■ 論 文 ■

메조모형 시뮬레이터를 이용한 교통운영방식의 연료소모량 분석

Fuel consumption effects of transportation improvement options using mesoscopic traffic simulator

이 건 영 (한국건설산업연구원 원장)

오 세 창 (아주대학교 환경·도시공학부 부교수)

최 기 주 (아주대학교 환경·도시공학부 부교수)

목 차

Ⅰ. 서론
1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구의 내용 및 범위
Ⅱ. 배경 이론
1. 에너지 소모 모형
2. 교통 시뮬레이션
Ⅲ. 교통운영시스템별 시뮬레이션 자료 구축
1. Integration의 적용
2. 효과 분석을 위한 대상 지역 선정
3. 기본 자료의 구축 및 입력
4. 대안별 입력 자료 구축
Ⅳ. 시뮬레이션 및 결과 분석
1. 시뮬레이션 수행 결과
2. 결과 분석
Ⅴ. 결론 및 향후 과제
1. 결론
2. 향후 과제
참고문헌

Key Words : 에너지소모모형, 교통운영시스템, 에너지효율, 효과척도(MOE), INTEGRATION 시뮬레이터

요 약

일반적으로 교통운영 시스템에 대한 효과를 평가하기 위해서 구간통행 시간, 통행속도, 지정체율 등과 같은 효과척도(MOE:measure of effectiveness)가 사용된다. 그러나, 에너지에 대한 관심이 극히 높은 상황에서는 기존의 교통측면의 효과척도 이외에 에너지소모라는 효과척도가 교통운영시스템의 MOE로서 대안평가에서 점차로 중요한 영향을 발휘할 수 있다. 본 연구는 교통운영방식별 에너지효율성에 대한 평가를 위해 (기존에 주로 사용되던 효과척도로서의 구간평균속도, 구간평균통행시간, 지정체 뿐 아니라), 에너지 소모 또한 대안평가에 사용할 수 있을 것으로 판단하여, 각 대안별 에너지 소모를 상대적으로 측정하여 볼 수 있는 절차를 개발하고 상호 그 결과를 비교하고자 하였다. 이를 위해 메조모형 시뮬레이터인 Integration이 사용되었으며, HOV 차로 운영, 신호 최적화, 차로 확장, ITS 적용에 대한 대안의 평가를 수행하였다. 이중ITS의 적용이 에너지 절감에 가장 큰 효과가 있는 것으로 나타났으며, 차로확장, 신호최적화, HOV 차로 운영 순으로 에너지 절감 효과가 나타났다. 본 연구는 차종에 대한 특성의 고려, 잠재수요에 대한 고려를 하지 않았으며, 분석 기간이 단지 첨두 1시간에 그쳤기 때문에 향후 이러한 현실적 요소에 대한 고려 및 시스템의 확대적용에 있어 보다 정확한 경제성 분석절차 및 방법론적 개선이 요구된다고 하겠다.

Ⅰ. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

고유가 시대에 에너지의 절약 및 효과적인 에너지 이용은 국가적으로 중요한 이슈로 대두되고 있다. 특히, 최근의 에너지가격 상승에 대한 국내외적인 환경이 더더욱 에너지 사용에 대한 적절한 국가적 대책을 강구하고 있는 실정이다. 〈표 1〉은 1999년까지 에너지 원별 소비 실태를 석유로 환산하여 나타낸 것으로, 우리나라의 경우 특히, 석유류의 소비가 43.3%로 절반 가까이 되는 것으로 나타났다.

또한, 석유류 에너지의 소비를 부문별로 구분하면 〈표 2〉와 같다. 이 표에서 나타난 것처럼 산업부문에서 소비되는 비율은 51%로 가장 많고, 그 다음으로 많이 소비되는 부분이 수송 부문인 것으로 나타났다. 수송부문의 에너지 소비는 대부분 차량에 의해 소비되는 것으로 판단되며, 특히, 도로의 지정체에 의해 발생된 불필요한 에너지 소비는 산업 전반에 걸쳐 경제 성장에 악영향을 미친다는 것은 이미 대부분의 사람들에게 인식되어 있다.

〈표 1〉 에너지 소비량 (단위:천 TOE)

에너지 소비량	1995	1996	1997	1998	1999
총량 석유환산	150,437	165,212	180,638	165,932	181,363
석탄류	28,091	32,200	34,799	36,039	38,155
석유류	93,955	99,898	109,080	90,582	97,270
수력	1,369	1,301	1,351	1,525	1,517
원자력	16,757	18,481	19,272	22,422	25,766
신탄 및 기타	1,051	1,161	1,344	1,526	1,806
액화천연가스	9,213	12,172	14,792	13,838	16,849

자료 : 산업자원부

〈표 2〉 석유류 에너지 소비 비율

시점 1999	산 업	수 송	가정·상업	공공·기타	총계
석유계 (천배럴)	355,721 (51.6%)	205,885 (29.9%)	118,856 (17.2%)	8,984 (1.3%)	689,445 (100%)
에너지유 (천배럴)	98,792	181,902	90,722	8,749	380,164
LPG (천배럴)	20,280	23,983	27,997	235	72,495

주) 에너지 경제연구원

이러한 배경 하에, 교통관련 기관 및 연구소에서는 도로의 지정체 해소를 위해 많은 새로운 기술과 정책을 도입해 보고자 하였다. 그러나, 이러한 기술 및 정책에 대한 에너지 소모 감소 부분의 연구는 상대적으로 미진하게 진행되어 왔다. 본 연구의 목적은 도로의 지정체 해소를 위해 새롭게 제시되는 기술 및 정책에 대하여 단지 도로의 운영적 효율뿐 아니라 에너지 소비에 대한 효율을 정량적으로 평가해 보고자 하는 것이다. 특히, 도로의 운영적 기술 및 정책으로는 단기간에 저비용으로 현재 가장 많이 이루어지거나 수행중인 TSM(Transportation Systems Management)과 ITS(Intelligent Transport Systems)를 중심으로 평가해 보고자 하였다.

2. 연구의 내용 및 범위

TSM과 ITS와 같은 교통 운영 시스템은 다양한 세부 기술이 존재한다. 이러한 기술들은 현재 개념이 정립되거나 진행중인 요소 및 완성기술도 있으며, 적용되고 있는 요소 및 기술도 있다. 따라서 이러한 대안이 현실에서 모두다 완벽히 운영되기에는 아직 많은 제약이 따르고, 또한 실제로 특정지역을 지정하여 다양한 대안요소를 현실에 모두 적용하는 것은 현실적으로 불가능한 일이다.

따라서, 본 연구에서는 교통운영 시스템의 에너지 개선 효과를 정량적으로 분석하기 위한 방법으로서 교통 시뮬레이션을 적용하였다. 거시적 시뮬레이션도 있으나 이는 대기행렬현상의 규명 등등의 교통현상의 서술 및 모형화가 다소 문제가 되며, 미시적 시뮬레이션은 대규모 네트웍에 대한 접근에 어려움이 있기 때문에 메조모형(일부는 미시적인 면이 있음.)시뮬레이터를 적용하였다.

또한, 시뮬레이션에 대한 결과를 보다 현실화하기 위해 서울 강남의 도심 네트웍과 통행량(O/D)을 적용하였으며, 대안별 효과를 뚜렷하게 나타내기 위해 첨두 1시간 수요를 기준으로 시뮬레이션을 수행하였다.

본 연구의 분석 시간은 첨두 1시간을 기준 분석이 첨두 1시간이기 때문에, 만일 분석 기간을 1일, 1주일, 혹은 그 이상으로 확장 시킬 경우 그 효과는 달라질 수 있다. 으로 이루어졌기 때문에, 잠재수요에

대한 부분은 고려하지 않았다 새로운 교통 운영시스템의 도입으로 교통류가 개선된 경우, 잠재수요를 자극하여 에너지 소비는 더욱 커질 수 있다. 따라서, 본 연구는 정확한 에너지 효율을 정량적으로 분석하는데 그 의미를 두기보다는 다양한 교통 운영시스템의 운영 시 발생되는 에너지 소비의 비율 혹은 상대적인 비교에 그 의의가 있으며, 나아가 에너지 소모라는 새로운 효과척도에 대한 일련의 도출과정을 소개하는데 그 의미가 있기 때문에 차량별 분류와 한국형 차량에 적합한 연료 소모모형의 적용은 이루어지지 않았다.

본 논문의 구성은 우선, 연료소모 모형과 교통부분에 적용되는 시뮬레이션에 대하여 알아보며, 연구에 적용된 시뮬레이션 모형에 대하여 보다 자세히 검토한다. 또한, 각 교통 운영 시스템별 분석을 위해 대안을 설정하며, 설정된 대안별 시뮬레이션 결과에 대한 평가 및 분석을 수행한다. 마지막으로 본 연구의 결과와 향후 나아갈 방향을 제시한다.

II. 배경 이론

1. 에너지 소모 모형

1) 모형의 개요

연료 소모 모형에 대하여 알아보기 전에 우선 연료 소모에 영향을 주는 인자들을 살펴보면 차량상태, 운전환경, 운전자, 교통상황으로 크게 4가지로 분류된다. 가속과 감속에 대한 운전자의 행태는 연료 소비율에 영향을 준다.

연료 소비에 영향을 줄 수 있는 운전 환경에 관련된 인자들로는 도로의 경사, 풍향, 기온, 고도, 포장상태와 표면 상태 등이 있다. 연료 소모에 영향을 주는 차량의 특성은 총 차량 무게, 엔진 규모, 엔진의 유형(예를 들면, 가솔린, 디젤, 전기, LPG), 변속기 유형, 타이어의 유형과 크기, 타이어 압력, 휠 정렬(얼라인먼트), 브레이크의 상태와 기화기 상태, 엔진의 온도, 오일의 점성, 연료의 유형, 차량의 모양, 기타 차량의 전기장치 상태(예를 들면, 에어컨, 라디오, 와이퍼 등) 등이 포함된다.

연료 소모 모형은 일반적으로 교통 관리 전략의 효과와 영향력을 평가하기 위해 사용된다. 이러한 모형들이 차량의 무게, 엔진 크기, 변속기 유형, 타이어 크기와 압력, 엔진 상태와 온도 등의 특성을 고려하여 수집된 자료를 토대로 구축된다. 운전자의 특성, 기온, 노면의 특성, 경사, 풍향, 고도 등과 같이 또 다른 인자에 기인하는 연료 소모의 변동은 적을 것으로 판단된다(만일 자료가 충분히 오랜 기간동안 수집되었다는 가정). 그렇지 않으면, 모형의 추정치는 기 구축된 도로의 경사, 기온, 고도, 풍향, 하중과 같은 인자의 영향력으로 보정 될 수 있다.

차량과 운전자 특성, 환경적 요인을 설정하여, 연료 소모에 영향을 주는 교통관련 인자의 영향력을 모형화 시킬 수 있는데, 이와 관련된 많은 연구활동이 영국(Everall, 1968), 호주(Pelensky et al., 1968), 미국(Chang et al., 1976; Evans & Herman, 1978; Evans et al., 1976) 등지에서 이루어 졌는데, 이들의 연구에서는 모두 도심에서 운전할 때 단위 거리 당 연료 소모는 평균 속도에 선형 반비례하는 함수로 표현할 수 있다고 주장했다.

2) 모형의 분류

연료 소모에 대한 모형은 2가지 방식으로 분류하는데 첫째 방식은 도로의 특성별로 적용되는 모형을 분류하는 방법이며, 다른 하나는 모형의 특성별로 모형을 분류하는 방법이다. 도로의 특성별로 모형을 적용할 경우, 도심에서의 적용가능 모형(Chang & Herman, 1981; Chang et al., 1976; Evans & Herman, 1978; Evans et al., 1976; Akcelik, 1981; Richardson & Akcelik, 1983; Herman & Ardekani, 1985; Watson et al., 1980; Hooker et al., 1983; Fisk, 1989; Biggs & Akcelik, 1986)과 고속도로 모형(Evans et al., 1976; Vincent et al, 1980; Akcelik & Bayley, 1983; Kenworthy et al., 1986)으로 나뉜다. 모형 자체의 특성별로 구분할 경우에는 순간 모형(Post et al., 1985; Akcelik, 1989; An & Ross, 1993; Ahn et al., 1999; Rakha et al., 1999; Ding, 2000), 수단 모형(Richarderson et al., 1983), 평균속도 모형(Evans & Herman, 1978; Lam, 1985)으로 나뉜다.

(1) 적용 도로별 구분

① 도심 모형

도심모형은 도심지역에서 적용가능한 모형으로,

Herman 등은(Chang & Herman, 1981; Chang et al., 1976; Evans & Herman, 1978; Evans et al., 1976) 단위거리 당 평균 통행시간의 선형함수(평균속도에 반비례)로써 도심의 상황에서 연료소모를 나타내는 간단한 이론적 모형을 구축한바 이는 다음과 같다.

$$\Phi = K_1 = K_2 T, \quad V < 55 km/h$$

여기에서,
Φ : 단위거리 당 연료 소모
T : 단위거리 당 평균 통행시간
$V(=1/T)$: 평균 속도

모형의 K_1, K_2는 파라메터이다. 한편, 이러한 기본모형을 개선하기 위해 독립변수를 추가하였던바, 이는

$$F = f_1 X_s + f_2 d_s + f_3 h$$

여기에서,
F : 도로 구간당 평균 연료 소모(ml)
X_s : 총 구간거리(km)
d_s : 차량 당 평균 정지지체(초)
h : 차량 당 평균 정지 수
f_1 : 순항 기간동안 연료 소모율(ml/km)
f_2 : 정지 시간동안 연료 소모율(ml/초)
f_3 : 차량 정지 당 초과 연료 소모(ml)

이 모형은 시뮬레이션 모형인 TRANSYT-7F에 사용된 모형과 유사하며, 많은 현장시험을 통해 기본모형을 보정하여 연료소모를 추정하는 추정식을 구축한바 아래와 같다.

여기에서,
F : 소모 연료(l/km)
V_s : 공간 평균 속도(km/h)

PKE는 가속(m/sec^2)하는 동안 양성 운동 에너지 변화의 합을 나타낸다.

한편,
V_f : 마지막 속도(km/h)
V_i : 초기 속도(km/h)
X_s : 구간 총 길이(km)

② 고속도로 모형

고속도로 운전은 평균속도가 충분히 높은 약 55km/h (Evans et al., 1976) 이상의 운전 상태에 잘 맞으며 일정한 순항 속도를 기반으로 하여 두 개의 고속도로 모형이 Vincent(1980)와 Post(1976)등에 의해 구축되었다. 이 두 모형은 비교적 일정한 순항 속도가 유지된다면 모든 속도 범위에서 타당한 것으로 판명되었다. Vincent, Mitchell, 및 Robertson에 의해 개발된 모형은 TRANSYT-8 모형에 사용되었으며, 다음과 같다.

$$f_c = a + bV_c + cV_c^2$$

여기에서,
V_c : 순항 속도(km/h)
f_c : 순항속도에서 연료 소모율
a : 170ml/km
b : 0.049ml-h^2/km^3 (Akcelik, 1983)

(2) 모형의 특성별 구분

① 순간 모형

이 모형은 차량의 속도, 힘, 도로의 구배와 같은 설명변수의 순간적인 측정된 값을 기반으로 세워진 모형이다. Power-based 모형은 Post 등에 의해 처음 구축되었다(1985). 이들의 모형은 승용차에 대하여 실제로 도로상에서 실험한 결과 2%이내의 정확도에서 총 연료 소모량을 추정하였다. 이 모형은 다음과 같다.

여기에서,
FC : 순간 연료소모율(ml/s)
α : 유류 연료소모율(ml/s)
β : 평균 연비인자(ml/s/kw)
P : 순간 총동력(kw)

계수 α와 β는 각 차량별로 차량의 상태와 특성에 따라 변한다.

An과 Ross(1993)에 의해 개발된 또 다른 동력

기반 모형은 차량의 연료 소모를 추정하기 위해 많은 차량의 특성과 통행의 특성을 식으로 표현하였고, Ahn (1999)과 Rakha(1999)등은 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)가 1997년에 수집한 1초 간격 속도와 가속도 자료, 연료 소모 및 배기가스 자료를 기반으로 미시적인 연료 소모 모형을 구축하였다.

다음의 식은 이 자료를 토대로 구축된 모형을 나타낸 것이다. 이 모형은 차량의 순간 속도 뿐 아니라 가감속에 대한 자료를 적용할 수 있기 때문에 보다 현실적이며, 교통의 에너지 관련 효과 분석 시 가장 많이 사용되는 모형중의 하나이다 "Evaluation of the Intelligent Cruise Control System final report", U.S.DOT, Volpe National Transportation Systems Center & National Highway Traffic Safety Administration, Oct., 1999. 특히, 모형은 실제 측정값의 2.5%내의 오차범위에서 차량 연료 소모를 추정한다(Ding, 2000). 또한, 이 모형은 본 연구에 적용될 시뮬레이션 툴인 INTEGRATION에 사용되고 있다.

$$\ln(Y) = a + bA + cA^2 + dA^3 + eS + fS^2 + gS^3 + hAS + iAS^2 + jAS^3 + kA^2S + lA^2S^2 + mA^2S^3 + nA^3S + oA^3S^2$$

여기에서,

Y : 연료소모(리터/초) 혹은 emission rate(mg/초)
a : 상수
$b, c, \cdots$: 회귀계수
A : 가속(ft/s^2)
S : 속도(ft/s)
ln : 자연로그(e=2.718281828)

② 수단별(modal)모형

이 모형은 순간 모형과 유사하며, 일반적인 통행에서 각기 다른 차량의 운영 상태에 관련된 연료 소모를 구하기 위해 시도된 모형으로 차량의 각 운전 상황에 대한 가정을 기반으로 구축되었다. 즉, 순행, 가감속, 휴식 등의 상황은 모두 연료소모가 다르게 진행되며, 통행에 소요된 총 연료 소모량은 이들 각 상황에서 소모된 연료의 총량을 나타낼 수 있다는 가정이다. 순간 모형과는 다르게, 이 모형은 차량의 순행속도(혹은 각 운전 상황에 대한 시작과 종료 속도), 차량의 정지 수(완전정지, 유효 정지, 처음 정지, 연속된 정지 등), 정지 시간, 통행 시 발생된 총 지체 등 많은 설명 변수가 요구된다.

③ 평균 속도 모형

이 모형은 통행시간에 대한 연료소모 혹은 평균 통행속도와 관련이 있다(Evans & Herman, 1978). 이 모형은 대규모 도시 교통체계에 대한 총 연료 소모량을 추정하는데 적합하며, 통행수요나 평균 통행속도에 영향을 미칠 것으로 판단되는 교통관계 전략에 대한 영향력을 평가하는데 적합한 모형이다. 다음 식은 Evans와 Herman에 의해 구축된 평균속도모형을 나타낸 것이다.

$$Fuel = k_1 + k_2\bar{t} = k_1 + \frac{k_2}{\bar{v}}$$

여기에서,

$Fuel$: 단위거리 당 연료소모량
$\bar{t}$: 단위거리 당 평균 통행시간
$\bar{v}$: 평균 통행속도
k_1, k_2 : 상수

평균 속도 모형은 평균속도의 범위가 10~50km/h일 때는 적용 가능하지만, 매우 낮은 속도와 공기저항이 연료 소모에 주요인자가 되는 매우 높은 속도에서는 단지 평균 속도만으로는 적용하기가 어렵게 된다.

2. 교통 시뮬레이션

1) 교통 시뮬레이션의 개요

교통 시뮬레이션은 교통관련 프로젝트에 대한 수익성이나 영향력을 추정하는데 중요한 툴로써 이용된다. 시뮬레이션은 교통 전문가들로 하여금 과업의 수행 전 시스템의 수행도와 가능성을 테스트할 수 있는 기능을 제공할 뿐 아니라 제시된 시스템을 최적화하는데 많은 도움을 준다. 또한, 시뮬레이션은 실제로 온라인 상에서 테스트하는 것 보다 안전하고 비용 측면에서 경제적이다.

대부분의 분야에서와 마찬가지로, 컴퓨터의 기능이 증가함에 따라, 교통에서 컴퓨터 툴을 이용한 시뮬레이션은 보다 쉽고, 보다 강력하고, 보다 포괄적으로 분석할 수 있게 되었다. 컴퓨터 기능의 성장, 컴퓨터

프로그램 이용에 대한 용이성의 증가, 그리고 미시적인 컴퓨터 모형이 보다 정확하고 쉽게 적용될 수 있다는 사실때문에 미시적인 시뮬레이션은 다른 기술보다 더 많이 사용되어 지고 있으나, 이러한 시뮬레이션 모형들에 대한 세부 기능들의 증가는 이러한 모형들이 가지고 있던 모형의 오류와 정산(calibration)에 대한 어려움이 어느정도 극복되고 있다는 것을 의미하며 연료의 효율성 분석과 같은 과제에도 활용이 될 수 있음을 의미한다고 보겠다.

2) 시뮬레이션의 적용

시뮬레이션은 실제 교통 시스템에서는 가능하지 않은 실험을 가능하게 하고 현장에서 관측할 수 있는 것보다 다양한 범위와 다양한 환경을 경험할 수 있는 기능을 제공하며(Williams et al., 1987), 각기 다른 대안들을 평가하기 위한 체제를 제공한다. 시뮬레이션 모형은 측정하기 불가능한 네트웍의 수행도 척도를 정량화 하는 것을 가능케 한다. 교통 프로젝트에 대한 대기의 영향력은 최근 보다 많은 관심을 불러일으키고 있고, 특히, 1990년도에CAAA(Clean Air Act Amendaments)에 의해 발족된 대기오염의 표준 수치에 이르지 못하는 대도시 지역에서 많은 관심을 보여주고 있다(US DOT JPO. 1999). 그러나, 오염물질 배출은 현실적으로 현장에서 측정될 수 없기 때문에, 시뮬레이션 모형은 만일 차량의 각 유형에 관련된 오염물질의 패턴과 혼합물질을 알고 있다면 어떤 오염물질이 발생할 것인가를 예측할 수 있다. ITS 수행으로부터 발생된 가장 중요한 편익은 통행시간과 같은 전통적인 척도보다 안전의 증가와 같은 형식으로 추정되기 때문에 공기 오염과 안전에 대한 편익은 특히 정량화 하는 것이 중요하다(Stewart, et. al., 1998).

3) 시뮬레이션 툴의 유형 및 분석

시뮬레이션 모형의 선정은 적용할 부문에 적절해야 한다. 일반적으로, 이러한 모형의 선정에서는 모형의 정확도와 시뮬레이션 실행에 필요한 비용, 요구자료, 시간 사이에는 상쇄(tradeoff)관계가 형성되는 것이 일반적이고 통상적으로 교통부문에서 많이 사용되는 시뮬레이션 모형은 3가지 유형으로 분류될 수 있다. 즉, 거시적 모형, 메조모형(mesoscopic), 미시적 모형으로 분류된다.

(1) 거시적 모형

거시적 교통 시뮬레이션 모형은 미시적 모형과 메조모형보다 많은 조사가 수행되었다. 이들 모형은 개별 차량에 대한 움직임 보다는 교통류의 총체적 묘사에 그 기반을 두고 있다. 이러한 이유 때문에, 이들 모형은 컴퓨터 성능면에서는 보다 낮은 성능을 요구하지만, 연료 소모와 같은 차량의 수준에서 정확하게 예측하는 측정은 불가능하다. 거시 모형은 그러나 속도, 교통량, 밀도 등의 측정은 가능하다.

(2) 미시적 모형

미시적 모형은 개별 차량에 대한 연속적인 혹인 순간적인 속도와 위치 자료를 바탕으로 차량간 상호작용을 시뮬레이션 한다. 이 것은 차량들이 실제로 네트웍에서 어떻게 움직이는가에 대한 보다 현실적인 개념을 나타내게 되지만, 보다 많은 자료와 계산 시간이 요구된다.

"이러한 모형은 TOD 혹은 감응식 신호제어, 신호제어, 특별하게 이용되는 차로 혹은 일반 차로의 이용, 표준 혹은 도류화에 대한 기하구조와 같은 교통제어와 교통관리 전략들을 범용적인 조사에 이용될 수 있다. 미시적 시뮬레이션 모형은 운전자의 유형, 차량의 유형, gap acceptance, 차량 속도, 기타 인자들에 대한 다양한 통계적인 분포를 고려하기 위해 설계되었다. 각 차로 별 차량의 움직임에 대한 시뮬레이션 기능, 다양한 도로의 설계, 제어 대안들에 대한 선정 기능은 거시적 모형보다 매력적으로 모형으로 만들게 된다. 그러나, 미시 모형은 거시모형보다 많은 입력자료를 필요로 한다"(Radwan & Hatton, 1990).

(3) 메조 모형

메조 모형은 거시모형과 미시모형의 특성을 모두 갖추고 이산과 연속적인 특성을 조합한 모형이다(Owen, et. al., 1996). 일반적으로, 미시 모형의 결과치는 메조모형에 입력 자료로 사용되기 위해 모아진다. 이 것은 필요한 시뮬레이션 시간을 감소시킨다.

메조 모형은 분석 수준에서 거시모형보다는 적지만 개별 차량을 추적한다. 예를 들면, 이들 모형은 미시모형에서 사용하는 차로변경(lane-changing)과 차량추종(car-following)행태를 모형화하지 않는다.

이러한 3가지 유형의 시뮬레이션 툴의 선정할 경우 유의해야 할 사항은 언제나 한가지 툴이 프로젝트

수행에 가장 적절한 것은 아니라는 것이다. 예를 들면, VISSIM과 CORSIM을 이용한 네트웍의 충분한 분석을 하는 연구에서 이 두 모형 모두에서 신뢰할 만한 분석 결과를 나타내었고 단일 모형으로도 충분한 분석이 가능하다는 결과가 나왔다. 각각의 모형은 다양한 경우의 대안에 대하여 평가되어야 하는데 이 때, 특정 모형은 어느 분야에서 우수하고 어느 분야에는 제약이 따른다(Bloomberg & Dale, 2000). 따라서, 시뮬레이션 툴을 선정할 때는 간단한 비교를 통해 선정해야 한다.

Ⅲ. 교통운영시스템별 시뮬레이션 자료의 구축

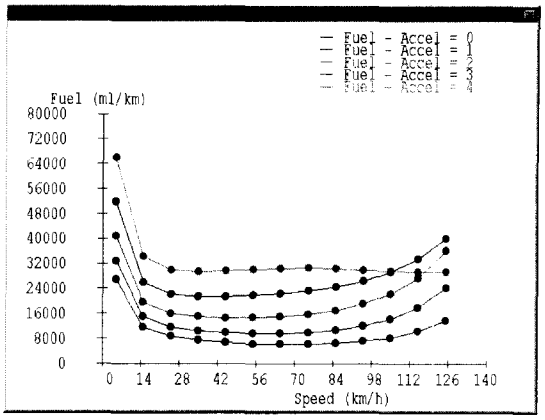
1. INTEGRATION의 적용

1) 시뮬레이션 도구 소개 및 선정 사유

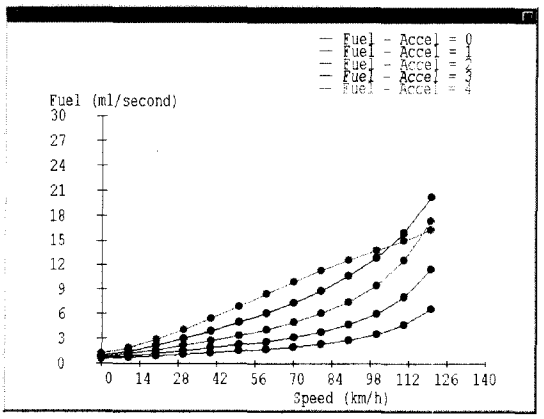
INTEGRATION은 ITS효과분석을 위해 주로 사용되는 시뮬레이션 툴로 거시적 모형(Tranplan, EMME/2 등)과 미시적 모형(NETSIM, FREESIM 등)의 기능을 갖춘 메조 모형에 속한다. INTEGRATION은 1/10초마다 네트웍 상의 모든 차량에 대한 속도를 파악하여 1초마다 차량의 연료 소비를 추정할 수 있기 때문에, 본 과제에서는 INTEGRATION을 이용하여 ITS 적용전후의 연료 소비분석, 신규도로 투자 전후의 연료 소비 분석, 다양한 TSM 사업을 다양한 대안으로 구성하여 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

INTEGRATION에서 사용하고 있는 연료 소모 추정에 대한 방식은 다음과 같다. INTEGRATION은 모든 차량에 대하여 1/10초 마다 속도를 계산한다. 이러한 안정류 상태의 속도 자료를 토대로 매 초마다 각 차량에 대한 연료 소비율을 계산하게 된다. 또한 매 초마다 차량의 속도 변화를 추적함으로써, 차량이 가감속으로 인해 발생되는 추가적인 연료 소모의 양을 결정할 수 있게 하였다.

에너지 소모 모형부분에서 소개한 것처럼 INTEGRATION은 순간모형을 사용하며, 교통 에너지 관련 효과분석 시 가장 많이 사용되는 모형이다. 특히, INTEGRATION 모형은 실제 측정값의 2.5%내의 오차범위에서 차량 연료 소모를 추정(Ding, 2000)하는 것으로 보고된 바, 본 연구에 가장 적절한 툴로 판단되어 적용하게 되었다.



〈그림 1〉 INTEGRATION의 거리Km당 연료 소모율



〈그림 2〉 INTEGRATION의 초당 연료 소모율

〈그림 1〉은 INTEGRATION에서 사용하는 단위거리당 속도별 연료 소모에 대한 모형을 그래프로 표시한 것이며, 〈그림 2〉는 단위시간당 속도별 연료 소모에 대한 모형을 그래프로 나타낸 것이다(Integration Ver. 2.1).

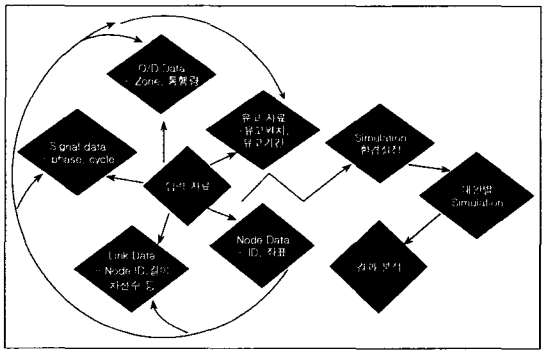
2) INTEGRATION의 특성 및 분석과정

INTEGRATION은 내재된 연료 소모모형의 우수성 외에도 다른 미시적 시뮬레이션 툴에서 제공하지 못하는 다양한 분석기능을 제공한다. 다음은 INTEGRATION의 특성을 요약한 것이다.

- ITS 상황(CMS, 실시간 정보 제공 등)에 대한 시뮬레이션 기능
- 고속도로 및 간선도로의 통합 시뮬레이션 가능
- Macro(Frank-Wolfe 알고리즘 적용) 및 Micro-

simulation(car-following, lane changing, shock-wave, gap acceptance, weaving 등) 가능
- 유고에 대한 시뮬레이션 가능
- HOV 차로, 램프 미터링에 대한 시뮬레이션 가능
- 교통정보 수집 설비(검지기, probe vehicle)에 대한 시뮬레이션 가능

특히, 다른 대부분의 미시적 시뮬레이션은 통행 수요 즉, O/D를 기반으로 시뮬레이션을 수행하지않는 반면, INTEGRATION은 O/D를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하는 특징이 있다. 아래 〈그림 3〉은 INTEGRATION의 분석과정을 나타낸 것이다.



〈그림 3〉 INTEGRATION을 이용한 분석과정

2. 효과 분석을 위한 대상지역 선정

본 연구에서 평가하고자 하는 교통 운영 시스템은 각각의 특성과 범위에 따라 나눌 수 있으며, 교통 운영 시스템을 그 적용범위에 따라 구분할 수 있다. 고속도로를 관리하느냐, 도시부 간선도로인지, 지방부 도로인지, 혹은 독립교차로에 대한 운영 전략인지에 따라 평가대상의 범위가 크게 달라질 수 있다. 또한, 대상 지역의 효율적인 분석과 자료 수집의 용이성, 분석 목적에 따라 사용 가능한 툴의 선택, 툴의 분석 범위 및 제약을 고려해야만 한다. 이러한 종합적인 측면을 고려하여, 본 연구에서는 크게 교통체계관리(TSM)전략과 ITS사업을 대상으로 하고, 부분적인 요소로서 고속도로 및 도시고속도로에서의 관리전략, 신호교차로를 포함한 도시 간선도로에서의 관리전략, 그리고 개별 차량에 대한 서비스 및 운영전략에 대한 에너지 효율성을 평가하여야 하기 때문에, 앞서 언급한 바와 같이 이에 대한 평가 툴로서 INTEGRATION을 선택하였다. 따라서, 이러한 제반 조건들을 고려하여, 분석을 위한 기초자료 및 세부자료의 취득 및 구축이 용이하며, 고속도로 및 도시 고속도로, 도시 간선도로를 포함하고, 도시교통특성을 잘 나타내는 강남 서초구 일대를 대상지역으로 선정했다. 서초구 일대는 도심으로 집중되는 많은 교통수요와 밀집된 주거, 상업, 업무지역으로 인한 반복적인 혼잡을 나타내고 있으며, 집약적이고 고효율적인 입지로 인해 시설투자와 같은 도로신설, 도로확장 등이 어려워 TSM이나 ITS와 같은 운영이나 관리, 첨단 기술적인 대안이 필요하며, 본 연구에서의 대안들을 적용하기 위한 다양한 기능과 위계의 도로, 즉 고속도로인 경부고속도로, 도시 고속도로인 올림픽 대로, 도시 간선도로인 남부순환로 및 기타 집산 도로 등을 포함하고 있어 대상지역으로서 매우 적합할 것으로 판단되었다. 또한, 대상지역에 대한 교통 자료인 네트워 자료 및 O/D 자료는 서울시 교통 센서스 조사의 자료가 사용가능하며, 네트워 및 O/D에 대한 보정 작업과 추가적인 네트워 자료는 주변지역의 특정 시설, 건물에 대한 최근의 교통영향평가 자료를 통해 보충이 가능한 이점을 가지고 있어 자료구축에도 매우 용이할 것으로 판단되어 선정하게 되었다.

3. 기본 자료의 구축 및 입력

본 연구에 사용된 기본 네트워 및 O/D자료는 1996년 구축된 서울시 교통 센서스 자료이다. 이 자료는 1996년에 구축된 자료이기 때문에 현재 상황과는 차이를 보일 수 있으나, 본 연구의 목적이 정확한 수요의 예측 혹은 교통계획 시 발생되는 제반 효과를 분석하는 것이 아니기 때문에 문제가 없이 그대로 적용해도 문제가 없을 것으로 판단된다. 1996년 서울시 센서스 자료는 거시적 분석 툴인 EMME/2 형식으로 구축되었으며 서울시와 그 주변 도시의 네트워을 포함하고 있다.

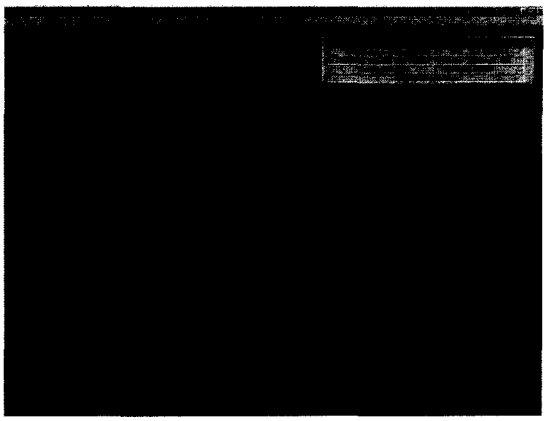
그러나 본 연구에 적용될 메조모형 시뮬레이션 툴인 INTEGRATION 본 연구에서는 INTEGRATION 2.10K 버전이 적용되었다. 이 버전은 3,500개의 노드, 3,500개의 링크, 350개의 존을 분석할 수 있다. 과 거시적 모형인 EMME/2의 분석 네트워 규모와 상세정도(level of detail)는 다르기 때문에 전 네트워에 대한 시뮬레이션은 불가능하다. 또한 본 연구의

대상지역은 강남구와 서초구 일대로 제한되기 때문에 이 부분에 대한 네트웍과 O/D를 추출해야 한다. 본 연구에서는 EMME/2가 대상지역의 네트웍을 물리적으로 추출하는 기능이 없기 때문에 EMME/2와 유사한 기능을 수행하는 거시적 분석 툴인 TRANPLAN을 이용하여 해당지역의 네트웍과 O/D를 추출하였다.

자료의 추출에 앞서EMME/2와 TRANPLAN은 자료의 구조가 서로 다르기 때문에 간단한 프로그램을 작성하여 전체 네트웍과 O/D 자료를 변환하였다. 변환된 자료는 TRANPLAN의 "SUBAREA ANALYSIS" 기능을 이용하여 대상지역의 네트웍과 O/D자료를 추출하여 INTEGRATION의 자료 형식에 적절하게 변환한다. 이때, INTEGRATION은 자료의 편집기능이 없기 때문에 TRANPLAN의 HNIS를 이용하여 네트웍을 편집하면 보다 효과적이다.

INTEGRATION을 이용한 분석을 위해서는 기본적으로 노드, 링크, 신호, O/D, 유고 자료에 대한 5개 file이 필요하다. 노드와 링크, O/D에 대한 자료는 TRANPLAN에서 구축된 자료를 적용하며, 신호에 대한 자료는 이들 지역에서 수행된 교통영향평가 보고서에 조사된 신호자료와 이 자료에 누락된 지점은 직접 조사한 자료를 이용하여 적용하였다.

TRANPLAN자료를 INTEGRATION자료로 변환하는 과정 역이 간단한 프로그램을 작성하여 TRANPLAN 형태의 네트웍과 O/D를 INTEGRATION 형태로 변환(노드파일, 링크파일, O/D파일로 변환)하였다. INTEGRATION 시뮬레이션 수행의 과정은 변환된 데이터를 통해 INTEGRATION에서 수행 가능한 세부적인 부분(Lane Striping, 신호, 차선이용제한 및 회전금지 등)의 수정 및 보완을 통해 기본 시뮬레이션 데이터를 구축한다. 구축된 기본 네트웍 자료에 대안별 네트웍의 수정 사항과 기타 교통상황을 반영한다. 이렇게 해서 구축된 기본네트웍은 대안별네트웍을 구성하는 기본적인 데이터로 활용하게 되며, 네트웍의 변화가 없는 대안의 경우는 기본네트웍을 사용하여 마지막 단계인 INTEGRATION의 수행단계에서 입력자료의 조정을 통해서 시뮬레이션을 수행하고, 네트웍의 변화가 있는 대안의 경우는 지금까지의 과정을 반복하여 각각 작성하면 된다. 입력자료 및 변수는 다음 장에서 자세히 설명할 것이며, 〈그림 4〉는 구축된 기본네트웍의 INTEGRATION 수행 화면이다.



〈그림 4〉 기본 네트웍의 INTEGRATION시뮬레이션 수행 모습

4. 대안별 입력자료 구축

전체적인 네트웍 및 O/D는 앞서 언급한 바와 같은 과정을 거쳐 구축된다. 실질적인 시뮬레이션을 위한 자료 구축에서는 대안에 따라 INTEGRATION의 입력자료의 형태 및 변수가 달라지며 자료의 추가 및 변수의 조정을 통해서 최종적으로 구축되어 시뮬레이션을 수행한다. INTEGRATION의 입력자료 형태는 1개의 마스터 파일과 다섯 개의 필수적인 데이터 파일로서 이루어져 있고, 이를 통해서 기본적인 시뮬레이션의 수행이 가능하다. 그리고, 분석하고자 하는 목적과 기능에 따라 추가적인 옵션 파일을 통해서 다양한 교통상황과 미시적인 분석이 가능하도록 이루어져 있다. INTEGRATION이 포함한 각 입력파일의 입력변수는 〈표 8〉과 같다. 분석 대안별로 입력변수는 각기 다르게 입력된다. 본 연구에서 설정한 대안은 총 7가지로 이루어져 있다. 각 대안별 입력자료 및 변수는 〈표 3〉과 같이 구성되었다.

1) 기본 네트웍

기본 네트웍은 도로 신설, 차로 확장, TSM 또는 ITS와 같은 사업을 실시하기 이전인, 현재의 상황을 그대로 묘사한 대안이며, 나머지 6개의 대안과 비교하기 위한 기준이 된다. 기본 네트웍의 입력파일별 입력변수는 다음과 같다.

마스터 파일에서는 네트웍에서 발생한 차량이 완전하게 네트웍을 빠져나갈 때까지를 시뮬레이션 해야 하기 때문에, 총 시뮬레이션 시간을 36,000초로 설정

〈표 3〉 INTEGRATION 입력 파일 및 입력 변수

마스터 파일(Master File)	시뮬레이션 시간 등 전체적인 시뮬레이션의 제어를 담당 입·출력 파일의 경로지정 및 출력 파일의 선택 및 형태 결정 추가 파일의 선택여부 운전자 계층별 통행배정 방법 선택
노드 파일(Node file)	노드의 x, y 좌표 : GIS 좌표계 이용 노드의 타입선택 및 존 설정 정보이용계수 : VMS 위치 지정
링크 파일(Link file)	링크의 길이와 속도 지정 링크의 용량과 밀도 및 링크의 특성(더미링크, 실제링크)지정 대향 교통류 지정 및 회전 금지 지정 차로수와 신호교차로의 해당 현시별 링크 지정
신호 파일(Signal file)	신호 계획 번호 : 현재 운영되고 있는 그룹번호 이용 주기와 현시의 수 : 현재 운영중인 신호시간 이용 옵셋주기 및 고정식 혹은 감응식 제어방식의 선택여부 신호최적화 여부 결정
O/D file	주어진 O-D량과 시뮬레이션 시간 내의 발생시간 결정 O-D 수요의 시·종점 승용차 환산계수 O-D량의Driver class 별 비율 결정
유고 파일(Incident file)	유고 발생 링크번호(내·외선 각각 3개 지점) 유고 발생 지점(Km) 유고 소멸 지점(Km) 유고 지속 시간 지정
기타 추가 파일(Optional file)	Detector Location(File 21) : 위치별 검지기 특성 지정 Lane Stripping(File 22) : 차선별 이동류 지정 Ramp Metering(File 23) : 램프미터링 위치 및 특성 지정

하였고, 시뮬레이션 내에서 최소 시간 경로와 링크통행시간의 계산 오차인 링크통행시간 오차(Link Travel Time Error)는 0.01로 설정하였다. 이것은 시뮬레이션서 최단경로 탐색 시 탐색오차를 감소시키는 효과를 가지고 있다. 경로선택에서는 실시간 링크통행시간을 기본으로, 300초 주기마다 갱신하여 최단경로를 탐색하도록 설정하였으며 운전자 계층별로 다른 갱신 주기를 사용토록 하여 ITS나 HOV에서도 적용이 가능토록 하였다. 그러나, 기본 네트웍에서는 실시간 통행시간 자료를 제공하는 옵션인 링크 파일의 링크 상황 감시가 설정되어 있지 않으므로, 시뮬레이션의 시작에서만 최단경로를 계산하고, 갱신 주기에 따라 계산하지 않게 된다.

노드파일은 노드의 위치좌표 및 노드의 특성을 나타낸다. 또한, 여기에서VMS의 위치를 노드에 표시함으로써, VMS의 효과분석을 할 수 있다. 기본 네트웍은 총 49개의 존과 249개의 노드로 이루어져 있으며, VMS는 없는 것으로 입력하였다.

기본 네트웍의 링크는 더미링크를 포함하여 총 613개로 이루어져 있으며, 신호교차로에 대한 이동류별 현시를 표시하게 되어있다. 교통자료로서 속도, 용량, 차선수, 링크길이 등을 현실상황에 맞도록 다시 보정하였고, 회전금지와RTOR(Right Turn On Red)이 있는 링크에 대한 정보를 추가로 입력하였다.

신호 파일은 신호시간계획의 수와 신호운영방식을 표현하는 부분으로서, 여기서는 1개의 신호시간계획과, 28개의 운영방식을 갖는 것으로 하며, 옵셋과 신호최적화는 없는 것으로 설정하였다.

기본적으로 모든 대안은 동일한 O/D를 가지고 있으며, 기본 대안에서는 운전자가 아무런 정보를 얻지 못하는 Driver class 1으로 모두 구성된 것으로 설정하였다. O/D의 발생은 시뮬레이션 시작부터 1시간동안 발생되었으며, 1시간 총 O/D에서, INTEGRATION의 수행 범위를 고려하여 0.04의 비율로 발생시키는 것으로 설정하였다.

유고파일은 유고상황 시뮬레이션을 나타내는 부분으로, 본 연구에서는 보다 현실적인 상황으로 분석하기 위해, 중요 도로에서 반복적인 혼잡에 따른 유고가 발생하는 것을 나타내도록 하였다. 모든 대안에서 동일한 유고가 발생하는 것으로 가정하고, 올림픽대로 2개 지점, 경부고속도로 1개 지점, 강남대로 1개 지점, 총4개의 지점에서 유고가 1,200초(20분) 동안

〈표 4〉 기본 네트워 입력변수

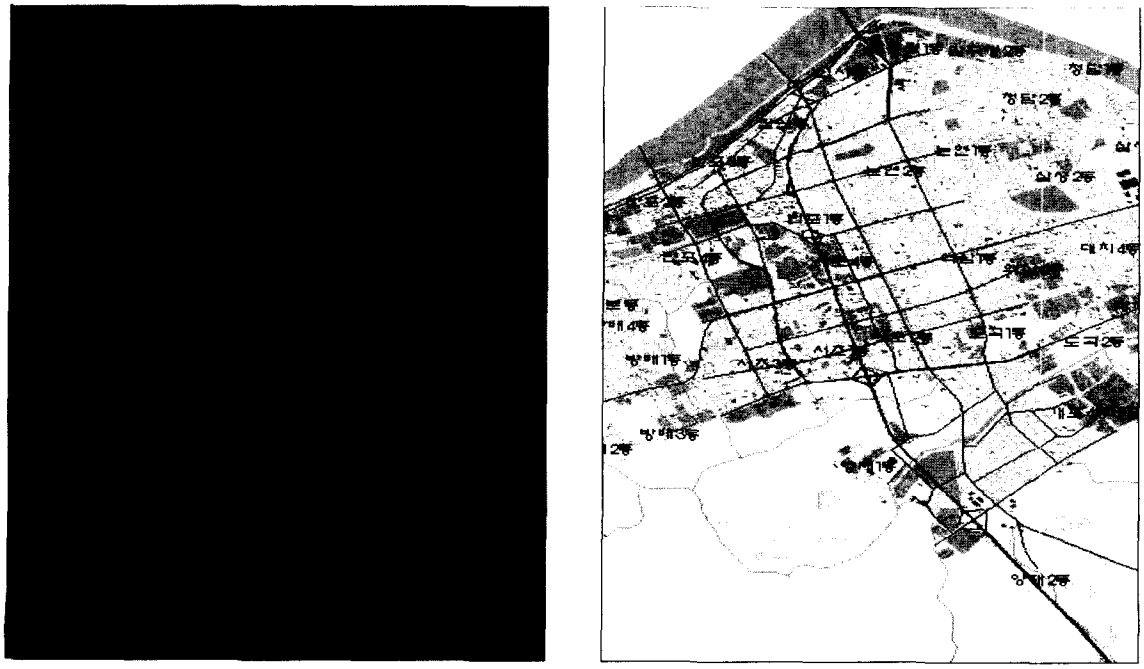
구분	내용
마스터 파일(Master File)	총 시뮬레이션 시간 : 36,000 초 Link Travel Time Error : 0.01 Route Choice Selection : 최초 시뮬레이션 시작에서 최단 경로 탐색
노드 파일(Node file)	존 : 49개 노드 : 249개
링크 파일(Link file)	링크 : 613개(더미링크 포함)
신호 파일(Signal file)	신호교차로 : 28개 신호시간계획 1개, 운영방식 28개
O/D file	총 13,896 차량으로 구성 정보를 갖지 않는 Driver class 1 으로 모두 구성
유고 파일(Incident file)	4개의 링크에 발생(올림픽대로 2, 경부고속도로, 강남대로)

지속하는 것으로 설정하였다. 〈표 9〉는 각 입력자료의 내용을 간략히 요약한 것이다.

2) HOV

기본적인 입력 변수는 기본 네트워과 동일하며, HOV를 운영하기 위해 링크 파일과 O/D 파일에서 변수를 설정하였다. 〈그림 5〉와 같이 교통량이 많고, HOV의 효과가 잘 나타날 것으로 예상되는 올림픽대로, 경부고속도로, 강남대로, 남부 순환로, 사평로의 5개 도로에 HOV 차로를 운영하는 것으로 설정하였다.

INTEGRATION에서는 HOV를 크게 두 가지 방법으로 입력할 수 있는데, 하나는, 링크 파일에서 링크회전 여부(Link Prohibition indicator)에서 이용 가능한 차량 형태를 지정해주고, 링크 전체를 차로에 상관없이 지정해준 차량 형태만이 이용하게 할 수 있는 방법이 있고, 다른 하나는 옵션 파일인 차로진행여부(lane striping) 파일을 추가하여 설정하는 방법이 있다. 차로진행여부에서는 차선별로 진행 이동류를 설정해 줄 수 있고(예를 들어, 좌회전만 허용,



〈그림 5〉 HOV 적용 네트워

〈표 5〉 HOV 입력변수

구분	내용
마스터 파일(Master File)	총 시뮬레이션 시간 : 36,000 초 Route Choice Selection : 최초 시뮬레이션 시작에서 최단 경로 탐색 Driver class 1 : 갱신 주기 300초, Travel Time Error 0.01 Driver class 5 : 갱신 주기 120초, Travel Time Error 0.01
노드 파일(Node file)	존 : 49 개 노드 : 249개
링크 파일(Link file)	링크 : 613개(더미링크 포함)
신호 파일(Signal file)	신호교차로 : 28개
O/D file	총 13,618 차량으로 구성(278대 감소) Driver class 1 : 70% Driver class 5(HOV 차량) : 30%
유고 파일(Incident file)	4개의 링크에 발생(올림픽대로 2, 경부고속도로, 강남대로)
Lane striping 파일	다섯 개 도로에 HOV 차로 운영(경부고속도로, 올림픽대로, 남부순환로, 강남대로, 사평로) 최우측 차로 HOV 차로 운영

좌회전과 직진 허용, 우회전과 직진 허용 등), 세부적으로 다시 차선별로 이용 가능한 차량 형태를 지정할 수 있다. 본 대안에서는, 경부고속도로상의 버스 전용 차로제와 도심부의 버스 전용 차로제를 고려하여, 후자의 방법으로서 현실상황에 가깝도록 설정하였다. 버스 전용 차로제와 동일하게 링크의 마지막 우측 차로을 HOV 차로로 설정하였고, Driver class 5번만이 이용 가능하도록 하였다. O/D 파일에서는 전체 차량의 30%를 HOV 차량으로 설정하였으며, 전체 교통 수요의 약 2%가 감소할 것으로 가정하였다.

3) 신호 최적화

신호 최적화는 네트웍의 변화 없이 시뮬레이션이 가능하며, INTEGRATION상에서 실시간으로 교통량에 따른 주기 및 현시 조정이 가능하다. 기본 네트웍의 입력자료와 O/D, 유고파일 등 대부분의 교통속성이 동일하며, 신호 파일에서 최적화를 시키는 부분이 다르다.

신호 최적화는 최소주기시간(Minimum cycle length)과 최대주기시간(Maximum cycle length)을 설정하여 줌으로써 그 범위 내에서 교통량에 따라 실시간으로 주기 및 현시 조정이 되며, 여기에서는 모든 신호교차로가 최소주기시간(Minimum cycle length) 60초, 최대주기시간(Maximum cycle length) 210초의 범위에서 20분의 간격으로 최적 주기 및 현시를 찾아 최적화 되도록 설정하였다.

〈표 6〉 신호 최적화 입력변수

구분	내용
마스터 파일(Master File)	총 시뮬레이션 시간 : 36,000 초 Route Choice Selection : 최초 시뮬레이션 시작에서 최단 경로 탐색
노드 파일(Node file)	존 : 49 개 노드 : 249개
링크 파일(Link file)	링크 : 613개(더미링크 포함)
신호 파일(Signal file)	신호교차로 : 28개 신호시간계획 1개, 신호운영방식 28개 Minimum cycle length 60초, Maximum cycle length 210초 최적화 주기 20분(모든 신호 교차로에 적용)
O/D file	총 13,896 차량으로 구성 정보를 갖지 않는 Driver class 1로 모두 구성
유고 파일(Incident file)	4개의 링크에 발생(올림픽대로 2, 경부고속도로, 강남대로)

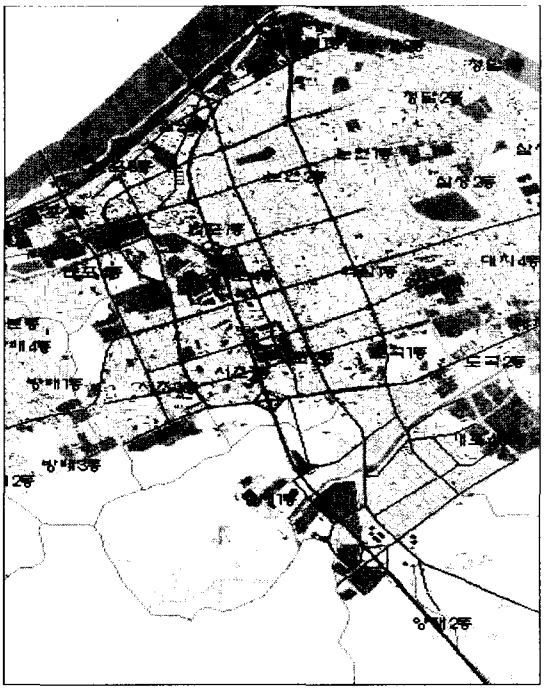
4) 도로 신설

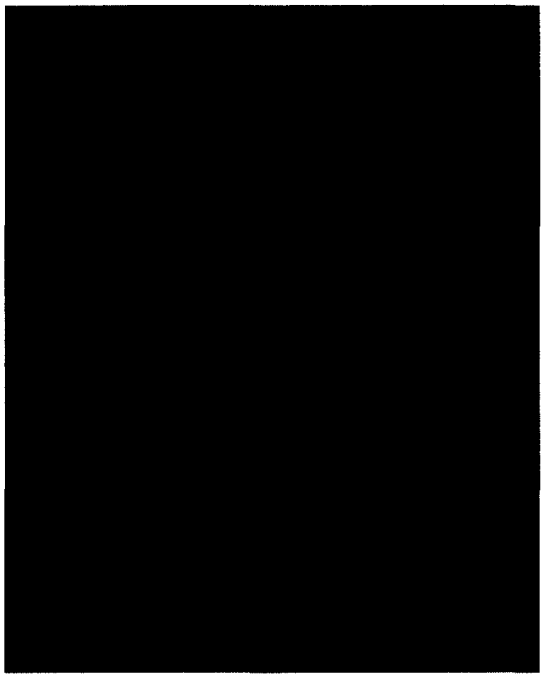
도로 신설은 〈그림 6〉과 같이 사평로 구간에 신설하는 것으로 설정하였다. 이 구간은 경부고속도로의 반포 IC가 있는 지점을 포함하는 구간으로, 사평로의 많은 통과교통과 램프로 인한 합류, 차선감소로 인한 병목현상과 엇갈림이 많이 발생하는 지역이다. 도로 신설 구간으로 사평로를 선정하여, 그림과 같이 2개 구간에 대해(강남대로 - 고속버스 터미널, 고속버스 터미널 - 반포대교 남단) 양방향으로 총 4개의 링크를 신설하여 시뮬레이션을 수행하였다. 신설된 링크는 약 2km의 구간에 설치되었으며, 사평로와 같은 용량(1200vph)과 자유류 속도(60kph) 기타 교통 속성이 동일한 도로로서, 모두 편도 2차선의 링크로 설정하였다.

경로선택 및 업데이트 주기는 기본 네트워과 동일하며, 최초 자유류 속도에 의해 계산된 링크통행시간에 따라 최단경로를 검색하게 되어 노선선택을 하게 되며, 모든 차량은 실시간 정보제공을 받지 않는 Driver class 1로만 구성되어 있으며, 신호 및 유고자료 역시 기본 네트워과 동일하게 설정하였다.

5) 차로 확장

차로 확장은 위의 도로 신설 대안과 유사한 구간을

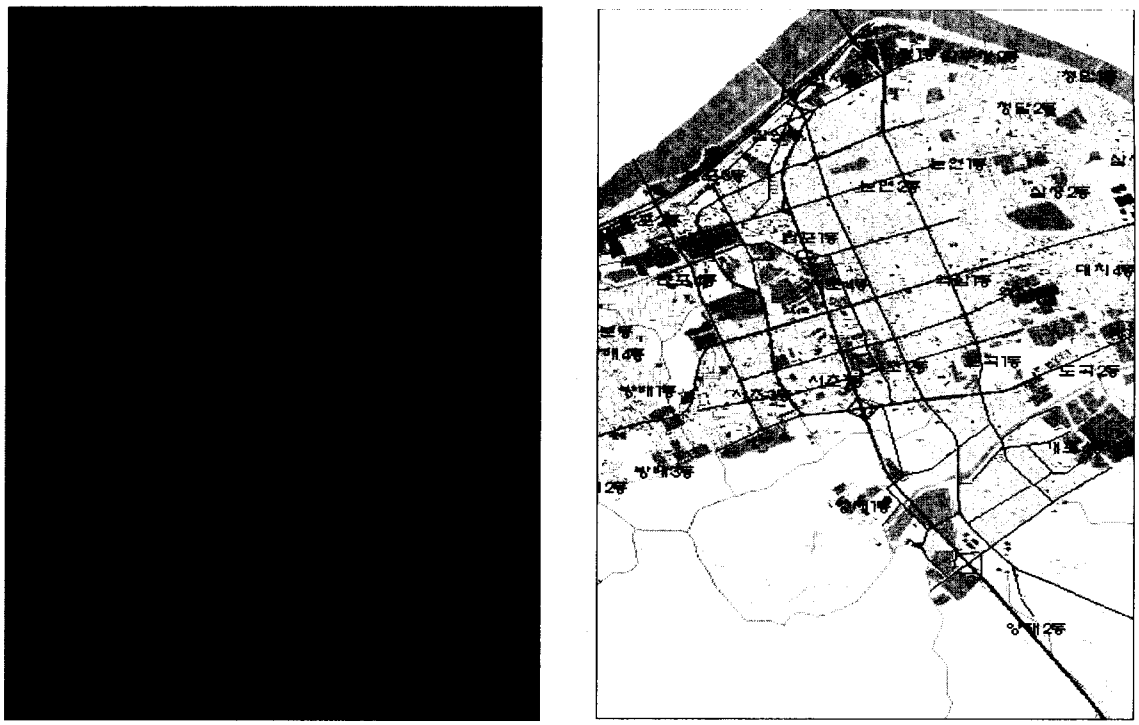




〈그림 6〉 도로 신설 네트웍

〈표 7〉 도로 신설 입력변수

구분	내용
마스터 파일(Master File)	총 시뮬레이션 시간 : 36,000 초 Route Choice Selection : 최초 시뮬레이션 시작에서 최단 경로 탐색
노드 파일(Node file)	존 : 49 개 노드 : 249개
링크 파일(Link file)	링크 : 617개 (더미링크 포함, 4개 링크 신설)
신호 파일(Signal file)	신호교차로 : 28개 신호시간계획 1개, 신호운영방식 28개
O/D file	총 13,896 차량으로 구성 정보를 갖지 않는 Driver class 1 으로 모두 구성
유고 파일(Incident file)	4개의 링크에 발생(올림픽대로 2, 경부고속도로, 강남대로)



〈그림 7〉 차로 확장 네트웍

〈표 8〉 차로 확장 입력변수

구분	내용
마스터 파일(Master File)	총 시뮬레이션 시간 : 36,000 초 Route Choice Selection : 최초 시뮬레이션 시작에서 최단 경로 탐색
노드 파일(Node file)	존 : 49 개 노드 : 249개
링크 파일(Link file)	링크 : 613개(더미링크 포함) 8개 링크 1차로 확장
신호 파일(Signal file)	신호교차로 : 28개 신호시간계획 1개, 신호운영방식 28개
O/D file	총 13,896 차량으로 구성 정보를 갖지 않는 Driver class 1 으로 모두 구성
유고 파일(Incident file)	4개의 링크에 발생(올림픽대로 2, 경부고속도로, 강남대로)

선정하였다. 단지 위의 도로 신설보다는 짧은 구간으로, 강남대로와 만나는 사평로부터 고속버스터미널까지의 구간의 총 8개 링크에 대해서 차로를 확장해주는 것으로 설정하였다.

확장된 링크의 교통속성은 본래의 교통속성을 유지하는 것으로 하였으며, 1개 차로가 확장되는 것으로 설정하였다.

마스터 파일에서는 최초 계산한 링크통행시간에 의해 최단경로를 탐색하도록 하였으며, 기본적인 속성은 실시간 정보이용을 제공하지 않으므로 대부분 동일하다. 유고 및 신호 파일은 기본 네트웍과 동일하게 설정하였다.

6) ITS 1

ITS 1은 운전자에게 실시간 교통정보를 제공하여 운전자가 경로선택의 변화를 가져오게 할 수 있다. 모든 Driver class는 동일하게 300초의 주기마다 실시간 교통정보를 이용하여 최단경로를 재계산하도록 하

〈표 9〉 ITS 1 입력변수

구분	내용
마스터 파일(Master File)	총 시뮬레이션 시간 : 36,000 초 Driver class 1-5 : 업데이트 주기 300초, Travel Time Error 0.01 실시간 링크통행시간정보를 이용하여 경로선택
노드 파일(Node file)	존 : 49 개 노드 : 249개
링크 파일(Link file)	링크 : 613개(더미링크 포함) 실시간 통행시간자료를 모니터링하는Surveillance indicator 설정
신호 파일(Signal file)	신호교차로 : 28개 신호시간계획 1개, 신호운영방식 28개
O/D file	총 13,896 차량으로 구성 정보를 갖지 않는 Driver class 1 : 30% 실시간 링크통행시간정보를 갖는 Driver class 2 : 40% 실시간 링크통행시간정보 + 예측정보를 갖는 Driver class 3 : 30%
유고 파일(Incident file)	4개의 링크에 발생(올림픽대로 2, 경부고속도로, 강남대로)

여 경로선택을 하도록 설정하였다.

링크파일에서는 동적인 통행배정을 위한, 실시간 통행시간 정보를 모니터링하는 Surveillance indicator를 설정함으로써 업데이트 주기에 따라 동적 통행배정이 실행된다.

ITS 1에서는 5개의 Driver class 중, 어떤 정보도 받지 못하는 Driver class 1과 실시간 교통정보를 받는 Driver class 2, 실시간 교통정보에 예측정보까지를 제공받는 Driver class 3의 세 가지로 구성하였다. O/D 파일에서 Driver class의 비율을 설정하며, 이 대안에서는Driver class 1, 2, 3를 각각 30%, 40%, 30%로 구성된 것으로 설정하였다.

7) ITS 2

ITS 2는 기본적인 입력 파일은 대부분 ITS 1과 동일하며, Driver class의 구성비에 차이를 두어 정보에 대한 접근 및 이용의 차이를 나타내었다. ITS 1과 마찬가지로,INTEGRATION의 5개의 Driver class 중, ITS 1과 같이 1, 2, 3 세 가지의 Driver class로 구성하였으며, ITS 2에서는 Driver class 1, 2, 3를 각각 10%, 70%, 20%로 구성된 것으로 설정하였으며, ITS 1과 동일하게 모든 Driver class는300초의 주기마다 실시간 교통정보를 이용하여 최단경로를 재계산하여 경로선택을 하도록 설정하였다.

〈표 10〉 ITS 2 입력변수

구분	내용
마스터 파일(Master File)	총 시뮬레이션 시간 : 36,000 초 Driver class 1-5 : 업데이트 주기 300초, Travel Time Error 0.01 실시간 링크통행시간정보를 이용하여 경로선택
노드 파일(Node file)	존 : 49 개 노드 : 249개
링크 파일(Link file)	링크 : 613개(더미링크 포함) 실시간 통행시간자료를 모니터링하는Surveillance indicator 설정
신호 파일(Signal file)	신호교차로 : 28개 신호시간계획 1개, 신호운영방식 28개
O/D file	총 13,896 차량으로 구성 정보를 갖지 않는 Driver class 1 : 10% 실시간 링크통행시간정보를 갖는 Driver class 2 : 70% 실시간 링크통행시간정보 + 예측정보를 갖는 Driver class 3 : 20%
유고 파일(Incident file)	4개의 링크에 발생(올림픽대로 2, 경부고속도로, 강남대로)

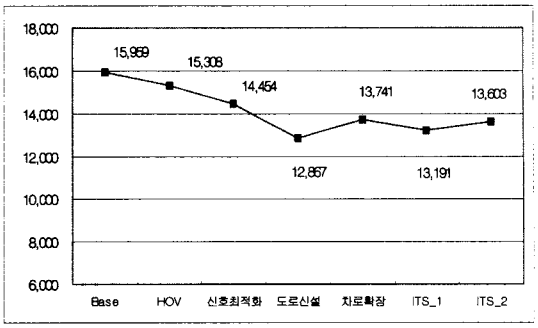
Ⅳ. 시뮬레이션 및 결과 분석

1. 시뮬레이션 수행 결과

시뮬레이션은 현재의 상황을 기반으로 하는 기본 네트워과 운영방식별 각 대안별로 수행되었다. 차량별, 특정 구간의 링크별, 전체 네트워에 대해서 다양한 MOE가 도출된다. 우선, 사업의 시행효과를 나타내는 일반적인 척도로 사용되는 평균속도와, 에너지 효율성의 측면을 고려하여 연료 소모량을 토대로 시뮬레이션 결과를 분석한 결과는 다음 〈표 18〉과 같다.

네트워의 평균 속도 측면에서는 ITS 2가 가장 효과가 높은 것으로 나타났으며, 연료 소모량의 절감 측면에서는 도로 신설이 가장 효과가 높은 것으로 나타났다. HOV나 신호 최적화, 차로 확장 등은 도로의 운영을 개선하고 관리해주는 성격의 사업인 반면에, ITS 1과 2는 운전자에게 링크에 대한 정보를 제공함으로써 경로선택의 전환을 유도하고 있다. 따라서 상대적으로 우회하더라도 소통이 원활한 경로를 선택하게 되어 네트워 전체에 대한 평균속도는 증가하게 되는 것이다.

1) total network travel(vehicle-km)
2) average network speed(km/h)
3) average trip length/veh(km)
4) network stops(average(%), total)
5) total fuel consumption by all vehicles while traversing this link during the entire simulation(liters)



〈그림 8〉 시뮬레이션 수행 결과(연료소모량)

2. 시뮬레이션 수행 결과 결과 분석

시뮬레이션의 결과 효과적인 교통시스템의 운영은 효과적인 에너지 소비의 한 방안이 될 수 있음을 알 수 있다. 교통운영방식에 대한 대안은 아니지만, 공급의 증대 요소인 도로개설이 에너지절약에 가장 많은 도움을 주는 것으로 나타났다. 그러나, 반대로 많은 초기투자비가 소요될 수 있기 때문에 경제적이지 못할 수 있다. 기타 대안 중에서 ITS에 의한 정보제공은 제어만을 강요한 그간의 교통운영에 새로운 전기가 되는 교통대안으로 판단되었다. 즉, 대규모 시설비가 투자되지 않는 상황에서의 최저비용 해법으로서 최근의 시대적요구를 반영한다는 측면에서도 좋은 에너지 절감효과를 낼 수 있는 대안으로 판단되었다.

또한 네트워의 평균속도와 연료 소모량은 언제나 양의 상관관계를 나타내지는 않으며, 특히, ITS의 대안 중에서 실시간 교통정보를 제공받는 차량(즉, driver class 2, 3)의 비율을 40+30%에서 70+20%로 증가시킨 경우 통행속도는 증가했지만 연료 소모량에서는 예상과 달리 더욱 악화됨을 알 수 있다. 이 부분

〈표 11〉 시뮬레이션 수행 결과

대안	MOE						비고
내용	1	2	3	4	5	에너지 감소율(%)	total net length (km)
기본운영상태	72,780	42.35	5.26	27.13	15,959	-	226.25
HOV	71,686	43.17	5.29	25.89	15,308	4.08	226.25
신호최적	73,268	44.84	5.30	24.22	14,454	9.43	226.25
도로신설	72,984	48.91	5.28	23.78	12,867	19.38	230.11
도로확장	70,623	50.06	5.15	25.87	13,741	13.90	226.25
ITS 1	74,260	50.14	5.37	23.62	13,191	17.34	226.25
ITS 2	72,697	52.19	5.33	24.24	13,603	14.76	226.25

은 실시간 정보 제공으로 인해 비록 통행거리는 증가하더라도 통행속도가 높은 경로를 선택하여 통행했기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

참고로 본 연구와 유사한 연구가 해외에서 시행되었으며, 결과 또한 유사하게 나타났다. 즉, 프랑스의 경우 파리의 교통제어 시스템 SURF-2000(Systeme Urbain de Regulation des Feux)을 적용한 결과 10%정도의 연료 소모가 감소한 것으로 보고되었다(Beteille & Briet, 1997). 미국의 LA에서는 자동화된 교통 조사 및 제어 프로그램을 적용한 결과 13%의 연료소모 감소효과를 나타내었다(LA DOT, 1994). 이 연구에서는 신호시간을 최적화하기 위해 4,509개의 검지기를 1,170개의 교차로에 설치한 것으로 보고되었다. 마지막으로, 캐나다의 토론토에서는 감응식 신호제어 시스템인 SCOOT을 설치한 결과 5.7%의 에너지 소비가 감소하였다(SCOOT in Toronto, 1995). 이 곳에서는 75개의 신호에 감응식 제어 시스템을 설치하여 운영하였다.

한편, 본 연구의 시뮬레이션 결과는 각 대안별로 조합이 이루어지지 않은 상태만을 나타내었기 때문에 각 대안별로 접합을 할 경우 그 효과는 더욱 클 것으로 판단된다. 즉, 예를 들면, 신호를 최적화하는 동시에 운전자에게 정보를 제공하고, 또한, 도로를 확장한다면 가장 좋은 대안이 될 것으로 판단된다. 그러나 이러한 대안은 경제적인 측면을 고려하지 않고, 교통운영 측면에서만 고려한 것이기 때문에 대안의 실행에서는 각 대안별로 소요비용을 추정하여 각 대안에 대한 경제적인 측면을 고려하는 것이 필요하다.

V. 결론 및 향후 과제

1. 결론

본 연구는 다양한 교통운영방식에 대한 효과를 측정하는 것으로 에너지 소비의 절감에 중점을 두고 있다. 일반적으로 에너지 소비는 네트웍을 통행하는 차량의 특정 속도에서 가장 효율적인 것으로 알려지고 있다. 보통 이 속도는 60~80km/h 정도이며, 이보다 높거나 낮을 경우에는 연비가 나빠지게 된다. 특히, 저속주행의 경우에는 더욱 심각하다.

때문에 네트웍의 평균 통행속도는 에너지 소모에 직접적인 관련이 있다. 따라서, 최적의 교통시스템의 운영은 효과적인 에너지 소비의 한 방안이 될 수 있다. 교통 시스템의 운영 효율을 증대 시키는 방안으로는 도로를 증설하는 기본적인 방안에서부터 기존 설비를 재정비하는 TSM, 그리고 최근 등장한 ITS는 네트웍의 효율을 증대 시킴으로써 에너지 절감효과를 도출할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 운영방식의 개선이 에너지 소비에 어느 정도의 영향력이 있는가를 정량적으로 판단하는 과정과 분석방안을 제공하였다.

수송수단을 이용함으로서 필요한 직간접적 절대적인 에너지 사용량을 본 연구에서 사용한 도구로서 직접 추정하는 것은 2가지 측면에서 어려움이 있다. 첫째, 시뮬레이션에서 사용한 함수식이 우리나라의 차량특성을 반영한 것이 아니라, 북미의 차량을 대표하여 사용한 함수식이다. 둘째, 시뮬레이션에서 차량의 이동, 교통대안의 영향 등을 복합적으로 추구할 수 있는 자체의 vehicle dynamics모듈이 불완전하다는 것이다.

그러나, 현실적으로 거시적인 모형으로서 대안의 영향으로서의 에너지 소모량을 파악할 수 없는 바 이는 거시적인 모형이 가지는 핵심적 단점인 대기행렬 생성 및 소멸에 대한 묘사가 불가능하기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 대안의 영향을 일단 평가할 수 있고, 여러 대안간의 에너지의 차이는 알아낼 수 있는(즉, 상대적인 에너지 절약량을 판단할 수 있는) 도구로서 INTEGRATION을 선정하였다. 즉, 대안간의 순위는 알아볼 수 있을 것이며, 향후 에너지 사용량의 절대치를 추정할 수 있는 차령, 차종별 제반 모형에 대한 연구가 함께 요구된다고 볼 수 있다.

한편, 시뮬레이션의 결과 효과적인 교통운영방식은 효과적인 에너지 소비의 한 방안이 될 수 있음을 알 수 있었다. 특히, 여러 대안 중에서 공급의 증대 요소인 도로개설이 아무래도 가장에너지절약에 도움은 되나 반대로 많은 초기투자비가 소요되는바 경제적이지 못할 수 있고, 기타 대안 중에서 ITS에 의한 정보제공은 제어만을 강요한 그간의 교통운영에 새로운 전기가 되는 교통대안으로 판단되었다. 즉, 대규모 시설비가 투자되지 않는 상황에서의 최저비용 해법으로서 최근의 시대적요구를 반영한다는 측면에서도 좋은 에너지절감효과를 낼 수 있는 대안으로 판단되었다.

2. 향후 과제

본 연구는 절대적인 에너지 사용량을 측정하는데

그 목적이 있는 것은 아니다. 단지 다양한 교통운영 방식에 대한 상대적인 에너지 소모를 비교 분석하는 것이다. 그러나 대안간의 우선순위는 알아볼 수 있으므로 에너지 정책과 교통정책을 동시에 고려하여 새로운 사업을 진행하는데 많은 도움을 줄 것으로 판단된다.

그러나, 향후 에너지 사용량의 절대치를 추정할 수 있는 차령, 차종별 모형에 대한 연구가 함께 요구된다고 볼 수 있다. 이미 선진국에서는 이러한 모형의 개발에 많은 노력을 투자하고 있으며, 특히, 미국의 EPA에서는 에너지 소모에 대한 모형을 계속 발전시켜 현재 MOBILE 6 모형이 개발되어 다양한 분야에 적용중이다. 우리나라에서는 차종과 도로의 기하구조, 운전자의 행태가 미국과는 다르기 때문에 우리나라에 적합한 에너지 모형을 구축하는 것이 요구된다. 또한, 이러한 모형을 개발하여 대안의 상대적인 비교가 아닌 절대적인 비교에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. A. J. Richardson, and R. Akcelik, "Fuel Consumption and Data Needs for the Design and Evaluation of Urban Traffic Systems", Research Report ARR No. 124, Austrailian Road Research Board, pp.51~56, 1983.
2. City of Los Angeles Department of Transportation, "Automated Traffic Surveillance and Control(ATSAC) Evaluation Study," June 1994.
3. C. S. Fisk, "The Australian Road Research Board Instantaneous Model of Fuel Consumption", Transportation Research, Vol. 23B, No. 5, pp.373~385, 1989.
4. D. C. Biggs and R. Akcelik, "An Energy-Related Model for Instantaneous Fuel Consumption", Traffic Engineering & Control, Vol. 27, No. 6, pp.320~325, 1986.
5. E. Pelensky, W. R. Blunden, and R. D. Munro, "Operating Costs of Cars in Urban Areas," Proceedings, Fourth Conference of the Australian Road Research Board, Vol. 4, part 1, pp.475~504, 1968.
6. "Evaluation of the Intelligent Cruise Control System final report," U.S.DOT, Volpe National Transportation Systems Center & National Highway Traffic Safety Administration, Oct., 1999.
7. Feng An and Marc Ross. "Model of Fuel Economy with Applications to Driving Cycles and Traffic Management," Transportation Research Record 1516, Washington, D.C., 1993.
8. H. C. Watson, E. E. Milkins, and G. A. Marshal, "A Simplified Method for Quantifying Fuel Consumption of Vehicles in Urban Traffic," SAE-Australia, Vol. 40, No. 1, pp.6~13, 1980.
9. H. Rakha, A. Medina, and J. Diekmann, "Evaluating the Efficiency, Energy, Environmental and Safety Impacts of Intelligent Transportation Systems along the Southern/ Baseline Corridor," Draft 1.1, Oct. 4, 1999.
10. H. Rakha, M. Van Aerde, L. Bloomberg, and X. Huang, "Construction and Calibration of a Large-Scale Microsimulation Model of the Salt Lake Area," Transportation Research Record 1644, pp.93~102. 1998.
11. J. A. Stewart, K. Lepik, and M. Van Aerde, "Benefit Sensitivities of Adaptive Traffic Control Strategies at Isolated Traffic Signals," The 77th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 1998.
12. J. A. Stewart and M. Van Aerde, "An Assessment of Adaptive Co-ordination of Traffic Signal Offsets within INTEGRATION," The 77th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 1998.
13. James C. Williams, Hani S. Mahmassani, and Robert Herman, "Urban Traffic Network Flow Models," Transportation Research Record 1112, pp.78~88. 1987.
14. J. N. Hooker, A. B. Rose, and G. F. Roberts, "OptimalControl of Automobiles for Fuel

Economy," Transportation Science, Vol. 17, No. 2, pp.146~167, 1983.
15. K. Ahn, A. Trani, H. Rakha., and M. Van Aerde, "Microscopic Fuel Consumption and Energy Emission Models," The 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 1999.
16. J. Beteille and G. Briet, "Making Wave in Traffic Control," Traffic Technology International, Annual 1997.
17. J. R. Kenworthy, H. Rainford, P. W. G. Newman, and T. J. Lyons, "Fuel Consumption, Time Saving and Freeway Speed Limits," Traffic Engineering & Control, Vol. 27, No. 9, pp.455~459, 1986.
18. K. Post, J. H. Kent, J. Tomlin, and N. Carruthers, "Fuel Consumption and Emission Modeling by Power Demand and a Comparison with Other Models," Transportation Research A, Vol. 18A, No. 3, Pergamon Press Ltd., 1985.
19. Larry E. Owen, Gary Brock, Scott Mastbrook, Rick Pavlik, Lei Rao, Charlie Stallard, Srinivasa Sunkari, and Yunlong Zhang, "A Compendium of Traffic Model Validation Documentation and Recommendations," Phase I, Tasks A-H.. Prepared for FHWA, December 1996.
20. L. Evans and R. Herman, "Automobile Fuel Economy on Fixed Urban Driving Schedules," Transportation Science, Vol. 12, No. 2, pp.137~152, 1978.
21. L. Evans, R. Herman, and T. Lam, "Multivariate Analysis of Traffic Factors Related to Fuel Consumption in Urban Driving," Transportation Science, Vol. 10, No. 2, pp.205~215, 1976.
22. Loren Bloomberg and Jim Dale, "A Comparison of the VISSIM and CORSIM Traffic Simulation Models On A Congested Network," The 79th annual meeting of the Transportation Research Board, January 2000.
23. M. F. Chang and R. Herman, "Trip Time Versus Stop Time and Fuel Consumption Characteristics in Cities," Transportation Science, Vol. 15, No. 3, pp.183~209, 1981.
24. M. F. Chang, L. Evans, R. Herman, and P. Wasielewski, "Gasoline Consumption in Urban Traffic," Transportation Research Record 599, Transportation Research Board, pp.25~30, 1976.
25. M. Van Aerde, "INTEGRATION Release 2.10 for WINDOWS: User's Guide-Volume I, II: Fundamental Model Features," Jul., 1998
26. P. F. Everall, "The Effect of Road and Traffic Conditions on Fuel Consumption," RRL Report LR 226, Road Research Laboratory, Crowthorne, England, 1968.
27. R. Akcelik and C. Bayley, "Some Results on Fuel Consumption Models. Appeared in Progress in Fuel Consumption Modelling for Urban Traffic Management," Research Report ARR No. 124, Austrailian Road Research Board, pp.51~56. 1983.
28. R. Akcelik, "Efficiency and Drag in the Power-Based Model of Fuel Consumption," Transportation Research B, Vol. 23B, No. 5, Pregamon Press Ltd., 1989.
29. R. Akcelik, "Fuel Efficiency and Other Objectives in Traffic System Management," Traffic Engineering & Control, Vol. 22, pp.54~65, 1981.
30. R. A. Vincent, A. I. Mitchell, and D. I. Robertson, "User Guide to TRANSYT Version 8," Transport and Road Research Lab Report No. LR888, 1980.
31. R. Herman and S. Ardekani, "The Influence of Stops on Vehicle Fuel Consumption in Urban Traffic," Transportation Science, Vol. 19, No. 1, pp.1~12, 1985.
32. "SCOOT in Toronto," Siemens Automotive, USA, in Traffic Technology International, Spring 1995.

33. T. N. Lam, "Estimating Fuel Consumption from Engine Size," Journal of Transportation Engineering, Vol. 111, No. 5, July 1985.
34. Yonglian Ding, "Quantifying the Impact of Traffic-Related and Driver-Related Factors on Vehicle Fuel Consumption and Emissions," Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, May, 2000.

♧ 주 작 성 자 : 최기주
♧ 논문투고일 : 2001. 7. 7
논문심사일 : 2001. 8. 20 (1차)
2002. 1. 15 (2차)
2002. 1. 30 (3차)
심사판정일 : 2002. 1. 30