

■ 論 文 ■

Puget Sound Transportation Panel을 이용한 활동참여와 통행행동의 Dynamic SEM

Dynamic Structural Equation Models of Activity Participation and Travel Behavior
using Puget Sound Transportation Panel

최연숙

(중앙대학교 도시공학과 석사과정)

정진혁

(중앙대학교 도시공학과 부교수)

목 차

- | | |
|------------------|---------|
| I. 서론 | V. 모형결과 |
| II. 자료 | VI. 결론 |
| III. 모형구조 및 변수설정 | 참고문헌 |
| IV. 분석모형 | |

Key Words : 활동참여, 통행행동, 패널자료, 구조방정식, PSTP

요 약

본 연구에서는 개인의 사회, 경제적 특성과 활동참여, 통행행동의 관계를 규명하기 위하여 개인의 사회, 경제적 특성을 시간 변동 외생변수와, 시간 불변동 외생변수로 설정하고 개인의 활동참여와 통행행동에 관한 변수를 내생변수로 설정하여 모형을 구축하였다. 모형의 실효성을 검증하기 위하여 분석에 사용된 자료는 1991년, 1992년 미국 Puget Sound 지역의 Transportation Survey 자료를 이용하였으며, Panel 자료의 변수 간 복잡한 상호관계를 규명해 내기 위하여 Dynamic Structural Equation Model을 구축하였다. 활동참여와 통행행동에 관한 10개의 내생변수와 개인의 사회, 경제적 특성인 10개의 외생변수를 사용하여 모형추정을 한 결과, 개인의 생계활동에 의해 유지활동과 여가활동은 시간적 제약을 받고, 여가활동은 유지활동에 제약을 받게 된다는 것을 알게 되었으며, 개인의 사회경제지표에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, 개인의 활동 패턴은 과거 연도의 각 활동 지속시간과 통행패턴에 영향을 받는 것으로 나타나 Panel 자료 분석의 필요성이 부각되었다. 본 연구의 결과로부터 보다 충실한 활동기반모형의 구축을 위해서는 Panel 자료의 구축의 필요성이 더욱 요구된다.

본 연구는 2001년 중앙대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

1. 서론

“통행(Travel)은 활동(Activity)이라는 인간의 욕구를 만족시키기 위해 필수적으로 발생하는 수요(Derived Demand)”라는 개념은 교통수요를 이해하는데 이미 오래 전에 도입되었지만 그 적용에는 한계를 보여왔다. 특히, 전통적인 4단계 교통 수요 예측 모형은 활동참여를 구체적이고 직접적으로 설명하지 못하는 문제점을 내재하고 있다. 지난 20년 동안 많은 연구를 통해서 개발 및 발전되어온 활동기반 접근 방법은(Activity-Based Approach Model)은 최근 이론, 분석방법, 컴퓨터의 급속한 발전과 함께 최근 많은 발전을 이루어 왔다. 그러나, 구미를 중심으로 이루어진 위의 발전은 우리나라에서는 전무한 상태이며, 많은 관심과 노력이 필요하다고 할 수 있다. 이들 활동기반접근 연구 중 통행행동에 미치는 활동참여의 영향을 이해하는 것은 활동기반모형의 기초연구로 인식되어 왔으며, 이들의 명확한 이해는 교통계획과 교통정책분석에서 더 나은 도구로 사용될 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

최근 개발되고 적용되고 있는 활동기반모형의 방법론을 분류는 여러 가지가 존재하나, 크게 다음과 같이 분류할 수 있다. 첫째, CPM's(Computational Process Models)의 이용, 둘째, 위험률을 기초로 한 지속시간 모형(Hazard-Based Duration Model)의 적용, 구조방정식 모형(Structural Equation Model: SEM)의 이해 및 적용, 넷째, 이산·이산-연속 선택 모형(Discrete-Continuous Choice Model) 등의 네 가지 모형으로 나누어 볼 수 있다. 이 중, 구조방정식 모형은 1987년에 활동기반모형분야에 소개되었으며, SEM이 가지고 있는 고유의 성질인 복합관계를 규명해내는 장점이 있어, 활동기반모형에서 활발하게 적용되어 왔다(Pas, 1996).

현재 활동기반 접근 중 SEM을 이용한 통합모형(Joint Model)의 경우 대부분의 연구가 Cross-section 자료를 이용하여 분석한 것이 대부분이다. 그 대표적인 연구로 Golob과 McNally(1997)는 구조방정식을 이용하여 남·여 가구주에 의하여 수행되는 활동사이의 관계와 24시간 내에서 발생하는 통행과 활동참여의 인과관계를 규명해내었다. 그러나 Panel 자료를 통한 시간 변화에 대한 개인의 활동/통행 패턴의 변

화 분석은 이루어지지 않았다. 그 중요성의 인식에도 불구하고, 국내에서는 교통관련 Panel 자료는 존재하지 않으며, 따라서, 이들 자료를 이용한 Panel 통행 수요 분석에 관한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다. 그러나, 구미를 중심으로 이루어진 주요 연구중 Panel 자료와 SEM을 이용한 연구를 간단히 살펴보면 다음과 같다.

Golob(1990)은 네덜란드의 Dutch Mobility Panel 자료 중 2개 연도의 자료를 이용하여, 두 시점 사이의 차량 소유와 차량의 통행시간, 대중교통의 통행시간, 비동력 교통수단의 통행시간의 관계를 Dynamic 구조방정식으로 규명하였으며, Wissen과 Golob(1992)는 Dutch Mobility Panel 자료 중 3개 연도의 자료로 차량의 이동성과 가솔린차량, 대체연료 차량의 관계를 연료유형선택, 차량의 연간 이용률, 통근거리 등의 4가지 변수를 사용하여 구조방정식을 통해 규명하였다. 또한, Golob과 Kitamura(1997)는 주변지역의 통근자의 Panel 조사를 통하여 San Diego I-15 차선 프로젝트를 교통수단선택, 통행시간, 개인의 성향의 변수로 평가하였으며, 개인특성변수를 사용하여 시간의 흐름에 의한 영향과 개인의 특성 변화에 의한 영향을 나누어 살펴보았다. 또한, SEM을 사용하지는 않았으나, Panel 자료를 이용한 논문들은 다수 발견할 수 있다(Goulias, 2002).

본 연구에서 사용한 미국 PSTP 자료를 이용한 기존의 연구는 다음과 같다. June Ma와 Goulias(1999)는 포아송 회귀모형을 이용하여 개인의 활동유형별 발생빈도수를 추정하기 위하여 PSTP의 4개 연도의 자료를 사용하였으며, 추정된 포아송 회귀모형을 5개 연도 자료에 적용시켜 모형의 정확성을 점검하였다. 구축된 모형의 정확성은 매우 정확한 것으로 나타났으며, 특히 생계활동 발생빈도 모형이 가장 정확한 것으로 나타났다. Chandrasekharan과 Goulias(1999)는 PSTP자료를 이용하여 단독(solo) 통행과 연쇄(joint) 통행을 발생시키는 사람들의 성향을 연구하였다. 연구결과 연쇄통행은 가구의 생애주기에 의해 영향을 받으며 연령이 높을수록 개인의 연쇄통행 수는 증가하는 것으로 나타났다. 또한 가구원수, 가구구성원의 연령, 가구내 차량수, 하루 중 활동과 통행패턴은 연쇄통행에 영향을 주는 것으로 나타났다. Yee와 Niemeier(2000)는 4개 연도의 PSTP자료를 사용하여 통행

발생, 개인과 가구 특성이 방문, 약속, 자유시간, 개인업무, 쇼핑 등의 5개의 비업무 활동 지속시간에 미치는 영향을 Cox proportional hazard model 으로 설명하였다. 활동지속시간은 4개 연도의 조사 기간동안 유의하게 변화하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 생계, 유지, 여가 활동에 미치는 영향을 시간변동 변수와 시간 불변동 변수로 나누어 설명하고 이를 구조방정식으로 모형화하여 변수들간의 복잡한 인과관계를 설명한다는 기존 연구들과의 큰 차이가 있다.

II. 자료

본 연구에서는 개인의 활동참여, 통행행동을 분석하기 위하여 미국의 도시가구 Panel 조사인 Puget Sound Transportation Panel 자료(Murakami and Watterson, 1990; Goulias and Jun, 1996; Chung and Goulias, 1995)를 이용하였다. 현재 우리나라에서 존재하는 panel 자료는 소규모 지역이나 집단을 대상으로 조사한 것이 대부분이며, 본 연구에서 적용하고자 하는 일기식 설문조사 자료를 통한 활동참여와 통행패턴을 연구할 수 있는 panel 자료는 전무하다. 또한, 1997년 이후 이루어진 대규모 일기식 통행 조사로는 서울시 교통센서스 및 데이터 베이스 구축(1997. 12. 서울특별시)과 경기도 교통종합기본계획(1998. 7. 경기도) 등에서 이루어 졌으나, 현재까지는 단일연도로만 구축되어 있어 본 연구에 적용하기에는 무리가 있고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 시간 변화에 따른 개인의 활동/통행 패턴을 분석하기 위하여 우선적으로 기존 존재하는 자료를 통하여, 분석방법의 타당성 및 통행 행태를 이해하기 위하여 외국의 자료를 분석에 사용하였다.

Panel 조사는 동일한 표본을 다른 시점에서 반복 조사하는 방법으로, PSTP는 1989년 미국 Seattle 지역의 Puget Sound 지역에서 처음 수행되었다. PSTP의 매년 조사에서는 가구특성, 개인의 사회경제 특성, 2일간의 통행일지에 담긴 통행행태가 조사되었으며, 1989년부터 현재까지 9개 연도에 걸쳐 수행되었다. (다른 시간시점에서 수행되는 한번의 반복된 조사를 'wave'라 일컫는다.)

통행행태조사에서는 개인이 2일간에 걸쳐 발생시킨 모든 통행을 기록하게 하였으며, 각각의 통행정보에는 통행목적, 수단, 출발/도착 시간, 통행시간, 출발/도착 지점, 통행거리 등의 자료가 포함된다. PSTP는 정기적인 대중교통사용자로 구성된 가구, 승용차 합승이용으로 업무통행을 하는 가구, 대중교통이용자나 승용차 합승이용자가 없는 가구 등의 3가지 가구로 구분되며, 각 개인 통행의 목적은 9개 유형 -통행을 발생하지 않았을 경우, 업무, 쇼핑, 통학, 방문, 자유시간, 개인업무, 약속, 귀가, 대학-으로 나뉘었으며, 최근 조사에서는 Telecommunication, ITS 정보활용 등과 같은 새로운 조사내용도 포함되었다. 본 연구에서는 모형 추정을 위하여 9개 유형의 통행목적을 3가지 즉, 생계활동, 유지활동, 레저활동으로 나누어 분석을 용이하게 하였다. 생계활동(Subsistence Activity)에는 업무, 대학, 통학 등의 통행목적 활동이 포함되며, 유지활동(Maintenance Activity)에는 쇼핑, 약속, 개인업무, 여가활동(Out-of Home Leisure Activity)에는 방문, 자유시간 등의 활동이 포함된다. 본 연구에서는 각 wave의 첫날의 활동참여와 통행행동의 자료를 SPSS program을 사용하여 정리하였으며, wave 3과 4에 동시에 참여하고 활동참여와 통행행동, 사회경제지표 항목에 결측 자료가 없는 1,621명의 관측치를 사용하여 분석하였다. 이들 중 Wave 3과 4를 이용한 이유는 현재 PSTP중 일반인이 직접 사용할 수 있는 wave는 제한되어 있으며, 이들 중 다른 관련 논문에서 가장 많이 사용하고 있는 wave를 선택하였다.

〈표 1〉에는 본 연구에서 사용된 1,621명에 관한 성별 및 나이 등의 사회경제지표들의 빈도분포를 나타내었다. 또한, 각 wave에서 각 활동에 참여한 사람들의 지속시간 분포를 보면, wave 4의 생계활동, 유지활동은 wave 3보다 감소하는 현상을 볼 수 있으며, 여가활동 지속시간은 6분 증가하는 것으로 나타났다(〈표 2〉). Wave 3과 4에서의 활동참여 분포는 〈표 3〉에 나타난 것과 같이 하루 동안에 약 88%의 사람들이 2개 이하의 통행사슬을 발생시키는 것을 알 수 있으며, 전체 1,621명 중 통행을 발생시키지 않는 사람의 수는 wave 3과 4에서 각각 8.6%, 9.4%로 나타났다.

〈표 1〉 사회·경제적 특성 변수의 빈도 분포

| 사회, 경제적 변수 | 빈도(%) |
|-----------------|--------------|
| 성별 | |
| 남 | 748(46.1) |
| 여 | 873(53.9) |
| 나이 | |
| 20세 미만 | 15(0.9) |
| 20~29세 | 63(3.9) |
| 30~39세 | 336(20.7) |
| 40~49세 | 426(26.3) |
| 50~59세 | 330(20.4) |
| 60~69세 | 270(16.7) |
| 70~79세 | 158(9.7) |
| 80세 이상 | 23(1.4) |
| 고용여부(wave 3) | |
| 고용 | 1,128(69.4) |
| 미고용 | 493(30.4) |
| 고용여부(wave 4) | |
| 고용 | 993(61.3) |
| 미고용 | 624(38.5) |
| 결측 | 4(0.2) |
| 차량 보유대수(wave 3) | |
| 0대 | 25(1.5) |
| 1대 | 253(15.6) |
| 2대 | 715(44.1) |
| 3대 이상 | 604(37.3) |
| 결측 | 24(1.5) |
| 차량보유대수(wave 4) | |
| 0대 | 31(1.9) |
| 1대 | 279(17.2) |
| 2대 | 768(47.4) |
| 3대 이상 | 543(33.5) |
| 총 | 1,621(100.0) |

〈표 2〉 통행사슬 수 분포

| 통행사슬 수 | wave 3 | wave 4 |
|--------|--------------|--------------|
| 0개 | 140(8.6) | 152(9.4) |
| 1개 | 820(50.6) | 796(49.1) |
| 2개 | 464(28.6) | 483(29.8) |
| 3개 | 142(8.8) | 129(8.0) |
| 4개 | 43(2.7) | 49(3.0) |
| 5개 이상 | 12(0.8) | 12(0.8) |
| 총 | 1,621(100.0) | 1,621(100.0) |

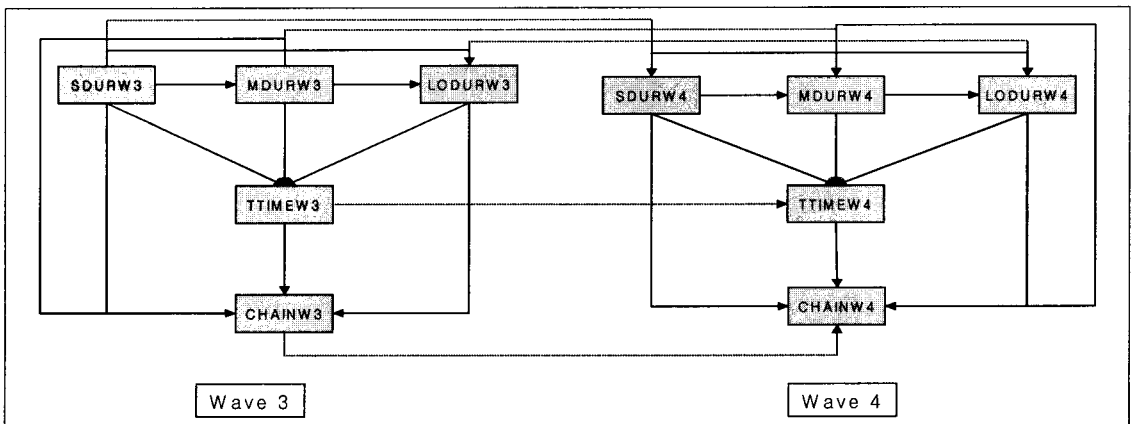
〈표 3〉 각 활동의 wave 별 지속시간 분포

| 구분 | 생계활동 지속시간 | 유지활동 지속시간 | 여가활동 지속시간 |
|------------|--------------|--------------|--------------|
| wave 3 (분) | 471.1 | 77.2 | 111.8 |
| 활동참여수(명) | 912 | 964 | 544 |
| wave 4 (분) | 466.2 | 71.3 | 117.8 |
| 활동참여수(명) | 919 | 933 | 545 |

의 구조이다. 이 모형은 개인의 사회경제지표를 모형의 외생변수로 설정하였으며, 활동참여(각 활동의 지속시간), 통행행동(통행시간, 통행사슬의 수)를 모형의 내생변수로 설정하였다. 사회경제지표는 직·간접적으로 개인의 활동참여와 통행행동에 영향을 미치며, 직·간접적 효과의 결합은 구조방정식모형에서 하나의 변수에서 다른 변수로의 총 효과이다. Golob(2000)의 연구에서는 활동참여는 통행을 발생시키고, 통행을 통행시간을 발생시킨다는 가정 하에 활동참여와 통행, 통행시간을 3단계의 인과구조로 설정하여 "Time Budget"을 고려한 모형을 설정하였으며, Pas(1999)는 가구 내 활동참여와 가구의 활동참여의 상호관계

III. 모형구조 및 변수설정

〈그림 1〉은 본 연구에서 개발하고 추정한 모형



〈그림 1〉 모형 구조

와 가구 내/외 활동참여가 통행행동에 미치는 영향을 모형화하였고, Goulias(1999)는 생계, 유지, 여가활동을 위계를 두어 모형을 설정하지 않고 각 활동의 서로의 인과관계 및 통행에 대한 모형을 구축하였다. 이에 반하여, 본 연구에서는 생계, 유지, 여가활동이 차례로 위계를 갖는다는 가정하에 생계활동은 유지, 여가활동에 영향을 미치며, 유지활동은 여가활동에 영향을 미치는 것으로 모형을 설정하였고, 이러한 각각의 활동은 통행을 발생시켜 통행시간을 허용하게 되고, 이러한 통행들이 모여 통행사수를 발생시키는 모형을 구축하였다.

본 연구에서 사용한 외생변수인 개인 및 가구의 사회경제지표는 크게 2가지 유형으로 나누어 볼 수 있다. 즉, 외생변수는 wave 3과 wave 4의 변화가 10% 이내에 있어 비교적 시간의 흐름에 영향을 받지 않고 안정적이며 정적인 외생변수(Time Invariant Variables)와 변화율이 10%를 초과하여 시간의 흐름에 민감한 반응을 나타내는 동적인 외생변수(Time

Variant Variables)로 나눌 수 있다. 본 연구에서 사용한 자료를 분석한 결과, 정적인 변수로는 가구내 1~5세 자녀수, 연령, 성별, 운전면허 보유여부 등의 4개 변수가 있으며, 동적인 변수에는 가구 소득, 가구원수, 가구내 차량보유대수 등의 3가지 변수가 있는 것으로 분석되었다.

IV. 분석모형

본 연구에서는 개인의 사회, 경제지표가 활동참여와 통행활동에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고 활동참여와 통행활동의 관계를 규명해내고자 한다. 본 연구에서는 Panel 자료를 사용하여 Dynamic SEM (Structural Equation Model)을 추정함으로써 이 관계를 규명해낼 수 있었다. 구조방정식은 Joreskog (1973)에 의해서 일반화되었고 이미 여러 분야에서 개발되었다. LISREL 8.0 프로그램(Joreskog and Sorbom, 1995)은 구조방정식 접근방법에서 가장 대중적으로 이용되고 있으며 본 연구에서도 LISREL 프로그램을 이용하여 모형을 추정하였다. 구조방정식 모형은 복수개의 연립방정식의 조합으로 이루어져 있으며, 각 변수간의 인과관계를 동시에 규명하는 모형이며, Dynamic 구조방정식은 하나 이상의 시점에서 조사자들에게 관측된 변수들의 선형관계를 동시에 규명하는 모형이다. 구조방정식은 다음과 같이 크게 세 가지로 나누어 볼 수 있다.

<표 4> 모형의 내생변수

| 변수명(10) | 설명 |
|---------|---------------------|
| SDURWX | wave X에서의 생계활동 지속시간 |
| MDURWX | wave X에서의 유지활동 지속시간 |
| LODURWX | wave X에서의 여가활동 지속시간 |
| TTIMEWX | wave X에서의 총 통행시간 |
| CHAINWX | wave X에서의 통행사수의 수 |

<표 5> 모형의 외생변수

| 구분 | 변수명 | 설명 |
|-----------------------------|---------|----------------|
| Time Variant Variables(3) | HHSIZE | 가구원수 |
| | NUMVEH | 가구내 차량대수 |
| | INCOME | 가구 전체 소득 |
| Time Invariant Variables(4) | AGE | 연령 |
| | SEX | 성별 |
| | TOT1_5 | 가구내 1~5세 어린이 수 |
| | LICENSE | 운전면허 소유여부 |

<표 6> 외생변수의 wave별 변화율

| 변수 | wave 3=wave 4 표본수 | 변화율(%) |
|--------|-------------------|--------|
| HHSIZE | 1,364 | 15.9 |
| NUMVEH | 966 | 40.4 |
| INCOME | 1,446 | 10.8 |
| TOT1_5 | 1,513 | 6.7 |
| LICENS | 1,578 | 2.7 |
| 전체 표본수 | 1,621 | |

- 1) 구조모형(A Structural Submodel)
- 2) 내생잠재변수의 측정모형(A Measurement Submodel for the Endogenous Variables)
- 3) 외생잠재변수의 측정모형(A Measurement Submodel for the Exogenous Variables)

이 중, 본 연구에서 구축하고자 하는 구조방정식은 구조모형이다. 이 모형은 교통행태 모형에서 주로 사용되는 모형으로 기존의 많은 연구에서 찾아볼 수 있다 (Golob et al., 1994; Golob, 1998; Golob and McNally, 1997; Lu and Pas, 1997). 잠재변수가 없는 구조방정식 모형을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$y = \beta y + \Gamma x + \zeta \tag{1}$$

여기서,

y : p 개의 내생변수 열벡터 ($p \times 1$)

x : q 개의 외생변수 열벡터 ($q \times 1$)

B : p 개의 내생변수 사이의 영향도 행렬 ($p \times p$)

Γ : 외생변수 q 가 내생변수 p 에 미치는 직접 영향도 행렬 ($p \times q$)

ξ : ξ 는 x 와 무관하다는 기본 가정을 가진 방정식에서의 오차 열벡터 ($p \times 1$)

또한, $\Psi = E(\xi\xi')$ 으로 오차 행렬 ($p \times p$)의 대칭 공분산 행렬로 정의되며, Φ 는 x 의 공분산 행렬이다. 본 연구에서는 내생변수 $p=10$, 외생변수 $q=10$ 를 갖는다. 본 연구에서 추정하는 모형은 3장에서 나타났듯이 3개의 활동지속시간과 통행시간, 통행사슬의 수 등의 10개의 내생변수와 시간변동변수와 시간불변동 변수인 10개의 외생변수를 가지고 있다. 각 활동지속시간 내생변수와 통행시간 내생변수는 연속형 변수이고, 통행사슬 수 내생변수는 자료의 특성상 순서를 가지고 있는 순서형 변수이다. 순서형 내생변수를 가진 구조 방정식은 편이되지 않는 결과(Unbiased Estimates)를 얻기 위해 특별한 추정방법이 요구된다.

〈표 7〉는 본 연구에서 구축하려고 하는 모형에서 추정하고자 하는 B 행렬을 나타낸 것이고, 〈표 8〉은 외생변수와 내생변수의 인과관계(Γ 행렬), 〈표 9〉는 오차행렬의 대칭공분산 행렬(Ψ)로 순서형 변수인 y^* 의 오차항의 공분산은 지정하지 않고 연속형 변수에는 오차항의 공분산을 지정한 것을 나타낸다.

〈표 7〉 내생변수사이의 인과관계 구조 (B 행렬의 자유모수는 β 로 표시)

| | | 원인변수 | | | | | | | | | |
|----------|-----------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | wave=3 | | | | | wae=4 | | | | |
| | | y1 | y2 | y3 | y4 | y5 | y6 | y7 | y8 | y9 | y10 |
| 결과 변수 | wa ve = 3 | y1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | y2 | β | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | y3 | β | β | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | y4 | β | β | β | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | y5 | β | β | β | β | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | wa ve = 4 | y6 | β | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | y7 | 0 | β | 0 | 0 | 0 | β | 0 | 0 | 0 |
| | | y8 | 0 | 0 | β | 0 | 0 | β | β | 0 | 0 |
| | | y9 | 0 | 0 | 0 | β | 0 | β | β | β | 0 |
| | | y10 | 0 | 0 | 0 | 0 | β | β | β | β | β |

〈표 8〉 외생변수와 내생변수와의 인과 구조 (Γ 행렬의 자유모수는 γ 로 표시)

| | | 원인변수 | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | x1 | x2 | x3 | x4 | x5 | x6 | x7 | x8 | x9 | x10 |
| | | 결과 변수 | wa ve = 3 | y1 | γ | γ | γ | 0 | 0 | 0 | γ |
| y2 | γ | | | γ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | γ | γ |
| y3 | γ | | | γ | 0 | 0 | 0 | 0 | γ | 0 | γ |
| y4 | γ | | | γ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | γ | γ |
| y5 | γ | | | γ | γ | 0 | 0 | 0 | 0 | γ | γ |
| wa ve = 4 | y6 | | 0 | 0 | 0 | γ | γ | γ | γ | γ | γ |
| | y7 | | 0 | 0 | 0 | γ | γ | 0 | 0 | γ | 0 |
| | y8 | | 0 | 0 | 0 | γ | γ | 0 | γ | 0 | γ |
| | y9 | | 0 | 0 | 0 | γ | γ | 0 | 0 | γ | γ |
| | y10 | | 0 | 0 | 0 | γ | γ | γ | γ | γ | γ |

〈표 9〉 오차행렬의 대칭공분산 행렬 (Ψ 행렬의 자유모수는 ϕ 로 표시)

| | | 원인변수 | | | | | | | | | |
|----------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | wave=3 | | | | | wae=4 | | | | |
| | | y1 | y2 | y3 | y4 | y5 | y6 | y7 | y8 | y9 | y10 |
| 결과 변수 | wa ve = 3 | y1 | ϕ | | | | | | | | |
| | | y2 | 0 | ϕ | | | | | | | |
| | | y3 | 0 | 0 | ϕ | | | | | | |
| | | y4 | 0 | 0 | 0 | ϕ | | | | | |
| | | y5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | | | |
| | wa ve = 4 | y6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ϕ | | | |
| | | y7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ϕ | | |
| | | y8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ϕ | |
| | | y9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ϕ |
| | | y10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

구조방정식은 양분된 변수(Binary Variable)와 순서형 내생변수(Ordered-nature Variable)를 일정한 방법으로 다루고 있다. 구조방정식은 이항프로빗모형과 순서형 프로빗모형을 사용하여 양분된 변수와 순서형 변수를 정규분포를 갖는 연속된 변수로 변환한다. 예를 들어서, c 개의 카테고리를 갖는 순서형 변수 y 에 대하여 평균이 0이며 분산이 1을 가지는 정규분포인 연속 잠재 변수 y^* 를 생성시킨다. 이 연속 잠재변수는 직접 측정되지는 않지만 다음과 같은 방법으로 생성된다.

$$y=1 \approx \alpha_0 < y^* \leq \alpha_1,$$

$$y=2 \approx \alpha_1 < y^* \leq \alpha_2,$$

$$y = c \approx a_{c-1} < y^* \leq a_c.$$

여기서, $a_0 = -\infty$,
 $a_1 < a_2 < \dots < a_{c-1}$,
 $a_c = \infty$

α 는 각 카테고리를 포함하는 모집단의 분포에 대응하는 누적 정규분포의 한계값(threshold value)이다. c 개의 카테고리를 갖는 순서형 변수는 $c-1$ 개의 한계값을 갖는다. 이 한계값은 Aitchison & Silvey (1957)과 Ashford(1959)에 의해 개발된 순서형 프로빗 모형을 사용하여 추정된다(Golob, 1997). 이 모형은 외생변수(x)에 대해서 관측 변수 y 가 카테고리 j 를 가질 확률은 다음과 같다.

$$P(y=1 | x) = P(a_{j-1} < y \leq a_j) \\ = \Phi(a_j - \omega'x) - \Phi(a_{j-1} - \omega'x)$$

여기서, Φ 는 표준 누적 정규 분포함수이며, ω 는 회귀 상수항의 잔차항의 벡터이다. 이 때, c 가 2개의 카테고리를 가지면, 이것은 이항 프로빗 모형이 된다.

$$P(y=1 | x) = 1 - \Phi(\alpha - \omega'x)$$

$\alpha_i (i=1 \text{ to } k-1)$ 한계값과, $\omega_j (j=1 \text{ to } p)$ 는 최우 추정법을 사용하여 추정된다(Maddala, 1983; Golob, 1997).

순서형 변수와 상응되는 연속 잠재변수 y^* 는 다변량 정규분포를 갖는다. 추정의 두 번째 단계는 순서형 변수와 관측된 연속형 변수들과의 공분산 혹은 상관성을 추정하는 것이다. 두 변수가 모두 연속형 변수일 경우, 두 변수의 상관성은 전통적인 Pearson product-moment correlation을 사용하여 추정하며, 두 변수가 모두 2개의 카테고리를 갖는 순서형 변수일 경우, Tetrachoric correlation으로 알려진 상관계수를 사용한다(Kirk, 1973). 두 변수 모두 3개 이상의 카테고리를 갖는 순서형 변수일 경우, Polychoric correlation을 사용하고(Olsson, 1979), 하나의 변수가 순서형 변수이고 다른 변수가 연속형 변수일 경우, Polyserial correlation을 사용(Olsson, et al., 1982)하여 상관성을 구한다(Golob, 1997).

마지막 단계는 구조방정식(1)의 모수를 추정하는 것이다. 식(1)에서 추정 모형의 기본개념은 관측변수의 모집단 공분산 행렬(Σ)는 알지 못하는 모수 $\theta(B, \Gamma, \Phi, \Psi)$ 에서 알지 못하는 모수로 설명할 수 있다는 것이다. 즉, 모집단의 공분산 행렬은 하나이상의 모수 모형의 함수식으로 쓰여질 수 있다는 것이다. ($\Sigma = \Sigma(\theta)$) 따라서, 모수 θ 는 알려지지 않은 모수 ($\Sigma(\theta)$)로 설명된 모집단의 공분산 행렬과 표본의 공분산 행렬(S)의 차이를 최소화하여 추정될 수 있다. 식(1)에서 추정되는 모든 모수의 유일한 값을 찾는 것은 불가능하기 때문에 모형은 유일해를 얻기 위한 충분한 정보를 가지고 있다는 제약조건을 둔다. 다시 말하면, 모형 추정의 가능성을 위해서는 $(I-B)$ 가 비특이 행렬(non-singular matrix)로 $(I-B)^{-1}$ 이 존재해야 하며, 여기서 I 는 크기 p 를 갖는 항등 행렬이다. 내생변수의 총 효과는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{xy} = (I-B)^{-1} - I \tag{2}$$

또한, 구조방정식의 외생변수가 내생변수에 미치는 총 효과는 다음과 같다.

$$T_{xy} = (I-B)^{-1}\Gamma \tag{3}$$

구조방정식에서 모수추정에 사용될 수 있는 방법은 최우추정법(Maximum Likelihood : ML), 비가중 최소제곱법(Unweighted Least Squares : ULS), 일반최소제곱법(General Least Squares : GLS), 대각가중최소제곱법(Diagonally Weighted Least Squares: DWLS), 일반가중최소제곱법(Generally Weighted Least Squares : WLS) 등이 있다. 이 모든 방법은 LISREL 프로그램에서 가능한 방법이다. 이 방법들은 모두 반복적 절차를 사용하여 모수 추정치를 개선해 감으로써 각각의 적합도함수를 최소화시켜 간다. 본 연구에서는 일반적으로 가장 많이 이용되는 추정방법인 최우추정법(Maximum Likelihood)을 사용하여 모형의 모수추정을 하였다. 최우추정법의 적합도함수는 확률밀도함수를 적용하여, 주어진 표본이 출현할 확률밀도가 가장 높아지도록 모수를 추정한다. 최우추정법의 추정량은 대부분 표본에서 일관적이고 점근효율적(Consistent Estimator)인 것으로 밝혀져 있다(Bollen, 1989). 최우추정법의 적

합도 함수는 다음과 같다.

$$F_{ML} = \log|\Sigma(\theta)| - \log|S| + tr[S\Sigma(\theta)] - (p+q) \quad (4)$$

모형의 전체 적합도는 $\Sigma = \Sigma(\theta)$ 라는 귀무가설을 가지고 표본의 공분산 행렬(S)가 모집단의 공분산 행렬과 어느 정도의 차이가 있는지를 검정하기 위해 χ^2 검정을 사용하여 평가하였다. 또한, 적합도지수(Goodness-of-Fit Index : GFI), 수정적합도지수(Adjusted Goodness-of-Fit Index : AGIF), 평균잔차제곱근(Root Mean Square Residual : RMR)을 사용하여 모형의 적합성을 평가하였다(Joreskog and Sorbom, 1995).

V. 모형결과

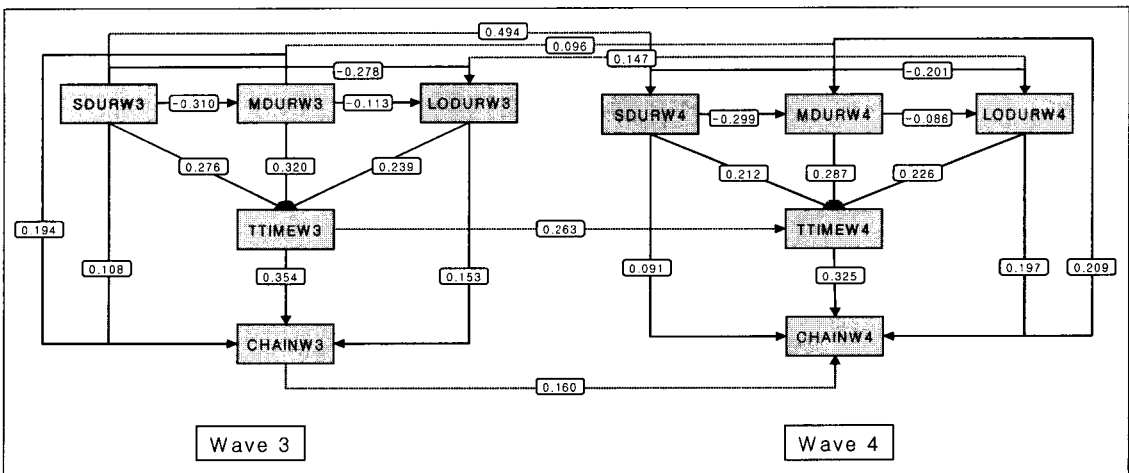
본 연구에서는 구조방정식을 통하여 내생변수사이의 25개 인과관계(B), 내생변수와 외생변수사이의 56개의 인과관계(T), 8개의 오차항(Ψ) 등의 총 89개의 영향도를 추정하였다.

내생변수들의 영향을 분석한 결과는 <그림 2>와 같으며, Golob과 McNally(1997)의 연구에서 모형화되었던 것처럼 변수들 사이의 관계에서 생계활동 지속시간이 증가할수록 유지활동과 여가활동 지속시간에 감소하며, 또한 유지활동 지속시간이 증가할수록 여가활동 지속시간에 감소하는 것으로 나타났고, 이는 모두 유의수준 1%이내에서 모두 유의한 것으로

나타났다. 이것은 wave 3과 wave 4에서 동일한 것으로 나타나, 개인은 하루의 Time Budget 중 생계활동, 유지활동, 여가활동의 순으로 시간을 사용하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 생계활동, 유지활동, 여가활동을 하기 위해서는 통행이 파생수요로 나타나며, 따라서 각 활동 지속시간이 증가할수록 통행시간도 증가하는 것으로 나타났다. 각 활동의 지속시간과 통행시간이 증가할수록 개인의 통행사슬의 수가 증가하는 것으로 나타났다.

또한, wave 3에서 wave 4에 영향을 미치는 5개의 인과관계를 살펴보면 wave 3의 각 활동 지속시간이 증가할수록 wave 4의 활동 지속시간은 증가하며, 또한, wave 3의 통행시간과 통행사슬의 수가 증가할수록 wave 4의 통행시간이 증가한다. 전체적인 측면에서 wave별 영향을 발견할 수 있었으며, 인간의 활동패턴은 전 연도의 패턴에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 이를 통해, 교통 행태분석에서 Panel 분석의 필요성을 증대시킨다고 보아야 할 것이다.

본 연구에서 설정한 외생변수에서 내생변수로 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다. 첫째, wave 3과 4 모두에서 가구원수가 증가하면 생계, 유지, 여가활동의 지속시간은 모두 증가하며, 통행사슬의 수 또한 증가한다. 둘째, 가구내 차량대수가 증가할수록 각 활동의 지속시간과 통행사슬의 수는 감소하고 가구원수의 패턴과 반대의 패턴을 보였으며, wave 3과 4에서 가구내 차량대수가 증가할수록 통행시간은 증가하는 경향을 보였으나 이에 대한 t-value가 유의수준



<그림 2> 내생변수간의 영향

10%에서 유의성이 없는 것으로 판단되었다. 셋째, 가구소득이 증가할수록 생계활동 지속시간은 증가하며 통행사슬의 수는 감소하는 것으로 나타났다. 위의 결과는 wave 3과 4에서 모두 같은 경향을 보였으며, 이는 유의수준 5% 이내에서 유의한 것으로 나타났다. 넷째, 연령이 높은 사람일수록, 남자일수록, 가구 내 1~5세 아동수가 적을수록, 운전면허를 보유한 사람일수록 생계활동 지속시간이 증가하며, 여자일수록 유지활동 지속시간이 증가하고, 통행사슬의 수가 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 경험적으로 추정한 모형의 적합성을 나타내는 통계지표 χ^2 의 값은 자유도 111에서 673.405의 값으로 매우 높게 나타났다. 자유도 100에서 통계지표 χ^2 의 값이 99%의 확률로 유의하려면 135.81

의 값보다 작은 값을 가져야 하므로, 표본의 공분산 행렬과 모집단의 공분산 행렬의 차이가 0이라는 귀무가설 ($\Sigma = \Sigma(\theta)$)을 기각하여 모형의 통계적 유의성이 없는 것으로 판단된다. 그러나 자료의 크기가 클수록 χ^2 의 값은 높게 나타나고, Panel 자료의 특성을 가지기 때문에 나타나는 것으로 판단되어 모형의 적합성이 없다는 기준을 택하기에는 무리가 있다 또한, 추정된 모형이 표본의 공분산 행렬을 설명하는 비율을 나타내는 적합도 지수(GFI: Goodness-of-fit Index)와 AGFI를 자유도에 의해 조정한 수정 적합도 지수(Adjusted GFI: AGFI)의 범위는 0과 1의 값 사이의 범위를 갖는데 이 값은 1에 가까울수록 적합도가 양호한 것으로 판단한다. 본 연구에서 추정한 모형의 GFI는 0.97이며, AGFI는 0.94로 모형의 적합성은

<표 10> 내생변수 사이의 직접, 간접, 총 영향

| | | | 원인변수 | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------|----------------------|----------------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|------|--------|--|--|
| | | | wave=3 | | | | | wave=4 | | | | | | |
| | | | 생계활동 지속시간 | 유지활동지속 시간 | 여가활동지속 시간 | 통행시간 | 통행사슬 수 | 생계활동 지속시간 | 유지활동지속 시간 | 여가활동지속 시간 | 통행시간 | 통행사슬 수 | | |
| 결과 변수 | wave = 3 | 생계활동 지속시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | | | | | | | | | | | |
| | | 유지활동 지속시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | -0.301(***) | | | | | | | | | | |
| | | 여가활동 지속시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | -0.278(***) | -0.113(***) | | | | | | | | | |
| | | 통행시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | 0.276(***) | 0.320(***) | 0.239(***) | | | | | | | | |
| | | 통행사슬 수 | 직접효과 간접효과 총 효과 | -0.157(***) | -0.027(***) | 0.119(***) | 0.293(***) | 0.239(***) | | | | | | |
| | wave = 4 | 생계활동 지속시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | 0.108(***) | 0.194(***) | 0.153(***) | 0.354(***) | | | | | | | |
| | | 유지활동 지속시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | -0.055(***) | 0.086(***) | 0.085(***) | 0.354(***) | | | | | | | |
| | | 여가활동 지속시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | 0.053(*) | 0.280(***) | 0.238(***) | 0.354(***) | | | | | | | |
| | | 통행시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | 0.494(***) | | | | | | | | | | |
| | | 통행사슬 수 | 직접효과 간접효과 총 효과 | 0.494(***) | | | | | | | | | | |
| wave = 4 | 생계활동 지속시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | 0.096(***) | | | | | | | | | | | |
| | 유지활동 지속시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | -0.177(***) | 0.096(***) | | | | | | | | | | |
| | 여가활동 지속시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | -0.177(***) | 0.096(***) | | | | | | | | | | |
| | 통행시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | -0.120(***) | -0.025(***) | 0.147(***) | | | | | | | | | |
| | 통행사슬 수 | 직접효과 간접효과 총 효과 | -0.120(***) | -0.026(***) | 0.147(***) | | | | | | | | | |
| wave = 4 | 생계활동 지속시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | 0.212(***) | 0.287(***) | 0.226(***) | | | | | | | | | |
| | 유지활동 지속시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | -0.125(***) | -0.020(***) | 0.226(***) | | | | | | | | | |
| | 여가활동 지속시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | 0.087(***) | 0.268(***) | 0.226(***) | | | | | | | | | |
| | 통행시간 | 직접효과 간접효과 총 효과 | 0.160(***) | 0.091(***) | 0.209(***) | 0.197(***) | 0.325(***) | | | | | | | |
| | 통행사슬 수 | 직접효과 간접효과 총 효과 | -0.069(***) | 0.070(***) | 0.074(***) | 0.325(***) | 0.325(***) | | | | | | | |

*** :p<0.01, ** : p<0.05, * : p<0.1, - : 유의성 없음.

수가 증가하는 것으로 나타나, 개인의 활동/통행 패턴은 과거연도의 영향을 받는 것으로 나타났다.

넷째, 개인의 활동/통행 패턴은 가구내 차량대수, 가구 소득, 가구원수 등의 시간 변동변수에 영향을 받으며, 연령, 성별, 가구내 1~5세 아동수, 운전면허 보유대수 등의 시간 불변동 변수에 영향을 받는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 개인의 활동참여와 통행행동의 영향에 대해서만 모형화하였으나 향후 연구에서는 가구내 가구 구성원들간의 역할분담과 구성원들 상호간의 반응에 대한 영향에 대해서 고려하여야 할 것이며, Panel 자료를 이용하여 시간의 흐름에 의한 영향과 개인의 성향 변화에 의한 영향을 구분하는 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다. 또한, 국내의 Panel 자료의 구축이 절실히 요구되며 이를 통한 모형적용 및 이해도 필수적이라 할 수 있다.

참고문헌

1. Balasibramanian Chandrasekharan, Goulias, K. G.(1999), Exploratory Longitudinal Analysis of Solo and Joint Trip Making Using the Puget Sound Transportation Panel, Transportation Research Record 1676, pp.77~85.
2. Bollen, K. A.(1989), Structural Equations with Latent Variable. Wiley, New York.
3. Chung, J. H., Goulias, K. G.(1995), Sample Selection Bias with Multiple Selection Rules: Application with Residential Relocation, Attrition, and Activity Participation in Puget Sound Transportation Panel, Transportation Research Record 1493, pp.128~135.
4. Goulias, K. G., Ma, J.(1996), Analysis of Longitudinal Data from the Puget Sound Transportation Panel Task. B: Integration of PSTP databases and PSTP Codebook. Final Report. #9619. The Pennsylvania.
5. Goulias, K. G.(2002), Multilevel analysis of daily time use and time allocation to activity types accounting for complex covariance structures using correlated random effects, Transportation 29, pp.31~48.
6. Jorekog, K. G., Sorbom(1995), LISREL 8, Scientific Software International, Inc. Chicago.
7. Jorekog, K. G.(1973), Analysis of Covariance Structures, In Krishnaiah, P. R.(Ed.), Multivariate Analysis-III, Academic Press, New York, pp.263~285.
8. June Ma, Goulias, K. G.(1999), Application of Poisson Regression Models to Activity Frequency Analysis and Prediction, Transportation Research Record 1676, pp.86~94.
9. Julie L. Yee, Debbie A. Niemeier(2000), Analysis of Activity Duration Using The Puget Sound Transportation Panel, Transportation Research Part A. Vol.34, pp.607~624.
10. Leo van Wissen, Thomas F. Golob(1992), A Dynamic model of Car Fuel-Type Choice and Mobility, Transportation Research Part B, Vol.26, No.1, pp.77~96.
11. Lu, X., and E. I. Pas(1997), An Examination of Activity Time Allocation on Two Consecutive Days, Presented at the Eighth Meeting of the International Association for Travel Behavior Research: Challenges and Opportunities in Travel Behavior Research and Application. August, Austin, TX USA.
12. Murakami, E., Ulberg, C.(1990), Developing a Household Travel Panel Survey for the Puget Sound Region. Transportation Research Record 1285, pp.40~46.
13. Thomas F. Golob(1990), The Dynamics of Household Travel Time Expenditures and Car Ownership Decisions, Transportation Research Part A, Vol.24, No.6, pp.443~463.
14. Thomas F. Golob, Ryuichi Kitamura, Lula, C.(1994), Modeling the Effects of Commuting Time on Activity Duration and Non-work Travel, Presented at Annual Meeting of Transportation Board, Washington D. C.
15. Thomas F. Golob, M. G. McNally(1997), A Model of Activity Participation and Travel

- Interactions Between Household Heads, Transportation Research Part B, Vol.31, No.3, pp.177~194.
16. Thomas F. Golob, Ryuichi Kitamura(1997), A Panel-Based Evaluation of the San Diego I-15 Carpool Lanes Project, Kluwer Academic Publishers.
17. Thomas F. Golob(1998), A Model of Household Demand for Activity Participation and Mobility, In Garling, T., Lairila, T., Westin, K. (Eds), Theoretical Foundations of Travel Choice Modeling, Pergamon, Oxford.
18. Pas, E. I.(1996), Recent Advances in Activity-Based Travel Demand Modeling, Travel Model Improvement Program, TMIP Activity-Based Travel Forecasting Conference, Summary, Recommendation and Compendium or Papers.

✉ 주 작 성 자 : 최연숙

✉ 논문투고일 : 2002. 9. 17

논문심사일 : 2002. 11. 12 (1차)

2002. 11. 25 (2차)

심사판정일 : 2002. 11. 25

✉ 반론접수기간 : 2003. 4. 30