

■ 論 文 ■

도시교통체계와 에너지효율성의 관계분석

Relationships between Urban Transportation System and Energy Efficiency

신 용 은

(동의대학교 도시공학과 교수)

강 민 우

(동의대학교 도시공학과 석사)

임 미

(울산광역시청 교통건설국 전문직)

목 차

- | | |
|--|---|
| <p>I. 서론</p> <p>1. 배경과 목적</p> <p>2. 문제의 정의와 접근방법</p> <p>II. 관련연구</p> <p>III. 모형구축</p> <p>1. 교통체계와 에너지소비 관계</p> <p>2. 모형을 위한 가정</p> | <p>3. 교통에너지 산정식</p> <p>IV. 민감도 분석</p> <p>1. 통행거리(도시의 광역화)</p> <p>2. 에너지계수(기술발전)</p> <p>3. 수단분담율 변화</p> <p>V. 결론</p> <p>참고문헌</p> |
|--|---|

Key Words : 도시교통, 에너지계수, 모형, 수단분담율, 밀도
 Urban Transportation, Energy Intensity, Model, Modal Split, Density

요 약

도시교통체계에 의한 에너지소비는 교통체계 자체의 특성 뿐 아니라 도시의 공간구조에도 크게 영향을 받는다. 그러나 현재까지 이와 같은 주제에 관한 연구가 매우 미미한 실정이다. 본 연구는 도시의 공간적 특성과 교통체계의 특성을 동시에 고려하고 교통 에너지 소비에 영향을 미치는 요소와 요소 간 관계 분석에 주목적을 둔다. 이를 위해 도시와 교통체계가 지닌 주요 특성을 기반으로 도시모형을 구축하여 교통체계에 의한 에너지 소비 산정식을 도출하였다. 도출된 모형과 산정식을 기반으로 에너지 소비량과 통행거리, 에너지계수 및 수단분담율이 에너지 소비에 미치는 영향을 수치적 민감도 분석을 시행하여 파악하였다. 그 결과 교통에너지 소비에 미치는 영향력으로 수단분담율이 가장 큰 것으로 파악되었으며, 또한 주거 및 고용밀도와 기술발전에 따른 에너지효율성도 에너지 소비량에 매우 민감한 변수로 파악되었다.

The amount of energy consumed by a transportation system in a city is influenced not just by a transportation system itself but also by city's spatial character. Yet there have been very limited studies on this subject. This study investigates the factors that influence the energy consumption by a transportation system and city's spatial character. The model of an urban area confined within a definite boundary is assumed in order to develop the relationships between the energy consumption and the transportation system. Various assumptions on the character of a city and activities are made. An equation for computation of the energy consumption is derived with such factors as modal split, densities of residents and workers, as well as technological development. Using the equation, sensitivity analyses are performed in order to identify the relationships between energy consumption and influencing factors. It is found that the modal split is the most powerful factor that determines the energy consumption by the transportation system. Yet it is also found that the densities of residents and workers and the technological factors are very important in determining the amount of energy consumption as well.

이 논문은 2009학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음.(과제번호 2009AA152)

1. 서론

1. 배경과 목적

교통은 사회·경제적 활동을 지원하여 국가 및 지역의 성장과 발전을 유지시키는 기능을 수행하는 동시에 그 과정에서 석유와 같은 한정된 자원을 소비하고 지구의 온난화를 가속시키는 온실가스를 배출한다. 금세기 들어 범세계적으로 교통부문의 에너지 사용량과 탄소배출량을 감축하기 위한 노력의 일환으로 “지속가능한 개발(Sustainable Development)”이란 새로운 패러다임이 교통부문에 적용되어왔고, 최근 정부의 녹색성장기조에 따라 “지속가능한 교통물류발전법”을 제정하여 에너지 효율적 교통체계 구축을 위한 법적 근거를 마련하였다. 이에 따라 교통과정에서 발생하는 에너지 소비의 감축 문제는 초미의 관심사로 대두되고 있다.

교통에너지 소비량은 교통수단에 따라 큰 차이가 나기 때문에 다양한 수단으로 구성된 도시교통체계의 경우, 교통량과 더불어 수단분담율에 따라 도시교통체계의 에너지 소비량은 상당한 차이가 발생하게 된다. 통행거리 역시 교통에너지 소비에 상당한 영향을 미치기 때문에 도시교통부문의 에너지 소비에 관한 문제를 검토하기 위해서는 도시교통체계를 구성하고 있는 다양한 교통수단 및 통행거리를 결정하는 도시공간구조에 대한 이해가 요구된다고 할 수 있다.

그간 교통분야의 에너지소비와 관련하여 교통 및 도시계획분야에서 다양한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 교통분야의 경우 주로 교통체계의 특성(교통량, 수단분담율 등)만을 고려하여 연구가 진행되어왔고, 반면 도시분야에서는 공간특성에 초점을 두고 직주근접의 개념이나 밀도와 같은 지표를 통행거리와 관련한 연구에 그쳐, 현재 도시교통체계에 의해 발생하는 에너지 소비 문제에 대한 총체적 연구는 전무한 실정이라 할 수 있다.

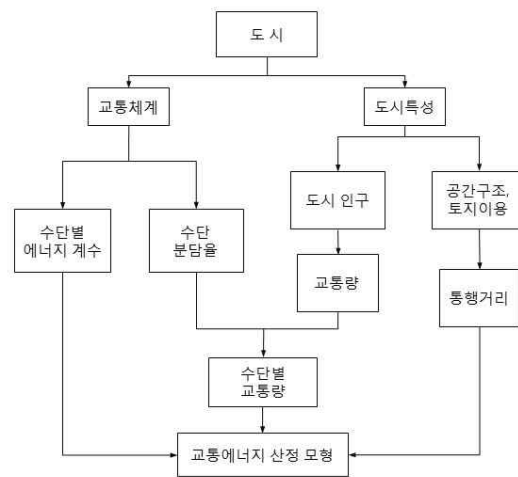
다양한 수단으로 이루어진 도시교통체계는 도시를 구성하는 기반 요소의 하나이며, 또한 인구 규모, 공간구조, 토지이용 등 다양한 요인에 의해 체계가 결정되거나 영향을 받는다. 예를 들면, 인구 규모는 교통량을 결정하는 중요한 요인이며, 공간구조와 토지이용은 통행거리를 결정한다. 따라서 도시교통에 의한 에너지 이슈는 교통분야 혹은 도시분야의 개별적 관점에서만 연구되어서는 한계가 있으며, 도시의 특성과 교통체계의 특성을 통합적으로 고려하여 연구될 필요가 있다.

본 연구는 도시특성과 교통체계의 특성을 반영한 교통에 의한 에너지 소비와의 관계 분석에 주목적을 둔다. 이를 위해 도시와 교통체계가 지닌 주요 특성을 기반으로 도시모형을 구축하고, 교통에너지 소비량을 결정하는 요소를 파악하여 교통에 의한 에너지 소비 산정식을 도출하였다. 마지막으로 도출된 모형과 산정식을 이용하여 에너지 소비량과 요소 간의 관계를 파악하기 위해 수치적 민감도 분석을 시행하였다.

2. 문제의 정의와 접근방법

일반적으로 다른 조건이 일정하다면 도시 내 발생교통량은 그 도시의 인구 규모에 따라 결정된다. 따라서, 교통체계에 의한 에너지소비량은 다른 조건이 일정한 경우 도시가 지닌 교통수단들에 발생교통량의 상대적 배분 비율인 수단분담율에 의해 결정된다. 반면 토지이용과 공간구조의 특성은 통행인들의 통행거리를 결정하며, 통행거리 역시 다른 조건이 일정하다면 교통에 의한 에너지소비량을 결정하는 중요한 요소이다.

즉, 교통부문의 에너지소비는 교통량이 일정한 경우, 수단분담율과 통행거리에 따라 결정된다고 할 수 있으며, 여기에 부가하여 각 교통수단의 에너지효율성과 관련된 기술적인 발전수준도 교통에 의한 에너지 소비량을 결정하는 중요 요소라 할 수 있다. 따라서 본 연구의 목적을 달성하기 위해서 위 제시한 각 요소 들을 포함하며, 요소들 간의 관계를 나타내는 교통에너지 산정모형을 구축하도록 해야 할 것이다.



<그림 1> 도시모형과 결정요소 간의 관계

<그림1>에 본 연구가 구축하고자 하는 이와 같은 모형이 flow-chart로 표현되어 있다.

그림에서 보듯이 교통에너지 산정 모형 구축을 위해 에너지소비와 관련된 교통체계의 특성을 수단별 에너지계수와 수단분담율로, 도시특성은 인구와 통행거리를 결정하는 공간구조/토지이용으로 가정하였으며, 도시특성과 교통체계 특성은 인구에 의해 결정되는 교통량과 교통량의 수단별 분배를 나타내는 수단분담율에 의해 연관되어 있다. 즉, 교통에 의한 에너지 소비량은 1인이 단위 거리를 통행할 때 에너지 사용량을 나타내는 각 수단의 에너지계수, 수단분담율, 인구 규모에 의해 결정되는 교통량, 공간구조/토지이용에 의해 결정되는 통행거리 등 4가지 변수의 함수로 간주한다. 만약, 인구를 고정된 값으로 가정하면 에너지계수, 수단분담율, 통행거리, 3가지 변수가 에너지소비량을 결정하는 요소가 된다. 여기서 에너지계수는 에너지효율성의 기술수준을 나타내는 지표이다.

II. 관련연구

본 연구와 관련된 교통분야의 에너지 소비에 관한 연구는 수단별 에너지계수를 찾아내기 위한 연구와 이를 활용한 교통에너지 소비 산정에 관한 연구로 구분가능하다. 한편, 도시분야에서는 지표설정을 통한 교통에너지 소비와 설정된 지표간의 관계분석을 통해 교통에너지 절약적인 도시형태 혹은 공간구조파악에 초점을 두고 있다.

개별 교통수단의 에너지 효율성 파악에 목적을 둔 수단별 에너지계수 혹은 에너지 원단위에 관한 선행 연구는 <표 1>과 같이 요약할 수 있다.

<표 1> 교통부문 수단별 에너지계수에 관한 연구

구분	에너지계수(kcal/인-km)	
일본 운수성 평성4년도 (1994)	자동차 여객	466.2
	철도 여객	101.1
일본에너지 경제연구소 계량분석부 (2002)	승용차	598.0
	도시철도	51.0
	버스	159.0
권태형 등(2005)	승용차	532.1
	승합차	209.3
	지하철	98.1
	육상여객 전체	343.4
산업자원부 (2008)	택시	870.0
	시외버스	190.0
	시내버스	670.0
	지하철	50.0

에너지계수는 국가별 집계방법에 따라 다소의 차이가 있지만, 일반적으로 승용차 이용자의 에너지계수가 가장 높고, 버스 그리고 도시철도(지하철)의 순으로 낮아지는 것으로 나타났다.

산정된 에너지계수 자료를 기반으로 교통에너지 소비량을 산정하기위한 연구로서, 국외에서는 Schipper, Gorham & Marie(2000)가 수송부문의 탄소배출량 산정을 위해서 탄소배출과 교통시스템의 각 요소의 관계를 'ASIF'모형을 구축하여 분석하였으며, 국내에서는 권태형 등(2005)이 '연료소비량 산정모형'을 제시하였고, 이주일(2007)은 '수단별 교통에너지 소비량과 교통량' 모형을 구축하여 수단분담율에 따른 교통에너지소비와의 관계를 분석하였다(<표 2>참조).

도시계획분야에서는 Cervero(1996)가 샌프란시스코 지역을 대상으로 인구 및 고용의 교외지역 탈출로 인한 직주 불일치가 궁극적으로 통행거리를 증가시키고 있음을 보이고, 교통에너지 감축을 위해서는 정책적으로 직장과 주거의 근접(직주근접)을 유도해야 된다고 제시하였다.

Newman & Kenworthy(1999)는 세계 주요도시(32개 도시)를 대상으로 도시특성과 교통에너지 소비량

<표 2> 교통에너지 산정을 위한 모형 연구

구분	모형
Schipper 등 (2000)	$G = A \times S_i \times I_i \times F_{ij}$ <p>G : 교통부문 탄소배출량 A : 통행활동수준(인,ton-km) S : 수단분담율(%) I : 각 수단별 에너지계수(ℓ/인-km) F : 탄소배출계수($g \cdot CO_2/\ell$) i : 교통수단 j : 연료</p>
권태형 등 (2005)	$f = FLPK \times d + FLPH \times t + FLPP \times s_1 + FLPSS \times s_2$ <p>f : 연료소비량(ℓ) , t : 주행지체(대-시) d : 총주행거리(km) s_1 : 교차로 정지회수(완전정차) s_2 : 지체 서행시 정차횟수 FLPK : 0.07, FLPH : 1.2, FLPP:0.016, FLPSS : 0.005(영국에서 개발한 계수)</p>
이주일 (2007)	$E = e_c x_c + e_t x_t + e_b x_b$ <p>E : 교통에너지 소비량(kcal) e : prs-km당 에너지 소비량(kcal/prs-km) x : 여객교통량(prs-km) c : 승용차 b : 버스 t : 철도</p>

의 관계를 분석하였으며, 그 결과 1인당 교통에너지 소비는 인구밀도, 고용밀도 그리고 전체인구에 대한 도시 인구의 비율과 상관관계가 높다고 주장하였다.

국내 도시계획분야의 경우 안건혁(2000)은 우리나라 22개 중소도시를 선정하여 에너지 소비와 도시형태의 상관관계 분석을 하여, 교통에너지 소비 효율적인 도시 형태로서 압축도시에 해당되는 순밀도 500~600인/ha, 총밀도 100~130인/ha로 제시하였다.

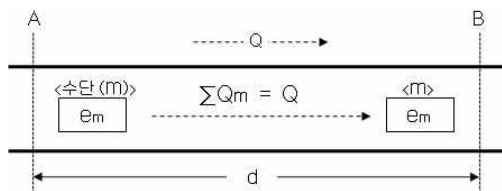
김선희(2003)는 국토(도시)공간·교통·에너지 현황 및 특성, 국토 공간 및 도시공간차원의 교통에너지 소비 요인분석을 시도하였고, 그 결과 국토공간 차원에서 인구밀도, 면적, 1인당지방세 등이 교통에너지소비와 정(+)의 관계를 갖고, 도시 분산도와는 부(-)의 관계를 가진다고 분석하였다.

관련연구를 살펴본 결과 교통분야는 수단별 에너지계수 산정과 이와 같은 에너지계수 값을 활용한 모형구축을 통해 교통에너지 소비량과 관련 변수와의 관계분석에 초점을 두고 있음을 알 수 있다. 그러나 교통체계의 특성에만 편중하여 도시의 특성이 배제된 단점이 있으며, 반면 도시분야의 경우 교통에너지 소비와 관련한 주요인을 직주근접 및 밀도로 파생된 통행거리에 초점을 두어 교통체계의 특성은 고려하지 못한 단점이 있다. 즉, 현재까지 도시와 교통시스템(교통량, 통행거리, 수단분담율 등)의 관계를 도시특성과 교통특성을 동시에 고려한 총체적인 관점에서 접근한 연구는 매우 미미한 실정이라고 할 수 있으며, 이와 같은 내용적 측면이 본 연구와 타 연구와의 가장 큰 차별성이 있다고 할 수 있다.

III. 모형 구축

1. 교통체계와 에너지소비 관계

교통에너지 소비량 산정모형 정립을 위해 통행기중점이 A부터 B까지인 <그림 2>와 같은 상황을 가정한다. <그림 2>의 상황은 다음과 같다. 총 통행인 Q인이 거



<그림 2> 교통모형

리 d인 기점 A에서 종점 B까지 통행을 하며, 이용가능한 m개의 교통수단이 존재한다고 가정한다. 여기서 수단 m을 이용하는 통행인이 단위거리(1km) 통행 시 에너지 소비량을 e_m 이라하면, A에서 B까지의 총 교통에너지 소비량은 각 수단의 에너지계수와 수단별 통행인, 그리고 통행거리에 따라 결정된다. 이를 식으로 표현하면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_T = \sum_m e_m \cdot Q_m \cdot d. \tag{1}$$

여기서,

E_T : 교통에너지 소비량(ℓ, toe, kcal)

e_m : 수단별 에너지계수(ℓ, toe, kcal/prs-km)

Q_m : 수단별 통행인(prs)

d : 통행거리(km)

m : 교통수단(승용차, 버스, 도시철도 등).

여기서, λ_m 을 총 통행인 Q에 대한 수단 m의 통행인 비율(즉, 수단 m의 분담율)이라 하면 Q_m 은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Q_m = Q \times \lambda_m \quad (0 \leq \lambda_m \leq 1). \tag{2}$$

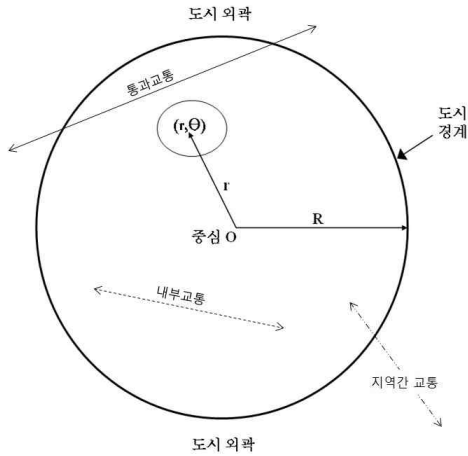
식(2)를 식(1)에 대입하면 식(1)의 에너지 산정식은 다음과 같이 표현된다.

$$E_T = Q \cdot \left(\sum_m e_m \cdot \lambda_m \cdot d \right). \tag{3}$$

2. 모형을 위한 가정

모형구축을 위해 <그림 3>과 같은 Smeed's City로 알려진 도시중심(O)에서 반지름 R인 완벽한 원형태의 가상 도시를 가정하고, 분석의 용이성을 위해 도시가 다음과 같은 특성을 내재하는 것으로 가정하였다(신용은 1997).

- 중심(O)을 기준으로 완벽한 대칭적인 도시형태이다.
- 반경(R)을 기준으로 도시와 교외지역으로 구분된다.
- 도시내외부에는 주거와 업무기능만 존재한다.
- 거주자와 노동자 밀도는 중심 O로부터 Sherratt의 밀도함수(Sherratt's density function)에 따라 균일하고 독립적으로 분포하며, 두 기능의 입지는 서로 간 상관관계가 없다.



<그림 3> 가정된 도시의 형태

- 도시는 동일한 규모와 형태의 무한대의 단위지역들로서 분할된다.

또한 위 도시 내에서 발생하는 통행에 관해 다음과 같이 가정한다.

- 도시의 모든 기·종점은 최단거리인 직선 도로로서 연결되며, 모든 통행자는 통행을 종료할 때까지 이 도로를 이용한다.
- 도시 내 이용 가능한 여러 수단들이 존재하지만 기·종점의 왕복통행은 처음 선택된 한 가지 수단만 이용한다.
- 모든 통행은 양방향 통행으로서 즉, 어느 기점에서 발생된 통행은 일정시간 후 동일한 도로를 이용하여 기점으로 돌아간다.
- 위 가정에 따라서 도시에서는 내부통행, 통과통행 그리고 지역 간 통행, 3가지 형태의 통행이 발생한다.

본 연구는 토지이용과 통행거리 간의 관계 분석에 그 적용성과 현실 반영이 탁월한 Sherratt의 밀도함수를 선택하였으며, 이는 식(4)로 표현된다.

$$e_i(r) = \frac{1}{2\pi\delta_i^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\delta_i^2}\right), \quad (0 \leq r < \infty). \quad (4)$$

여기서,

- $e_i(r)$: 밀도변화율
- δ : 분산계수
- r : 거리(km).

Sherratt의 밀도함수는 중심 O에서 최대밀도를 나타내며 외곽방향으로 분산계수(δ)의 값에 따라 점진적 혹은 급격히 밀도가 떨어지는 형태를 지니고 있다.

3. 교통에너지 산정식

위 모형과 가정을 기반으로 교통에너지 산정모형식을 도출하였다. 우선 교통량인 통행인수(Q)는 도시활동의 주체인 거주자와 노동자 즉, 인구(P)에 의해 결정된다. 이는 통행발생원단위의 개념을 활용하여, 식(5)와 같이 단순한 표현이 가능하다.

$$Q = \sum_{i=h,w} \mu_i \cdot P_i \cdot \bar{a}_i. \quad (5)$$

여기서,

- P : 인구수(인)
- μ : 토지이용 통행발생원단위(인-통행/ m^2)
- \bar{a} : 1인당 평균요구 상면적(m^2)
- i : 도시활동의 종류(h:주거, w:업무).

위의 P_i 는 도시활동 i 의 인구수으로써 도시 전체인구에서 i 의 비율인 활동계수를 곱한 것으로 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_i = P \cdot \gamma_i. \quad (6)$$

여기서, γ_i 는 활동 i 의 활동계수이다. 본 연구에서는 거주자와 노동자만 존재하기 때문에 $\gamma_h + \gamma_w = 1$ 의 식이 성립된다.

식(6)을 식(5)에 대입하면, 총 통행인은 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = P \cdot \left(\sum_{i=h,w} \mu_i \cdot \gamma_i \cdot \bar{a}_i \right). \quad (7)$$

본 연구의 가정에 의해 가상도시에서는 출·퇴근 교통 흐름만 존재한다. 평균통행거리를 \bar{d} 라 하고, 식(7)을 식(3)에 대입하면, 최종적인 수학적 모형은 식(8)로 표현되며, 본 연구에서는 이를 '교통에너지 산정식'으로 정의한다.

$$E_T = 2 \cdot \left[\sum_{i=h,w} \sum_m e_m \cdot (\mu_i \cdot P \cdot \gamma_i \cdot \bar{a}_i \cdot \lambda_m) \cdot \bar{d} \right] \quad (8)$$

$$= 2 \cdot P \cdot \bar{d} \cdot \left[\sum_{i=h,w} \sum_m e_m \cdot \lambda_m \cdot (\mu_i \cdot \gamma_i \cdot \bar{a}_i) \right]$$

여기서, 통행발생원단위(μ_i), 도시활동계수(γ_i), 1인당 평균요구 상면적(\bar{a})은 상수로 가정하였다. 따라서 교통에 의한 에너지 소비량은 에너지계수(e), 인구(P), 수단분담율(λ) 그리고 평균통행거리(\bar{d})에 의해 결정된다. 산정식에서 '2'를 곱함은 양방향 통행(출근, 귀가)을 고려하여 에너지 소비를 산정하기 위함이다.

IV. 민감도 분석

도출된 에너지 산정식을 이용하여 에너지와 각 변수 간의 관계 분석을 위해 식(8)의 상수 및 변수의 초기 값을 다음과 같이 가정하였다.

- 도시 반경(R) : 5km · 토지이용률($\bar{\sigma}$) : 0.6
- 도시활동인구(P) : 1,000만명
- 도시활동계수(γ_i) : $\gamma_h=0.7, \gamma_w=0.3$
- 분산계수(δ_i): $\delta_h=7, \delta_w=3$
- 1인당 평균요구 상면적(\bar{a}) : 주거용 45.0m²/prs, 업무용 30.0m²/prs
- 통행발생원단위(μ_i) : 주거 0.009prs/m², 업무 0.032prs/m²
- 수단분담율(λ_m) : 승용차(λ_A)=0.25, 버스(λ_B)=0.35, 도시철도(λ_R)=0.45
- 평균통행거리(\bar{d}) : 5.33km

즉, 주거 7백만명, 고용 3백만명으로 총 도시활동 주체가 1,000만에 이르는 반경 5km의 대규모 도시를 가상하였고, 승용차, 버스 그리고 도시철도 3가지 수단이 존재하는 교통체계를 가정하였다. 가정이 필요한 그 밖의 값들은 문헌조사를 통해 적절한 값을 선택하였으며, 평균통행거리는 모형의 가정과 sherrat 밀도함수의 분산계수에 의해 도출된 값이다. 특히 국가 간 실제 수단의 에너지 효율성은 큰 차이가 없을 것으로 판단하여 일본 에너지경제연구소 계량분석부(The Institute of Energy Economics, EDMC)에서 제시한 에너지계수 값을 적용하였다.

가정된 초기값을 교통에너지 산정식(식 8)에 적용한 결과 가상도시의 교통에너지 소비 초기값은 6758.8백만 kcal로 파악되었다. 산출된 교통에너지 소비량을 기초로 인구를 제외한 통행거리, 에너지계수 및 수단분담율이 에너지 소비에 미치는 영향에 대해 분석을 수행하였다.

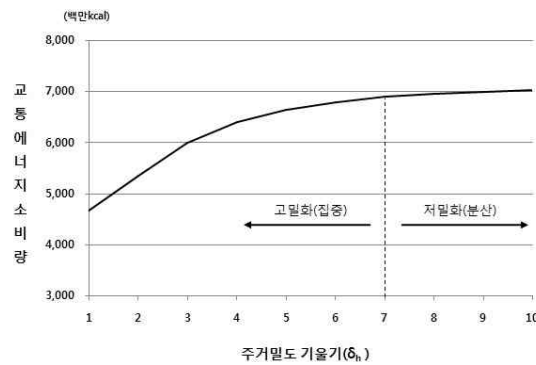
1. 통행거리(도시의 광역화)

도시 및 교통 발달과 함께 이어온 도시의 외연적 확대로 통행거리는 점차 증가되어왔으며, 향후 지속적인 도시 확장으로 이와 같은 상황이 지속될 가능성이 있다. 분석을 위해 도시의 확산을 밀도의 변화로 표현하였으며 밀도를 제외한 수단분담율 등 타 여건이 일정하다고 가정하였다. 즉, 도시광역화를 도시 거주민이 교외지역으로 거주지를 이전하는 현상으로 가정하였으며, 이를 주거밀도에 해당되는 주거분산계수 δ_h 의 변화로 표현하였고, 분산계수의 변화에 따른 평균통행거리 값을 계산하였다. 다른 조건이 일정하다고 가정한 경우의 교통 에너지 소비량을 산정하였으며, 그 결과가 <표 3>에 제시되어 있다.

δ_h 값이 증가함에 따라, 주거밀도는 점점 낮아진다. 즉, 도시 내의 거주민의 숫자가 감소하고 외곽지역 거주민 인구가 증가하게 된다. (분석을 위해 통행인수는 일정하다고 가정하였다.) <표 3>에서 보듯이 도시광역화 현상의 진행에 따라 통행인의 평균통행거리는 점점 증가하게 된다. 특히 δ_h 값 1~5까지 구간에서 평균통행거리가 급

<표 3> 주거밀도 변화와 평균통행거리, 교통에너지 소비량

구분	주거 분산계수 (δ_h)	평균통행거리 (km)	교통에너지 소비량 (백만kcal)
집중 (고밀도)	1	3.609	4,576.0
	2	4.135	5,244.1
	3	4.637	5,879.8
	4	4.950	6,276.7
	5	5.138	6,515.5
	6	5.253	6,660.7
	7	5.327	6,758.8
분산 (저밀도)	8	5.375	6,816.2
	9	5.404	6,852.1
	10	5.429	6,884.6



<그림 4> 밀도 변화 vs. 에너지 소비량변화

격히 증가함에 따라 교통에너지 소비량이 급속히 증가하는 것으로 나타났다. 또한 주거지의 분산 정도에 따라 교통에너지 소비량이 최소 4,576.0백만kcal에서 최대 6,884.6백만kcal로 50% 이상의 차이가 발생함을 알 수 있다(<그림 4>참조).

2. 에너지계수(기술발전)

하이브리드차량의 개발, 재생전류의 사용과 같은 동력기관의 효율성 제고는 에너지 소비량에 큰 영향을 미친다. 에너지소비 효율성의 제고는 수단의 이용자가 단위거리 통행에 사용되는 에너지량(l , toe, kcal 등)의 감소를 의미하며, 이는 구축된 모형상 교통부문의 에너지계수 (혹은 에너지원단위)인 ' l ,toe,kcal/prs-km'를 감소시키는 것으로 표현할 수 있다.

<표 4>와 <그림 5>에 각 수단의 에너지효율성이 제고되는 경우를 가정하여 전체 수단과 단일 수단의 에너지계수 증가에 따른 교통에너지 소비량의 관계가 제시되어 있다.

산정식의 성격상 전체 수단의 에너지계수가 감소할 경우의 감소 비율과 동일한 비율로 교통에너지 소비량이 감소하게 된다. 그러나 단일수단의 에너지계수 변화를 고

려할 경우 그 감소 비율은 달라진다. 가령, 기술의 발전으로 승용차 에너지계수만 30% 감소할 경우, 교통에너지 소비는 20.4%(5,494.0백만kcal)까지 에너지절감이 가능하나, 버스의 경우는 6.5%, 도시철도는 3.1% 정도의 교통에너지 소비량 감축 효과가 있다. 이는 승용차의 에너지계수가 근원적으로 타 수단에 비해 월등히 높기 때문이며, 따라서, 기술개발의 초점이 승용차의 에너지 효율성제고에 우선적으로 두어야할 것으로 판단된다.

3. 수단분담율 변화

에너지 저효율 수단에서 고효율 수단 혹은 그 반대인 고효율에서 저효율 수단으로 전환될 경우의 교통에너지 소비량 변화를 분석하기 위해 승용차, 버스, 도시철도의 수단분담율 변화에 따른 에너지소비량을 산정하였으며, 그 결과가 <표 5>와 <그림 6>에 제시되어 있다.

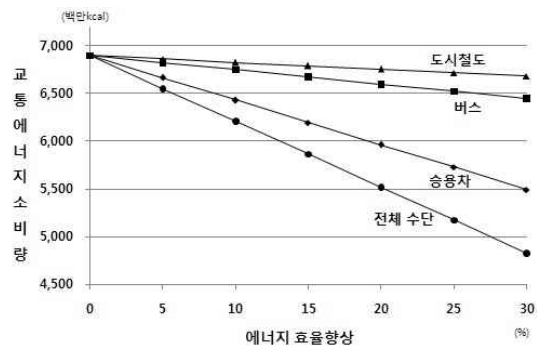
여기서 수단분담율 1.0:0.0, 0.9:0.1, ……., 0.0:1.0은 전체 통행인 1에 대한 각 수단의 비율로서 1.0:0.0 혹은 0.0:1.0은 한 가지 수단으로만 통행이 이루어지는 것

<표 4> 수단별 에너지계수 변화와 교통에너지 소비량

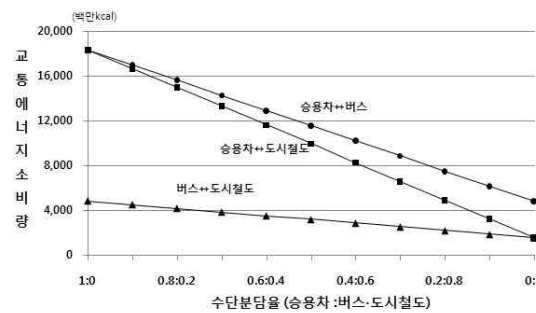
구분	교통에너지 소비량(백만kcal)			
	전체 수단향상(%)	승용차만	버스만	도시철도만
0	6,899.6	6,899.6	6,899.6	6,899.6
5	6,554.6	6,665.3	6,824.8	6,863.6
10	6,209.6	6,431.1	6,750.1	6,827.7
15	5,864.7	6,196.8	6,675.3	6,791.7
20	5,519.7	5,962.5	6,600.6	6,755.7
25	5,174.7	5,728.2	6,525.9	6,719.8
30	4,829.7	5,494.0	6,451.1	6,683.8

<표 5> 수단분담율에 따른 교통에너지 소비량 (단위:백만kcal)

수단분담율	승용차:버스	승용차:도시철도	버스:도시철도
1.0 : 0.0	18,741.6	18,741.6	4,983.1
0.9 : 0.1	17,365.7	17,027.2	4,644.6
0.8 : 0.2	15,989.9	15,312.9	4,306.2
0.7 : 0.3	14,614.0	13,598.6	3,967.7
0.6 : 0.4	13,238.2	11,884.3	3,629.2
0.5 : 0.5	11,862.3	10,170.0	3,290.7
0.4 : 0.5	10,486.5	8,455.6	2,952.3
0.3 : 0.7	9,110.7	6,741.3	2,613.8
0.2 : 0.8	7,734.8	5,027.0	2,275.3
0.1 : 0.9	6,359.0	3,312.7	1,936.8
0.0 : 1.0	4,983.1	1,598.4	1,598.4



<그림 5> 에너지계수 변화율 vs. 에너지소비량 변화



<그림 6> 수단분담율 vs. 에너지소비량 변화

을 의미한다. 즉 수단분담율이 승용차가 '1.0'이고 버스가 '0.0'인 경우 승용차와 버스 중 승용차를 이용한 통행이 100%, 버스이용자는 전무한 경우를 나타낸다. '승용차와 도시철도', '버스와 도시철도' 역시 동일한 의미이다.

본 연구의 수단분담율 초기값은 승용차 25%, 버스 30%, 그리고 도시철도가 45%로 가정되어 있고 이에 따른 총 교통에너지 소비 초기값은 6,899.6백만kcal이다. 만약 모든 통행인이 승용차를 이용하는 경우 에너지 소비량은 18,741.6백만Kcal로 초기값의 271.7%에 이른다.

반면, 모두 버스를 이용하는 경우, 4,983.1백만kcal로 초기값의 72%, 승용차만의 26.6% 정도의 에너지만을 소비한다. 모두 도시철도를 이용하는 경우는 초기값의 23.2%, 모두 승용차를 이용할 경우의 8.5%, 버스만 이용할 경우의 38.9%만의 에너지를 소비하는 것으로 나타났다.

요약하면, 도시의 통행이 단일수단에 치우쳐 모두 이루어질 경우 교통에너지 소비량은 승용차(18,741.6) > 버스(4,983.1) > 도시철도(1,598.4) 순으로 나타났다. 최대값과 최소값의 차이는 17,143.2백만kcal로 이것은 승용차와 도시철도 간 수단분담율 중 도시철도의 수단분담율이 증가할 경우 최대 1,7143.2백만kcal의 에너지 절감 효과가 있으며, 반대로 승용차의 수단분담율이 증가할 경우 도시의 교통에너지 소비량은 1,7143.2백만kcal만큼 가증되는 것이다. 즉, 도로·자전거를 제외하고, 대량수송이 가능한 수단일수록 에너지 효율적이라는 일반적인 개념을 <그림 6>은 재확인하고 있다.

현실적으로 도시 내에서 승용차 분담율이 100%되기를 불가능하기 때문에 승용차이용에 따른 최대 교통에너지 소비량은 발생하지 않을 것이다. 하지만 승용차 수단분담율의 지속적인 증가는 교통에너지 소비를 가중시키는 결정적 요인이라는 것을 분석을 통해 알 수 있다.

에너지사용 저감을 위한 궁극적인 대안은 기존의 화석 연료를 기후변화와 무관한 신에너지로 대체함으로써 이루어질 수 있으나, 신에너지의 개발 그리고 보편화되기까지는 많은 시간과 비용이 필요하다. 따라서, 단기적으로 승용차보다 상대적으로 에너지 효율성이 좋은 대중교통으로의 수단전환에 정책의 초점을 두어야 할 것이다.

V. 결론

최근 기후변화와 자원절약 시대에 즈음하여 도시교통에 의한 지구온난화 가속화와 에너지 낭비의 문제가 국

가의 주요한 관심사로 대두되고 있다. 교통에 의한 에너지소비는 교통체계만의 문제가 아니며, 도시공간구조 및 형태에 의해서도 상당한 영향을 받는다. 하지만 그간 이를 모두 고려하여 도시와 교통시스템의 총체적 관점에서 접근한 연구는 미미한 실정이다.

이에 본 연구는 도시특성과 교통체계의 특성을 통합적으로 고려하여 에너지 소비에 영향을 미치는 거시적 변수로 도시의 공간적 특성이 결정하는 통행거리, 수단의 에너지 효율성을 나타내는 에너지계수, 그리고 수단분담율을 가정하고, 가상의 도시모형을 구축하여 이를 기반으로 교통에너지 산정 모형(교통에너지 산정식)을 정립하였으며, 이를 이용하여 에너지소비와 변수간의 관계를 분석하였다. 분석의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 교통에너지 소비량은 수단분담율, 통행거리, 기술발전의 에너지효율성 제고 그리고 사회·경제적 활동의 밀도에 모두 영향을 받는 것으로 분석되었다.

둘째, 에너지 절감을 위한 가장 효율적인 방법은 승용차의 수단분담율을 조절하는 것으로 파악되었고, 다음으로 통행거리 감소를 유도하는 도시의 고밀화, 마지막으로 교통수단의 에너지효율성을 제고 시키는 순으로 에너지소비에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 도시교통의 수단분담율이 교통에너지 소비 절감에 가장 큰 영향력을 보이는 변수로 제시되어 향후 기후변화에 능동적으로 대처할 수 있는 도시교통체계의 구축은 승용차 이용자의 감축과 대중교통수단으로의 수단전환의 성공여부에 달려 있음을 확인할 수 있다.

본 연구는 거시적이고 개념적인 연구로서의 한계 외에도 분석의 편의를 위해 여러 가지 가정을 함으로써, 결과가 현실을 정확히 반영치 못하는 약점이 있으나, 교통체계와 도시의 특성을 동시에 반영한 실험적인 연구로서의 가치가 있다고 할 수 있으며, 거시적 정책결정의 근거를 제시할 것으로 기대한다. 또한 본 연구를 기반으로 미시적인 관점에서 교통에너지 소비에 영향을 주는 교통운영체계 혹은 첨단교통기술(ITS)등을 적용하여 향후 보다 정밀한 연구가 진행될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. 강민우(2010), "도시와 교통시스템의 에너지 소비량과의 관계", 동의대학교 석사학위논문.
2. 권태형·박정욱·김건영(2005), "고유가 대비 교통부문 영향분석 및 에너지 절감방안 연구", 한국교통연구원.

3. 김선희(2003), “자원절약적 국토발전방안 연구; 국토·도시 공간구조와 교통에너지 소비와의 관계를 중심으로”, 국토연구원.
4. 성현곤·박지형·김동준(2007), “대중교통지향형 도시개발의 효과분석 및 유도기법 적용방안”, 한국교통연구원.
5. 신성일·장윤미·김순관·김찬성(2005), “도시 교통체계의 지속가능성 평가를 위한 도시 접근성 지표”, 대한교통학회지, 제23권 제8호, 대한교통학회, pp.31~42.
6. 안건혁(2000), “도시행태와 에너지 활용과의 관계 연구”, 대한국토·도시계획학회지 107, 대한국토·도시계획학회, pp.9~17.
7. 이건영·오세창·최기주(2002), “메조모형 시뮬레이터를 이용한 교통운영방식의 연료소모량 분석”, 대한교통학회지, 제20권호 제1호, 대한교통학회, pp.19~38.
8. 이주일(2007), “공간구조 및 교통수단의 변화가 교통에너지소비에 미치는 영향”, 시정개발연구원
9. Cervero·Robert(1996), “Trends and Impacts in the San Francisco Bay Area”, Journal of the American Planning Association 62, no 4, pp. 492~511.
10. Newman P. and Kenworthy, J(1999), “Sustainability and Cities:Overcoming Automobile Dependence”, Island Press, Washington D.C..
11. Lee Schipper·Lew Fulton(2000), “Driving a Bargain? Using Indicators to Keep Score on the Transport-Environment-Greenhouse Gas Linkages”, IEA, pp.3~5.
12. Y. E. Shin(1997), “Analysis of City/Transportation System Relationship via Land Consumption”, Department of City and Regional Planning University of Pennsylvania Philadelphia, PA19106. pp.22~35.

♣ 주 작성 자 : 신용은
 ♣ 교 신 저 자 : 신용은
 ♣ 논문투고일 : 2010. 2. 5
 ♣ 논문심사일 : 2010. 2. 16 (1차)
 2010. 2. 23 (2차)
 ♣ 심사판정일 : 2010. 2. 23
 ♣ 반론접수기한 : 2010. 8. 31
 ♣ 3인 익명 심사필
 ♣ 1인 abstract 교정필