

도시교통과 환경간의 동태적 관계와 정책실험논리

feedback approach for the dynamic interactions between urban transportation and air pollution

최남희

(청주과학대 행정전산과 교수/drnhchoi@cjnc.ac.kr)

김선경

(서울시립대 도시행정학과/skckim@dreamwiz.com)

Abstract

To solve the policy problem between transportation and environment in trade-offs, above all, it is necessary to understand the complicated relationship between transportation and environment clearly before selecting policy alternatives. From this point of view, this study will propose the logic structure to examine the complex interaction of transportation and environment and investigate theoretically what kinds of impact would appear by the air related policies.

In this research, we used 'system-dynamics' which investigates the complexity through the flow of information and materials and the interaction of elements, which constitutes systems. System Dynamics is an approach that the variables to decide structural relationship in a system affect one another not in only-way but in inter-way and the power of influence changes time by time.

This research is trying to examine the complex interaction of transportation and air pollution. For achieving this purpose, causal maps in System Dynamics approach were used. The main issues are as follows; first, to investigate the dynamic relationship between transportation and air pollution caused by exhaust emission gas. Second, to structuralize the logic of simulation to experiment the impacts of policies to relieve air pollution.

Keyword: urban transportation, air pollution, feedback structure, fuel & vehicle

I. 서론

오늘날의 도시정부는 지역주민의 삶의 질을 높이기 위하여 환경의 질적 수준을 높임과 동시에 지역의 교통과 같은 생활 및 경제활동 여건을 활성화 시켜야 한다는 두 가지의 목표를 균형적으로 달성해야 하는 입장에 처해 있다. 그러나 도시지역에서의 교통과 같은 생활 및 경제활동 여건과 환경수준을 제고하는 것 사이에는 특정 측면을 제외하고 일반적으로 상충관계(trade off)가 존재하기 때문에 두 가지 목표를 동시에 달성할 수 있는 정책적 대응은 용이한 일이 아니다¹⁾.

도시 지역에서 대기환경에 대한 인식이 높아지기 전에는 지방정부의 보편적인 정책방향이 도로와 같은 교통시설의 투자를 통한 지역경제 및 생활여건을 활성화하는 것에 초점을 두었다고 할 수 있다. 이러한 사실은 서울시의 경우 해마다 1년 예산의 30% 수준을 도로 교통시설 확충 및 개선에 투자해 오고 있다는 것에서 잘 알 수 있다²⁾.

그러나 최근 서울시의 경우 오존주의보 발령이 1995년 5회에 불과하던 것이 2000년에 들어서만 40회를 넘어 시민들의 생명에 직접적으로 위협을 미치는 상황이 더욱 빈번하게 일어남으로써 시정부와 시민들로 하여금 대기환경의 질이 원활한 교통소통과 같은 도시의 생활, 경제 여건 조성 못지 않게 삶의 질을 좌우하는 중요한 기준이라는 인식을 갖게 하는 계기를 제공하였다. 이러한 일련의 여건 변화는 도시기반 시설 확충과 대기환경의 질적 제고를 동등한 수준에서 추구하여야 하는 어려운 정책적 대응과제를 제기하였다고 할 수 있다.

따라서 상호 상충적 관계에 놓여 있는 교통과 대기환경간의 정책적 대응과제를 조화시키기 위해서는 이에 앞서 우선적으로 교통과 대기환경간의 복잡한 상호작용 관계를 명확하게 이해하여 이를 고려한 정책대안의 모색에서부터 출발하여야 한다고 할 수 있다.

이에 본 논문은 먼저 도시시스템 내에서 교통과 대기환경간에 발생하는 복잡한 상호작용을 규명하기 위한 논리적 구조를 제시하고 이를 토대로 최근에 논의되고 있는 대기환경 정책들이 교통과 대기환경수준에 어떠한 효과를 가져올 것인가를 정책인과지도를 통해 이론적으로 규명해 보고자 하였다.

이러한 연구목표를 달성하기 위하여 본 연구에서는 복잡한 시스템 내에서 일어나는 문제를 시스템을 구성하는 하위 구성요소들 간의 상호작용 관계와 정보 및 물질의 흐름을 피

1) 이러한 정책적 대응의 곤란성은 교통과 대기환경과의 불가분한 관계에서 설명될 수 있는데 예를 들어 교통시설의 투자는 교통량의 증가를 가져와 이로 인한 배기가스 배출을 증대시켜 대기 환경오염 수준을 상승시키고 대기환경을 보호하기 위한 교통부문에 대한 규제와 교통시설투자 억제는 도시생활과 경제활동 여건을 위축시키는 상충적 상호작용성을 갖는다는 것이다.

2) 1997년 서울시는 일반회계 및 특별회계를 포함하여 총 예산의 30.77%인 5조2천억 원을 교통시설에 투자하고 있다.

드백 구조를 통해 규명하고자 하는 시스템 다이내믹스 접근방법³⁾을 이용하였다.

본 연구는 이러한 시스템사고를 바탕으로 교통-대기오염 간에서 발생하는 복잡한 상호작용을 규명하고 이러한 관계 속에서 도시 대기 환경의 오염문제를 해결하기 위한 정책실험의 논리를 구조화 하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 주로 시스템 다이내믹스 접근 방법에서 인과지도(causal map)에 의한 분석 방법을 활용하였으며, 연구의 주요 내용은 첫째, 교통과 대기오염간의 관계를 연구한 기존 연구의 한계를 살펴본 후 시스템 사고를 바탕으로 교통과 자동차 배기가스에 의한 대기오염간의 동태적 관계를 규명하는 것, 둘째 교통과 대기오염과의 동태적 관계 속에서 대기오염 문제를 완화하기 위한 정책들의 효과를 실험하기 위한 모의실험 논리를 구조화하는 것으로 요약할 수 있다.

II. 교통과 대기오염과의 관계에 관한 시스템 사고적 접근

1. 교통-대기오염과의 관계에 대한 전통적 접근과 한계

지금까지 교통과 대기오염의 관계를 이해하여 문제를 분석하고 이를 해결하기 위한 많은 연구가 있어왔다.

먼저 기존의 연구에서는(이성원 1996; 이상훈 1998) 도시에서 사람들의 활동이 증가함에 따라 교통 발생량이 지속적으로 증가하고 이로 인한 대기오염 발생으로 환경이 악화되어 도시민의 삶의 질을 저하시킨다고 봄으로써 교통과 대기오염간의 관계가 교통으로 인해 대기오염이 증가된다는 직선적인 인과관계를 가정하고 있다.

한편 교통-대기오염간의 관계를 분석하기 위해 주로 이루어진 연구방법으로는(이성원 외 1992; 전의찬 외 1994; 이성원 외 1995; 이성원 1996; 한상진 1996; 이상훈 1998; 장현봉 1998 등) 과거부터 현재까지 연구대상지역의 교통과 대기오염여건을 따로 구분하여 개별적으로 조사한 후 수치상의 분석을 시도하였다. 이들 연구를 보면 교통량과 대기오염이 수치상 지속적으로 증가한다는 것과 대기오염원에서 많은 부분을 교통이 차지하고 있다는 문제점을 도출하고 이에 대한 해결방안으로 교통부문의 문제해결을 시도하고 있다.

따라서 이들 연구에서는 위에서 도출된 문제점을 해결하기 위한 방안을 주로 교통부문의 문제점을 해결하는 방안에만 초점을 두어 교통수단의 대기오염저감에 대한 기술적인 방

3) 시스템 다이내믹스 접근방법은 시스템 사고를 통해 시스템 내에서의 구조적 관계를 결정하는 변수들의 영향 관계가 일방향적이 아니라 양방향적 피드백 구조를 갖으며, 영향력의 크기가 고정되어 있지 않고 시간에 따라 동태적으로 변한다는데 초점을 두고 접근하는 방법이다(김도훈·문태훈·김동환, 1998).

안들을 제시하고 있다.

그러나 위에서 제시하고 있는 기존의 연구들을 살펴보면 대략 다음의 3가지 한계점을 나타내고 있음을 알 수 있다.

첫째, 교통과 대기오염간의 관계를 단일방향으로 가정하고 있다는 점이다. 즉 교통이 대기오염에만 영향을 미친다고 가정하는데 이러한 시각은 정체적인 것이다. 현실적으로 볼 때 교통과 대기오염은 단일방향으로만 흐르는 것이 아니고 쌍방향으로 흐르면서 피드백(feedback)되는 동태성을 띄고 있다.

둘째, 교통과 대기오염간의 문제점 분석이 파라미터적 접근방법이다. 즉 수치상으로 제시되는 문제점들을 나열하여 과거와 현재 또는 교통과 대기오염간을 수치상으로 비교함으로써 문제점을 도출하고 있다. 그러나 부문별 시스템들은 지속적으로 변화하고 있고 정확한 숫자로 표현할 수 없는 많은 사회현상들이 존재하며 비선형적인 관계로 나타나는 여러 가지 상황이 있기 때문에 이러한 분석방법으로는 이러한 여러 가지 상황을 포괄적으로 파악하기가 어렵다.

셋째, 이들 연구들이 제시한 정책수단의 단일성 문제이다. 기존 연구는 교통과 대기오염과의 관계를 단일방향으로 가정하고 있기 때문에 해결방안을 교통부문에만 초점을 맞추고 있다. 따라서 동태적상황에 따른 문제대안방안이 제시되고 있지 못하다.

2. 시스템 사고에 의한 교통과 대기오염간 관계에 대한 이론적 검토

1) 시스템사고(system thinking)의 의미

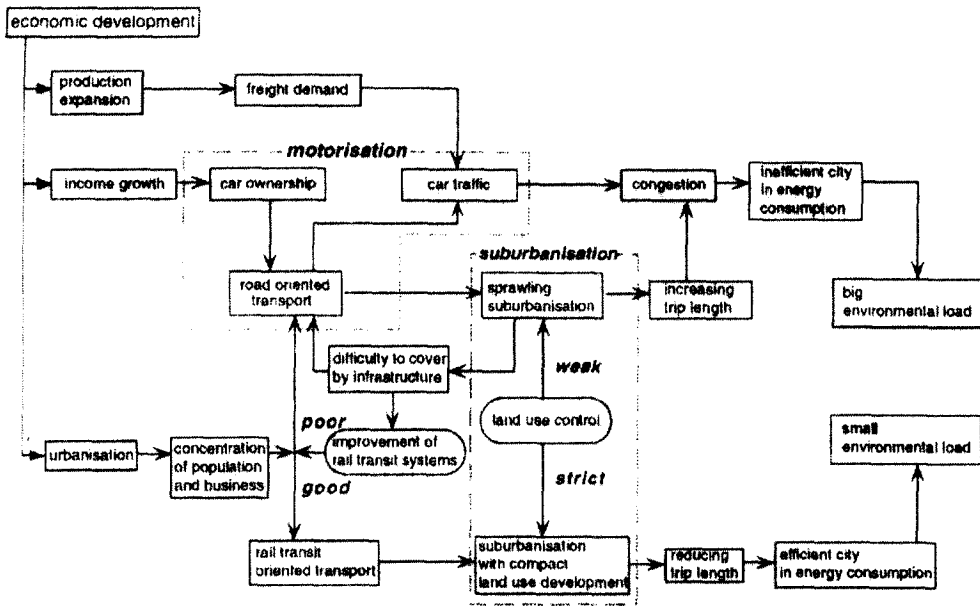
시스템 사고는 단선적 사고로 대표되는 기존의 사고를 대체하는 사고의 틀로 제안되고 있다. 복잡한 인간 시스템의 기본적인 특징은 원인과 결과가 시공적으로 직접 결합되어 있지 않은 경우와 다수의 요인들이 상호작용관계로 얽혀 있는 경우가 많으며, 특정 시점에서의 변화 방향과 장기적인 시스템의 변화 행태가 근본적인 차이점을 가질 수 있다는 것이다. 이러한 특징을 갖는 시스템을 독립변수가 종속변수에 일방향적으로 영향을 준다는 정태적 사고, 과정을 사건의 연속으로 보고 특정 기간동안의 문제를 단기적으로 관찰하려는 사고, 시스템의 전체가 아닌 일 부분만을 중심으로 다루려는 편협한 부분적 사고는 문제의 정확한 이해는 물론이고 정책적 처방의 오류를 초래할 수 있다(김도훈·문태훈·김동환, 1998).

시스템 사고에서는 이러한 단선적 사고의 한계를 극복하기 위하여 문제의 요인들이 내재적으로 순환적인 인과관계의 고리들로 연결되어 있다는 점, 문제를 유발하는 요인들의 상대적 중요성이 시간의 흐름에 따라 변할 수 있으며 따라서 장기적·전체적 변화패턴에

주목해야 한다는 점, 분석적 사고와 통합적 사고의 조화 필요성이 크다는 점을 강조한다 (Senge, 1993).

2) 도시 시스템 속에서의 교통과 대기오염간의 관계에 관한 시스템 사고적 접근

도시의 교통은 교통 그 자체가 목적이라기 보다는 경제성장에 따른 파생수요(derived demand)를 해소하기 위한 수단이라고 볼 수 있다. 오늘날 도시의 교통수요는 경제성장으로 인해 급격히 증대되고 있으며 교통량의 증가는 환경에 직·간접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 교통문제에 대한 논의는 단순히 교통부문에 대한 고려뿐만 아니라 경제와 환경부문과 연계하여 논의되어 왔다. 이들 경제부문·교통·환경과의 연계는 간략하게 다음의 3가지 측면으로 구분하여 살펴볼 수 있다(그림 1)⁴).



〈그림 1〉 교통·경제·환경과의 상호작용

4) 도시는 하나의 거대한 시스템이다. 즉 도시는 성장(growth), 전이(transition), 쇠퇴(decay)의 주기성을 가지면서 동태적으로 변화하고 있으며 도시성장은 경제적, 사회·문화적, 환경적 요인 등 다양한 요인들이 피드백구조를 통해 복잡하게 상호작용하여 이루어진다(김도훈·문태훈·김동환, 1998).

첫째 경제성장은 생산부문의 성장을 가져와서 운송수요를 파생시켜 교통량을 증대시킨다. 이에 교통혼잡이 발생하고 비효율적인 에너지 소비로 환경의 질을 저하시킨다.

둘째 경제성장으로 인해 도시민의 소득이 증가되는데 도시민의 소득증가는 다시 두 방향으로 구분된다. 먼저 도시민의 소득증가는 자동차 소유량을 증대시켜 많은 교통량을 야기시킨다. 다음으로 소득증가는 차량이용자들로 하여금 대중교통보다 도로 지향적인 운송수단을 선택하게 하고 이는 평면적으로 확산된 도시화(urban sprawling)를 야기시켜 차량이용자의 이동거리를 증대시킨다. 이들의 결과 교통혼잡이 증대되고 비효율적인 에너지소비를 가져와 환경의 질을 저하시킨다.

셋째 경제성장은 도시화를 촉진시킨다. 그 결과 인구와 산업의 집중이 이루어지고 교통량을 증대시켜 교통혼잡을 야기하고 이는 비효율적인 에너지소비로 환경의 질을 저하시킨다.

이와 같이 <그림 1>에서는 경제성장과 교통, 환경과의 관계를 간략하게 설명하고 있다. 다음에서는 경제성장과 교통과의 관계 그리고 교통과 환경(특히 대기오염)과의 관계를 구분하여 설명한다.

(1) 경제성장과 교통

교통수요는 파생수요(derived demand)로서 경제성장으로 인한 도시화와 광역적 도시개발(또는 교외화) 즉 도시의 성장과 개발의 결과로 나타나는 것이다.

오늘날 각 나라들(특히 개발도상국)은 광역도시권에서 교통의 중요성을 경험하고 있으며, 교통은 도시화가 됨에 따라 육상교통수단에 더 많은 의존성의 증가로 인한 많은 문제점을 경험하고 있다. 이들은 교통의 의존성을 해소하는 방안으로 교통부문에 대한 투자 위주의 정책을 시행해 왔으나 도시교통시설의 확충은 급증하는 인구에 의한 도시권역의 평면적 확산(urban sprawling)을 따라 잡지 못하였다. 동시에 교외화 특히 스프롤화 된 교외화는 공공 대중운송수단이 완전히 정비될 수 없기 때문에 결국 교외에서의 이용이 전적으로 자가용에 의존하게 되어 자가용화(motorization)를 더욱 확산시키는데 즉 이와 같은 교외화와(스프롤화) 자가용화 간에 상존하는 자기강화적 피드백⁵⁾은 상호간 혹은(반대 역방향의) 상승작용

5) 양의 피드백루프(positive feedback loop)는 종종 '자기 강화 피드백(self-reinforcing feedback)'이라고 불리며 이러한 양의 피드백루프는 원의 중심부에 + 기호로 표시한다. 양의 순환관계를 가지는 예는 국가간 군비경쟁을 들 수 있다. A, B 두 국가간의 군비경쟁이 확대되어 나가는 것은 A국가가 보유하고 있는 무기에 의해 B국가가 위협을 느끼게 되어 B국가가 군비를 확장하여 무기체제나 무기의 양을 확대시키면 B국의 행동이 A국에게 위협으로 느껴지게 되고, A국은 다시 군비를 확장하게 되는 결과를 가져오게 된다. 이러한 A국의 군비확장은 또 다른 B국의 위협을 가져오게 되고 양국가 간에는 군비경쟁의 악순환이 되풀이되어 진행된다(김도훈 외, 1998).

을 가져와서 교통에너지소비의 지속적 증대를 가져온다. 오늘날 교통의 많은 부분이 도시 간 교통(Inter-Urban Transport)이 차지하고 있어 도시교통문제는 단지 도심내부의 문제만이 아니며 도시간의 교통부분이 동시에 고려되고 있다.

(2) 동태적 도시시스템 속에서의 교통과 대기오염

교통은 매단계, 즉 차량, 주차장, 도로 등의 생산단계부터 차량의 운행단계 그리고 페타 이어, 중고차량의 폐기 등의 처분단계까지 이들 각 단계에서 에너지를 사용하는 주소비 분야이며 세계의 도시에서 대기오염을 일으키는 주 오염원이다.

오늘날 개도국, 선진국 모두 산업화와 도시화의 영향으로 인구의 집중과 함께 자동차(육상)교통수단이 급증하고 있으며 자동차의 배출가스로 인한 심각한 대기오염을 경험하고 있다. 즉 도시화와 자동차화의 증대는 도시의 대기오염의 질적 저하를 가져왔다⁶⁾. 이러한 자동차와 대기오염간의 관계를 보다 세부적으로 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 자동차로 인한 대기오염원의 종류와 비중을 살펴보면 자동차로 인해 방출되는 각종 도시오염물질은 다양하지만 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx), 탄화수소(HC), 이산화탄소(CO₂) 등의 주된 배출원이 자동차 배기가스로서 서울시의 경우 전체 대기오염물질 배출의 약82%이상이 자동차에서 나왔다.

둘째, 자동차량의 종류별로 방출되는 배기가스의 종류와 양에 차이가 있다. 즉 휘발류사용 차량보다 경유사용 차량이 오염물 배출량이 훨씬 많으며 특히 대형버스와 트럭은 배출계수를 기준으로 할 때 대당 5배(일산화탄소, 탄화수소)에서 20~30배(질소산화물, 분진류)의 오염물질을 배출하는 것으로 나타났다.

셋째, 교통속도별 대기오염발생량이 차이가 있다. 교통속도가 낮을수록 즉 교통혼잡으로 인한 차량운행속도의 감소는 더욱 불필요한 에너지소비를 야기하는데 예로 휘발류차의 에너지효율성은 10km/h와 20km/h속도 간에 1.5배의 차이가 발생하며 시간당 40-70km/h의 적절한 속도는 다른 속도보다 더욱 에너지효율적인 것으로 나타났다.

지금까지 위에서 살펴본 바에 의하면 도시시스템의 하위시스템인 교통과 대기오염은 이들간 복잡한 역동성을 내포하고 있는데 이를 바탕으로 이들 시스템간의 상호연관된 피드백루프의 순환적 인과관계를 간략하게 설명하면 다음과 같다.

먼저 도시인구의 증가로 교통수단별 교통량이 증가하게 된다. 교통량의 증가는 교통혼잡

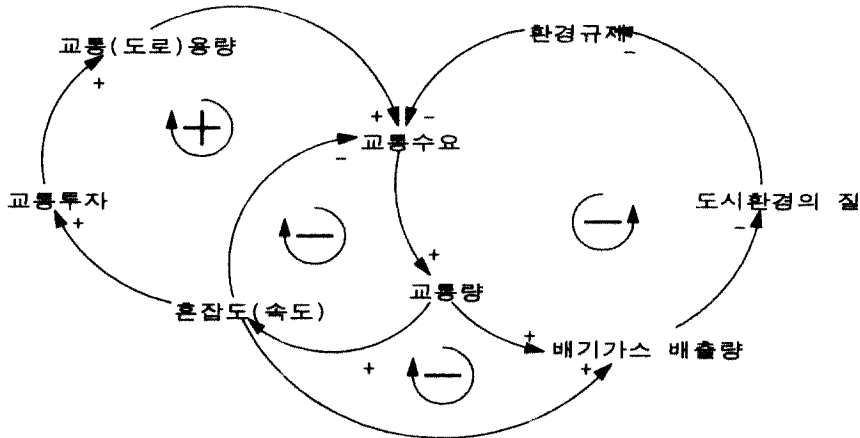
6) OECD국가 중 특히 개도국에서 차량판매량이 급증하고 있는데 자가용에 의해 소비되는 오일 1갤런에 대해 약 19파운드의 CO₂가 대기로 직접적으로 방출되고 있으며 인간활동으로부터 방출되는 산화질소는 주로 교통부분이 차지하고 있다. NOx는 자동차량 외 내부 연소과정 동안 화석연료 연소원으로 방출된다. 국내 NOx 방출의 1/3-1/2 이 교통부분에 기인한다(Gray Hag, 1997).

을 증대시키고 평균통행속도를 감소시키면서 대기오염의 증가를 가져온다. 대기오염의 증가는 도시환경의 질적 수준을 악화시킴으로써 환경위기를 고조시키고 이는 오염원의 배출부문인 교통부문에 대한 규제 필요성을 강하게 제기함으로써 이는 곧 교통수요관리 정책, 배출가스 저감기술정책, 에너지사용정책, 경차우대정책, 환경세 등의 정책수단을 도입하게 한다. 환경규제 정책으로서 이들 정책수단들은 도시에서 파생된 교통량을 감소시키며 교통량이 감소되면 이는 직접적으로 대기오염을 감소시키게 될 것이다. 그러나 이와 같이 대기오염이 저감된다면 환경규제 정책이 약화될 수 있는데 그렇다면 결국엔 다시 교통량은 증대될 것이고 배출가스 배출량의 증가는 다시 대기오염 수준을 증가시킬 것이다. 이러한 피드백루프의 순환적 인과관계는 반복적으로 되풀이되어 진행되어 나갈 것이다.

이와 같이 교통-대기오염과의 관계는 단일적인 방향이 아닌 쌍방향적인 피드백관계로 동태성을 갖기 때문에 이들 문제를 해결하기 위해서는 무엇보다도 우선적으로 이들간의 복잡한 상호작용을 규명해야할 필요성이 제기된다.

3) 교통-대기오염과의 상호작용 관계에 대한 기본적 피드백 구조

위에서 제시한 바와 같이 교통과 대기오염은 피드백루프의 순환적 인과관계를 갖고 있다. 교통과 대기오염간 상호작용 관계에 내재되어 있는 근본적 피드백 구조를 살펴보면 <그림 2>에서 보는 바와 같다. <그림 2>에서는 4개의 루프가 제시되었는데 이를 통해 교통과 대기오염간 상호 순환적 인과관계를 살펴볼 수 있다.



<그림 2> 교통과 환경간 관계의 기본적 피드백 구조

첫째는 교통량과 도로혼잡도간 음의 피드백루프이다. 이를 보면 교통량이 증대하면 도

로의 혼잡도가 증가하게 되며 도로가 혼잡하면 연료소비와 통행시간 비용 증가로 인해 교통수요가 감소하여 결국 교통량이 감소하게 된다는 것이다.

둘째는 교통량과 교통투자간 양의 피드백루프⁸⁾이다. 이를 보면 교통량이 증가하면 도로의 혼잡도가 증가하여 이를 해결하기 위한 도로부문에 대한 교통투자가 늘어나고 교통투자의 증대는 교통용량을 증대시켜 결과적으로 다시 교통량을 증대시키는 효과를 가져오며 이는 반복적으로 되풀이된다. 서울시에서 매년 수조원의 예산을 도로부문에 투자해도 해마다 도로혼잡도가 증가하는 것은 이와 같은 피드백 루프가 작용하기 때문이다.

위의 2가지 루프를 통해 살펴볼 수 있는 점은 교통량이 증대되어 도로가 혼잡하면 결국 교통량이 안정화 되가는 특성이 있기 때문에 교통량이 증대한다고 해서 무조건 공급위주의 교통정책을 시행하면⁹⁾ 결국 교통량을 증대시켜 환경정책 효과의 상쇄를 가져올 수 있다는 것이다.

셋째는 혼잡에 의한 통행속도와 환경규제 간의 음의 피드백 루프이다. 교통수요의 증가는 도로상에 운행되는 교통량의 증가를 가져와 자동차 배출가스를 증대시키기도 하지만 도로용량 부족에서 발생하는 혼잡도의 증가로 인해 주행속도가 떨어지고 도로에서 지체되는 시간이 많아 그 만큼 더 많은 배기가스를 배출하게 된다. 이에 따라 환경규제 정책이 강화되고 환경규제는 다시 교통량을 감소시켜 혼잡도를 완화시킨다. 그러나 결국 이는 또다시

7) 음의 피드백루프(negative feedback loop)는 '자기억제 피드백(self restraining feedback) 또는 안정화피드백(stabilizing feedback)'이라고 하며 원의 중앙에 - 기호로 표시된다. 예를 들어 음의 피드백루프는 일단 컵에 원하는 높이까지의 물을 따르는 데에 어떠한 메커니즘이 내재되어 있는지를 보여준다. 일단 물의 높이를 정해 놓았으면 컵에 물이 없는 경우 물을 따르기 시작한다. 물의 높이가 올라가서 원하는 수준에 접근하게 되면, 물을 따르는 양을 줄이다가 드디어는 물따르기를 중단함으로써 안정화를 이루게 된다(김도훈 외, 1998).

8) 양의 피드백루프(positive feedback loop)는 종종 '자기 강화 피드백(self-reinforcing feedback)'이라고 불리며 이러한 양의 피드백루프는 원의 중심부에 + 기호로 표시한다. 양의 피드백 혹은 강화피드백과정(self-reinforcing)은 루프의 일탈과 교란을 확대시켜 루프 내 요소를 변화시킴으로써 해서 시스템의 지속적인 성장이나 쇠퇴를 가져온다. 예를 들면 만약 한 기업의 상품이 우수하다면 매출액의 증가는 만족한 고객을 증가시키고 이는 기업이미지를 좋게 하여 긍정적인 구전(口碑)이 이루어지게 한다. 그러면 결국 기업에게 더 많은 매출을 가져다 줄 것이고 이러한 기업은 지속적인 성장을 이루게 될 것이다. 이러한 피드백 행태가 성장을 가져오는 순순환의 강화피드백의 예이다. 반대로 상품에 결함이 있다면 매출액의 증가는 고객의 불만족을 증가시켜 부정적인 구전으로 기업의 매출을 저하시키는 지속적인 쇠퇴를 가져올 것이다. 이러한 피드백 행태가 쇠퇴를 가져오는 악순환의 강화피드백의 예이다. 즉 강화 순환의 결과는 좋은 쪽으로의 성장을 가속화시키거나 또는 나쁜 쪽으로의 퇴보를 가속화시킨다(박광량·손태원 역, 1996).

9) 우리나라의 사회간접자본 투자는 도로건설에 집중되어 왔으며 공급위주 교통정책을 시행해왔다. 그러나 도로가 신설되면 그 도로의 대부분을 장악하는 것은 다시 승용차들이기 때문에 집중적인 도로투자는 사실상 자가용 승용차에 보조금을 지급하는 것과 마찬가지로 귀결되어 바람직한 사회자본 투자의 왜곡이 빚어진다(민만기, 2000).

교통수요를 증대시키는 결과를 초래하는 피드백 루프이다.

넷째는 교통량과 환경규제간 음의 피드백루프이다. 교통량이 증대하면 배기가스배출량이 증대하고 이는 도시환경의 질을 저하시킨다. 도시환경의 질적 저하는 환경위기감을 고조시켜 환경규제의 필요성을 높임으로써 이에 따라 환경규제 정책이 증대되고 교통수요관리와 같은 환경규제는 교통수요를 억제하여 교통량을 감소시킨다. 이는 다시 배기가스배출량을 저하시키는데 이로 인해 도시환경의 질은 좋아져서 만약 환경규제를 다시 완화한다면 이는 결국 교통량이 다시 증가하게 되는 관계를 갖는다.

이를 통해 살펴볼 수 있는 교통과 환경부문에 내재해 있는 가장 근본적인 피드백 구조는 교통량 증가에 의한 대기오염 수준이 증가하면 대기오염에 따른 환경규제가 시행되어 결국엔 교통량을 줄이게 되는 음의 피드백(자기억제적인 안정화피드백)이라는 것이다.

그러나 교통과 대기오염과의 이러한 근본적 피드백 관계 외에도 정책실험의 논리를 구조화하기 위해서는 상호영향을 주고받는 교통과 대기오염간의 복잡성에 대한 보다 정교한 이해가 필요하다. 따라서 정책대안과 실험논리를 구조화하기 위해서는 모든 관련 변수들간의 연결고리와 피드백 관계를 구조화하고, 여기에서 정책 지렛대를 탐색해 볼 필요가 있다.

Ⅲ. 정책대안 탐색을 위한 교통과 대기오염과의 동태성에 대한 인과지도 분석

시스템 다이내믹스의 방법론으로서 인과지도(casual loop)는 복잡한 시스템들의 관계를 이해하게 해줌으로써 적실성 있는 정책대안을 탐색하기 위한 기초작업이라고 할 수 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 교통량 증대에 따라 교통문제를 해결하기 위해 단순히 교통투자를 늘이면 장기적으로 교통량을 증대시켜 문제를 더욱 악화시킬 수 있는데 이는 도시체계의 피드백 구조에 기인하는 것이므로 인과지도를 통해 이런 피드백구조를 우선적으로 살펴볼 필요가 있다. 또한 하나의 피드백구조를 통해서 관련 부분들의 문제를 동시에 충족시켜 줄 수 있는 정책을 제시할 수 없다는 점에서도 부분들간의 상호관련성을 살펴보는 인과지도의 의의를 찾아볼 수 있다.

도시정책은 도시문제를 단기적·단편적으로 접근해서는 어렵기 때문에 장기적·종합적 시각을 가지고 체계적으로 접근해야 하는데 인과지도는 집합적(aggregate) 수준에서나마 도시 성장의 순환적인 인과관계와 피드백 구조를 밝히고 있기 때문에 이러한 집합적 수준의 개념적 모델만으로도 정책 결정자에게 많은 이해를 줄 수 있다. 즉 문제인식에 있어 인과

지도를 통해 관련부문간 동태적·순환적 인과관계, 피드백구조를 이해하게 되어 단기적·부분적 시각이 아닌 장기적·전체적 시각의 정책대안을 고안하게 될 것이다(김도훈 외, 1998).

1. 교통수요·교통량과 대기오염과의 동태적 상호 작용성

도시의 대기오염 수준은 근본적으로 자동차, 교통수요, 그리고 통행량의 함수이다. <표 1>에서 보는 바와 같이 우리나라의 자동차등록 대수는 경제성장과 가구별 소득의 증가로 인해 해마다 꾸준히 증가하여 서울의 경우 1991년에 1백37만5천대에 불과하던 자동차가 1999년에는 2백30만대를 넘고 있어 연 15.5%의 성장률을 보이고 있다.

특히, <표 2>를 보면 '90~'97 기간 중 유출입 통행량의 증가율이 총통행량 증가율의 3배 수준으로 서울에서는 신도시개발로 직주 분리가 심화되어 통근거리가 장거리화 됨으로 인해 통행거리와 시간까지 증대하고 있는 실정이라고 할 수 있다. 이러한 자동차 증가와 통행량의 증가는 곧 자동차 운행 증가로 인한 배기가스 배출량의 증대를 의미한다.

<표 1> 연도별 자동차 증가대수 추이

구 분	1981년	1986년	1991년	1996년	1999년 (6월)	연평균 증가율(%)
수 도 권	291,121	700,501	2,180,240	4,481,451	4,931,903	19.2
서 울	221,644	521,521	1,374,677	2,168,182	2,227,905	15.5
경 기	49,082	140,573	610,168	1,809,624	2,133,388	26.2
인 천	20,395	49,407	195,395	503,645	570,610	22.9
전 국	571,794	1,309,434	4,247,816	9,553,092	10,732,739	19.9
구성비(%) 수도권/전국	50.9	54.3	51.3	46.9	46.0	-

자료: 원제무, 서울 및 수도권 문제의 현황과 대책: 교통부문, 삼성경제연구소, 2000.

<표 2> 서울시 통행량 증가추이

구 분	1990	1997	증가율(%)
총통행량(만통행)	2,464	2,720	10.4
유·출입통행량(만통행)	475	613	29.1
유·출입통행량 비율(%)	19.3	22.5	-

자료: 건설교통부, 제1차 수도권 광역교통 5개년 계획, 1998.

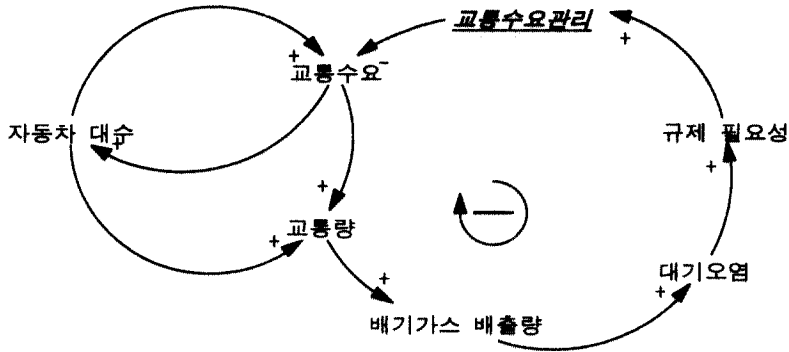
이와 같은 자동차 증가와 이에 따른 교통량의 증가로 인해 대기오염에서 차지하는 자동

차 부문의 오염비중이 서울시의 경우 1992년에는 60.8%였으나 1998년에는 83.8%로 크게 증가하고 있다. 따라서 교통부문에 의한 대기오염 증가 추이를 줄이기 위해서는 자동차 증가, 교통수요 증가, 교통량 증가, 대기오염 증가의 관계를 기본적인 상호작용 관계로 이해하여야 한다.

〈표 3〉 대기오염 및 대기오염에서의 자동차 부문 비중 추이 (단위 : 천톤)

구 분		'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98
전국	대기전체	4,868	4,584	4,526	4,350	4,425	4,365	3,768
	자 동 차	1,839	1,664	1,645	1,710	1,702	1,795	1,552
	(%)	37.8	36.3	36.3	39.3	38.5	41.1	41.2
서울	대기전체	760	534	455	422	396	388	334
	자 동 차	462	383	351	341	326	331	280
	(%)	60.8	71.6	77.1	80.6	82.3	85.3	83.8

이와 같은 자동차 증가, 교통수요, 교통량, 배기가스 배출량, 그리고 대기오염 간의 관계를 인과지도로 나타내면 아래의 그림과 같다. 이 인과지도에서 교통과 대기오염 관계의 상호작용성에 연결고리 역할을 하면서 정책지렛대로서 기능하는 것은 교통수요관리이다.



〈그림 3〉 교통수요·교통량과 대기오염과의 동태적 상호 작용성에 대한 인과지도

2. 통행수단과 대기오염

교통과 대기오염과의 상호작용에서 중요한 관계 중의 하나가 통행수단인 자동차 종류와 배출가스량 및 오염물질과의 관계이다. 자동차에서 배출되는 배기오염 물질을 살펴보면 대

기오염 전체에는 일산화탄소와 질소산화물의 기여도가 높다.

〈그림 4〉 차종별 대기오염발생 량의 구성비

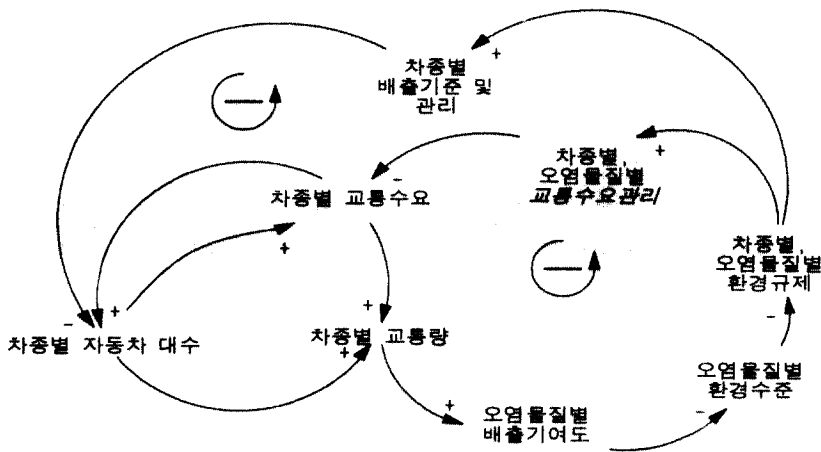
이를 차종별로 보면, 승용차는 일산화탄소와 질소산화물 및 탄화수소에 대한 배출 비중이 높고, 버스는 질소산화물과 일산화 탄소, 트럭은 일산화탄소와 질소산화물의 배출 비중이 높게 나타나고 있는 등 차종별로 배기가스 배출비중이 다르다. 또한, 차종에 따른 오염물질 배출총량의 기여도를 보면 <표 4>에서 보는 일산화탄소와 탄화수소는 승용차, 질소산화물과 분진은 대형화물차가 높은 것으로 나타나고 있다.

〈표 4〉 차종별, 오염물질별 배출 기여도(배출계수)

구 분		차량등록대수	일일주행거리 (km)	CO (톤/년)	HC (톤/년)	NOx (톤/년)	PM (톤/년)	SO ₂ (톤/년)
승용차	휘발유	1,634,588	36	56,546	8,996	8,996	214	34
	LPG	74,682	177	28,819	3,464	3,897	0	0
승합차	소형 휘발유	27,410	33	2,063	166	475	3	0
	경유	170,636	53	4,597	397	4,795	1,158	586
	중형	3,184	44	100	42	81	33	14
화물차	대형	15,802	105	7,241	1,058	7,755	1,221	354
	소형	244,240	56	8,839	794	7,399	1,837	861
	중형	32,097	57	1,322	557	1,067	436	285
	대형	45,928	70	16,651	2,188	15,422	2,422	904
총 계		2,248,567	630	126,178	17,663	49,888	7,325	3,039

자료: 서울시, 서울시 대기환경 개선계획 2000, 1999.

이러한 사실은 교통과 대기오염 간의 관계에서 차종에 따른 상호작용성에 주목할 필요가 있으며, 이에 따른 피드백 관계를 반영할 수 있는 정책지렛대의 탐색이 요구된다 하겠다. 차종과 대기오염 간의 동태성과 연결고리로서의 정책지렛대를 인과지도로 나타내면 아래의 그림과 같다. 이는 차종과 대기오염 간의 관계를 고려한 정책 탐색이 중요함을 보여준다.



〈그림 5〉 교통수단(차종)과 대기오염과의 동태적 상호 작용성에 대한 인과지도

3. 통행속도와 대기오염

우리나라 자동차 배출량 증가의 가장 큰 요인은 교통체증에 의한 평균차속의 감소로 인한 연료소비의 증가이며 특히 일산화탄소(CO)는 교통체증 시 많이 배출되어 교통정체가 심한 도심지 도로변에서의 오염도가 높은 것으로 제시되었다(한화진, p12). 한편 2000년 서울시의 통행속도를 보면 승용차가 22.92km/h(1999년 대비 2.49km/h 감소)였으며 시내버스는 18.99km/h (1999년 대비 0.22km/h 감소)로 나타났다. 또한, <표 6>은 자동차의 도로통행 속도와 배기가스 배출량의 관계를 보여주고 있는데 이 표에 의하면 같은 차종이라도 주행평균 속도에 따라 오염물질의 배출계수가 달라지는 것을 알 수 있다.

〈표 5〉 연도별 통행속도 증감추세(Km/h)

연도	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'99대비
승용차	23.53	23.18	21.96	20.90	21.06	25.41	25.41	22.92	9.8%감소
시내버스	17.02	18.42	18.79	18.35	18.69	20.07	19.21	18.99	1.1%감소

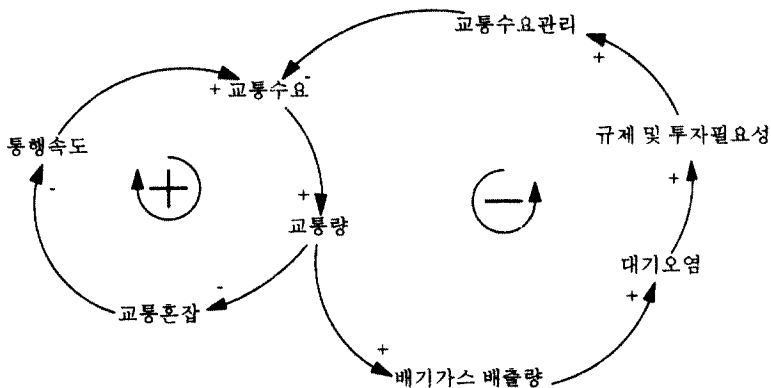
자료: 건교부 육상교통국 육상교통자료 2000

〈표 6〉 자동차의 통행속도에 따른 오염물질별 배출계수

gasoline passenger	pollutant type	CC	speed range	속도에 따른 배출계수
(승용차)	CO	all	10-60	$260.788 * V^{(-0.910)}$
			60-130	$14.653 - 0.220 * V + 0.001163 * V^2$
	NOX	1.4 < cc < 2.0	10-130	$1.484 + 0.013 * v + 0.000074 * v^2$
			VOC	all
	Fuel Comsump	1.4 < cc < 2.0	10-60	$606.1 * V^{(-0.667)}$
			60-130	$102.5 - 1.364 * V + 0.0086 * V^2$

자료: 서울시, 서울시 대기환경 개선계획 2000, 1999.

따라서 교통과 대기오염간의 관계에서는 자동차의 통행속도 또한 상호작용 관계를 살펴 보는데 중요한 요인이 되며, 이러한 요인을 중심으로 교통과 환경과의 연결고리가 정책 지렛대 차원에서 모색되어야 할 것이다. 이러한 관계를 인과지도로 나타내면 아래와 같다.



〈그림 6〉 통행속도와 대기오염과의 동태적 상호 작용성에 대한 인과지도

그러나, 위의 그림에서 교통수요 관리를 통한 교통량 감소는 배기가스 배출량 감소로 이

어지지만 교통수요관리로 인한 교통량의 감소는 교통혼잡을 완화하고 통행속도를 증가시켜 다시 교통량 증가를 가져와 결국에는 배기 가스 배출량을 증대시키는 결과를 가져온다.

4. 자동차연료와 대기오염

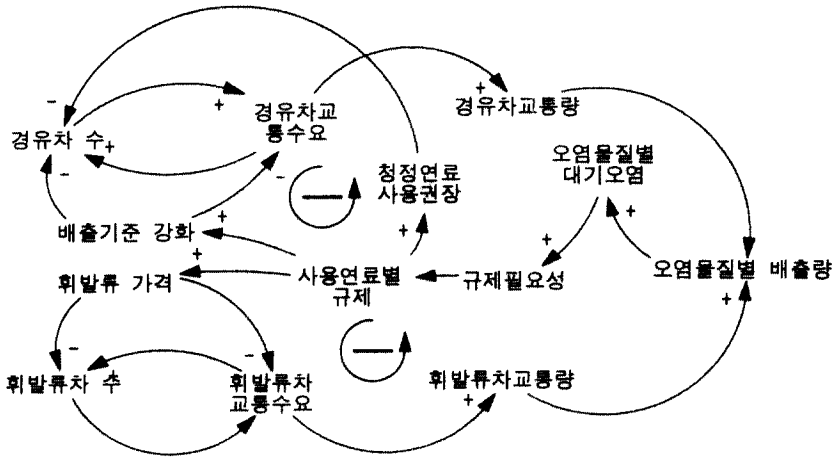
서울시의 경우 자동차 오염물질배출량 중 경유차가 차지하는 비중은 전체의 43.6%를 차지하고 있고 특히 먼지는 98%, 질소산화물은 74%를 차지하고 있기 때문에 경유차의 경우 차량대수에 비해 오염기여도가 심각한 실정이다. 일반적으로 자동차에서 배출되는 오염물질은 엔진 및 사용연료의 종류에 따라 다르며 휘발유나 LPG를 연료로 사용하는 자동차에서는 일산화탄소와 탄화수소가 주로 배출되고, 경유를 사용하는 버스, 트럭 등에서는 질소산화물 및 매연 등이 많이 배출된다(환경부, 1999).

〈표 7〉 차종별 오염물질 배출 비율

구분	총계	차종별 비율		
		승용차(휘발류차) (LPG포함)	경유차	
			전체	대형(버스, 트럭 등)
전국	1,552	641(43.1%)	911(58.7%)	665(42.8%)
서울	280	158(56.4%)	122(43.6%)	83(29.6%)

자료: 서울시 통계자료, 1999

따라서 교통과 대기오염의 관계에서는 자동차에서 사용하는 연료와 오염물질의 관계를 중심으로 상호작용 고리를 파악하고 여기에 따라 정책실험 논리의 구조를 확립하는 것이 중요하다고 하겠다(그림 7).



〈그림 7〉 자동차 사용 연료와 대기오염과의 동태적 상호 작용성에 대한 인과지도

IV. 교통과 대기오염과의 동태적 상호작용 구조에 기초한 정책실험 논리의 구조

앞의 인과지도에서는 교통과 대기오염간의 상호작용에서 중요하게 고려되어야 할 연결 고리들을 4부분으로 구분하여 살펴보았다(그림 3, 5, 6, 7). 다음에서는 이를 바탕으로 하여 교통과 대기오염과의 인과지도를 재구조화하였다(그림 8). 그림8에서는 4개의 대기오염저감정책들(환경세부과, 배출허용기준, 경차우대, 에너지사용)이¹⁰⁾ 제시되고 있으며 이들 정책들이 교통-대기오염과의 동태적 관계에 영향을 미치는 경로를 보여주고 있다. 이를 통하여 향후 대기오염저감정책을 탐색하기 위한 정책실험논리를 구축하였다.

1. 교통수요관리를 위한 환경세부과 정책과 교통-대기오염과의 관계

<그림 8>의 인과지도를 보면 총대기오염수준의 증가로 환경세부과정책이 시행되면 승용차통행분담율, 승용차 일교통량, 총교통량이 감소한다. 이는 평균통행속도를 증가시킴으로 특히 일산화탄소 발생량을 감소시켜 총대기오염수준을 감소시킨다. 한편 총대기오염수준의 감소로 환경세부과정책이 약화되면 앞서 설명한 경로를 다시 반복하게 됨으로써 결국

10) 이들 정책들은 「서울시 대기환경 개선계획 2000」에서 채택하고 있는 정책들 중에서 선택하였다.

다시 총대기오염수준을 증가시킬 것이다. 즉 <그림 8>은 환경세정책변수를 통한 교통-대기오염간 상호피드백적인 동태적인 관계를 보여주고 있다.

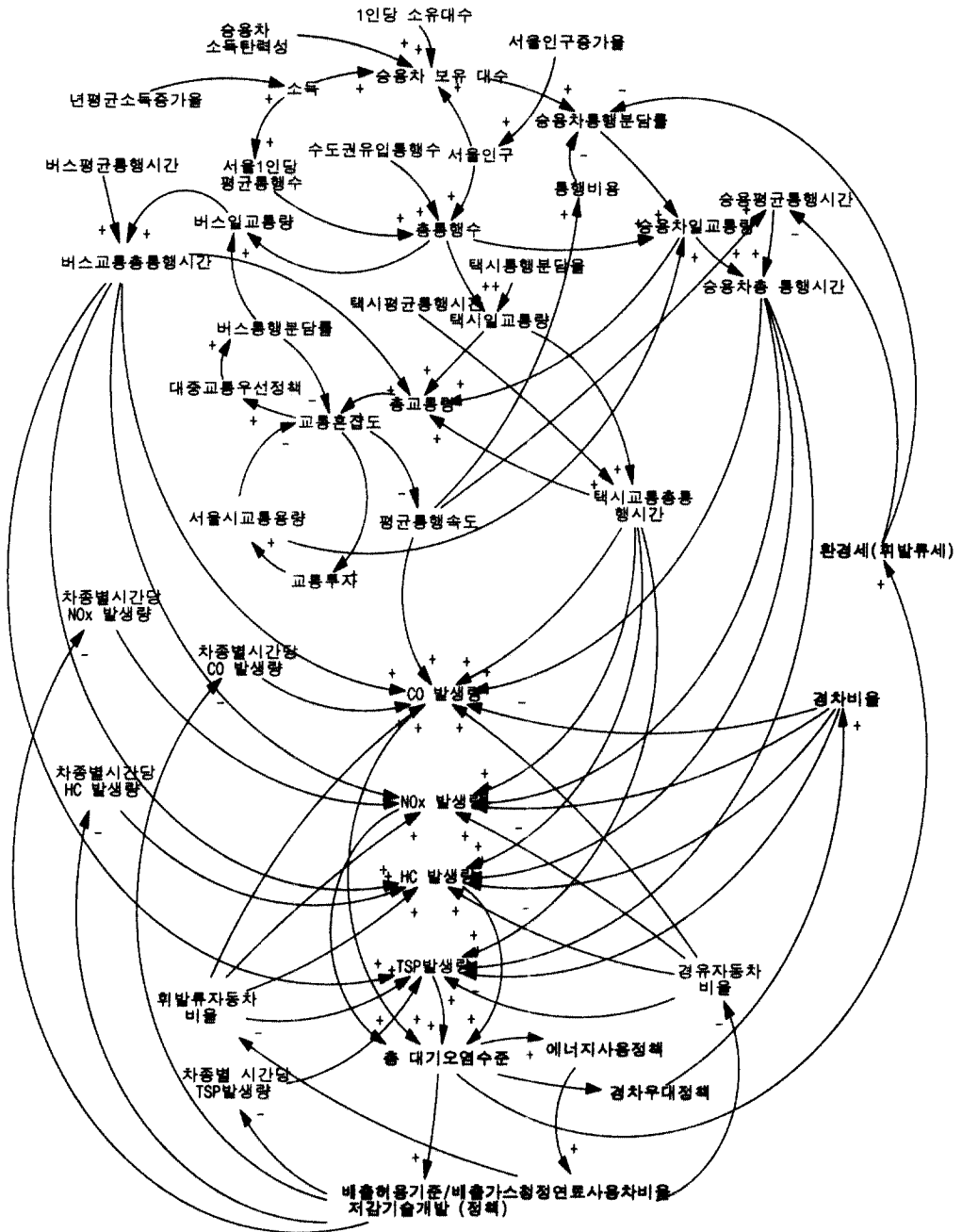
2. 배출허용기준 정책과 교통-대기오염과의 관계

<그림 8>의 인과지도를 보면 총대기오염수준의 증가로 배출허용기준¹¹⁾/배출가스저감기술개발정책이 시행되게 되면 차종별 그리고 오염물질별로 각기 다른 경로로 시간당 오염물질 발생량을 감소시켜 결국 총대기오염수준을 감소시킨다. 총대기오염수준의 감소는 다시 정책변수에 영향을 미쳐 앞서 설명한 경로를 다시 반복하게 된다. 즉 정책변수를 통한 교통과 대기오염간 상호피드백적인 동태적인 관계를 보여주고 있다.

3. 경차우대정책과 교통-대기오염과의 관계

<그림 8>의 인과지도를 보면 총대기오염수준의 증가로 경차우대정책이 시행되게 되면 경차의 비율이 증가하여 총 대기오염수준이 감소하게 된다. 이는 다시 정책변수에 영향을 미쳐 앞서 설명한 경로를 다시 반복하게 된다. 즉 정책변수를 통한 교통-대기오염간 상호피드백적인 동태적인 관계를 보여주고 있다.

11) 현재 서울시는 운행자동차 배출허용기준은 사용연료 및 차종에 따라 규제항목 및 규제기준을 구분하여 설정하고 휘발유 또는 가스사용 자동차의 경우에는 일산화탄소, 탄화수소 및 공기과잉유를, 경유사용 자동차의 경우에는 매연을 규제하고 있다. 특히 경유사용 자동차의 매연배출허용기준을 1996년 이후 출고차는 40%에서 35%이하로, 1998년 이후 출고차량은 30%이하(시내버스 25%)로 강화하였다(서울시 대기오염저감대책, 2000).



<그림 8> 교통과 대기오염간의 상호작용 분석과 대기오염 완화 정책대안의 평가를 위한 정책실험 인과지도

4. 에너지 사용정책과 교통-대기오염과의 관계

<그림 8>의 인과지도를 보면 총대기오염수준의 증가로 에너지사용정책이 시행되면 청정연료사용차, 휘발유자동차, 경유자동차의 비율이 변한다. 이는 각 대기오염물질량을 변화시켜 결국 총대기오염수준이 변화하게 된다. 이는 다시 정책변수에 영향을 미쳐 앞서 설명한 경로를 다시 반복하게 된다. 즉 정책변수를 통한 교통-대기오염간 상호피드백적인 동태적인 관계를 보여주고 있다.

위에서 제시하고 있는 정책실험논리의 구축을 위한 인과지도를 통해서 살펴볼 수 있는 점은 다음과 같다. 즉 대기오염의 증가로 정책들을 시행하면 결국 다시 대기오염에 각기 다른 영향을 미치는 피드백적인 상호작용성을 갖는다는 것이다. 따라서 정책 시행시 장기적이고 종합적인 상황을 고려해야 함을 제시해주고 있다.

V. 결론

도시의 교통과 대기환경은 상충적 관계에 있기 때문에 동시에 이들 문제를 해결하기에는 상당한 어려움이 따른다. 따라서 이들간의 문제를 해결하기 위해서는 무엇보다 먼저 교통과 대기환경간에서 발생하는 복잡한 상호작용관계를 이해해야 한다. 따라서 본 연구에서는 이를 위해 시스템 다이내믹스 방법론인 인과지도모형을 통해 교통과 대기오염간의 동태적 상호작용성을 규명해보았다.

먼저 교통과 대기오염간의 동태성을 규명하기 위해 교통수요·교통량, 교통통행수단별, 교통통행속도별, 자동차연료별로 세분하여 인과지도를 구조화하였다.

다음으로 정책들의 효과를 평가하기 위한 정책실험논리를 구축하기 위해 정책변수들을 중심으로 전체적인 인과지도를 재구축하였다. 이들 정책변수들로 인해 교통-대기오염간의 상호 피드백적인 동태적인 관계가 이루어짐을 살펴보았다.

이와 같은 교통과 대기오염간의 동태적 상호작용분석을 통해 교통과 대기환경간 상호영향정도가 보다 실질적으로 검토될 것이다. 또한 이를 바탕으로 제반 영향요소, 영향인자간 단선적 인과관계가 아닌 복잡한 상호작용체제를 바탕으로 한 정책대안의 탐색이 가능할 것이다.

향후의 연구에서는 이러한 인과지도 분석을 바탕으로 이러한 피드백 순환들을 보다 정교하게 모델화하여 동태적 행태 유형을 발견하기 위한 시뮬레이션 연구를 수행하고자 한다.

[참고문헌]

- 김도훈, 문태훈, 김동환. 1998. 「시스템 다이내믹스」. 대영문화사.
- 김동환. 1999. “김대중 대통령의 인과지도”. 「한국시스템다이내믹스학회」, pp. 1~32.
- 민만기. 2000. “도시지역 대기오염 문제와 개선방향”. 제2회 「지방의제21전국대회발표논문집」, pp. 185~200.
- 박광량·손태원 역. 1996. 「학습조직의 5가지 수련」, 피터생게 외 66명 지음, 21세기 북스.
- 윤대식, 정성용, 김운수. 1998. 「환경친화적 도시교통체계의 구축을 위한 모형정립과 적용가능성에 관한 연구」. 「대한국토·도시계획학회지」, pp. 159~181.
- 이상훈. 1998. “자동차가 환경적으로 지속가능한 도시교통에 미치는 영향”. 「환경영향평가」 제7권 제1호, pp. 109~116.
- 이성원. 1996. “자동차공해저감을 위한 정책대안 및 그 추진방향”. 「교통정책연구」 제3권 제3호, pp. 22~50.
- 장현봉. 1998. “환경친화적인 도심기능을 위한 교통체계구상”. 충남대학교 「지역개발논총」 제10권, pp. 55~66.
- 한화진. 1996. 「자동차오염의 특성과 오염저감방안」 pp. 4~19.
- 홍민기, 이문희, 김동환, 최남희. “지역환경 시스템과 지역경제 시스템간의 동태적 상호작용과 정책실험에 관한 연구”. 미발표문, 대한국토도시계획학회지 게재예정논문.
- 교통개발연구원. 1992. 「교통부문의 에너지소비 및 대기오염 저감방안 연구」.
- _____. 1995. 「자동차배출가스의 저감을 위한 교통부문 대책」.
- _____. 1999. 「교통관련 사회환경비용의 내재화방안」.
- 삼성경제연구원. 2000. 「서울 및 수도권 문제의 현황과 대책」.
- 시정개발연구원. 1994. 「서울시 대기오염 특성 연구」.
- _____. 1999. 「쾌적한 도시를 위한 교통체계개편방안연구」.
- _____. 2000. 「서울의 대기오염저감대책 2000」.
- 건교부 육상교통국. 2000. 「육상통계자료」.
- 서울시자료. 1996. 「2000년대 서울시의 대기오염물질 배출량 예측 및 관리방안연구」.
- 서울시 녹색환경방 자료. 2000. 「서울시 대기오염저감대책」.
- 환경부. 1999. 「대기오염과 자동차 관계」.
- Banister, David. 1998. “Transport policy and the environment”, New York : Routledge.
- Cartledge, Bryan, Sir. 1996. “Transport and the environment”, New York :Oxford University Press.
- Chang-Hee Christine Bae. 1993. “Air Quality and Travel Behavior” *APA Journal*, pp. 65~74.

- Haq, Gary. 1997. "Towards sustainable transport planning :a comparison between Britain and the Netherlands", Aldershot: Avebury.
- Hayashi, Yoshitsugu, Roy. 1996. "Transport, land-use, and the environment", Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Katsutoshi Ohta, 1994. "Transportation Problems and Policies of the Tokyo Metropolitan Region".
- Recio, J. M. Baldasano, Sucharov, L. J. 1996. "Urban transport and the environment II", Southampton, UK, Boston: Computational Mechanics Publications.
- Senge, Peter. 1993. "The Fifth Discipline"