

시스템 다이내믹스를 이용한 지속가능한 교통시설 인과지도 개발

배진희* · 박희성**

Bae, Jin Hee*, Park, Hee-Sung**

Development of Causal Map for Sustainable Transportation Facilities Using System Dynamics

ABSTRACT

The global warming caused by consumption of fossil fuel and energy has been interested. Therefore, several policies and regulations have been discussed to reduce greenhouse gas emission and effective energy consumption. The construction industry that takes 45% of energy consumption makes efforts to develop green construction methods and materials and reuseable energy. However, there is no common definition to calculate greenhouse gas and database in the construction industry. Especially, transportation infrastructure like road, railway, harbor, and airport consumes 21% energy of construction facilities. Therefore, this paper develops the causal relationship to define performance of sustainable road construction and maintenance. The performance indices are grouped into economic, social, and environment impacts. Then, the causal map is developed based on survey results of construction experts. This will provide the baseline to evaluate the performance of sustainable construction and to establish the objective goals.

Key words : Transportation facility, Causal map, Sustainable development

초록

최근 화석연료 및 에너지 소비의 증가로 인해 지구온난화의 심각성이 대두되고 있다. 따라서 온실가스 저감, 에너지 효율화를 위한 정책 및 제도에 대한 논의가 진행되고 있다. 총 에너지 사용량의 45%를 차지하는 건설 산업도 녹색기술, 친환경자재, 재생에너지 등의 녹색 건설화가 이루어지고 있다. 그러나 건설 산업은 온실가스 배출에 미치는 영향요인 및 데이터 구축이 이루어지지 않았으며, 녹색 건설의 성과를 평가하기 위한 방법론도 불명확하다. 특히 건설 산업 분야중 도로, 철도, 해운, 항공 등의 교통시설물은 전체 에너지 소비율의 21%를 차지하고 있다. 따라서 본 문은 건설 산업 분야의 교통시설물 중 도로시설물의 성과평가 항목의 인과관계를 제시하였다. 성과분야는 경제적, 사회적, 환경적 요인으로 구분하였으며 건설 전문가의 설문조사 결과를 바탕으로 제시된 성과평가 항목을 이용하여 항목 사이의 인과관계 체계를 도식화하였다. 이는 녹색 성과를 비교·평가하여 향후 목표 수립 기반을 제공할 수 있다.

검색어 : 교통시설물, 인과지도, 지속가능한 개발

* (주)태창이엔지, 한밭대학교 산업대학원 석사 (Taechang ENG. ·jinheeb2@nate.com)

** 정희원·교신저자·한밭대학교 건설환경공학과 교수 (Corresponding Author ·Hanbat National University ·jackdaniel@hanbat.ac.kr)

Received March 31, 2015/ revised May 7, 2015/ accepted May 13, 2015

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

화석연료 및 에너지 소비의 증가에 따른 온실가스 배출은 지구온난화를 초래하였다. 지구온난화는 홍수, 가뭄, 태풍 등의 이상기후 현상을 유발하며 인간의 생명을 위협하고 있다. 이에 현재 전 세계적으로 지구온난화를 방지하기 위한 해결책으로서 지속가능한 개발, 녹색화, 친환경 등의 개념을 적용한 정책이 활발히 논의되고 있다.

우리나라도 2008년 8월 녹색성장을 기본으로 경제와 환경의 균형적인 성장을 위한 비전을 선포하고 효율적 온실가스 감축, 기후변화 적응역량 강화, 녹색기술 개발 및 성장 동력화 등의 기본방향 및 실행 방안을 제시하였다(CGG, 2009).

이에 총 에너지 사용량의 45%와 CO₂ 배출량의 36%를 차지하는 건설 산업도 녹색 기술, 친환경 자재, 재생에너지 등의 친환경 건설을 위한 노력을 하고 있다. 그러나 아직 건설 산업은 온실가스 배출요인 및 데이터 통계조차 구축되어 있지 않고 녹색 건설 성과평가 방법 또한 불명확한 실정이다(Bae and Park, 2012).

특히 도로, 철도, 해운, 항공 등의 교통시설물은 전체 에너지 소비율의 21%를 차지하며, 그중 도로 부분은 79%의 가장 높은 소비율을 차지한다. 또한 통계청에 따르면 연료소비가 많은 자동차 등록수가 2008년 16만대에서 2011년 18만대로 꾸준한 증가율을 보이고 있다(Statistics Korea, 2011). 교통시설 중 도로 이용률이 증대되고 이에 따라 발생될 수 있는 경제적, 환경적, 사회적 요인들이 고려되어야 한다.

따라서 본 연구는 도로, 철도, 해운, 항공 등의 교통시설물 중 도로에 중점을 두고 성과를 비교·평가하여 향후 목표 수립 기반을 제공하는 성과평가 항목의 인과관계를 나타내었다. 성과분야는 경제적, 사회적, 환경적 요인으로 구분하여 각 분야별 세부 성과항목 사이의 인과관계 체계를 나타내었다.

본 논문은 지속가능한 교통시설물 중 도로를 주 대상으로 연구문헌을 고찰하여 성과를 비교평가 할 수 있는 성과항목을 조사하였다. 그리고 기존 문헌 분석을 통해 제시된 성과항목의 적정성을 검토하기 위해 건설 전문가를 대상으로 실시한 설문조사를 수행하였다. 그리고 시스템 다이내믹스를 활용하여 각 분야별 항목 사이의 원인과 결과의 인과관계를 파악할 수 있는 인과지도를 작성하였다. 그리고 작성된 인과지도의 분석을 통해 추후 성과항목의 활용방안을 제안하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 기존 선행연구

캐나다 빅토리아 교통국(VTPI)은 지속가능한 개발을 교통에

Table 1. Sustainability Indicators

Sustainability Goals	Performance Indicators
Economic	
Economic productivity	- Portion of budgets devoted to transport - Per capita congestion delay - Efficient pricing(road, parking, insurance, fuel, etc)
Energy efficiency	- Per capita transport energy consumption - Per capita use of imported fuels
Affordability	- Availability and quality of affordable modes (walking, cycling, ridesharing, public transport)
Social	
Equity/fairness	- Transport system diversity - Portion of destination accessible by people with disabilities and low incomes
Safety, security and health	- Per capita traffic casualty rates (injury and death) - Human exposure to harmful pollutants - Portion of travel by walking and cycling
Community development	- Quality of road and street environments - Walkability and bikability
Environment	
Climate stability	- Per capita emissions of greenhouse gases (CO ₂ , CH ₄ , CFCs, etc)
Prevent air pollution	- Per capita emissions (PM, VOCs, NOx, CO, etc) - Air quality standards and management plans
Prevent noise pollution	- Traffic noise levels

*VTPI, "Well Measured Developing Indicators for Sustainability and Livable Transport Planning, 2012.

적용하여 지속가능한 교통을 정의하고, 지속가능한 교통을 평가할 수 있는 성과지표를 제시하였다. 지속가능한 교통 지표는 경제적, 사회적, 환경적으로 구분되었다. 경제적 지표는 효과적인 이동성, 지역경제 개발, 운영 효율성, 사회적 지표는 공정성, 안전성, 적합성, 지역사회기주 및 보존, 환경적 지표는 대기, 소음, 수질 오염, 기후변화, 자원보존에 목적을 두어야 하며 이에 해당하는 각 분야의 지표는 Table 1과 같다(VTPI, 2012).

제시된 지표는 경제적, 사회적, 환경적 요인의 세 분야로 구성되었다. 경제적 요인은 경제적 생산성, 에너지 효율성, 적합성에 따라 세부 성과지표를 나타내었다. 사회적 요인은 공정성, 안전, 지역사회 개발에 따른 세부 성과지표를 나타내었다. 환경적 요인은 기후변화, 대기, 소음에 따른 세부 성과지표를 나타내었다.

1995년 미국 환경부(EPA)는 교통수단을 도로, 철도, 항공, 해운으로 구분하여, 각각이 환경에 미치는 영향을 정의하고 목록화하여 지표를 나타내었다. 미국 환경부는 지표란 교통이 환경에 미치는

Table 2. Indicators for Road Construction and Maintenance

Activity	Outcome Indicators	Output Indicators	Activity Indicators
Habitat disruption and land take for road and right-of way	- States reporting highway related wetland losses	- Cumulative land area covered by road	- New road mileage and lane mileage constructed
Emission during construction and maintenance	- Percent of surface waters degraded from land development projects	- Change in surrounding water quality conditions near typical construction site	- Energy used in construction
Releases of deicing compounds	- States reporting road salting as a significant source of ground water contamination	- Data unavailable	- Quantity of road salt used
Highway runoff	- River miles, lakes, and ocean shore miles impaired by urban runoff	- Quantity of oil and grease loading via road runoff	- Percentage of roads that are paved

* EPA, "Indicators of the Environmental Impacts of Transportation", 1996.

Table 3. Transportation Indicators



Transportation Indicators	Indicator set
Traffic volume	- Vehicle travel - Public transportation volumes - Walking and cycling
Network reliability	- Congestion and travel time reliability
Freight/transport industry	- GDP - Freight volume - Transport workforce
Access and perceptions of transport	- Social connectivity - Access to a vehicle - Accessibility of public transport
Travel patterns	- Household travel
Safety and security	- Accident occurrences - Deaths and injuries - Social cost of accidents
Public health	- Air quality
Infrastructure and investment	- Infrastructure size - Infrastructure quality
Environmental	- Climate change - Water quality - Sector energy use
Transport-relater price indices	- Price indices - Affordability of transport

영향의 규모 정도를 양적으로 측정할 수 있는 것이라고 정의하였다 (EPA, 1996).

지표는 건강, 생태학적 결과를 측정할 결과지표(outcome indicators), 배출량, 서식지 변화, 유해물질 등을 측정하는 생산지표(output indicators), 구조물, 수송, 또는 다른 활동에 관한 활동성 지표(activity indicators)로 구성되어있다.

Table 2는 미국 환경부에서 제시한 도로 교통에 관련된 지표를 나타낸 것이다. 각 활동별로 outcome, output, activity 별로 지표를

Table 4. Causal Map Concept

Causal relation connection	Meaning
A  + B	The increase in variable A increases variable B
A  - B	The decrease in variable A decrease variable B

개발하여 평가 관리하고 있다. 그리고 각 항목별 결과지표, 생산지표, 활동성 지표를 나타내고 측정할 수 없는 데이터는 이용불가능(data unavailable)으로 표시하였다.

뉴질랜드 교통부는 교통, 항공, 해상, 철도 등의 법률, 규정 및 정책을 조인하고 효율적으로 적용되도록 지원하는 기관이다. 뉴질랜드 교통부가 제시한 교통지표는 교통량, 교통 네트워크, 화물 운송 및 교통산업, 접근성, 통행 패턴, 안전 및 보안성, 건강에 미치는 영향, 인프라 시설 및 투자, 환경영향, 교통관련 물가지수의 10개의 항목으로 구성되어있다. 구성된 지표는 Table 3과 같이 각 항목에 따른 세부 지표로 구성되어 있다(Ministry of Transport, 2011).

2.2 시스템 다이내믹스 이론

시스템 다이내믹스(System dynamics)란 시스템(System)과 다이내믹스(Dynamics)의 결합어로서 관찰하고자 하는 대상에 연결된 구성요소들이 시간의 흐름에 따라서 변화하는 행태를 다루는 것이다. 시스템 다이내믹스는 문제의 근원이 되는 원인구조를 밝힘으로써 변수들 간의 관계를 고찰하여 이들 사이의 순환고리(Feedback loops)를 이해하는 사고체계라고 할 수 있다(Kim, 2007).

시스템 다이내믹스를 활용한 인과지도(Causal map) 작성을 통해 선정된 구성 변수들의 상호관계를 파악한다. 인과지도는 Table 4와 같이 화살표, 부호, 피드백 고리 등으로 구성되며, 화살표는 상호 영향관계를 나타낸다. 인과지도는 시스템의 계량적인 값을

보여주지 않고 변수들 사이의 관계를 쉽게 파악할 수 있게 도식화하여 나타낸다(Kim, 2007).

3. 교통시설 성과평가 항목

지속가능한 교통시설의 성과평가 항목은 앞서 살펴본 연구문헌과 같이 경제적, 사회적, 환경적 분야에 교통이 미치는 영향요인들로 구분하여 나타낼 수 있다. 본 연구는 앞서 살펴본 문헌을 통해 예비 성과항목을 제시하고, 적정성을 판단하기 위해 발주자, 시공회사, 설계사, 연구기관을 포함한 건설 전문가 46명을 대상으로 수행한 설문조사 결과를 근거로 성과항목을 제시하였다(Bae, 2012).

3.1 경제적 성과항목

경제적 성과항목은 소득의 증가, 복지, 고용, 생산성 등의 지역사회의 진전을 위한 경제개발에 필요한 항목이다(VTPI, 2012).

경제적 성과항목은 Table 5와 같이 경제성, 이동성, 접근성의 세 가지 항목에 따른 각각의 세부항목으로 구분되었다. 경제성은 총 교통비용, 인구밀도 및 종사자 수의 세부 항목으로 구성되었다. 이동성은 인터넷 서비스 접속비율, 도보 10분내 공공서비스 수의 세부항목으로 구성되었다. 접근성은 도보, 자전거, 대중교통 이용자 수, 자가용, 대중교통 등의 교통량, 평균화물 이동속도, 평균 통행시간 및 거리, 화물 수송실적, 여객 수송실적의 세부항목으로 구성되었다.

3.2 사회적 성과항목

사회적 성과항목은 공평성, 인간복지, 지역사회 환경의 질, 거주 적합성 등을 포함한 사회적 영향이 미치는 요인이다(VTPI, 2012).

사회적 성과항목은 Table 6와 같이 공평성, 거주적합성, 사회복

지의 세 가지 항목에 따른 각각의 세부항목으로 구분되었다. 교통의 공평성은 부유층, 사회소외계층, 장애인 등의 그룹에 상관없이 교통 서비스의 질이 적용되는 것을 의미하며, 소득대비 교통비용 비율, 1인당 교통사고 비용의 세부항목으로 구성되어있다. 거주 적합성은 교통체계 만족도, 도보 및 자전거 이용비율, 도보통학 학생 비율의 세부항목으로 구성되어있다. 사회복지는 교통 환승 편의성, 사회 소외계층의 통행품질의 세부항목으로 구성되어있다.

3.3 환경적 성과항목

환경적 성과항목은 대기, 수질, 소음 오염, 기후변화, 자원의 소비로 인해 환경에 미치는 영향을 의미한다(VTPI, 2012). Table 7은 환경적 성과항목을 나타낸 것이다.

환경적 성과항목은 오염원, 기후변화, 지역사회 환경의 세 가지 항목으로 구분되었다. 오염원 항목에는 대기 오염물질 배출량, 수자원 오염물질 배출량의 세부항목으로 구성되어있다. 기후변화는 화물 운송에너지 소비, CO₂ 배출량, 재생에너지 재활용의 세부항목으로 구성되어있다. 지역사회 환경은 지역사회 생활의 질, 대체에너지 활용한 교통시설, 대기 및 소음의 건강영향정도, 도로 포장률의 세부항목으로 구성되어있다.

4. 교통시설 인과지도 작성

앞서 살펴본 경제적, 사회적, 환경적 분야의 성과항목을 바탕으로 시스템 다이내믹스를 활용하여 인과지도를 작성하였다. 인과지도의 작성은 경제적, 환경적, 사회적 분야에 대한 각각의 인과지도와 세 분야를 통합한 인과지도 4개로 구분하였다. 작성된 인과지도를 통하여 분야별 성과항목 사이의 관계, 분야에서 분야로 미치는 원인과 결과 관계를 살펴보았다.

4.1 경제적 성과항목 인과지도

Fig. 1은 경제적 성과평가 항목의 인과지도를 나타낸 것이다. 인과지도를 살펴보면 인구밀도 및 종사자 수가 증가할수록 인구의

Table 5. Economic Performance Items

Category	Subcategory	Indicator
Economic performance item	Economic	Total traffic cost
		Population and workers
	Mobility	Internet service percentage
		Public service within 10 minutes
	Accessibility	Usage rate of walk, bicycle, public transportation
		Volume of traffic (car, public transportation etc)
		Average freight rate of movement
		Average travel time and distance
		Freight transport record
		Passenger transport record

Table 6. Social Performance Item

Category	Subcategory	Indicator
Social performance item	Fairness	Traffic price to income ratio
		Per cost of the traffic accident
	Livability	Satisfaction of traffic system
		Use walk and bicycle rate
		Commute to school by walk
	Social welfare	Convenience of transit transfer
Quality of pass in disadvantaged		

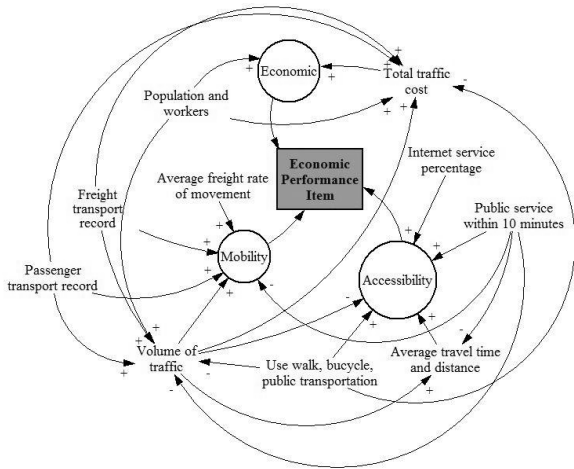


Fig. 1. Causal Map for Economic Performance

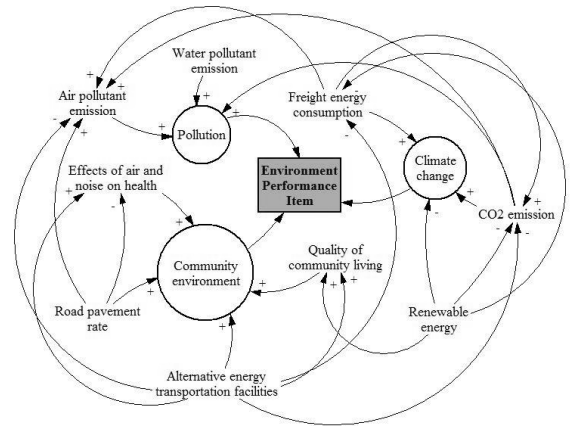


Fig. 3. Causal Map for Environmental Performance

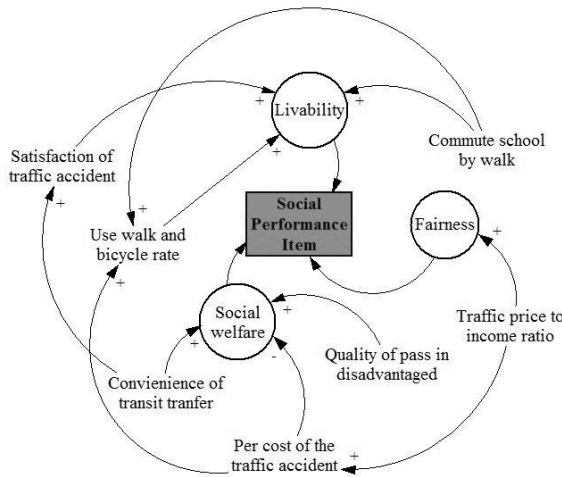


Fig. 2. Causal Map for Social Performance

이동이 많고 이동거리에 따른 차량의 사용이 증가하여 교통량의 증가영향을 미친다. 하지만 도보, 자전거, 대중교통 이용자 수, 도보 10분내 공공서비스 수가 증가할수록 이동이 편리해지고 차량 사용량이 줄어들어 교통이 원활해지므로 교통량에 감소영향을 미친다.

총 교통비용은 교통 부문에서 내적·외적으로 사용되는 모든 비용을 의미한다. 도보, 자전거, 대중교통 이용자 수, 교통량의 교통 지체 및 혼잡 비용인 외부비용의 증가와 인구밀도 및 종사자 수의 가구비용, 여객 수송실적, 화물 수송실적의 수송물류비로 인한 내부비용의 증가는 총 교통비용의 증가영향을 미친다.

4.2 사회적 성과항목 인과지도

Fig. 2는 사회적 성과항목의 인과지도를 나타낸 것이다. 인과지도를 살펴보면 교통환승 편의성, 사회소의 계층의 통행품질이 양질

의 서비스와 품질을 기본으로 이용자에게 높은 만족도 수준을 통해 사회복지의 향상에 영향을 미친다.

도보 통학 학생 비율, 도보 및 자전거 이용 비율, 교통체계 만족도는 주거 중심으로 이동을 편리하게 한다. 또한 도보 및 자전거 시설 운영을 통해 자전거 또는 도보 이용자의 교통위험성을 최소화 하여 주거환경을 향상시켜 거주 적합성 증가에 영향을 미친다.

4.3 환경적 성과항목 인과지도

Fig. 3은 환경적 성과평가 항목의 인과지도를 나타낸 것이다. 인과지도를 살펴보면 도로시설의 건설 및 유지 관리에 사용되는 장비, 도로 이용차량 연료소비로부터 배출되는 오염 물질로 인해 대기 및 수질오염 물질의 배출량이 증가한다.

이산화탄소, 메탄과 같은 유해가스 배출이 많은 차량의 화석 연료대신 동식물을 이용한 바이오 연료, 전기, 수소자동차를 통한 대체에너지 활용한 교통시설, 재생 에너지 재환용을 통한 친환경 에너지는 지역사회 환경에 긍정적인 영향을 미친다. 또한 이는 지역사회 생활의 질을 향상시키고, 대기 및 소음이 사람, 동식물 등 생명체의 건강에 미치는 영향을 감소시킨다.

4.4 통합적 성과항목 인과지도

Fig. 4는 경제적, 사회적, 환경적 성과항목의 통합적인 인과지도를 나타낸 것이다. 인과지도를 살펴보면 경제적 성과항목의 화물 수송실적, 여객 수송실적, 교통량이 증가할수록 환경적 성과항목인 CO₂ 배출량, 에너지 소비에 증가 영향을 미친다.

환경적 성과항목의 대기 및 소음의 건강영향정도, 대체 에너지 활용한 교통시설이 증가할수록 사회적 성과항목의 교통체계 만족도가 높아진다.

경제적 성과항목의 도보 10분내 공공서비스 수의 증가는 이용자

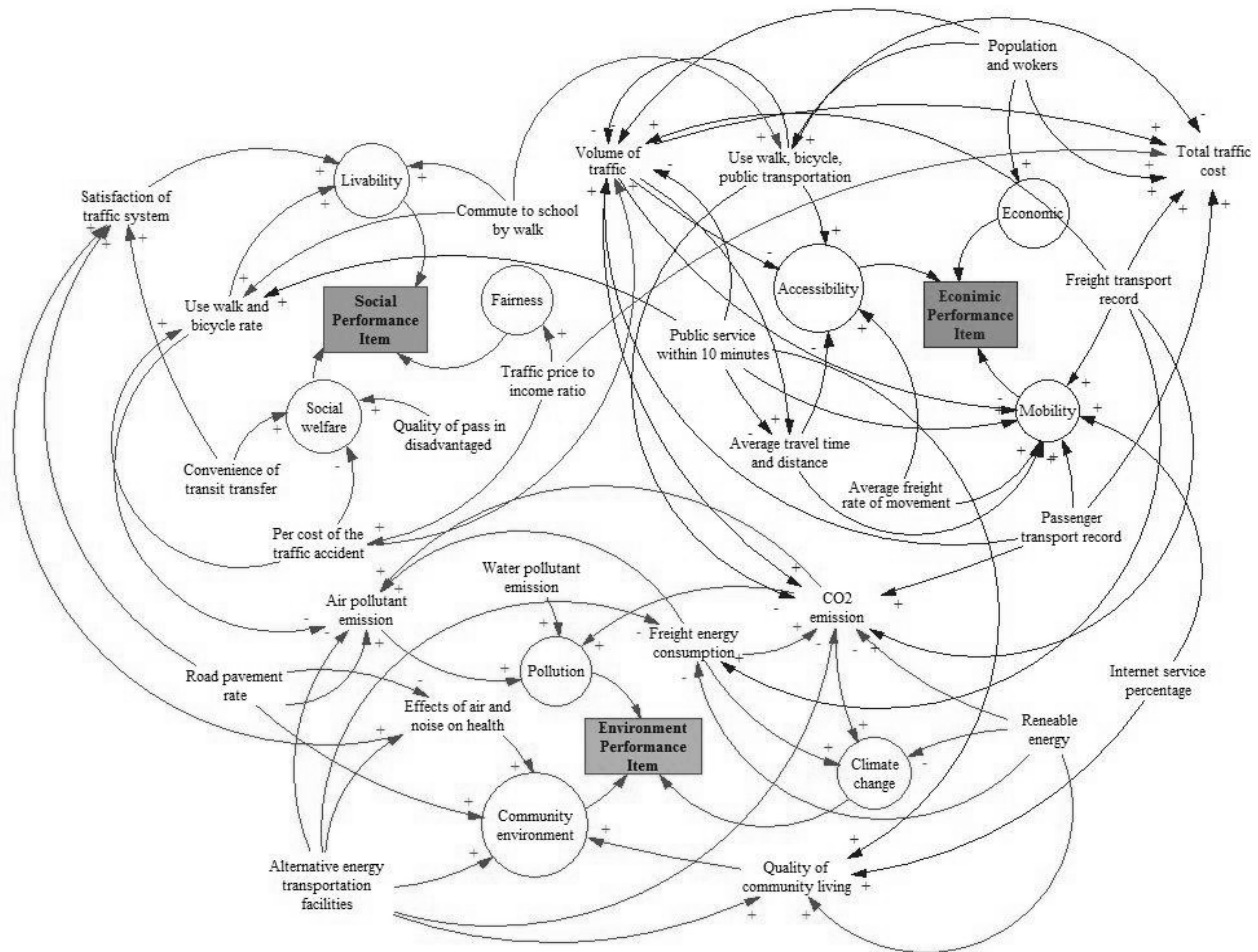


Fig. 4. Causal Map for Sustainability Metrics of Transportation Facilities

들의 이동이 가깝고 차량이용을 감소시킴으로 인해 사회적 성과항목의 도보 및 자전거 이용 비율에 증가영향을 미친다.

각 분야의 항목 및 세부항목의 통합된 인과지도를 통하여 교통시설물의 지속가능한 성과를 비교평가하기 위해서는 어느 한 분야에 치우친 성장이 아닌 세 분야를 모두 고려한 통합적인 성장이 필요하다.

5. 결론

본 연구는 교통시설물의 지속가능한 성과를 비교평가하기 위한 성과항목을 제시하고 시스템 다이내믹스를 활용하여 항목사이의 인과관계를 나타내었다. 이를 위해 기존 연구문헌 고찰을 통하여 국외의 교통지표 사례를 조사하였다. 그리고 문헌고찰을 토대로 건설 전문가 설문조사를 통해 선호 항목을 선정하고 적정성이 판단된 기존 수행연구의 성과 항목을 이용하여 인과지도를 작성하였다. 인과지도 작성을 통해 성과 항목 사이의 인과관계를 파악하였다.

성과 항목은 경제적, 사회적, 환경적 분야로 구분하였으며, 각 분야별 항목 및 세부항목으로 구성되었다.

기존 수행 연구를 통해 제시된 항목은 경제적 성과항목 10개, 사회적 성과항목 7개, 환경적 성과항목 9개로 구성되었다. 시스템 다이내믹스를 통한 인과지도 작성 결과 각 분야별 항목 및 세부항목은 서로 다른 분야에 영향을 미친다. 이는 교통시설물의 성과를 비교평가하기 위해서는 경제적, 사회적, 환경적 요인을 모두 고려한 통합적인 시스템이 필요함을 의미한다.

본 연구를 통해 제시된 인과지도는 도로 뿐만 아닌 항만, 철도, 항공 등의 다른 교통시설물의 지속가능성의 성과를 비교평가하기 위해 이용 할 수 있으며, 지속가능한 교통시설물의 영향요인 사이의 관계를 쉽게 이해할 수 있는데 도움이 된다.

그러나 인과지도를 통해 살펴본 항목의 인과관계는 국외 사례 중심의 문헌을 통한 이론적 고찰과 건설 전문가를 대상으로 실시한 일반적인 주관적 설문조사를 통해 제시된 성과 항목 사이의 인과관계를 나타낸 것이다. 이에 추후 단위로 측정하여 수로 나타내기

위한 주관적인 데이터 구축이 필요하며 우리나라 실정에 맞는 항목 선정을 위한 추가 연구가 수행되어야 할 것이다.

References

- Bae, J. H. (2012). *Development of performance evaluation items for sustainable transportation facilities*, Master's Thesis, Hanbat National University, Daejeon, Korea (in Korean).
- Bae, J. H. and Park, H. S. (2012). "Applicability of green transportation performance index in the construction industry." *Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 12, No. 5, pp. 470-477 (in Korean).
- Committee on Green Growth (CGG) (2009). *National strategy*, Available at: www.greengrowth.go.kr (Accessed: June 10, 2011).
- EPA, "Indicators of the environmental impacts of transportation." US EPA, Washington D.C., USA.
- Kim, K. C. (2007). *System dynamics using vensim*, Seoul Economic and Management, Seoul (in Korean).
- Kostat (2011). *Statistics korea*, Available at: www.kostat.go.kr (Accessed: May 15, 2011) 2011 (in Korean).
- Ministry of Transport (2011). *Transport indicators*, Available at: www.transport.govt.nz/ourwork/tmif (Accessed: May 13, 2011).
- VTPI (2012). *Well measured developing indicators for sustainability and livable transport planning*, Victoria Transport Institute, Victoria, Canada.