한 장소이기도 하다. 만일 지구단위에서의 토지이용패턴과 교통정책에 따른 CO₂ 배출량 파악이 가능한 토지이용-교통모형(Land use- Transportation Model: LT모형)이 만들어진다면 탄소배출량을 최소화할 수 있는 도시설계기법의 제시도 가능해질 것이다.

따라서 본 연구에서는 지구단위에서 다양한 토지이용패턴 및 교통정책이 적용된 시나리오를 가정하여 CO₂ 발생량을 측정한 후 CO₂ 배출량을 최소화할 수 있는 토지이용-교통모형을 작성하여 도시설계 시 최적대안을 선정하는 데 도움을 주고자 하였다.

1.2 연구의 내용 및 방법

본 연구에서는 선행연구 및 이론을 고찰한 후 가상 네트워크(Toy Network)를 작성하고 다양한 교통정책과 토지이용방법이 적용된 45개의 카테고리를 가정한다. 가정된 카테고리는 다시 6개의 도시개발밀도별 즉, 270개의 개별 시나리오별로 EMME3 프로그램을 이용하여 CO₂ 발생량을 시뮬레이션한다. 그 후 가장 효율적인 토지이용과 교통이 적용된 지구단위 설계방법을 찾아내기 위해 범용통계패키지인 SPSS20.0을 이용하여 회귀모델을 만들어 교통, 토지이용정책 별 영향 정도를 나타낼 수 있는 LT모형을 작성하고자 하였다. 단, CO₂ 발생량은 모형의 단순화를 위하여 승용차에 한하여 추정하는 것으로 한다.

2. 기존 연구 고찰

2.1 관련 선행연구

탄소저감을 위한 도시계획과 관련한 선행연구를 살펴보면 외국에서는 탄소저감 도시계획지원시스템으로서 다양한 모형의 검토에 관한 연구와 이를 실제 도시에 적용한 연구, 기후변화에 대응하기 위한 계획적 요소의 도입에 관한 연구, 기후변화에 대응하기 위한 계획적 프레임워크의 개발방향을 제시하는 연구 등이 이루어지고 있었다.[2] 이 가운데 본 연구와 관련성이 깊은 기후변화에 대

응하기 위한 계획적 요소의 도입에 관한 연구로서 Zhou et al(2008)은 Texas주 Austin 지역을 대상으로 G-LUM과 교통수요모형을 활용하여 시나리오별 분석을 실시하였으며, Waddell(2002)은 4가지 대표적인 도시모형을 검토후 UrbanSim이라는 프로그램을 활용하여 Oregon주의 Eugene-Springfield를 대상으로 시나리오별 시뮬레이션을 실시하였다[3,4].

국내의 경우 이승일(2010)은 저탄소에너지절약도시구현을 위하여 해외의 토지이용-교통 모델의 검토를 통해 우리나라 대도시에 적용하기 위한 개발방향을 제시하였다. 이재길·김영우(2001)는 토지이용과 교통수요의 동태적 상호작용 모형을 대전시에 적용하였으며, 반영운 외(2008)는 기후변화의 개념과 탄소중립도시의 국내외 동향검토 후 탄소중립도시 계획요소를 탄소저감과 흡수로 구분하여 제시하고, 탄소중립도시의 평가요소를 도출하여 평가모형을 개발하였다[5,6].

국내외 탄소저감을 위한 도시계획에 관한 선행연구를 검토한 결과 해외에서는 이미 탄소저감 도시계획지원시스템을 위한 관련모형의 검토와 실제 도시적용사례가 상당히 많이 진행되고 있음을 알 수 있었다. 하지만 이들의 연구는 대부분이 대규모 도시를 대상으로 하고 있었고, 지구단위를 대상으로 한 경우에는 토지이용-교통의 시뮬레이션보다는 저탄소계획을 위한 계획요소 도출에 머무르고 있어 Tier 2 수준 이상으로 분석하기에는 아직 미흡한 것으로 보였다.

2.2 연구의 차별성

본 연구의 차별성은 다음과 같다.

첫째, 기존 연구의 경우 저탄소도시 조성을 위해 도시의 가장 기초단위인 지구단위에서 교통과 토지이용 요소를 동시에 고려하여 CO₂ 발생량을 최소화시킬 수 있는 방법론을 개발한 연구는 거의 없는 것으로 보인다. 물론 진장원 외(2012)에서 19개의 시나리오를 만들고 CO₂ 발생량에 대한 추정을 시도하였으나 시나리오의 숫자도 적을 뿐만 아니라 단순 집계에 머무르고 있어 모형 작성 단계에는 이르지 않았다.[7] 또한 진장원 외(2012)에서 유사한 연구를 추진하였으나 광범위한 분석에는 미치지 못하였다.

둘째, 지구단위 차원에서 시뮬레이션을 시도한 연구 자체가 희소하다. 최동호(1998)는 주어진 가로망으로 허용가능한 용적율 수준을 가능해보는 개발밀도에 따른 적정 지구설계기법을 고찰한 바 있으나 CO₂ 발생량에 대한 논의는 아직 시작되고 있지 않았다[8].

이러한 인식에서 본 연구는 온실가스 저감을 위한 도

시설계기법 개발의 하나로서 도시의 가장 기초단위인 지구단위에서 토지이용패턴과 주차장 위치, 보행자 천국, 교통수요관리 등 다양한 교통정책을 접목한 시나리오를 고안하고 각각의 결과를 추정하여 가장 적절한 지구단위 토지이용-교통모형을 제시하는 것이 다른 연구와의 차별성이라 할 수 있다.

3. 분석의 틀

3.1 분석 프로그램

지구를 대상으로 통행량을 배정하고 속도를 계산해낼 수 있는 프로그램으로는 EMME3, 사통팔달, VISSIM 등이 있다. 하지만 본 연구에서는 매크로용 시뮬레이션틀이라는 한계는 있지만 연구자의 패키지 보유문제로 우리나라에서 통행량 배정모형으로 가장 범용화 되어 있고 국가 O/D구축 시 기본틀로 이용되고 있는 EMME3를 이용하여 분석하는 것으로 한다.

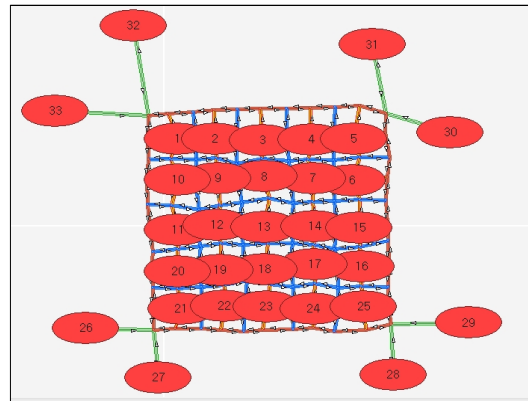
3.2 네트워크 설정

가상 네트워크는 서울시 강남구 국기원 블록과 유사한 크기인 1km×1km의 대형지구(super block)를 설정하고 Base Map겸 시나리오 1로 하였다. 대형지구로 가정할 이유는 지구내에서 다양한 토지이용패턴과 교통정책을 가정하여 시뮬레이션 하기 위해서는 어느 정도 규모가 있어야 하기 때문이었다. 지구를 분할하는 외곽도로는 강남대로와 유사하게 폭원 50m의 왕복 8차로의 대로, 내부도로는 두 종류로서 존을 분할하는 내부도로는 폭원 25m의 왕복 4차로의 중로, 존 내부에는 폭원 12m의 왕복 2차로 인 소로로 가정하였다. 그 결과 존수는 Fig. 1과 같이 중로의 내부도로에 의해 분할되는 25개의 내부존이 있으며 외부존은 각 방향 8개로 설정하였다.

3.3 분석방법론

3.3.1 발생수요 및 통행량지체함수(VDF)

각각의 존에는 기본적으로 침두시에 400통행의 승용차 통행이 생성되고, 25개 존에서 총 10,000~80,000 승용차 통행/피크시를 발생시키는 것으로 가정하였다. 기본 Toy Network를 구성하는 외곽도로 및 내부도로는 [Table 1]에 나타난 것과 같이 통행량지체함수(Volume Delay Function: VDF) 및 차로수, 도로 폭원, 자유속도를 설정하였다.



[Fig. 1] Zone structure of basic scenario

[Table 1] Attributes of links

Link	No. of lane	Width of road(m)	VDF	Free flow speed (km/h)
Outer road	8	50	8	70
Inner road(S13)	6	35	7	60
Inner road	4	25	16	50
Inner road	2	12	11	40
Dummy link	9.9	-	13	20

주) 여기에서 VDF8: 8차로 도시부 도로, VDF7: 6차로 도시부 도로, VDF16: 4차로 도시부 도로, VDF11: 2차로 도시부도로, VDF13: 더미 링크를 의미함

단, 카테고리 13의 경우는 도로면적을 유사하게 하기 위하여 폭 35m의 왕복 6차로 도로로 가정하였다. VDF는 한국교통연구원에서 개발한 『2008년 국가교통DB구축사업』에서 제시한 값을 원용하되, 지구내 도로의 경우 용량은 황정원 외(2012)에서 제시하고 있는 600대/시를 기준으로 하였으며 기본적인 개념은 [Eq.1]과 같다[9,10].

$$T = T_0 [1 + \alpha(V/C)^\beta] + (\text{distance} \times \text{fare per distance} + \text{Initial fare}) / VOT \quad [\text{Eq.1}]$$

단, T : Trip time of link(Generalized cost)

T_0 : Initial trip time(VOT, minutes)

V : Traffic volumes of link(pcu/h)

C : Capacity of link(pcu)

α, β : Parameters

VOT : Value of time for car types

3.3.2 CO₂배출량 계산방법

국제기준인 IPCC에서 제시하고 있는 Tier3 수준의 온실가스 산정방법은 우리나라 자동차와는 현실 여건이 맞지 않는 한계가 있다. 우리나라에서 승용차와 관련된 CO₂ 배출량 산정방법은 현재 국가기관에서 연구 중에 있고 국가기관에 의해 공인된 가장 최신의 방법은 Table 1과 같이 제 3차 교통시설 투자 평가지침 개정안에서 제시한 방법으로 보여진다. 물론 최근 개별 연구가 활발해지기 시작하여 이규진 외(2011)의 연구에서 Tier3 수준의 새로운 CO₂ 배출계수가 발표되고 있지만 국가기관에 의해 공인된 계수 값으로서 Table 2를 원용하도록 한다 [11,12].

[Table 2] Calculation of CO₂ emission coefficient of vehicle models in Korea

Car types	Calculating equations for emission (Unit : g/km)
Auto	$1391.5 \times v^{(-0.5632)}$
Van	Small(Diesel) $1389 \times v^{(-0.544)} (v \leq 30)$ $0.0502 \times v^2 - 6.2772 \times v + 363.18 (30 < v \leq 100)$
	Medium $0.1251 \times v^2 - 15.385 \times v + 646.05$
	Big $2426.4 \times v^{(-0.3604)} (v \leq 50)$

3.4 시나리오 구축

시나리오는 5가지 종류(Type)의 변수로 구성하였다. 첫 번째는 지구개발패턴에 따른 설정, 두 번째는 개발밀도로서 존당 발생통행량 400대/시부터 3200대/시까지 가정하였다. 세 번째는 도로망에 위계를 부여했을 경우, 네 번째는 주차장 위치의 변경에 따른 차이 파악, 다섯 번째는 내부도로의 통행금지에 따른 차이를 파악하기 위해 설정하였다. 각각을 조합할 경우 720가지의 시나리오 구성이 가능하지만 분석의 효율성을 위해 반복되는 시나리오 등은 제외하고 구성하여 270개 시나리오에 대해 시뮬레이션 후 분석 정리하였다. 다음은 각각의 45개 카테고리(C)에 대한 설명이다. 각각의 카테고리는 개발밀도를 400대/시/존에서 3200대/시/존까지 가정하였다.

- C1: 내부의 모든 25개 존이 균등하게 개발되는 패턴으로 기본 Base Map과 동일.
- C2: 브라질의 꾸리찌바식 개발패턴으로 간선도로에 접한 외곽 16개 존만 개발되며 내부 9개 존은 개발하지 않음.
- C3: 지구내 중간지점에 해당하는 8개의 존만 개발되는 패턴으로 간선도로에 접한 외곽 16개 존과 가장 중심

부 1개 존은 개발하지 않음.

- C4: 두바이의 지구라트와 같은 개념으로 지구내 가장 중심부 1개 존만 개발되고 간선도로에 접한 외곽 16개 존과 중간지점의 8개 존은 개발하지 않음.
- C5: 지구 모퉁이 4곳(1, 5, 21, 25번) 존에 공동주차장을 건설하여 지구내 모든 차량은 의무적으로 4곳 중 한 곳에 주차하도록 가정하고 지구내 중심부 9개 존은 통행금지 구역으로 설정.
- C6: C5번과 동일하게 지구내 9개 존을 통행금지 구역으로 설정. 토지이용은 균등개발이나 결과적으로는 외곽 16개의 존만 O/D 발생.
- C7: 도로 하나씩 건너가며 차량용, 보행자 전용이 교차하는 일산신도시와 유사한 패턴으로 개발형태는 전체 균등개발이나 내부의 12m(2차로) 도로는 보행자 전용 도로로써 차량통행금지됨. 2차로 도로가 차량통행금지되므로 존중심에서 4차로 도로로 연결되도록 함.
- C8: C7에 지구모퉁이 4존(1, 5, 21, 25번)에 공동주차장을 건설하여 지구내 모든 차량은 의무적으로 4곳 중 하나에 주차하도록 가정.
- C9: 내부의 12m(2차로) 도로는 보행자 전용도로로써 차량이 통행금지 되나 지구내 중간지점에 해당하는 8개의 존만 개발되는 패턴.(C3과 동일)
- C10: 전체적으로 균등개발하되 지구 내부 중간지점(7, 9, 17, 19번 존)에 4개의 공동주차장을 건설하여 지구내 모든 차량은 의무적으로 4곳 중 한 곳에 주차하도록 가정. 결과적으로 차량 O/D는 7, 9, 17, 19번 존에서만 발생.
- C11: 전체적으로 균등개발하되 지구 외곽의 미드 블럭 지점(3, 11, 15, 23번 존)에 4개의 공동주차장을 건설하여 지구내 모든 차량은 의무적으로 4곳 중 한 곳에 주차하도록 가정. 결과적으로 O/D는 3번, 11번, 15번, 23번 존에서만 발생.
- C12: 전체적으로 균등개발하되 도로망의 패턴을 조정함. 즉, 내부도로 중 위계가 낮은 2차로 도로는 직접 외곽도로로 접근을 제한시키고 4차로 도로는 자유롭게 외곽도로와 연결시킴.
- C13: 전체적으로 균등개발하되 교통 측면에서 간선도로-집분산도로-지구도로의 도로망 위계를 갖도록 강력히 조정하여 내부도로 중 위계가 낮은 2차로 도로는 직접 외곽도로로 접근을 제한시킴. 또한 4차로 도로는 6차로로 변경하고 동, 서, 남, 북의 한 곳만 외곽도로와 연결.
- C13-1: C13과 동일하나, 4차로 도로를 6차로도로가 아닌 4차로도로로 존치.
- C13-2: C13과 동일하나, 외곽도로와 접속하는 지점을

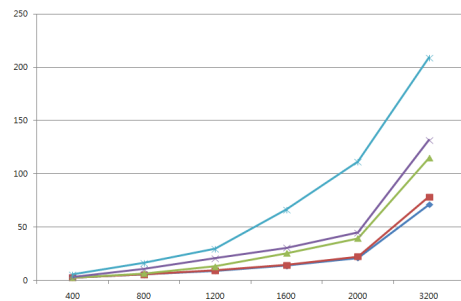
- 1군데에서 2군데로 늘림.(중간 수준의 접근통제)
- C14: 균등개발하되 지구모퉁이 4곳(1, 5, 21, 25번) 존에 사는 사람들은 모두 대중교통을 이용하는 것으로 설정.(TOD 개념 부여)
- C15: C1과 동일하되 50%의 주민이 자전거를 이용하는 것으로 가정.(교통수요관리 도입)
- C16: 균등개발이며 C12번의 도로망 패턴에 C15번과 같이 50%의 주민이 자전거를 이용하는 것으로 가정.
- C17: C2(외곽고밀개발)와 동일하되 개발된 존의 사람들이 50%는 자전거를 이용하는 것으로 가정.(교통수요관리)
- C18: C1과 동일하되 자전거 이용률 2.5%로 가정.(우리나라의 낮은 자전거 이용률을 가정)
- C19: C1과 동일하되 자전거 이용률 5.0%.
- C20: C1과 동일하되 자전거 이용률 10.0%.
- C21: C1과 동일하되 자전거 이용률 20.0%.
- C22: C1과 동일하되 자전거 이용률 30.0%.
- C23: C1과 동일하되 자전거 이용률 40.0%.
- C24: C4와 동일하되 2차로는 통행금지이며 입구는 16개로 가정.
- C25: C4와 동일하되 2차로는 통행금지이며 입구는 4개로 가정.(4차로는 6차로로 가정)
- C26: C4와 동일하되 2차로는 통행금지이며 입구는 4개로 가정.(4차로 존치)
- C27: C4와 동일하되 2차로는 통행금지이며 입구는 8개로 가정.
- C28: C4와 동일하되 통행금지 없으며 입구는 16개로 가정.
- C29: C4와 동일하되 통행금지 없고 입구는 4개로 가정.(4차로는 6차로로 가정)
- C30: C4와 동일하되 통행금지 없으며 입구는 4개로 가정.(4차로 존치)
- C31: C4와 동일하되 통행금지 없으며 입구는 8개로 가정.
- C32: 외곽고밀(C2)와 동일하되 2차로는 통행금지이며 입구는 16개로 가정.
- C33: 외곽고밀(C2)와 동일하되 2차로는 통행금지, 입구는 4개로 가정.(4차로는 6차로로 가정)
- C34: 외곽고밀(C2)와 동일하되 2차로는 통행금지이며 입구는 4개로 가정.(4차로 존치)
- C35: 외곽고밀(C2)와 동일하되 2차로는 통행금지이며 입구는 8개로 가정.
- C36: 중간고밀(C3)과 동일하되 통행금지 없으며 입구는 16개로 가정.
- C37: 중간고밀(C3)과 동일하되 통행금지 없으며 입구는 4개로 가정.(4차로는 6차로로 가정)

- C38: 중간고밀(C3)과 동일하되 통행금지 없으며 입구는 4개로 가정.(4차로 존치)
- C39: 중간고밀(C3)과 동일하되 통행금지 없으며 입구는 8개로 가정.
- C40: 외곽고밀(C2)와 동일하되 통행금지 없으며 입구는 16개로 가정.
- C41: 외곽고밀(C2)와 동일하되 통행금지 없으며 입구는 4개로 가정.(4차로는 6차로로 가정)
- C42: 외곽고밀(C2)와 동일하되 통행금지 없으며 입구는 4개로 가정.(4차로 존치)
- C43: 외곽고밀(C2)와 동일하되 통행금지 없으며 입구는 8개로 가정.

4. 시뮬레이션 결과 비교

4.1 지구개발패턴에 따른 결과

Fig. 2는 토지이용개발패턴에 따른 개발밀도별(400대/시~3200대/시) CO_2 배출량을 나타낸 것이다. 배출량은 지구전체를 균등하게 개발을 하거나 외곽을 고밀도로 개발하는 방안이 거의 유사하고 중간부를 개발하거나 모퉁이에 주차장을 설치하는 개발패턴이 유사했다. 중심의 한 개 존(center) 만을 개발하는 경우 1200대/시/존의 중밀도까지는 큰 차이는 없었지만 1600대/시/존 이상 고밀도로 개발하는 경우에는 배출량이 급격하게 증가하고 있어 두바이 지구라트와 같은 개발패턴의 경우 초고층 빌딩의 중심부에서 대부분의 도시활동이 이루어지지 않는다면 총 CO_2 배출량 측면에서는 가장 불리한 것으로 나타났다.

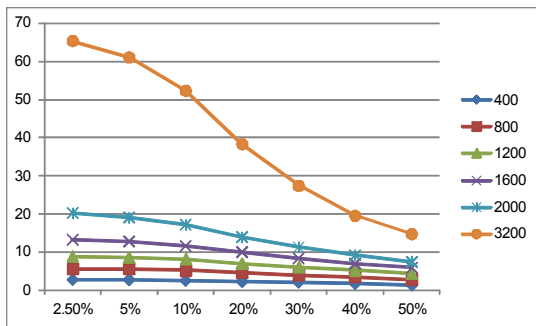


[Fig. 2] Total CO_2 emission by development pattern

4.2 교통수요관리에 따른 결과

Fig. 3은 균등개발을 조건으로 자전거 이용률이 2.5%에서 50%까지 증가될 때 개발밀도별 CO_2 배출량의 추

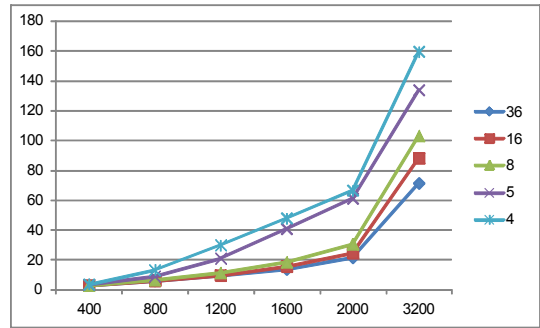
이를 나타낸 것이다. 자전거 이용자가 우리나라 현재 수준인 2.5% 즉, 교통수요관리가 전혀 되지 않는 상황에서는 개발밀도가 높아질수록 배출량도 급격히 증가하다가 특히 초고밀밀도(3200대/시/존) 상태에서는 교통정책이 심각해져 CO₂ 배출량이 기하급수적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 전체 통행자중 50%가 녹색교통을 이용하는 수준의 교통수요관리가 가능해질 경우에는 초고밀밀도에서도 배출량의 증가폭이 상대적으로 급격하지 않음을 알 수 있다. 따라서 개발밀도가 높은 상태일수록 교통수요관리는 더욱 필요한 것으로 판단된다. 흥미로운 것은 모든 개발밀도 수준에서 수요관리 10%~30% 사이의 기율기가 가장 급한 것으로 나타나 지구단위 교통정책에서 주민의 10%에서 30%를 승용차가 아닌 타교통수단을 이용하도록 유도하는 것은 CO₂ 배출량 감소정책 측면에서 유용할 것으로 판단되었다.



[Fig. 3] Total CO₂ emission by TDM

4.3 도로위계부여에 따른 결과

Fig. 4는 개발밀도별로 간선도로(8차로)와 지구도로(2차로)의 접속지점수에 따른 CO₂ 발생량을 나타낸 것이다. 400~2000대/시/존의 저, 중밀도개발 수준에서는 전체를 접속시키는 36개에서 8개 접속지점까지는 거의 차이가 없는 것으로 나타나지만 5개 또는 4개만을 접속시키는 경우에는 800대/시/존까지의 저밀도개발상태를 제외하고는 배출량이 높게 나타나는 것으로 파악되어 지나치게 과도한 접근통제는 오히려 역효과를 낼 수 있음을 알 수 있었다. 하지만 접근로 36개와 16개 사이에는 큰 차이가 없기 때문에 어느 정도 적절한 범위내에서는 과도한 접근보다 적절한 접근통제를 할 경우 전체적인 통행속도의 증가를 기대할 수 있으므로 이 범위내에서는 설계자가 재량을 발휘할 수도 있을 것으로 판단된다.



[Fig. 4] Total CO₂ emission by road hierarchy

4.4 회귀분석 결과

Table 3과 같이 독립변수를 가정하고 CO₂배출량을 종속변수로 설정하여 회귀분석을 실시하였다. 이 분석의 목적은 통계적으로 유의한 회귀계수를 추출하여 토지이용-교통 CO₂ 배출량 모델을 작성하는 데 있었다.

[Table 3] Variables for regression model

	Categorical values	Measuring values
development pattern	dpattern : 5(equal), 4(outer), 3(mid), 2(corner), 1(center zone)	nofz : No. of developed zones of 25 zones
development density	-	totalvol : No. of trips, volpz : No. of trips per zone
System of road	styleaccess : trip prohibition of access road: yes(1), no(0)	noaccess : No. of access roads
Trip prohibition	ynprohibit : trip prohibition of inner road: yes(1), no(0)	lengthprohi : Length of trip prohibition (m), squareprohi : Square meters of trip prohibition(m ²)
Location of Parking	locationpark : No(1), Corner(2), Mid(3), Outer(4)	-

그 결과 Table 4와 같이 회귀모델이 작성되었다. 단계 선택방식을 이용하여 작성된 모델에서 독립변수들은 공차한계가 0.1보다 상당히 크고, VIF 값은 10보다 훨씬 작아서 공선성의 문제는 없는 것으로 판단된다. 모델에 의하면 CO₂배출량에 영향을 주는 변수는 존당 통행량, 총 통행량은 정(+)의 관계를, 외곽도로에의 접속지점수, 통

[Table 4] Regression model by CO₂ emission

	Regression model					R ²
Regression model (t value)	-11.829 +0.001*volpzs + 0.002*totalvol - 0.684*noaccess - 0.001*lengthprohi (-2.859) (15.107) (24.680) (-5.936) (-2.678)					0.851
Tolerance	0.390	0.765	0.430	0.660	0.639	
VIF	2.562	1.307	2.324	1.514	1.564	
F value	301.949, Sig. probability(p) = 0.000					

행금지 도로연장은 부(-)의 관계를 갖는 것으로 나타났다. 즉, 회귀식에 의하면 존당 차량 한 대가 증가하면 CO₂ 1 kg, 총통행량으로 차량 한 대가 증가하면 CO₂ 2kg이 증가하며, 접속지점수는 1개소가 증가하면 684kg이 감소하고 통행금지 도로가 1m 늘 때마다 1kg이 감소하는 것으로 나타났다. 이같은 회귀모델은 지구설계시 CO₂ 배출량을 줄이기 원하는 설계자들에게 개발패턴, 개발밀도, 도로패턴 등 교통과 도시설계적 요소를 조합하여 최적 모델을 선택할 수 있도록 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 종합적인 결과

Table 5는 밀도별로 각 시나리오의 CO₂ 배출량을 크기순으로 정렬한 결과이다. 균등개발과 외곽개발의 차이는 극히 미미하였으며 다음과 같은 내용을 유추할 수 있었다.

- ① 표의 상단부에 나타나는 바와 같이 CO₂ 배출량이 최소가 되는 시나리오들은 교통수요관리(TDM)가 실행될 경우이다. 당연한 결과이겠지만 TDM 비율이 높을수록 배출량은 감소했으며 특히 고밀도개발이 이루어질수록 TDM의 중요성은 절대적임을 알 수 있다.
- ② 밀도가 1200 이상부터는 TDM을 제외한 어떤 교통정책도 CO₂ 감소에 영향을 미치지 못한다. 고밀도개발인 경우에는 균등 또는 외곽개발의 토지이용패턴만 조정하는 것이 CO₂ 배출량 감소에 가장 적합하다.
- ③ 1200 이상에서는 아무런 교통정책도 취하지 않는 것이 좋지만 저밀도에서는 2차로의 경우 자동차 통행을 금지시키고 보행자 전용도로로 전용할 경우 CO₂ 배출량이 감소한다. 또한 2차로만을 길게 통행금지를 시키는 선적(線的)규제가 2차로와 4차로를 동시에 통행금지시키는 면적(面的) 규제보다

좋은 것으로 파악되었다.

- ④ 중간 + 2차 통금 + 8(접근제한)은 고밀도로 갈수록 나빠지다가 1600 이후에는 동일한 순위를 나타낸다.
- ⑤ 중간개발패턴은 고밀도로 갈수록 조금씩 불리해진다.
- ⑥ 중간개발의 경우 저밀에서 고밀까지 2차통금, 병행하는 것이 유리, 그러나 8차로 이상 접근제한 시에는 오히려 배출량이 증가한다.
- ⑦ 균등 + 외곽 주차는 저밀 또는 초고밀개발에서 유리하다.
- ⑧ 중앙 1개 존만 개발하는 방식은 전체적으로 가장 좋지 않은 그룹에 속한다. 특히 초고밀개발에서는 2차 통금, 접근제한 모두 불리하다.
- ⑨ 전체에서 가장 안좋은 Group은 센터개발 + 접근통제 + 2차로 통행금지 정책이다.
- ⑩ 균등개발에서 지구 전체를 대상으로 TDM 10% 하는 것보다는 외곽 4존에서 대중교통중심개발(Transit Oriented Development)을 하는 것이 다소 유리한 것으로 나타났다. 즉, 10% 이하의 미약한 TDM보다는 강력한 토지이용-교통접목 정책이 유리한 것으로 보인다.
- ⑪ 800대/시/존 이하의 저밀도 개발에서는 평범한 균등 또는 외곽개발의 순수한 토지이용정책보다는 중간부 개발과 2차로 통행금지 정책의 교통정책을 병행하는 것이 유리하다.
- ⑫ 균등개발방식의 저밀도일 때 16개소 미만의 도로를 접속시키는 경우 단순한 중간부 개발 방식보다 불리한 것으로 파악되었다. 그러나 개발밀도가 높아지면서 중간부 개발방식의 배출량은 점차 증대해가는 것을 볼 수 있다.

[Table 5] CO₂ emission ranking by development density and scenario

400	800	1200	1600	2000	3200
Equ+50	Equ+50	Equ+50	Equ+50	Equ+50	Equ+50
Equ+16+50	Equ+16+50	Equ+16+50	Equ+16+50	Equ+16+50	Outer+50
Outer+50	Outer+50	Outer+50	Outer+50	Outer+50	Equ+16+50
Equ+40	Equ+40	Equ+40	Equ+40	Equ+40	Equ+40
Equ+30	Equ+30	Equ+30	Equ+30	Equ+30	Equ+30
Equ+20	Equ+20	Equ+20	Equ+20	Equ+20	Equ+20
Equ+4TOD	Equ+4TOD	Equ+4TOD	Equ+4TOD	Equ+4TOD	Equ+4TOD
Equ+10	Equ+10	Equ+10	Equ+10	Equ+10	Equ+10
Equ+2 way R	Equ+2.5	Equ+5	Equ+5	Equ+5	Equ+5
Mid+2 way R	Equ+5	Equ+2.5	Equ+2.5	Equ+2.5	Equ+2.5
Equ+2.5	Equ+2 way R	Equ	Equ	Equ	Equ
Equ+5	Mid+2 way R	Outer	Outer	Outer	Outer
Mid+2 way R+16	Mid+2 way R+16	Equ+2 way R	Equ+16*	Equ+16*	Equ+16*
Equ	Equ	Mid+2 way R	Equ+2 way R	Equ+Z.R.	Equ+Outerparking1
Outer	Outer	Equ+16*	Mid+2 way R	Equ+2 way R	Equ+2 way R
Equ+Z.R.	Equ+Z.R.	Mid+2 way R+16	Mid+2 way R+16	Mid+2 way R	Mid+2 way R
corner+2 way R	corner+2 way R	Equ+Z.R.	Equ+Z.R.	Mid+2 way R+16	Mid+2 way R+16
Mid+2 way R+8	Equ+16*	corner+2 way R	corner+2 way R	corner+2 way R	Equ+Z.R.
Mid	Outer+16	Equ+8	Equ+8	Outer+16	Outer+16
Equ+Outerparking1	Equ+8	Outer+16	Outer+16	Equ+8	Equ+8
Equ+16*	Mid	Outer+8	Outer+8	Outer+8	Equ+Midparking
Equ+8	Outer+8	Mid	Mid	Equ+Midparking	Outer+8
CT+2 way R+16	Mid+16	Mid+16	Mid+16	Mid	corner+2 way R
Mid+16	Mid+8	Mid+8	Mid+8	Mid+8	Mid
Outer+16	Mid+2 way R+8	Mid+2 way R+8	Equ+Midparking	Mid+16	Mid+16
CT+2 way R+8	CT+2 way R+16	CT+2 way R+16	Equ+Outerparking1	Equ+Outerparking1	Mid+8
Mid+8	Equ+46	Equ+Midparking	corner	corner	corner
Outer+8	CT+2 way R+8	corner	Mid+2 way R+8	Mid+2 way R+8	Mid+2 way R+8
corner	Outer+46	Equ+46	CT+2 way R+16	Outer+46	Equ+46
Mid+2 way R+46	Mid+2 way R+46	Equ+Outerparking1	Equ+46	Equ+46	Mid+2 way R+46
Equ+Midparking	Mid+46	Outer+46	Outer+46	Mid+2 way R+46	Outer+46
Equ+46	CT+2 way R+46	CT+2 way R+8	CT+8	CT+2 way R+16	CT+2 way R+16
CT+2 way R+46	Equ+Midparking	Mid+46	Mid+2 way R+46	Equ+44	Equ+44
Mid+46	corner	Mid+2 way R+46	Equ+44	Outer+44	Outer+44
Outer+46	Equ+Outerparking1	CT+8	Outer+44	CT+8	Mid+46
Equ+44	Equ+44	CT+16	Mid+2 way R+44	Mid+2 way R+44	Mid+2 way R+44
Mid+44	Outer+44	CT+2 way R+46	Mid+46	Mid+46	CT+2 way R+8
Mid+2 way R+44	Mid+44	CT	CT+2 way R+8	CT+2 way R+46	CT
Outer+44	CT+8	Equ+44	CT+2 way R+46	Mid+44	CT+16
CT+2 way R+44	CT+16	Outer+44	Mid+44	CT+2 way R+8	Mid+44
CT	Mid+2 way R+44	Mid+2 way R+44	CT	CT+16	CT+2 way R+46
CT+16	CT	Mid+44	CT+16	CT+46	CT+8
CT+8	CT+46	CT+46	CT+46	CT	CT+46
CT+46	CT+2 way R+44	CT+2 way R+44	CT+2 way R+44	CT+44	CT+2 way R+44
CT+44	CT+44	CT+44	CT+44	CT+2 way R+44	CT+44

Equ:Equally development, Outer: Outer development, Mid: Mid part development, CT: Only center development, 2 way R: Prohibition of 2 lane roads, Z.R.: Restriction of zonal traffic, corner: Parking lot in corner

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 가상네트워크(Toy Network)를 설정하고 다양한 토지이용패턴과 교통정책을 접목한 270개의 시나리오를 가정한 후 지구단위에서 도시설계 및 교통정책의 적용에 따른 CO₂의 배출량을 산정하였다. 그 결과 균등하게 개발하는 토지이용패턴이나 외곽을 고밀도로 개발하는 토지이용패턴이 지구의 중간부나 1개 중앙존만을 개발하는 것보다 CO₂ 배출량 감소에 유리한 것으로 파악되었다. CO₂ 배출량 감소에 가장 영향을 많이 주는 것은 교통수요관리정책으로 CO₂ 배출량을 줄이기 위해 교통수요관리는 필수적으로 추구되어야 할 정책임을 알 수 있었다. 특히 개발밀도가 높은 상태가 될수록 교통수요관리는 더욱 필요한 것으로 판단되었다. 고밀개발이 아닌 경우에 주어진 가상 네트워크에서는 2차로도로에 차량을 통행금지시키고 보행자도로로 전환시킬 경우 CO₂ 배출량을 감소시킬 수 있음을 알게 되었다. 흥미로운 것은 토지이용정책이나 교통정책을 개별적으로 실시하는 것보다는 토지이용과 교통정책을 결합하여 실시하는 경우 배출량 감소에 더욱 효과가 있음을 알 수 있었다. 또한 일반적으로 교통공학에서 이용되고 있는 접근통제가 과도하게 이루어질 경우 가정된 토이네트워크 상에서는 역효과를 주는 것으로 나타났다. 한편, 제시된 회귀모델은 지구설계시 CO₂ 배출량을 줄이기 위한 최적대안 선정시 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구의 한계로서는 설정될 수 있는 전체 시나리오 720개중 270개만을 시뮬레이션하여 전체를 면밀히 비교하지 못한 것이다. 추후 나머지를 조합하여 시뮬레이션하면 훨씬 더 정교한 모델이 작성 가능할 것으로 보인다. 또한 격자형 토이네트워크만 가정되었으나 방사형, 원형 등도 함께 고려될 필요가 있으며 본 연구에서 이용한 EMM3의 경우 매크로 분석에 합리적인 패키지이므로 VISSIM 등과 같은 메조 분석프로그램을 이용할 경우 더욱 정교한 분석이 가능해질 것으로 보인다.

References

[1] Fiddaman, T. Fiddaman, "Dynamics of climate policy". *System Dynamics Review*. pp. 21-34, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/sdr.360>

[2] Yu, Seon-Cheol · Min, Kyung-Ju · Wang, Kwang-Ik · Noh, Kyoung-Sik, "A study on the Conception of the Low Carbon Planning Support Systems", *Urban Design*

Institute of Korea 2012 Autumn Conference. pp. 515-526, Nov. 2012.

- [3] Zhou, B., Kockelman. K., Lemp. J. D, "Transportation and Land Use Policy Analysis Using Integrated Transportation and Gravity-Based Models", *88th Annual Meeting of the Transportation research Board*, 2008.
- [4] Waddell, P, "UrbanSim : Modeling Urban Development for Land Use, Transportation, and Environmental Planning", *Journal of the American Planning Association*, Vol 68(3), pp. 297~314, 2002
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01944360208976274>
- [5] Lee, S. I., "Development Scheme of a Land-Use Transport Model for Korea's Large Cities toward a Low-Carbon-Energy-Saving City", *Journal of the Korea Planners Association* Vol. 45 No.1, pp. 265-281, 2010.
- [6] Lee J. J., Choi S. H., "A Study on the Development of the Planning Indicator for Carbon Neutral on the District Unit Plan". *Journal of the Korea Planners Association* Vol. 44 No.4 . 2009. pp. 119-132.
- [7] Jangwon Jin, Minkwan Park, "A study on the District Unit Design for CO₂ Reduction of Transportation", *Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society* Vol.13 No.4, 1880-1888., 2012. pp. 17-22.
- [8] Jangwon Jin, Jungwon Whang, "A study on the Minimization of CO₂ Reduction by Jointing of Transportation and District Unit Design", *Proceedings of The 2012 Conference of Urban Design Institute of Korea*, 2012. pp. 491-499.
- [9] Choi, D.H., "Proper Road Network by Land Use Density", Ph.D. Dissertation of Seoul National University, 1998.
- [10] Korea D.O.L & O., "The 3rd Investment Assessment Guidebook for Transport Facilities", 2009., p.130
- [11] Whang J. W., Jangwon Jin, Calculation of Road Capacity for Two Way 4 Lane Street in Block, *Proceedings of The 48th Conference of Korean Society of Civil Engineering*, 2012. pp. 5-8.
- [12] Lee, K.J. et al, "A study on the CO₂ Emission Factors on Road Traffic", *Journal of Korea Society of Transport* Vol 37 No 6, pp. 126-135, 2011.
- [13] Korea Transportation Institute, "2008 Nationwide DB Construction Project", 2009.

진 장 원(Jang-Won Jin)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 (도시계획석사)
- 1998년 3월 : 동경대학 대학원 도시공학과 (교통공학박사)
- 1993년 1월 ~ 1998년 8월 : 서울시정개발연구원 연구원
- 1998년 9월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통대학원 교수

<관심분야>

교통계획, 대중교통, 녹색교통