

열차 분리결합 자동화 기술 도입에 따른 편익 추정에 관한 연구

A Study on the Benefits of Introducing an Automatic Train Coupling System

박성희*, 김동성*[†], 이성모*, 오세찬**

Kil-Dong Hong*, Choonja Kim*[†], K.W. Smith*, Jin Gam Park**

Abstract New technologies to improve operational efficiency of rail and convenience of train user are being developed and examined. To develop these new technologies, the economic feasibility should be secured in advance. For feasibility assessment, the types of benefits and the methodologies for benefit calculation analysis should be standardized. In this study, we present the benefits of introducing an automatic train coupling system and suggest how to quantify these benefits. Through case study of Sin-An-San Route, we present the result of benefit of introducing an automatic train coupling system into real rail network.

Keywords : Automatic train coupling system, feasibility, benefit, headway reduction, Sin-An-San route

초 록 최근 철도의 운영 효율성을 향상시키고 이용자의 편의성을 증진시킬 수 있는 새로운 기술들이 다각적으로 검토되고 있다. 이러한 기술들이 개발되기 위해서는 기술 개발 시의 경제적 타당성 확보가 선행되어야 하며, 따라서 기술 개발을 통해 발생할 것으로 기대되는 편익 항목 및 편익 추정방법의 표준화가 필요하다. 본 연구에서는 열차 분리결합 자동화 기술 개발 시 발생 가능한 편익항목을 발굴하고, 이 중 정량적 추정이 가능한 편익항목에 대해 편익 추정 방법을 제시하였다. 또한, 사례 분석을 통하여 국내 철도 노선 중 열차 분리결합 자동화 기술을 적용할 수 있는 대상 노선에 대한 편익 분석 결과를 제시하였다.

주요어 : 열차 분리결합 자동화 기술, 경제적 타당성, 편익 항목, 운행시격 단축, 신안산선

1. 서론

그간 국내 철도는 증가 추세의 이용수요를 충족시키기 위해 노선 확대 및 차량 운행 대수 증가 등을 통해 노선 용량을 증대시키는 양적 성장 방안을 모색해왔다. 이러한 양적 성장의 결과로 2013년 현재 침두시 수도권 도시철도의 열차 최소 시격은 노선별 평균 2~3분으로 운행되고 있으며, 수도권 도시철도의 침두시 노선 용량은 포화에 이른 상태이다.

최근 이러한 국내 철도 산업의 양적 성장의 한계를 극복하고 철도 운영의 효율성 제고 및 이용자의 편의성 증대, 비인기 노선의 형평성 확보 등 철도이용자 및 운영자의 만족도를 향상시키기 위한 여러 가지 새로운 기술들이 다각적으로 검토되고 있다.

† 교신저자: 서울대학교 공과대학 건설환경공학부(dskim716@gmail.com)

* 서울대학교 공과대학 건설환경공학부

** 한국철도기술연구원

이러한 기술들을 연구·개발하기 위해서는 충분한 예산 확보가 이루어져야 하며, 예산 확보를 위해서는 기술 개발 시의 경제적 타당성 확보가 선행되어야 한다. 그러나 현재까지 기술 개발 시의 경제적 타당성을 분석에 필요한 편익 항목 및 편익의 추정 방법이 표준화되어 있지 않아, 새로운 기술 개발에 어려움이 있다.

본 연구는 열차 운영의 효율성을 제고하고 이용자의 편의성을 증진시키기 위한 새로운 기술 중 하나인 열차 분리결합 자동화 기술의 연구·개발의 경제적 타당성 분석을 위해, 기술 개발을 통해 발생할 것으로 기대되는 편익 항목을 발굴하고, 이 중 정량적 추정이 가능한 편익 항목에 대해 그 추정방법을 제시하는 것을 목적으로 한다. 또한 국내 철도 노선 중 열차 분리결합 자동화 기술을 적용 시 효과가 발생할 것으로 판단되는 대상노선으로 광역철도 신안산선을 선정, 사례분석을 통해 편익 분석 결과를 제시하였다.

2. 편익 항목 구성 및 산출 방법

2.1 기술 도입의 효과

열차 분리결합 자동화 기술 도입에 따라 발생할 수 있는 효과로는 두 가지를 꼽을 수 있다. 먼저, 분리결합 자동화 기술 도입에 따라 열차의 시간대별 가변편성운행이 가능해진다. 기존 열차 운행시격을 유지하는 상태로 시간대별 이용수요 맞춤형 열차편성이 가능해짐에 따라, 에너지 효율적인 열차 운영 효과가 발생하게 된다.

다음으로, 분리결합 자동화 기술 도입 시 Y자 형태의 분기노선에서 열차이용자의 환승 노력이 불필요한 직결운행이 가능해진다. 이 경우 동일한 열차 운행비용으로 열차 시격 단축이 가능해 이용자의 대기시간 절감 효과가 발생하게 된다. 이는 곧 통행자의 수단 선택 시 철도의 효용 증가로 이어져 결과적으로 타수단에서 철도로의 수단전환이 이루어지고 철도의 이용수요가 증가한다.

본 연구에서는 열차 분리결합 자동화 기술 도입으로 발생하는 효과로 수요맞춤형 가변편성에 따른 운영비 절감 효과 측면과 분기노선에서의 직결운행에 따른 열차 운행시격 단축 효과 측면으로 구분하여 각 효과별 편익 항목을 구성하였다.

2.2 편익 항목 구성

2.2.1 운영비 절감 효과 측면

열차 분리결합 자동화 기술 개발 시, 열차 간의 분리·결합이 인력소모 없이 자동 시스템에 의해 이루어질 뿐 아니라 이에 소요되는 시간이 역시 감소한다. 이에 따라 열차의 분리·결합이 이전에 비해 상대적으로 자유롭게 이루어져 시간대별 수요 변화에 따른 열차의 탄력적인 가변편성 운행이 가능해진다. 예를 들어, 철두 시 10량 1편성으로 운행되던 열차가 비철두 시 줄어든 수요에 따라 5량 1편성으로 운행될 경우 1회 운행 객차 수의 감소에 따라 기관사의 인건비를 제외한 에너지 측면의 운영비가 감소한다. 또한, 객차의 총 운행 횟수의 감소로 유지관리비 및 감가상각비가 절감되며 이를 통해 철도 운영자의 운영효율성이 향상되는 결과가 도출된다.

이에 따라 본 연구에서는 철도운영자 측면에서 운영효율화에 따른 운영비용 절감편익을 열차 분리결합 자동화 기술 도입에 따른 편익 항목으로 선정하였다.

2.2.2 열차 운행시격 단축 효과 측면

Y자 형태의 분기노선에 열차 분리결합 자동화 기술 도입 시, 분기된 두 개의 지선을 번갈아 운행하던 열차 운행 방식에서 분기된 두 개의 지선을 각각 출발한 열차가 환승역에서 자동으로 결합하여 본선을 직결 운행하는 방식으로 전환된다. 이 경우 기존 분기 지선 이동 시 요구되던 환승이 불필요해져 이용자의 편의성이 향상되며, 지선부분의 열차 운행시격이 기존에 비해 단축되어 이용자의 대기시간 절감 효과가 발생한다.

열차 운행시격 단축으로 이용자의 대기시간이 절감되면 통행자의 수단 선택 시 철도의 효용이 증가하고 결과적으로 타수단에서 철도로의 수단 전환이 이루어져 철도의 이용수요가 증가한다. 이와는 반대로 도로 이용수요는 감소하게 되며, 도로통행 수요 감소에 따라 도로의 통행 속도 등 통행 환경이 개선되어 도로 이용자 편익이 발생하게 된다.

본 연구에서는 열차 분리결합 기술의 도입에 따른 직결 운행의 효과로 지선부분 철도 이용자의 환승이 불필요해짐으로써 발생하는 편익으로 철도 이용자의 편의성 증가 편익을 선정하였다. 또한 지선부분에서의 열차 운행시격이 단축됨에 따라 철도 이용자의 대기시간이 절감되고, 이에 따라 철도 이용수요가 증가하고 타수단(자동차, 버스 등 도로교통) 이용수요가 감소하여 발생하게 되는 편익 항목으로 철도 이용자의 대기시간 절감편익, 타수단 이용자의 통행시간 절감편익, 차량운행비용 절감편익, 환경비용 절감편익, 사고비용 절감편익을 선정하였다. 이 중 철도 이용자의 편의성 증가편익의 경우 정성적 가치로 계량화에 어려움이 있어 편익산출방법 제시에서 제외하였다.

Table 1 The Benefit of Introducing an Automatic Train Coupling System

발생 효과	편익 항목	수혜자	계량화 가능 여부
운영비 절감 효과	운영비용 절감편익	철도 운영자	O
열차 운행시격 단축 효과	대기시간 절감편익	철도 이용자	O
	편의성 증가편익	철도 이용자	X
	운행비용 절감편익	타수단 이용자	O
	통행시간 절감편익	타수단 이용자	O
	환경비용 절감편익	타수단 이용자	O
	교통사고 절감편익	타수단 이용자	O

2.3 편익 산출 방법

2.3.1 운영비용 절감편익

기존 열차 운행시격을 유지하는 상태로 시간대별 이용수요 맞춤형 열차편성이 이루어질

경우, 1회에 운행하는 열차의 객차 수가 감소하게 된다. 객차 수와 관계없이 기관사의 인건비는 동일하므로 기관사의 인건비를 제외한 열차의 운행 비용, 유지관리비 및 감가상각비에 서 비용이 감소하게 되고 감소된 비용을 기술 도입에 따른 편익으로 산출할 수 있다. 본 연구에서는 열차 분리결합 자동화 기술 도입 전의 운영비용과 기술 도입 후의 운영비용의 차이를 기술 도입에 따른 운영비 절감편익으로 설정하였다.

2.3.2 대기시간 단축편익

열차 분리결합 자동화 기술 도입으로 열차 운행시격이 단축되면 철도 이용자의 평균 대기 시간이 절감되고, 철도 이용자는 절감된 대기시간을 업무 및 비업무 목적으로 사용할 수 있게 된다. 본 연구에서는 평균 대기시간이 절감되는 철도 구간의 이용수요와 절감된 평균 통행시간, 평균 통행시간 가치의 곱을 총 대기시간 절감편익으로 설정하였다.

이 때, 열차이용자의 평균 대기시간은 이용자의 도착분포를 uniform distribution으로 가정하여 열차 운행시격의 절반으로 계산하였다.

2.3.3 운행비용 절감편익

열차 분리결합 자동화 기술 도입으로 열차 운행시격이 단축, 철도 이용자가 증가하게 되면 이에 따라 도로교통 이용자가 감소하게 된다. 도로교통 이용자의 감소는 도로 속도 및 도로 상황 등에 영향을 미쳐 도로를 통행하는 차량의 운행비용 감소가 발생하며, 감소한 운행비용은 열차 분리결합 자동화 기술 도입에 따른 편익으로 판단할 수 있다.

본 연구에서는 링크 평균속도에 기초한 차종별 차량운행비용 원단위와 링크별 차량운행비용의 곱을 차량운행비용으로 보고, 기술 도입 전의 운행비용과 기술 도입 후의 운행비용의 차이를 기술 도입에 따른 운행비용 절감편익으로 산출하였다. 차량 운행비용에는 유류비, 엔진오일비, 타이어 마모비, 유지관리비, 감가상각비 등을 포함할 수 있다.

2.3.4 통행시간 절감편익

운행비용 절감편익과 마찬가지로, 열차 분리결합 기술 도입으로 도로의 통행환경이 개선되면 도로 이용자의 통행시간이 단축되는 효과가 발생한다. 도로 이용자는 절감된 통행시간을 다른 목적에 활용할 수 있으며, 절감된 통행시간만큼의 가치를 기술 도입에 따른 편익으로 산출할 수 있다.

본 연구에서는 링크의 차종별·인별 통행시간과 통행시간가치, 통행량의 곱을 총 통행시간 비용으로 보고 기술 도입 전 통행시간 비용과 기술 도입 후의 통행시간 비용의 차이를 기술 도입에 따른 통행시간 절감편익으로 산출하였다.

2.3.5 환경비용 절감편익

환경비용 절감편익 역시 열차 분리결합 기술 도입으로 도로의 통행 환경이 개선되면서 발생하는 편익으로, 대기오염, 수질오염, 소음, 진동, 지반침하, 식물 및 동물 등 생태계 영향 등 환경적 변화 요소에 대한 환경가치의 변화를 추정하여 산출할 수 있다.

그러나 이러한 다양한 환경적 변화요소 모두에 대해 계량화하여 추정하는 것은 현실적으로 불가능하므로 이 중 영향 정도가 크고 계량화가 용이한 대기오염 및 소음에 대하여 환경비용을 추정, 기술 도입 전·후의 환경비용 절감분을 환경비용 절감편익으로 산정하였다.

2.3.6 사고비용 절감편익

열차 분리결합 기술 도입으로 도로 이용수요가 감소함에 따라 전체적인 교통사고 발생률이 감소하게 되고 그 결과 도로부문의 교통사고 비용이 감소하여 이는 곧 기술 도입의 편익으로 산출된다. 단 도로 이용수요는 감소하는 반면 철도 이용수요는 증가하므로 철도의 총 사고 발생률은 증가하게 되고, 그 결과로 철도부문의 교통사고 비용은 사업시행 시에 오히려 증가하게 되어 부(-)의 편익이 발생하게 된다.

본 연구에서는 도로유형별 사상자수와 사고비용, 교통량의 곱을 총 교통사고 비용으로 정의하며, 기술 도입 전·후의 사고비용 절감분을 사고비용 절감편익으로 산출하였다.

3. 사례 분석

3.1 신안산선 분석 개요

신안산선 복선전철은 2018년 준공 예정으로 수도권 서남부와 동북부를 연결하는 광역 전철망이다. 노선은 시흥시청~서울역, 중앙~서울역 노선으로 광명에서 Y자 형태로 분기하며, 서울역에서 송산 방면으로 운행하는 열차와 서울역에서 중앙 방면으로 운행하는 열차가 같은 시격으로 교차 운행하도록 계획되어 있다. 본 연구에서는 신안산선이 광명에서 Y자형으로 분기하도록 설계되었다는 점에서 차후 열차 분리결합 기술 도입 시 열차의 운행시격 단축 효과가 발생할 것으로 판단하고 사례 분석 노선으로 선정하였다.

기술 도입에 따른 철도로의 수단전환에 의한 교통수요 및 편익 분석을 위해서는 국가교통 DB센터에서 제공하는 수도권 및 광역권 통행량과 분석용 네트워크 및 종합 교통계획 분석모형인 EMME/3를 이용하여 분석을 수행하였다.

편익 산출 시, 신안산선 복선전철은 2018년 개통하여, 이후 40년간 편익이 발생할 것으로 가정, 5년 단위로 분석하였으며, 편익 산출을 위한 원단위로는 국토교통부[1]에서 제시하는 원단위를 적용하였다.

3.2 편익 분석

신안산선 복선전철 노선에 열차 분리결합 자동화 기술을 도입할 경우, 서울역~광명까지의 본선 구간은 결합된 열차 차량이 운행하고, 이후 광명역에서 분리된 두 대의 차량이 송산방향과 중앙방향으로 지선 노선을 각각 운행하게 된다. 이에 따라 교차 운행하는 열차가 송산방향과 중앙방향으로 번갈아 운행해 본선구간의 두 배 간격으로 운영되던 지선구간의 열차 운행시격이 아래 Table 2에 제시된 바와 같이 본선구간과 동일한 시격으로 운영되게 된다.

열차의 운행시격 단축에 따라 철도 이용자의 평균 대기시간이 절감되는 효과가 발생하며, 첨두 시의 평균 대기시간은 기존 5분에서 2.5분으로 감소하게 되고, 비첨두 시의 평균 대기시간은 기존 10분에서 5분으로 감소하게 된다. 즉, 기술 도입에 따라 첨두 시에는 2.5분의

Table 2 Comparison of Headways between trains of Sin-An-San Route according to the Introduction of an Automatic Train Coupling System

구간	미도입 시		도입 시	
	첨두 시	비첨두 시	첨두 시	비첨두 시
서울역~광명	5 분	10 분	5 분	10 분
송산~광명	10 분	20 분	5 분	10 분
중앙~광명	10 분	20 분	5 분	10 분

대기시간 절감이 이루어지고, 비첨두 시에는 5분의 대기시간 절감이 이루어진다. 이때, 열차의 결합 시 기술상의 문제로 3분의 결합시간이 소요되며, 본 연구에서는 대기시간 절감과 함께 결합에 소요시간을 고려하였다.

본 연구에서는 교통수요 분석을 통해 신안산선 복선전철의 분리결합 자동화 기술 도입으로 철도 이용자들의 평균 대기시간이 감소함으로써 수단 선택 시 철도의 효용이 높아지고, 따라서 철도의 이용수요가 증가하는 결과를 확인하였다.

신안산선 복선전철의 열차 분리결합 자동화 기술 도입에 따른 편익으로는, 철도 이용자의 대기시간 절감편익, 타수단 이용자의 운행비용 절감편익, 통행시간 절감편익, 환경비용 절감편익 및 사고비용 절감편익을 선정하였다. 철도 이용자의 편의성 증가편익은 계량화가 어려워 편익분석 항목에서 제외하였다.

3.3 편익 분석 결과

본 연구에서는 기술 도입에 따른 편익 산출을 위해 교통수요 분석을 선행하였으며 분석 결과, 신안산선에 열차 분리결합 자동화 기술을 도입하여 지선 부분의 열차 운행시각 단축이 이루어져 신안산선의 이용수요가 일평균 3,600~4,400명가량 증가할 것으로 분석되었다.

신안산선 이용수요 증가에 따른 편익 분석 결과, 가장 큰 편익을 보인 항목은 철도 이용자의 대기시간 감소편익으로 연간 100~120억원에 이를 것으로 분석되었으며, 타수단 이용자 감소에 따른 편익은 연간 70~110억원에 이를 것으로 분석되었다.

Table 3 Comparison of Demands Analysis Result for Sin-An-San Route according to the Introduction of an Automatic Train Coupling System

구분	2018 년	2023 년	2026 년	2031 년	2036 년
미도입 시 일평균 신안산선 이용수요(인/일)	375,680	441,442	437,739	427,228	407,813
도입 시 일평균 신안산선 이용수요(인/일)	379,294	445,552	441,954	431,632	411,974
일평균 신안산선 이용수요 증가량(인/일)	3,614	4,110	4,215	4,404	4,161

Table 4 The Benefit of the Introduction of an Automatic Train Coupling System to the Sin-An-San Route

구분	시간비용 절감편익(억원)	운영비용 절감편익(억원)	환경비용 절감편익(억원)	사고비용 절감편익(억원)	대기시간 절감편익(억원)	총 편익(억원)
2019년	45	19	3	3	102	171
2021년	53	22	4	3	117	198
2026년	62	21	4	3	118	209
2031년	68	32	8	3	120	232
2036년	57	21	5	2	120	205

4. 결 론

본 연구에서는 열차 분리결합 자동화 기술 도입 시의 효과로 운영비 절감 효과와 열차 운행 시격 단축에 따른 효과를 제시하고, 각 효과별로 산정 가능한 편익 항목으로 철도 운영자의 운영비용 절감편익, 철도 이용자의 대기시간 절감편익 및 편의성 증가편익, 타수단 이용자의 운영비용 절감편익, 통행시간 절감편익, 환경비용 절감편익, 교통사고 절감편익을 제시하였다. 또한 제시된 편익항목 중 정량적 추정이 어려운 편의성 증가편익을 제외한 편익항목들에 대해 추정방법을 제시하였다.

신안산선 복선전철의 사례 분석을 통해 실제 철도 노선에 기술을 도입할 때 기대되는 편익을 분석·제시하였다. 신안산선 복선전철에 열차 분리결합 자동화 기술을 도입하면 지선부분에서 열차 운행시격 단축 효과가 발생하며 이에 따라 철도이용자의 대기시간 절감편익 및 타수단 이용자 감소로 인한 시간비용 절감편익, 운영비용 절감편익, 환경비용 절감편익, 사고비용 절감편익이 발생할 것으로 판단, 편익 추정 결과를 제시하였다.

본 연구를 통해 차후 열차 분리결합 자동화 기술이 개발되어 국내 철도 시스템 전체에 도입할 때 발생 가능한 편익의 정도를 가늠할 수 있으며, 철도분야에 열차 분리결합 자동화 기술 뿐 아니라 다른 새로운 기술 및 시스템이 개발·도입될 때 표준화된 편익 항목 및 그 분석 방법을 제시할 수 있는 계기가 될 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2011) Railway construction standard in Korea(4th edition)
- [2] Korea Development Institute(2007) A manual on pre-feasibility study for road and railway sector project(5th edition)
- [3] Korea Development Institute(2010) A report on pre-feasibility restudy of Sin-An-San route construction project(5th edition)
- [4] <http://www.ktdb.go.kr>