

지속가능한 고속철도망 계획을 위한 투자우선순위 선정에 관한 연구 : 다원-속성 효용이론을 이용하여

Priority Decision Making for Planning A Long-term Sustainable High-speed Rail Network using Multi-Attribute Utility Theory

박진경* · 엄진기* · 이 준**

Jinkyung Park · Jin Ki Eom · Jun Lee

Abstract With the growing international consensus regarding sustainable development of transportation, the plan of transportation infrastructure needs to meet various requirements toward enhancing environmental conditions. Accordingly, the upcoming long-term plan of high-speed rail network has to be reflecting the sustainability of transportation systems. In this paper, we demonstrate an application of methodologies based on multi-attribute utility theory for determining priorities of sustainable high-speed rail investment. The proposed methodologies identify indicators for sustainable transportation systems such as economic, environmental, and social ones and then, evaluate priority for planning a long-term sustainable high-speed rail network by comparing the relative importance among indicators. This will help transportation agencies to prioritize high-speed rail investment toward sustainable transportation systems.

Keywords : Sustainable Development, Multi-Attribute Utility Theory(MAUT), Decision Making, High-Speed Rail

요 지 본 연구는 중장기적 고속철도망 계획을 위한 투자우선순위를 전통적인 평가기법에서 벗어나 지속가능한 교통의 관점에서 이를 분석할 수 있는 방법론을 제안하고, 다원-기준 의사결정기법 중의 하나인 다원-속성 효용이론(MAUT)을 이용하여 이를 분석하였다. 지속가능한 교통지표는 경제지표, 사회지표 및 환경지표로 구분하였으며, 지속가능한 고속철도망 지수 분석 결과 경부와 호남 고속철도 이후에 건설되어야 할 우리나라의 고속철도망 노선축의 투자우선순위는 동서축, 남해축, 서해축 등의 순서로 분석되었다.

주 요 어 : 지속가능개발, 다원-속성 효용이론(MAUT), 의사결정이론, 투자우선순위, 고속철도

1. 서 론

현재 우리나라는 철도 투자를 효율적이고 체계적으로 수행하기 위하여 철도건설법 제4조에 의거한 법정계획인 『국가철도망 구축계획(2006~2015)』을 수립하여 이를 고려한 철도투자사업을 추진하고 있다. 국가철도망 구축계획의 목표는 전국적으로 고속화¹⁾된 국가 철도망을 확충하고, 주요 대도시를 기점으로 목적지까지 편도 기준 3시간 이내로 이동

가능한 반나절 생활권을 구축하며, 접근성을 개선²⁾하여 안전하고 친환경적이며 쾌적한 철도망을 구축하는 데 있다³⁾. 전국적으로 고속화된 국가 철도망이란 오송역을 중심으로 경부 및 호남고속철도가 국가 철도망의 대골격을 구성하고, 남북 6개축과 동서 6개축이 경부 및 호남고속철도와 연계하여 고속화된 간선철도망을 구성하는 X자형(2+6×6) 철도망을 의미한다. 이러한 X자형 국가철도망을 완성하기 위하여 정부는 경부 및 호남고속철도 건설사업⁴⁾을 조속히 마무리하고, 기존선을 개량하여 고속화하거나 신선을 건설하여 고속철도 축과의 연계성을 높이도록 하고 있다.

이러한 철도부문을 비롯한 공공투자사업에 있어 가장 중요한 현안사항 중의 하나는 한정된 자원 하에서 객관적인 기준과 평가 방법으로 사업의 투자우선순위와 이에 따른 단계

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 철도정책물류연구본부, 교통계획연구팀

E-mail : jinny23138@dreamwiz.com

TEL : (031)460-5463 FAX : (031)460-5499

* 한국철도기술연구원, 철도정책물류연구본부, 교통계획연구팀

** 한국철도기술연구원, 철도정책물류연구본부, 교통계획연구팀

별 사업추진계획을 선정하는 것이라 할 수 있다. 그러나 상위 계획 및 관련계획 상에는 소득증가에 따른 철도 서비스 고급화 요구가 증대되고 있음에도 불구하고 합리적이고 장기적인 장래 국가 고속철도망 구축방향은 마련되어 있지 않은 상황이다. 다만 국가철도망 구축계획 상에 정부와 호남고속철도, 동서축 고속철도(서울~속초), 서해축 고속철도(인천~여수), 남해축 고속철도(부산~목포), 동해축 고속철도(부산~속초), 그리고 중앙축 고속철도(서울~경주)가 장래 고속철도망으로써 개괄적으로 제시되어 있을 뿐이다.

더욱이 기존 철도망의 투자우선순위 평가항목은 경제적 타당성으로 대표되는 투자 효율성과 AHP 분석에 의한 정책적 타당성으로 획일화 되어 있으며, 이중 대부분의 철도망 계획에 가장 큰 영향을 미치는 항목은 B/C 비율로 대표되는 투자 효율성 측면이라 할 수 있다. 장래 국가 철도망, 특히 국가 철도망의 대골격이 되는 고속철도망의 구축단계에 있어 투자우선순위는 투자 효율성뿐만 아니라 경제적, 사회적, 환경적 요소 등 다양한 측면을 종합적으로 고려하여 객관적이고 합리적으로 선정될 필요성이 있다.

이에 본 연구는 우리나라의 중장기적 고속철도망 계획과 투자우선순위를 전통적인 평가기법에서 벗어나 지속가능한 교통(sustainable transportation)의 관점에서 이를 분석할 수 있는 방법론을 제안하고, 이를 활용하여 5개 고속철도 노선축의 투자우선순위를 선정하는데 그 목적이 있다. 철도망 계획을 포함한 전반적인 교통계획단계에서는 이해당사자들의 다양한 목적과 이해관계를 종합적으로 고려함으로써 상충되는 다양한 목적을 합리적으로 충족시킬 수 있도록 평가체계가 구축되어야 한다. 현재 우리나라에서는 교통사업의 대안을

대부분 비용편익분석과 AHP 분석에 의한 정책적 분석으로 평가하고 있는 현 시점에서 최근 대두되고 있는 지속가능한 교통 측면에서의 대안 평가 방법을 고찰하고, 이를 이용하여 고속철도 노선축 대안을 평가하고 투자우선순위를 선정하는 것은 큰 의의가 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 먼저 제2장에서 지속가능한 개발과 지속가능한 교통에 대한 정의를 내리고, 제3장에서 다원-속성 효용이론(multi-attribute utility theory)을 이용하여 지속가능한 고속철도망 계획을 위한 투자우선순위를 분석할 수 있는 방법론을 제시한다. 제4장에서는 지속가능한 교통의 측면에서 고속철도망 계획을 위한 투자우선순위를 분석한 결과를 제시하며, 마지막으로 제5장에서 연구결과를 요약하고 향후 연구 과제를 제시한다.

2. 지속가능한 교통

2.1 지속가능한 교통의 정의

지속가능한 개발(sustainable development)이라 함은 광의로써 “현 세대의 필요성 때문에 미래 세대의 역량을 손상시키지 않는 개발”로 정의 된다⁵⁾. 지속가능성이란 더 나은 미래를 창조하고 영속적인 유산을 물려주려는 인간의 바람을 반영한 것으로 인간 활동의 통합된 특성을 강조한다. 따라서 지속가능한 계획은 사회전체의 장기적인 목표를 고려해야 한다.

그렇다면 교통 부문의 지속가능성이란 무엇이며, 어떻게 측정되는가? 현재 표준적인 지속가능한 교통에 대한 정의는 내려져 있지 않지만 [그림 1]에서 보는 바와 같이 지속가능한

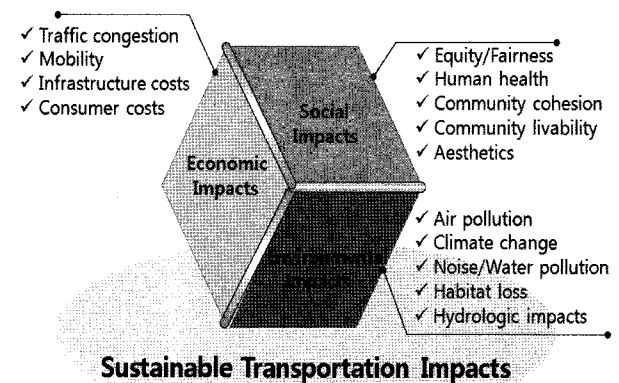


Fig. 1. Sustainable transportation impacts

- 1) 고속철도는 설계속도 370km/hr 이상, 주요 간선철도는 설계속도 200km/hr 이상으로 고속화하여 타 교통수단과의 속도 경쟁력을 강화시키고자 한다. 건설교통부(2006) 참조.
- 2) 주요 철도역에 30분 이내 접근할 수 있도록 철도중심의 연계교통체계를 구축하고, 고속철도 서비스의 수혜지역을 확대시키기 위해 고속철도역 중심의 연계교통체계를 확충한다.
- 3) 『국가철도망 구축계획(2006~2015)』의 상위계획은 20년 단위의 최상위 장기종합교통계획이라 할 수 있는 『국가기간교통망 구축계획(2000~2019)』이다. 2007년 현재 국가기간교통망 구축계획은 『국가기간교통망 수정계획(안)』이 추진 중에 있으며, 글로벌 시대에 대응하는 교통기반시설의 확보와 제도 정비, 효율적이고 지속가능한 종합교통체계 구현 및 교통기술개발과 교통·물류산업의 교통정책 강화를 목표로 한다. 한국교통연구원(2007) 참조.
- 4) 먼저 경부고속철도(서울~부산, 448.8km)는 1단계 사업(서울~동대구, 281.6km)이 2004년 4월 1일에 개통되었으며, 2단계(동대구~경주~부산 및 대전·대구 도심구간, 167.2km) 사업은 2007년 현재 건설 중에 있으며, 2010년 12월에 완공될 예정이다. 다음으로 호남고속철도(오송~목포, 230.9km)는 2005년에 기본계획 수립영역이 완료되었으며, 1단계 사업(오송~광주)은 2015년에, 2단계 사업(광주~목포)은 2017년에 완공될 예정이다.

- 5) Jeon and Amekudzi(2005)에 따르면, Brundtland Commission에서 이와 같이 정의한 개념이 가장 널리 이용되고 있다고 하였다. “development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs”.
- 6) Litman(2007)에 따르면, 지속가능한 교통은 경제적, 환경적으로 그리고 사회적으로 잘 갖춰진 교통 시스템의 영향으로 정의된다.

교통 시스템에는 보편적으로 고려되는 필수적인 3가지 요소가 있다. 이러한 지속가능한 교통 시스템의 필수적인 3가지 요소, 즉 경제적, 환경적 그리고 사회적 요소의 영향은 지속가능한 교통 지표를 이용하여 측정할 수 있다.

2.2 지속가능한 교통 지표

지속가능한 교통 지표에 대한 연구는 대표적으로 Litman(2007)과 Black(2000)을 들 수 있는데, 먼저 Litman은 <표 1>에서 보는 바와 같이 개별통행자의 특성과 전체 교통 시스템의 성과를 함께 포함하는 권장 지표를 제안하였다. Litman이 제안한 권장 지표는 첫째, 지속가능한 교통의 경제적 효과를 측정하는 경제지표(economic indicators)로 인당 이동성(통행거리 또는 통행 수)과 수단분담⁷⁾, 평균통행시간과 정시성, 인당 혼잡비용과 통행비용 등을 제안하였다. 둘째, 사회적 효과를 측정하는 사회지표(social indicators)로 인당 사고 사상자수, 약자를 위한 교통서비스의 질, 소득대비 교통비 지불능력, 그리고 교통 서비스 만족도 등을 제안하였다. 마지막으로 환

경지표(environmental indicators)는 지속가능한 교통의 환경적 효과를 측정하는 것으로 수단별 인당 에너지 소비량과 대기오염물질 배출량, 인당 교통시설 및 대기오염/소음 노출도 등을 제안하였다⁸⁾.

반면 Black은 연료의 석유 의존도, 오염물질 배출량이 대기오염과 인간의 건강에 미치는 영향, 교통사고 사상자수, 교통 혼잡의 영향, 그리고 타 수단의 이용 가능성의 5가지 척도를 고려하여 지표를 제안하였다.

본 연구는 고속철도 노선축별 투자우선순위를 지속가능한 교통의 관점에서 분석하기 위하여 Litman이 제안한 권장 지표를 이용하여 교통 지표를 선정한다. Litman의 지속가능한 교통 지표는 지속가능한 교통 시스템에서 일반적으로 고려되고 있는 필수적인 3가지 요소, 즉 경제적, 환경적, 사회적 요소를 적절하게 나누어 잘 정의하고 있으며, Black보다 보다 광범위한 성과지표를 제시하고 있기 때문이다. 또한 개별통행특성을 반영하는 비집계 접근법을 이용하게 되므로 개별 링크 수준에서의 의사결정을 가능하게 해준다는 장점이 있다.

Table 1. Sustainable transportation indicators

	Economic	Social	Environmental
Important	<ul style="list-style-type: none"> Per capita mobility Mode split Average travel time Reliability Average freight transport speed Per capita congestion costs Transport expenditure 	<ul style="list-style-type: none"> Per capita crashes and fatalities Quality for disadvantaged people Affordability Overall satisfaction rating of transport system Universal design 	<ul style="list-style-type: none"> Per capita energy consumption, by mode Energy consumption Per capita air pollution Per capita land devoted transport facilities Air and noise pollution and health damages
Helpful	<ul style="list-style-type: none"> Relative transport quality Number of public services 	<ul style="list-style-type: none"> Health Community cohesion Degree culture resources 	<ul style="list-style-type: none"> Community livability ratings Water pollution Habitat preservation Use of renewable fuels
Specialized	<ul style="list-style-type: none"> Change in property values 	<ul style="list-style-type: none"> Housing affordability 	<ul style="list-style-type: none"> Heat island effects

Data: Litman(2007).

7) 승객교통의 경우 승용차와 비-승용차간 수단분담, 또는 대중교통의 수단분담을 말하며, 화물교통의 경우 트럭, 철도, 항만, 항공 간 수단분담을 말한다.

3. 지속가능한 고속철도망 계획을 위한 투자우선순위 선정 방법론

교통사업의 전통적인 투자 평가는 주로 재정적·경제적 측면을 고려한 단일-목적 의사결정기법(single-objective decision making)에 의거하여 수행되며, 가장 일반적인 단일-목적 의사결정기법은 교통사업의 비용과 편익을 금전화하여 고려하는 방법이다. 단일-목적 의사결정기법으로 교통사업의 대안을 평가하는 방법은 크게 비용편익분석, 순현재가치법, 내부수익률법 등이 있다⁹⁾. 일반적으로 고려되는 편익¹⁰⁾은 이용자

8) Jeon and Amekudzi(2005)와 Jeon et al.(2007)의 경우 북미, 유럽, 호주 및 뉴질랜드를 포함한 전 세계의 지속가능성 지표에 대한 정의를 고찰한 다음 경제지표, 사회지표, 환경지표에 더해 교통효과성 지표(transportation system effectiveness-related indicators)를 추가로 고려하여 4가지의 주요 지속가능한 교통 지표를 제시하였다. 이들 연구는 Litman의 경제지표를 교통효과성 지표와 일반적인 경제지표로 보다 세분한 것으로 판단된다.

9) 전 세계적으로 각 국가마다 서로 다른 사업기간과 사회적 할인율을 적용하고 있는데, 비용-편익비율을 사용하는 우리나라와 일본 및 독일을 제외하고 순현재가치가 주요 기준 항목이 되고 있다. Hayashi and Morisugi(2000) 참조. 우리나라의 경우 도로와 철도 부문의 사업기간은 30년, 사회적 할인율은 5.5%를 이용하고 있다.
 10) 모든 국가에서 이러한 네 가지 편익을 일반적으로 사용하고 있으며, 영국의 경우 토지이용과 지역개발효과 편익을 포함시키고 있다. 그러나 편익의 상대적인 중요도는 각 국가마다 매우 다르게 평가하고 있는데, 영국의 경우 통행시간 절감편익과 사고비용 절감편익을, 프랑스의 경우 교통투자사업의 지역개발효과 편익을 중시한다. 한편 일본은 환경측면을 정량적이고 정성적인 요인을 고려하려고 하며, 독일은 정지적인 요인까지도 평가하고 있다. Hayashi and Morisugi(2000) 참조.

통행시간 절감편익, 차량운행비용 절감편익, 대기오염비용 절감편익, 그리고 사고비용 절감편익이며, 비용은 자본비용, 유지관리비용, 차량비용 등을 고려한다. 비용편익분석과 같은 금전적인 평가방법은 하나의 수치로 제시되기 때문에 명백하고, 논의하기 쉬운 반면 수량화 할 수 없거나 금전적인 가치로 전환되지 않는 교통사업의 영향을 분석에 포함시킬 수 없다는 단점이 있다. 또한 차후에 건설되는 대안을 고려하지 않고 현재 건설되는 대안을 가지고 투자우선순위를 결정하게 되는 오류를 범하기 쉽다¹¹⁾.

대안을 평가하기 위한 수학적 의사결정방법은 이 외에 퍼지 의사결정기법(Fuzzy decision making), 베이시안 의사결정기법(Bayesian decision making), 그리고 다원-기준 의사결정기법(multi-criteria decision making)을 들 수 있다. 교통계획과정은 다양한 목적과 이해관계를 반영하고 있기 때문에 수많은 상충되는 목적들을 평가하기 위해서는 적절한 기법이 필요하다. 더욱이 지속가능한 교통 측면에서 대안을 평가하고자 할 때 상충되는 목적을 가진 대안을 동시에 평가할 수 있어야 한다. 비용-편익분석과 같은 단일-목적 의사결정기법은 교통계획과정에서 발생하는 여러 복잡한 문제를 적절하게 다루지 못한다는 한계가 있다.

이에 본 연구는 우리나라의 지속가능한 고속철도망 계획과 투자우선순위 선정을 위하여 다원-기준 의사결정기법을 이용하여 고속철도 노선축의 상대적인 중요도를 평가하고자 한다.

3.1 다원-속성 효용이론

다원-기준 의사결정기법¹²⁾은 AHP(analytical hierarchy process), 공조분석법(concordance analysis), 목표달성도 행렬법(goal-achievement method), 다원-속성 효용이론(multi-attribute utility theory, MAUT), outranking method 등이 있으며, 이 중에서 가장 일반적으로 이용되는 다원-기준 의사결정기법은 다원-속성 효용이론과 AHP, outranking method이다.

이러한 다원-기준 의사결정기법 중 본 연구는 다원-속성 효용이론을 이용하여 고속철도 노선축별 투자우선순위를 평가하고자 한다¹³⁾. 다원-속성 효용이론을 이용하면 양적, 질적 지속가능성 지표를 의사결정과정 상에 광범위하게 포함시킬 수 있으며, 교통사업의 대안을 평가할 때 비교적 단순하고, 직

관적이며, 가중치를 할당할 수 있다는 장점이 있기 때문이다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 개별통행특성을 반영하는 비집계 접근법을 이용하게 되면 개별 링크 수준에서의 의사결정을 가능하게 해준다.

MAUT의 기본적인 가설은 대안을 선택하는 의사결정문제에 효용(utility)이 존재하고, 의사결정자는 실행가능한 대안 집합에서 효용을 극대화한다는 것이다. 각 대안의 효용값은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$U_j = \sum_{k=1}^{n_k} w_k n_{kj} \tag{1}$$

- 여기서 U_j : 대안 j 의 효용
- w_k : k 번째 기준의 가중치
- n_{kj} : 대안 j 의 정규화시킨 기준 k 값

MAUT는 각 대안에 가중치(weights)를 부여하여 집계하는 과정을 거치는데, 가장 간단하고 널리 이용되는 집계 방법은 선형 가중 합(weighted linear average)을 취하는 것이다. Zietsman et al.(2006)에 따른 MAUT는 [그림 2]와 같은 단계로 요약된다.

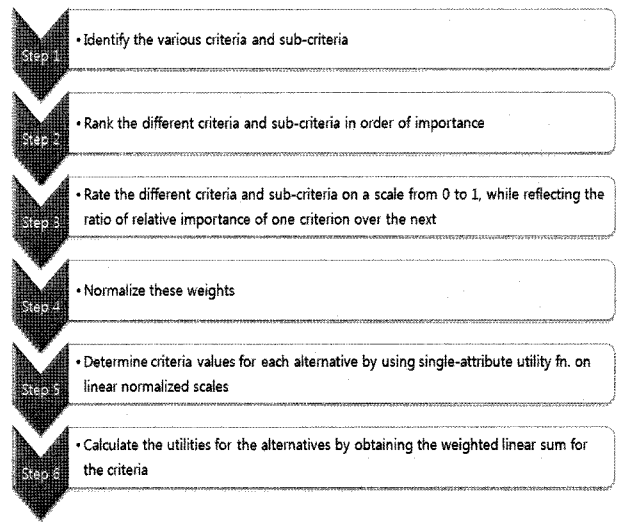


Fig. 2. the MAUT approach

3.2 정규화

성과 척도와 상대적인 중요도로 매겨진 속성의 순위는 각기 다른 단위를 가지기 때문에 정규화하여야 한다. 속성 값이 단조 증가하는 효용함수라고 가정하면, 식 (2)의 선형 형태와 식 (3)의 벡터 형태로 취할 수 있다. 정규화된 성과 척도 또는 속성의 순위, r_{ij} 는 0과 1사이의 값을 갖는다.

11) Chu and Polzin(2000) 참조.

12) 임강원(1997)과 Zietsman et al.(2006) 참조.

13) Zietsman et al.(2006)에 따르면, 순현재가치법과 가중치를 제외한 MAUT, 가중치를 포함한 MAUT를 이용하여 Tshwane, South Africa, Houston, 및 Texas 교통축의 지속가능한 교통 효과를 분석한 결과 NPW 접근법은 결과가 상당히 다른 반면 MAUT 접근법은 두 가지 방법이 거의 유사하다고 하였다. 또한 MAUT에 의거한 방법이 가장 최선의 결과를 나타내었다고 결론지었다.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^*}, \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$$

여기서 x_j^* : j 번째 속성의 최대값

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$$

3.3 가중치 산정

다음으로 각 성과 척도의 가중치를 산정하는 방법은 가장 간단한 방법인 선호도 비교를 통한 속성 순위법(attribute ranking method)을 이용하여 도출한다¹⁴⁾. 속성을 비교하여 가장 중요한 속성에 1을 부여하고, 가장 중요하지 않은 속성에 n 을 부여하면, 성과 척도의 가중치는 다음과 같이 도출된다.

$$w_j = \frac{1/r_j}{\sum_{k=1}^n 1/r_k} \quad (4)$$

여기서 r_j : j 번째 속성의 순위

3.4 지속가능한 고속철도망 지수 산정

식 (2) 또는 식 (3)를 이용하여 정규화시킨 성과 척도는 식 (4)에 제시된 가중치를 이용하여 지속가능한 고속철도망 지수(index)로 집계할 수 있다. 가중치를 이용하는 것은 어느 정도의 주관성이 분석에 개입되기 때문에 논쟁의 여지가 있으나 여러 가지 기준을 상대적인 중요도에 따라 할당하는 중요한 도구가 될 수 있다. 이는 차후에 민감도 분석을 수행할 수 있다.

이와 같이 선정된 고속철도 노선축에 대해 식 (5)에 제시된 지속가능한 지수를 집계하여 산출한 다음 지속가능한 교통 측면에서 고속철도 노선축의 상대적인 투자우선순위를 분석할 수 있다.

$$I_s = N_e W_e + N_s W_s + N_f W_f \quad (5)$$

여기서 I_s : 지속가능한 고속철도망 지수

N_e, N_s, N_f : 경제지표, 사회지표, 환경지표에 대한 정규화된 기준값

W_e, W_s, W_f : 각 지표의 가중치

14) Yoon and Hwang(1995) 참조

4. 지속가능한 고속철도망 계획을 위한 투자우선순위 선정 결과

4.1 고속철도 노선축 대안의 설정

본 연구에서 지속가능한 고속철도망 계획을 위해 고려한 고속철도 노선축은 [그림 3]에서 보는 바와 같이 국가철도망 구축계획 상에 제시된 동서축 고속철도(서울~속초), 서해축 고속철도(인천~여수), 남해축 고속철도(부산~목포), 동해축 고속철도(부산~속초), 그리고 중앙축 고속철도(서울~경주)이다.

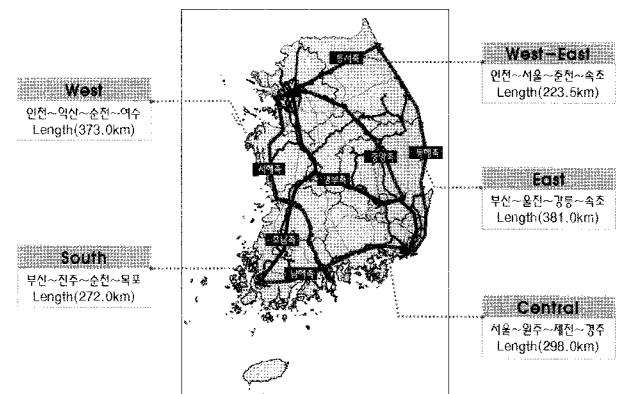


Fig. 3. High speed rail alternatives

4.2 지속가능한 고속철도망 계획을 위한 지표의 선정

제2장 제2절에서 제시한 일반적인 지속가능한 교통 지표로부터, 본 연구는 우리나라의 지속가능한 고속철도망 계획을 위한 교통 지표를 경제지표와 사회지표 및 환경지표로 설정하였다. 지속가능한 고속철도망 계획을 위해서는 경제적 측면과 환경적 측면, 그리고 사회적 삶의 질을 모두 포함해야 하기 때문이다.

첫째, 지속가능한 고속철도망의 경제지표는 교통 혼잡과 관련된 이동성 향상 여부를 측정하며, 통행자의 지불능력을 극대화 시키고 교통지출을 최소화 하는지 여부를 측정한다. 둘째, 지속가능한 고속철도망의 환경지표는 온실가스 배출량과 오염물질 배출량 감소를, 셋째, 사회지표는 사회적 형평성과 교통안전 증대, 그리고 고속철도망 건설로 인한 지역경제 개발 촉진 여부 등 전반적인 삶의 질을 포함한다.

4.3 지속가능한 고속철도망 계획을 위한 목표와 성과 척도의 선정

지속가능한 교통 지표의 목표(goals)는 성과 척도(performance measures)를 이용하여 정량화할 수 있으며, 성과 척도는 지속가능성을 적절하게 효과적으로 평가할 수 있도록 설정되어야

한다. 구체적인 지속가능한 고속철도망 평가를 위한 성과 척도는 <표 1>에서 제시한 Litman의 권장 지표를 참고하여 선정하였으며, <표 2>에 자세히 제시하였다. 이러한 성과 척도를 이용하는 가장 큰 장점은 고속철도 노선축에 대한 비교가 가능하다는 점이다.

<표 2>에서 보는 바와 같이 각각의 목표는 하나 또는 그 이상의 성과 척도로 대표된다. 경제적 지속가능성의 목표는 이동성을 향상시키고, 경제적 효율성과 통행자의 지불능력을 극대화하며, 교통지출을 최소화하는 것으로 설정하였다. 먼저 고속(간선)도로의 평균통행속도(A11)와 인당 차량통행거리(A12)는 이동성과 정시성을 포함한 교통 시스템의 전반적인 효과성을 대변하는 것으로 알려져 있다¹⁵⁾. 평균통행속도는 혼잡에 대한 대리변수로 이용되고 있으나, 엄밀히 말해 이동성은 평균통행속도가 높고, 인당 차량통행거리가 작을 때 높다고 할 수 있다. 또한 인당 총 통행시간(A21)은 짧을수록 경제적으로 효율적이라 할 수 있으며, 인당 총 통행시간이 작을수록 통행자의 지불능력은 극대화된다고 가정하였다. 또한 교통지출 최소화는 연장 당 고속철도 노선축별 공사비(A31)¹⁶⁾를 산정하여 이용하였다.

Table 2. Sustainability goals and performance measures

Sustainability	Goals	Performance Measures
Economic	A1. Improve Mobility	A11. Freeway congestion A12. Vehicle-miles traveled
	A2. Maximize Affordability	A21. Total time spent
	A3. Minimize Costs	A31. Construction costs
Social	B1. Increases Safety	B11. Crash disabilities and fatalities
	B2. Promote Regional Development	B21. Production effects B22. Employment effects B23. Wages effects
	B3. Maximize Equity	B31. Average rail travel time
Environmental	C1. Minimize Greenhouse Effect	C11. CO ₂ emissions
	C2. Minimize Air Pollution	C21. CO emissions C22. NO _x emissions C23. HC emissions

15) Jeon et al.(2007) 참조.

16) 고속철도 노선축별 공사비는 용지비의 경우 철도투자평가편람(2006)에 제시된 평균 용지보상비를 적용하였으며, 공사비와 궤도비, 시스템비를 비롯한 기타 공사비는 호남고속철도 기본계획의 km당 단위비용을 적용하여 산정하였다.

다음으로 사회적 지속가능성의 목표 중에서 교통안전증대는 『도로·철도 부문사업의 예비타당성 조사 표준지침 수정·보완 연구(제4판)』에 제시되어 있는 도로유형별 km당 교통사고 사상자수(B11)를 이용하여 산정한다. 고속철도망 건설로 인해 발생하는 잠재적인 형평성 차이는 우리나라를 15개 권역(17)으로 구분하였을 때, 권역간 철도평균통행시간(B31)으로 평가하여 전국의 모든 권역에 대해 균일한 철도통행시간을 제공할 수 있는지를 측정한다. 경제개발촉진 여부는 도시계획학적 측면을 고려하기 위한 항목으로 고속철도망 건설로 인해 발생하는 생산(B21), 고용(B22) 및 임금유발효과(B23)를 MRIO 모형(다지역 산업연관모형)을 이용하여 계량화해서 구한 수치를 적용한다¹⁸⁾.

마지막으로 환경적 지속가능성의 목표는 온실가스 배출량 최소화과 대기오염물질 최소화로 설정하였으며, 먼저 온실가스 배출량 최소화와 대기오염 최소화는 1일 이산화탄소(CO₂) 배출량과 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x) 및 탄화수소(HC) 배출량이 이용된다. 일반적인 수요분석 패키지에서 도출되는 개별 링크별 대·km에 『도로·철도 부문사업의 예비타당성 조사 표준지침 수정·보완 연구(제4판)』에서 제시하고 있는 차종별·속도별 오염물질 배출계수를 곱한 다음 모두 합산하여 1일 배출량을 산정할 수 있다. 환경적 지속가능성은 이들 온실가스 배출량과 대기오염물질 배출량이 적을 때 더 나은 것으로 나타난다.

4.4 지속가능한 고속철도망 지수 분석 결과

고속도로의 평균통행속도와 차량통행거리 및 인당 차량통행시간과 권역간 철도 평균통행시간은 대표적인 교통수요 패키지인 EMME/3를 이용하여 도출된 결과를 이용하였다. 교통분석에 활용된 여객통행 O/D와 네트워크는 KOTI에서 배포하는 2005년 기준의 전국 지역간 수단통행 O/D와 네트워크이며, 장래 목표년도는 국가교통 DB의 최종목표년도인 2036년으로 설정하였다. 권역간 철도 평균통행시간 산출시 철도 접근시간은 KOTI의 『2005년 전국 지역간 여객통행실태조사』자료에 따라 33.44분으로 가정하였다.

먼저 지속가능한 고속철도망 계획을 위해 선정된 성과척도

17) 제주도를 제외하고 광역시와 도를 기준으로 구분한 권역에 해당함.
18) 최근 교통 기반시설의 건설이 지역의 경제성장에 미치는 영향을 분석하려는 시도가 스페인을 사례로 이루어지고 있다. 교통 기반시설과 관련된 지역경제 파급효과는 주로 총요소생산성 지표를 회귀식으로 추정하는 회계학적 방법이나 생산합수를 계량경제학적으로 추정하는 방법으로 분석된다. Cantos et al.(2005)는 스페인을 사례로 경제성장에 대한 기반시설의 영향을 계량경제학적 방법으로 분석한 결과 교통 기반시설과 관련된 매우 잠재적인 지역경제 파급효과가 존재한다는 분석결과를 제시하였다.

Table 3. Raw values of performance measures

Sustainability	Performance Measures	West-East	West	South	East	Central
Economic	A11. Average freeway speed(km/hour)	78.66	78.73	78.68	78.67	78.67
	A12. Vehicle miles traveled per capita(vehicle · km/person)	5,725	5,734	5,734	5,743	5,751
	A21. Vehicle hours traveled per capita(vehicle · hour/person)	159	174	174	189	189
	A31. Construction costs per length(10 ⁹ won/km)	588	522	538	522	543
Social	B11. Crash disabilities and fatalities(person)	461	470	470	490	491
	B21. Production effects per Construction costs	2.130	2.125	2.097	2.121	2.133
	B22. Employment effects per Construction costs(person/10 ⁹ won)	1.560	1.560	1.561	1.520	1.559
	B23. wages effects per Construction costs	0.438	0.429	0.429	0.434	0.432
	B31. Average rail travel time(hour)	3.76	4.13	4.24	4.28	4.25
Environmental	C11. CO ₂ emissions(g/vehicle · km)	4,966,658	5,153,438	4,603,997	5,579,863	7,166,333
	C21. CO emissions(g/vehicle · km)	328,286	357,382	322,111	353,859	458,116
	C22. NO _x emissions(g/vehicle · km)	368,720	397,795	361,461	392,088	498,820
	C23. HC emissions(g/vehicle · km)	76,254	76,005	66,681	88,348	116,163

Table 4. Weights and normalized values

Sustainability	Performance Measures	Weights	West-East	West	South	East	Central
Economic	A11. Average freeway speed(km/hour)	0.545	0.999	1.000	0.999	0.999	0.999
	A12. Vehicle miles traveled per capita(vehicle · km/person)		1.000	0.998	0.998	0.997	0.995
	A21. Vehicle hours traveled per capita(vehicle · hour/person)	0.273	1.000	0.917	0.917	0.843	0.842
	A31. Construction costs per length(10 ⁹ won/km)	0.182	0.887	1.000	0.969	0.999	0.960
Social	B11. Crash disabilities and fatalities(person)	0.667	1.000	0.981	0.981	0.940	0.939
	B21. Production effects per Construction costs	0.333	0.999	0.996	0.983	0.994	1.000
	B22. Employment effects per Construction costs(person/10 ⁹ won)		0.999	0.999	1.000	0.974	0.998
	B23. wages effects per Construction costs		1.000	0.981	0.981	0.993	0.986
	B31. Average rail travel time(hour)	0.545	1.000	0.910	0.887	0.879	0.885
Environmental	C11. CO ₂ emissions(g/vehicle · km)	0.273	0.927	0.893	1.000	0.825	0.642
	C21. CO emissions(g/vehicle · km)	0.182	0.981	0.901	1.000	0.910	0.703
	C22. NO _x emissions(g/vehicle · km)		0.980	0.909	1.000	0.922	0.725
	C23. HC emissions(g/vehicle · km)		0.874	0.877	1.000	0.755	0.574

의 값은 <표 3>에 제시되어 있으며, 식 (2)에 의해 성과 척도의 상대적인 중요도로 정규화된 값은 <표 4>에 제시되어 있다. 여기서 각각의 세 지표별 가중치는 앞서 설명한 바와 같이 선호도 비교를 통한 속성 순위법으로 도출하였다. 이러한 평가방법은 속성을 비교하여 속성 간 상대적인 중요도, 즉 랭킹을 결정하는 데 도움을 준다.

각각의 노선축별 정규화된 성과척도의 값은 단일속성 효용 함수를 이용하여 지속가능한 고속철도망 지수로 집계되며, 그 결과는 <표 5>에 제시하였다. 지속가능한 고속철도망 지수를 도출할 때 이용된 각 지표의 가중치는 선행연구인 Jeon et al.(2007)에 따라 경제지표를 45%, 사회지표를 35%, 환경지표를 20%로 가정하였다.

<표 5>에서 보는 바와 같이 지속가능한 고속철도망 지수는 동서축이 0.977로 가장 크고, 중앙축이 0.887로 가장 작은 것으로 나타났다. 따라서 지속가능한 고속철도망 계획 측면에서 고속철도 노선축의 투자우선순위는 동서축, 남해축, 서해축 등의 순서라고 판단된다. 세 가지 지표를 개별적으로 살펴보면, 경제지표와 사회지표의 경우 5개 고속철도 노선축중에서 동서축이 각각 0.979와 1.000으로 가장 크고, 환경지표의 경우 남해축이 1.000으로 가장 큰 것으로 나타났다.

선행연구에 따르면 지속가능한 교통지표는 경제지표, 사회 지표 및 환경지표의 3가지 지표로 구분되어 측정되는 것이 일반적이지만 지속가능한 복합지수를 도출할 때 이용되는 각 지표의 가중치는 보편적인 값으로 일치되어 있지 않은 상황

Table 5. Comprehensive sustainability indexes

Sustainability	Economic	Social	Environmental	Comprehensive Sustainability
Weights	45%	35%	20%	100%
West-East	0.979	1.000	0.933	0.977
West	0.977	0.971	0.894	0.959
South	0.971	0.966	1.000	0.975
East	0.956	0.942	0.838	0.927
Central	0.948	0.945	0.651	0.887

Table 6. Sensitivity of comprehensive sustainability Indexes

Weights(%)			Comprehensive Sustainability				
Economic	Social	Environmental	West-East	West	South	East	Central
30	20	50	0.960	0.934	0.984	0.894	0.799
30	30	40	0.967	0.942	0.981	0.904	0.828
30	40	30	0.974	0.950	0.978	0.915	0.857
40	20	40	0.965	0.943	0.982	0.906	0.828
40	30	30	0.972	0.951	0.978	0.916	0.858
40	40	20	0.978	0.958	0.975	0.927	0.887
50	20	30	0.970	0.951	0.979	0.918	0.858
50	30	20	0.976	0.959	0.975	0.928	0.888
50	40	10	0.983	0.967	0.972	0.938	0.917
60	10	30	0.967	0.952	0.979	0.919	0.859
60	20	20	0.974	0.959	0.976	0.929	0.888
60	30	10	0.981	0.967	0.972	0.940	0.917

이며, 전문가 집단의 공개토론을 거친 후 결정되는 것이 일반적이라 할 수 있다.

본 연구는 전문가 집단의 공개토론을 거치지 않고 Jeon et al.(2007)의 가중치를 이용하였기 때문에 가중치에 따른 민감도 분석을 수행하였다. <표 6>에서 보는 바와 같이 민감도 분석결과, 경제지표의 가중치가 커질수록 동서축의 투자우선순위가 남해축보다 높아지며, 환경지표의 가중치가 커질수록 남해축의 투자우선순위가 높아지는 경향이 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

철도부문의 상위계획인 국가기간교통망 구축계획과 국가철도망 구축계획 상에는 고속철도 서비스 수혜지역의 확대 요구가 증가하고 있음에도 불구하고 합리적이고 장기적인 국가 고속철도망 구축방향이 마련되어 있지 않은 상황이다. 더욱이 대부분의 철도망 계획에 가장 큰 영향을 미치는 항목은 B/C 비율로 대표되는 투자 효율성 측면이라 할 수 있다. 장래

국가 철도망, 특히 국가 철도망의 대골격이 되는 고속철도망의 구축단계에 있어 투자우선순위는 투자 효율성뿐만 아니라 경제적, 사회적, 환경적 요소 등 다양한 측면을 종합적으로 고려하여 객관적이고 합리적으로 선정될 필요성이 있다.

이에 본 연구는 중장기적 고속철도망 계획과 투자우선순위를 전통적인 평가기법에서 벗어나 지속가능한 교통의 관점에서 이를 분석할 수 있는 방법론을 제안하고, 다원-기준 의사결정기법 중의 하나인 다원-속성 효용이론(MAUT)을 이용하여 고속철도망의 투자우선순위를 분석하고자 하였다.

먼저 본 연구는 지속가능한 고속철도망 지수를 산정하기 위하여 지속가능한 교통지표를 경제지표, 사회지표 및 환경지표로 구분하고 각 지표의 목표를 설정한 다음 목표를 효과적으로 평가할 수 있는 성과 척도를 도출하였다. 이때 경제지표의 목표는 이동성을 향상시키고, 경제적 효율성과 통행자의 지불능력을 극대화하며, 교통지출을 최소화하는 것으로 설정하였고, 사회지표의 목표는 교통안전과 형평성 증대 및 경제개발 촉진으로 설정하였다. 환경지표의 목표는 온실가스 및 대기오염물질을 최소화하는 것으로 설정하였다. 이러한 지속가능한 고속철도망에 대한 세 가지 지표의 다양한 성과 척도는 그 상대적 중요도에 따라 순위를 매겨서 정규화 시킨 다음 가중치를 곱하여 최종적인 지속가능한 고속철도망 지수를 산정하였다.

경제지표, 사회지표 및 환경지표의 가중치를 Jeon et al.(2007)에 따라 각각 45%, 35%, 20%로 가정하였을 경우, 지속가능한 고속철도망 지수는 동서축이 0.977로 가장 크고, 남해축이 0.975, 서해축이 0.959 순이며, 중앙축이 0.887로 가장 작은 것으로 나타났다. 따라서 지속가능한 고속철도망 계획 측면에서 정부와 호남 고속철도 이후에 건설되어야 할 우리나라의 고속철도망 노선축의 투자우선순위는 동서축, 남해축, 서해축 등의 순서로 분석되었다. 또한 가중치에 따른 민감도 분석결과, 경제지표의 가중치가 커질수록 동서축의 투자우선순위가 남해축보다 높아지고 환경지표의 가중치가 커질수록 남해축의 투자우선순위가 높아지는 경향이 있는 것으로 나타났다.

본 연구는 다음과 같은 몇 가지 한계를 갖는다. 첫째, 각 지표의 성과척도를 Litman(2007)이 제시한 바와 같이 보다 다양하게 측정하여 분석에 반영할 필요가 있으나 이는 향후 연구과제로 남겨두고자 한다. 둘째, 현재 지속가능한 복합지수를 도출할 때 이용되는 각 지표의 가중치가 보편화되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 선행연구의 가중치를 받아들이고, 가중치에 따른 민감도를 분석하였다. 그러나 이는 전문가 집단의 공개토론을 거치거나 설문조사 등을 통하여 보다 객관적인 과정을 거칠 필요가 있다. 셋째, 지속가능성 개념을 보다 효과적으로 다루기 위해서는 교통과 토지이용의 상호 관련성

을 계획과정에 포함시켜야 하나 자료의 부족으로 이러한 상호관계를 포함시키지 못하였다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1999), 『국가기간교통망계획(2000~2019)』.
2. 건설교통부(2006), 『국가철도망 구축계획(2006~2015)』.
3. 임강원(1997), 『도시교통계획-이론과 모형-』.
4. 한국개발연구원(2004), 『도로·철도 부문사업의 예비타당성 조사 표준지침 수정·보완 연구(제4판)』.
5. 한국교통연구원(2007), 『국가기간교통망 수정계획(안)』 공청회.
6. Black, W. R. (2000), "Toward a Measure of Transport Sustainability", Proceedings of the 79th Annual Meetings of the Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C.
7. Cantos, P. M. Gumbau-Albert and J. Maudos (2005), "Transport Infrastructures, Spillover Effects and Regional Growth: Evidence of the Spanish Case", Transport Reviews, Vol.25, pp.25-50
8. Chu, X. and S. E. Polzin (2000), "Timing Rule for Major Transportation Investments", Transportation, Vol.27, pp.201-219.
9. Fuente, A. (2004), "Second-Best Redistribution Through Public Investment: A Characterization, an Empirical Test and an Application to the Case of Spain", Regional Science and Urban Economics, Vol.34, pp.489-503.
10. Hayashi, H. and H. Morisugi (2000), "International Comparison of Background Concept and Methodology of Transportation Project Appraisal", Transport Policy, Vol.7, pp.73-88.
11. Jeon, C. M. and A. Amekudzi (2005), "Addressing Sustainability in Transportation System: Definitions, Indicators, and Metrics", Proceedings of the 84th Annual Meetings of the Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C.
12. Jeon, C. M., A. Amekudzi and R. A. Guensler (2007), "Evaluating Transportation System Sustainability: Atlanta Metropolitan Region", Proceedings of the 86th Annual Meetings of the Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C.
13. Kennedy (2002), "A Comparison of the Sustainability of Public and Private Transportation System: Study of the Greater Toronto Area", Transportation, Vol.29, pp.459-493.
14. Litman, T. (2007), "Developing Indicators for Comprehensive and Sustainable Transport Planning", Victoria Transport Policy Institute Paper 07-2706, Victoria, Canada.
15. Yoon, K. P. and C. L. Hwang (1995), 『Multiple Attribute Decision Making: An Introduction』, Sage Publication Inc.
16. Zietsman, J., R. R. Laurence and S. J. Kim (2006), "Transportation Corridor Decision-Making with Multi-Attribute Utility Theory", Int. J. Management and Decision Making, Vol.7, pp.254-266.

(2007년 11월 21일 논문접수, 2008년 1월 29일 심사완료)