

■ 論 文 ■

비선형정수계획법을 이용한 운행전략에 따른 열차운영계획 수립

Planning of Train Operation with Different Objectives
Utilizing Mixed-Integer Nonlinear Programming Models

김 기 현

(한양대학교 교통공학과 석사과정)

서 선 덕

(한양대학교 교통시스템공학과 교수)

목 차

I. 서론	1. 모형의 적용
1. 연구의 배경 및 목적	2. 최적화 해석도구의 소개
2. 연구의 범위	3. 대안별 분석결과
II. 철도계획의 정의와 분류	VI. 열차운행패턴 대안의 평가
III. 열차운영계획 및 운영전략	1. 개요
1. 열차운영계획	2. 효과적도
2. 열차운행개념의 정립	3. 철도운행패턴대안의 효과분석
IV. 모형의 개발	VII. 결론 및 향후연구과제
1. 기본모형의 설정	1. 결론
2. 해의 산출과정	2. 향후연구과제
V. 모형의 적용 및 결과	참고문헌

Key Words : 비선형정수계획법, 철도계획, 열차운영계획, MINLP, 경부고속철도, 운행전략

요 약

열차운영계획은 수송수요 산정, 운행노선계획, 열차시각표 작성, 기관차 및 인원의 할당 등 광범위한 내용을 포괄하고 있으나, 본 논문에서는 계획의 초기단계에서 결정 가능한 운행노선계획을 대상으로 범위를 설정하였다. 운영목표에 따른 전략은 사용자, 운영자, 사회전체의 입장에서 고려될 수 있는데, 이러한 전략에 의해 운행될 수 있는 열차운행패턴을 운영비용의 최소화, 통행시간의 최소화, 운영자 수익의 최대화 모형으로 해결하고자 하였다. 2004년 이후에 운행이 예상되는 고속철도/기존철도는 운영계획의 변경이 예상되는바, 상기의 목표에 따라 열차운행패턴을 작성하여, 개발된 효과적도의 적용을 통해 정책적인 적용가능성을 평가하였으며 기존 계획된 철도청의 운영계획과도 아울러 비교, 최적대안을 선정하였다. 본 고에서는 수리계획모형인 비선형정수계획모형(MINLP)으로서 국내 철도망에 부합하는 운영계획을 작성하였으며, 이에 따른 열차-km는 수익최대화 모형, 인-km는 철도청의 열차운영계획이 가장 많은 것으로 나타났다. 인-hour는 수익 최대화 모형과 통행시간 최소화 모형이 가장 적은 것으로 나타났는데, 이는 장거리 노선의 편성이 증가된 것으로 사료된다. 이러한 결과를 산출함에 있어, 어려운 점은 각 구간의 기하급수적 증가, 결정변수의 초기값 선정 등이 있으나, 그동안 연구된 각종 경험적 기법의 적용과 실제 편성 가능한 변수의 적용을 통해 이를 해결하였다. 추후, 설정된 모형의 비교에 적합한 효과적도의 개발과 전국적으로 사례구간의 확장 및 모형의 최적대안 선택 시 효과적도의 가중치에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 논문은 과학기술부(한국과학재단)에서 지원한 첨단도료연구센터의 연구수행 결과입니다.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

철도여객수송은 철도운영에 있어서 가장 중요한 부분으로 인식되고 있으며, 공로상에서 혼잡의 증가와 환경 문제를 고려할 때, 철도여객수송은 계속해서 중요한 위치를 유지할 것이다. 최근 많은 나라의 철도 운영조직에서는 철도운영효율을 증대시키기 위해서 많은 노력을 기울이고 있으며, 이러한 방안으로 민영화 및 민간부문의 경영전략들이 도입되고 있다. 이러한 여객수송 효율성을 증대시키기 위해서 이용될 수 있는 또 다른 측면은 현재의 운영방법을 개선하는 것에서 찾을 수 있다. 그동안 국민의 기본 이동성을 제공하는 차원에서, 철도서비스가 정부 주도 하에 지속되어 온 한국철도는 현재 철도산업구조개혁을 통해 민영화를 준비하고 있으며, 2004년 경부고속철도가 개통될 예정이다. 이에 따른 기존 열차운영계획의 변경은 불가피하며, 새로운 운영시스템의 도입은 필요하다.

그동안 국가정책 또는 공공목적을 위하여 수익성 없는 서비스를 제공함으로써 발생한 경영적자와 재무구조의 취약점은 앞으로 철도구조개혁의 목표 정립에 도움을 줄 것이다. 이러한 관점에서 철도운영주체가 고려할 점은 적자해소의 측면에서 자사의 비용감소와 고객서비스향상의 측면에서 통행시간 손실의 최소 등의 전략을 구상할 수 있음은 자명한 일이다. 이러한 전략에 부합하는 열차운영계획은 장래 철도교통수단의 경쟁력 확보와 국가 발전에 일부분으로서 역할을 다하게 될 것이다.

여객열차운영계획은 주기적인 시각표(Periodic schedules)작성을 위한 전 단계로서, 철도망에 의해 구현된다. 운영계획의 수립은 통상 가능한 대안의 수가 매우 많기 때문에 체계적인 계획을 수립하기 위해서는, 수리계획모형(Mathematical Programming Model)을 활용할 필요가 생긴다. 또한 운영계획에서 추구하는 목표를 명시적으로 고려하기 위해서도 수리계획모형은 유용한 도구가 된다. 그러나, 열차운영계획모형은 최적화 문제를 적용함에 있어 가장 난해하고, 해법이 쉽지 않은 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고, 그동안 수요, 용량 그리고 철도운영조건을 만족시키면서 운영비용의 최소, 통행시간 손실의 최소, 여객 환승 최소 등 여러 목적식에 부합하는 최적

화 모형들이 소개되어 왔다. 실제 열차운영에 적용한 결과, 상당한 운영비용의 감소와, 여객 서비스질의 개선효과 사례들이 보고하고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 국내 철도망에 부합하는 열차운영계획을 개발하고, 개발된 모형을 적용하여 사례분석을 실시하는 것이다. 또한 사례분석의 검증을 통하여 적용가능성을 평가하고자 한다.

아울러, 본 고에서 고려된 열차운영계획모형은 비선형정수계획모형(Mixed-Integer Nonlinear Programming: MINLP)이다. 실제상황의 여건을 반영한 대규모자료를 바탕으로 각종 연구와 경험적 기법을 적용하여 해를 산출하였으며, 목적함수에 부합하는 각 노선별, 차종별 열차운영계획을 작성하였다.

2. 연구의 범위

이 분야의 연구 방향은 크게 두 방향으로 분류할 수 있다. 첫째, 열차운영계획모형의 구조와 개발된 모형의 최적해(Optimal Solution)를 구할 수 있는 알고리즘의 효율성을 개선시키기 위한 방향이며 둘째, 개발된 알고리즘과 모형을 실제 철도운영에 적용하는 것이다. 본 연구의 범위는 두 번째의 경우로 지금까지 개발된 이론과 알고리즘을 바탕으로 현재 국철의 운영환경인 전국 철도망, 객차, 구간 용량, 역간 수요, 운영비용, 통행시간 등을 반영할 수 있는 열차운영계획을 개발하고 적용하며 개발된 열차운영계획을 이용하여 정책대안을 제시하고자 한다.

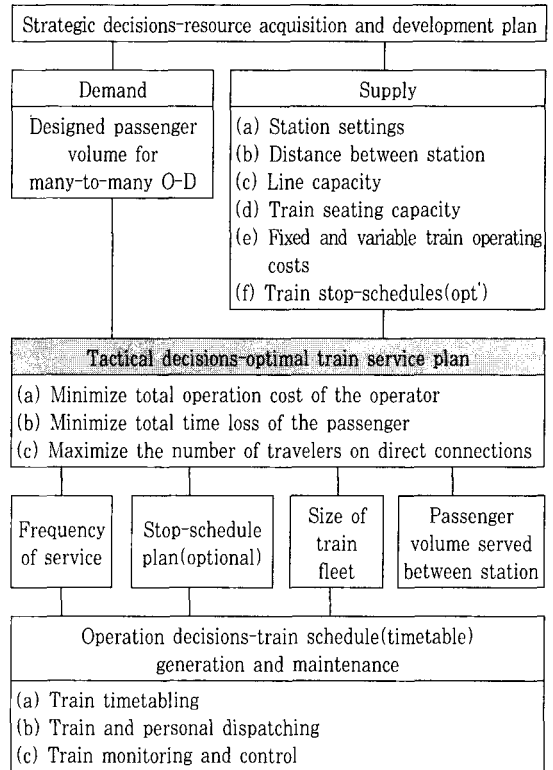
II. 철도계획의 정의와 분류

철도시스템은 선로, 신호, 열차 등의 자원으로 구성되어 있으며, 철도운영기관은 이러한 제한되어 있는 자원을 효율적으로 활용하여 운용효율을 극대화시켜야만 한다. 철도 운용효율은 대부분 계획단계에서 결정되어 지는데, 일반적인 계획절차는 개념 및 정의에 따라 여러 가지로 정의될 수 있겠으나 현재 일반적으로 사용되고 있는 개념은 종합계획(Comprehensive planning) 개념으로서 정의될 수 있다. 이러한 절차는 크게 가치설정(Value formation) - 수단파악(Mean identification) - 실행(Effectuation)으로 나눌 수 있는데, 여기서 가치설정이라는 것은 결국 계획의 목표설정이라고 할 수 있고 목표설정 단계에서 고려되

는 정책목표는 크게 3가지 측면에서 고려될 수 있음은 널리 알려져 있는 바이다.(Faludi, 1973) 철도운영계획의 수립은 가능한 대안의 수가 많기 때문에 체계적인 계획을 수립하기 위해서는, 수리계획 모형을 활용할 필요가 생긴다. 철도를 대상으로 정의된 수리계획모형의 위계를 정의함으로써 추후 계획의 연속성 및 적용의 용이성을 고려할 수 있으며, 의사결정에의 과학적이고 체계적인 접근이 가능해진다. 나아가, 조직이 존재하는 환경 내에서 환경의 한 구성부분, 혹은 하위시스템으로 파악하는 데 도움을 준다. 오늘날의 운영조직은 급속한 변화와 복잡성의 계속적 증가라는 조건 하에서 운영되고 있으므로, 이러한 계획의 분류는 목적달성을 이루는데 용이할 것이다.

철도의 건설은 일반적으로 장기간에 걸쳐 생애주기(Life cycle)를 가지며, 공공성을 띠고 있는 이유로 많은 사람들과 직·간접적으로 이해관계를 가지게 된다. 또한 대규모의 투자를 필요로 하며, 효과, 영향이 지역사회에 광범위하고 또 복잡하게 미친다. 그러므로 목표설정은 계획의 성격을 좌우하므로 계획의 입안자(작성자), 계획의 분석자, 계획의 결정자가 모두 충분히 그 내용을 이해하고 인식하고 의도가 일치하여야 한다.

일반적으로 철도계획은 철도투자계획, 철도영업계획으로 대별되는데(이종득,1989), 상기의 분류는 철도시설의 건설 전·후의 기준으로 사료된다. 이를 감안한다면 본 고에서는 철도영업계획을 기본으로 언급하게 될 것이다. Anthony(1965)는 철도의 정책결정 수준에 따라 크게 전략(Strategic)/전술(Tactical)/운영(Operation) 부분으로 나누었다. 그 내용을 간략히 살펴보면, 전략부분은 장기간 고려될 수 있는 자원을 할당하는 것으로 철도 네트워크의 신설 및 개량, 역사의 신설 및 확장사업을 예로 들 수 있으며, 두 번째 전술부분은 중기사업을 대상으로 하며 일반적인 통행수요의 변화로 인해 야기될 수 있는 각종 운영계획을 지칭한다. 마지막 운영부분은 철도에서의 하루단위로 영향을 미치는 요소의 계획을 의미하며, 여기에는 공차배정, 기관차계획, 운행시각표, 직통연결 등이 속한다. 이러한 분류는 순차적인 접근방법으로 간단히 표현할 수 있는데 <그림 1>(Chang, 2000)과 같다. 순차적인 계획은 자칫 상위단계에서 잘못된 해의 적용으로 오류가 발생할 수 있으나, 각 단계별로 도출되는 분석결과에 대한 적절성을 검증하면서

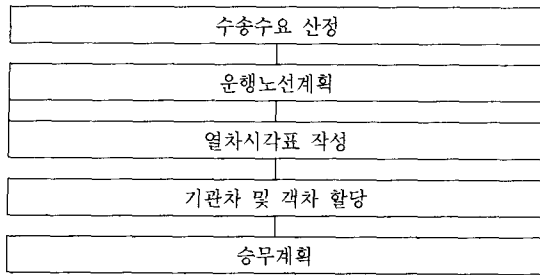


<그림 1> 정책수준에 따른 철도계획의 분류

순서적으로 추정해 가는 장점을 지니고 있다.

현행 철도청에서 작성되는 열차운영계획은 <그림 1> 내용을 모두 포함한 내용으로 정의되고 있다. 수송수요 예측, 차량규모 선정, TPS(Train Performance Simulation) 분석, 열차운행패턴 결정, 구간별 열차운행회수 산정, 선로용량 및 한계년도 분석, 차량소요편성 및 차량 수, 차량기지계획, 열차 DIA작성 등 광범위한 내용을 포괄하고 있다. 본 고에서는 전략 및 운영범위의 내용을 제외한 전술(Tactical) 수준의 내용, 즉 정책목적에 부합하는 차량소요편성 및 차량 수, 열차운행패턴 결정, 구간별 열차운행회수 산정 등의 내용을 다루게 된다. <그림 2>는 <그림 1>에 근거한 열차운영계획의 내용이다(Bussieck, 1998).

단계별 계획의 수리모형은 대다수의 외국 논문에서 소개되었으며, 활발히 연구가 진행되고 있는 중이다. 또한 위의 단계를 통합한 복합모형의 구성에 관한 내용이 소개되고 있다. 이러한 내용은 단지 철도수단에 국한된 것이 아니라 도로, 항공 및 해운수단의 계획에서도 활발히 연구가 이루어지고 있다.



〈그림 2〉 廣義의 열차운영계획

III. 열차운영계획 및 운행전략

1. 열차운영계획

본 고에서는 열차운영계획을 운행노선계획으로 한정한다. 실질적으로 국내에 적용되고 있는 열차운영계획은 운행노선계획의 내용에 대부분 포함되므로, 이러한 설정은 무리가 없다고 볼 수 있다.

열차운영계획에 관한 최초의 문헌은 Patz(1925)에 의해 소개되었다. 그 이후로 몇몇의 논문이 소개되었지만, Oltrogge(1994)에 의해 열차운영계획의 개념이 확립되었다. 크게 공급요소의 정의, 시스템의 할당, 운행노선의 최적화, 시물레이션 및 평가로서 이루어진다(Bussieck,1998). 그 내용을 살펴보면 공급요소의 정의 단계는 철도망의 설정단계라 할 수 있는데 열차종별의 구분에 따른 것이다. 우리나라의 경우, 단일 운영주체에 의해 3종의 열차가 운영되고 있으나, 2004년이 도래하면 경부고속철도 노선의 추가로 4종의 차량이 구성되어 진다. 두 번째는 시스템의 할당으로서 4종의 차량을 고려할 때의 조합을 계산함으로써 완료되며, 장래에 새로운 종별이 제공된다면 변화될 수 있는 내용이다. 세 번째로 운행노선의 최적화인데, 이는 열차의 편성수, 객차수, 열차운행패턴을 산정하는 단계이다. 최적화문제는 모형의 구조, 목적식의 설정, 알고리즘의 적용으로 구성되므로, 실질적인 문제의 어려움은 본 단계에서 야기된다. 마지막 시물레이션 및 평가단계는 기본안과 연구자의 대안별로 효과적도(MOE)를 통해 확인하고, 점검하는 단계이다. 효과적도에 관한 내용은 6장에서 설명한다.

2. 열차운행개념의 정립

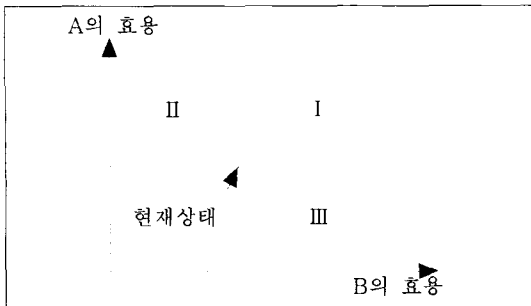
오늘날까지 철도는 정부주도 하에 건설, 운영, 관

리 되어오고 있다. 이러한 이유로 철도서비스는 국민의 기본 이동성(Mobility)을 제공하는 차원에서 운영되어 왔으나 그 동안의 투자부진으로 수송분담률이 계속 낮아지는 추세이며, 경부선 등 주요 간선노선의 수송능력은 한계에 도달한지 오래 되었다. 다행히, 장래 2004년 경부고속철도사업의 완공은 철도교통수단의 경쟁력 강화에 중요한 역할을 할 것이다. 철도청은 경부고속철도 1단계 개통 시 서울~부산간 고속열차 운행구간 중 45%에 달하는 구간에서 기존선을 활용하고, 호남선 전철화 사업의 추진으로 서울~목포간에도 고속열차를 투입하여, 운행 소요시간의 대폭적인 단축으로 철도의 경쟁력이 향상될 것으로 기대하고 있다. 고속열차가 등장함으로써 기존열차간의 운행체계 개편은 불가피하며, 새로운 운영전략, 전술의 수립이 필요하다.

운영계획을 수립함에 있어 사업자는 이익을 극대화하는 전략을 수립할 수 있으며, 사용자 측면에서는 통행시간의 최소화를 목적으로 할 수 있을 것이다. 또한 사회의 입장에서는 철도의 분담률 최대화 등을 고려할 수 있다.

이는 대중교통수단의 경우 사용자(User), 운영자(Operator), 사회(System)에 대한 효과를 체계적으로 분석해야 한다는 전제와 동일한 것인데 사용자의 경우는 통상적으로 철도서비스의 변화, 예를 들어 통행시간, 요금 및 기타서비스지수들이 극대화되길 원한다. 운영자의 경우는 비용효율화 측면에서 정해진 서비스를 제공, 또는 일정한 수요를 수송하기 위해서 소요되는 비용을 최소화하거나 또는 정해진 최소 서비스 수준을 만족하는 상태에서 수입(Profit)을 극대화하는 방안을 강구하고자 할 것이다. 사회 전체측면에서 통상 사회전체의 통행비용 최소화 차원에서 철도의 역할이 높아지는 수익(Revenue)극대화를 모색하는 것이 일반적이다.

이러한 전략은 다시 말하면 철도운영으로 얻으려고 하는 목표(Goal)가 무엇인가에 따라 결정될 것이다. 그러나 대중교통의 운행목표들은 통상 앞서의 3명의 의사결정 참가자들 사이에서 합치점을 찾기가 어려운 것이 현실이다. 사용자가 원하는 비용최소화는 종종 운영자의 수입극대화와 상충되며, 운영자의 목표가 사회전체의 목표와 부합하지 않은 경우들이 대부분이다. 이는 적자노선에의 운행기피 현상들을 보면 자명하다.



(그림 3) 파레토 최적화(Pareto Optimum)

이러한 목적 중에서 어떠한 목적을 추구할 것인가를 궁극적으로 사회구성원 전체의 가치체계(Value System)에 따른다고 보는 것이 좋다. 문제는 사회구성원 전체의 가치체계가 쉽게 정의되지 않는다는 것이다. 본 사항과 같은 공공에 영향을 미치는 공공의 사결정(Public Choice)은 일반적으로 파레토 최적(Pareto Optimum)의 상태를 지향하지만 실제적으로 그러한 상태를 실현하는 것은 현실적으로 어려운 경우가 대부분이다.

(그림 3)에서 보는 바와 같이 I 지역으로 정책결정이 나는 경우는 어느 누구도 현재보다 나빠지지 않으면서 다른 사람의 상태가 개선이 되는 경우를 보여주는데, 이런 경우를 파레토 최적(Pareto Optimum)이라고 한다.

II와 III의 경우는 어느 한 사람은 좋아지지만 이는 다른 사람의 효용이 감소하는 것을 동반하게 된다. 이럴 경우 A와 B의 누구의 효용이 더 중요한지를 결정하여야 한다. 본 논문에서 다루는 문제도 실제적으로는 II와 III의 경우에 해당된다고 할 수 있다. 고속철도와 일반철도의 운행이 서로 관련이 있기 때문에 고속철도 정차역 근처에 거주하는 사람과 일반열차만 정차하는 지역의 사람은 열차운행 형태에 따라 서로 효용의 크기가 연관되어 변하게 되는 것이다.

비록 모든 사회구성원이 동의하는 가치체계를 정하고, 목적을 정하는 것을 어렵다고 하더라도 여러 가지 설정된 목적에 근거하여 측정 가능한 효과적도(MOE: Measure of Effectiveness)에 근거한 목적을 설정하고 효과를 계량화하고 이들 효과적도간의 가중치를 구하게 되면 적어도 절차상으로는 상당히 합리적인 전략을 파악할 수 있게 된다.

본 논문에서는 운영비용의 최소화, 통행시간의 최

소화 및 수익 최대화를 채택, 이를 서로 비교함으로써 운행개념의 차이에 따른 분석을 통해, 대안을 제시한다. 다만, 장래 예상되는 사례를 적용하기 위해 "통합열차운영기본계획(안)"(2000.5, 철도청), "고속철도운영관련 주요추진 방향 검토"(2002.5, 철도청) 및 "고속철도 통합정보시스템 최적화 알고리즘 개발"(2002, 철도청)의 내용을 참조, 현실성 및 실행가능성을 고려하였다.

IV. 모형의 개발

1. 기본모형의 설정

비선형정수계획법은 목적함수 및 제약식이 비선형 형태이며, 결정변수가 정수의 조건으로 구성되어 있다. 이는 수리계획모형 중 가장 난해한 부분으로 소개되고 있으며, 비선형계획(NLP)과 혼합정수계획(MIP)보다 더 어려운 것으로 알려져 있다.¹⁾ 이를 좀 더 쉽게 하기 위해선 모형의 구조가 간단, 명료하여야 한다. 본 연구에서는 이를 고려하여 Claessens(1994)의 모형을 변형하였으며, 다음의 계수를 설정하였다.

열차운영계획은 노선에서 운행하는 열차의 편성 수, 객차 수, 정차 스케줄 등을 결정변수로 설정하여 현실적인 해를 찾을 수 있는 중기전략을 제공하는 모형으로 고안할 수 있다. 비선형정수계획 모형(MINLP)이 기본모형으로 채택되기 위해서는 최적의 해를 산출할 수 있는 알고리즘의 확보가 필요하며, 이러한 알고리즘을 적용하기 위한 적절한 도구(Solver)가 요구된다. 먼저 기본적인 가정사항을 고려하여 보면, 다음과 같다.

- 역간 사이의 기본적인 철도시설물은 제공된다.
- 각 구간의 여객 수, 운영비용, 용량 등은 제약식을 통해 설명된다.
- 운영계획은 출발역과 도착역간의 열차 편성수와 객차의 수로 결정된다.

1) 모형의 소개

본 고에서는 운영비용 및 통행시간의 최소화, 수익의 최대화를 통해 여러 운행패턴을 개발하고, 검증하

1) <http://www.gamsworld.org/minlp/index.htm>.

는 것이 목적이다. 그러나, 이를 위한 전문적인 이산 수학(Discrete mathematic)의 개념의 도입 및 소개는 배제하기로 한다. 다만 간단한 예제를 통해 모형을 설명하기로 한다. 각종 계수 및 결정변수, 그리고 모형은 다음과 같다.

○ 운영비용의 최소화

$$\begin{aligned} & \min \\ & \sum_{v=1}^2 \sum_{s=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n c^s b_{ij}^{vs} cp_j^{vs} x_{ij}^{vs} + l_{ij}^{vs} x_{ij}^{vs} (bkm^s b_{ij}^{vs} + trkm^s) \\ & s.t \\ & \sum_{v=1}^2 \sum_{s=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n x_{ij}^{vs} b_{ij}^{vs} \beta_s \geq T_{ij}^{vs} \\ & \sum_{v=1}^2 \sum_{s=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n I_{ij}^{vs} \cdot x_{ij}^{vs} \leq f_k^{\max} \\ & x_{ij} \geq 0, \text{ and integer} \\ & \min(s) \leq b_{ij}^{vs} \leq \max(s), \text{ and integer} \end{aligned}$$

○ 통행시간의 최소화

$$\begin{aligned} & \min \\ & \sum_{v=1}^2 \sum_{s=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n I_{ij}^{vs} x_{ij}^{vs} b_{ij}^{vs} \beta_s / spd_j^{vs} \\ & s.t \\ & \sum_{v=1}^2 \sum_{s=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n x_{ij}^{vs} b_{ij}^{vs} \beta_s \geq T_{ij}^{vs} \\ & \sum_{v=1}^2 \sum_{s=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n I_{ij}^{vs} \cdot x_{ij}^{vs} \leq f_k^{\max} \\ & x_{ij} \geq 0, \text{ and integer} \\ & \min(s) \leq b_{ij}^{vs} \leq \max(s), \text{ and integer} \end{aligned}$$

○ 운영자 수익의 최대화

$$\begin{aligned} & \max \\ & \sum_{v=1}^2 \sum_{s=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n F_{ij}^{vs} x_{ij}^{vs} b_{ij}^{vs} L_s \\ & s.t \\ & \sum_{v=1}^2 \sum_{s=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n x_{ij}^{vs} b_{ij}^{vs} \beta_s \geq T_{ij}^{vs} \\ & \sum_{v=1}^2 \sum_{s=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n I_{ij}^{vs} \cdot x_{ij}^{vs} \leq f_k^{\max} \\ & x_{ij} \geq 0, \text{ and integer} \\ & \min(s) \leq b_{ij}^{vs} \leq \max(s), \text{ and integer} \end{aligned}$$

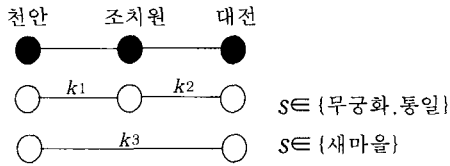
여기서,

- i, j : (출발, 도착) 정거장명
- s : 열차등급
- x_{ij}^{vs} : i 에서 j 로 이동하는 열차 s 의 하루당 편성수
- b_{ij}^{vs} : i 에서 j 로 이동하는 열차 s 의 객차수
- T_{ij}^{vs} : 노선 v 의 i 에서 j 로의 통행자수(OD)
- c^s : 열차등급 s 의 좌석수
- cp^s : 열차등급 s 의 객차1량의 비용
- l_{ij}^{vs} : 노선 v 의 i 에서 j 로 이동하는 열차 s 의 이동거리
- bkm^s : 열차등급 s 의 객차-km당 비용
- $trkm^s$: 열차등급 s 의 열차-km당 비용
- cp_j^{vs} : 편성계획운용률
- f_k^{\max} : 선로구간 k 에서의 최대열차빈도수
- I_{ij}^{vs} : i 에서 j 로 이동시 선로구간 k 에 속하면 1, 아니면 0
- $\min(s)$: 열차등급 s 의 열차당 최소객차수
- $\max(s)$: 열차등급 s 의 열차당 최대객차수
- spd_j^{vs} : 노선 v 에 i 에서 j 로 이동할 때의 표정속도
- F_{ij}^{vs} : 노선 v 에 i 에서 j 로 이동할 때의 운임
- L_s : 열차등급 s 의 평균탑승객

목적함수는 운영노선의 전체 비용을 최소화하는 것과 통행시간의 최소화하는 것, 운영자 수익을 최대화하는 것으로 선택하였다. 총 운영비용은 각 항의 합으로 구성되어 있고, 통행시간은 거리/속도의 개념이며, 마지막 운영자 수익은 실제 발생하는 운임의 합계로서 설정하였다.

제약식의 경우 공통부분으로서, 모든 여객은 전체의 선로구간을 이용하며 모든 선로구간에 최소, 최대의 열차 편성이 존재한다. 선로용량의 종별배분은 각 차종별 정책에 따른 하한 및 상한의 편성수를 적용한 뒤, 각 차종의 편성수가 선로용량을 넘지 않도록 한다. 또한 나머지는 각각 정수조건, 열차당 객차의 최소 수와 최대 수의 한계를 나타낸다. 위 상술된 세 모형은 객차의 수가 변동됨으로서 구간 열차 이용객의 변화에 민감하게 대응하는 장점을 가지고 있다. 실제 운영되는 열차는 편성수와 거리, 통행시간에 의해 반영되며, 이러한 변수들의 조합으로 결정된다.

본 모형을 적용하기 위해서는 철도망의 경우 <그림 4>



〈그림 4〉 가상 철도망의 예시

와 같은 종별로 분리된 가상의 철도망을 구상하여야 한다. 이에 새로운 구간(모서리: Edges)과 역(정점: Vertices)이 생성됨은 자명한 일이다. 아울러 전국 철도망을 대상으로 한다면 기하급수적으로 변수는 늘어나게 된다. 열차운영계획에서 제기되는 네트워크의 개발과정과 해의 산출과정, 각종 증명을 통한 알고리즘의 개발은 Bussieck(1998)과 Goossens(2000)의 내용을 참고하면 된다.

2) 비용계수의 설정

운영비용 최적화 문제에서 고려할 수 있는 모든 비용을 고려하였다. 이러한 비용을 본 논문에서는 3가지 종류로 설정하였으며, 이는 다음과 같다.

- 차량비용, 차량의 감가상각비용, 고정유지비용
- 객차 km 당 발생하는 가변비용
- 열차 km 당 발생하는 가변비용

비용계수의 설정 시 무엇보다도 목적식 및 제약식의 단위조절에 유의하여야 하며, 환산계수(Scale factor)의 적용을 통해 모형을 재 설계할 수도 있다. 위에서는 3가지의 비용을 적용하였으나, 목적식의 항을 축소하는 차원에서 하나의 계수로서 비용을 함축할 수도 있다.

3) 기타계수의 설정

차종당 편성할 수 있는 객차의 수는 정책적으로 고려될 수도 있을 것이다. 이는 강제적인 구간범위 설정을 통해 가능하다. 또한 본 고에서는 장래 운영이 예상되는 고속열차, 중장거리열차, 구간연계열차의 차종을 고려하였는데 거리, 차량좌석용량, 구간에 배정된 여객수요, 표정속도, 역간 운임 등을 입력값으로 채택하였다.

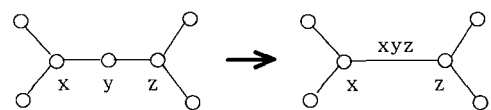
2. 해의 산출과정

위의 수리모형은 목적함수와 제약식 모두 이차식으로 구성되어 있다. 모형에서 편성크기(b_{ij}^{xy})와 빈도(x_{ij}^{xy})가 결정변수인데, 모형이 난해한 것은 이들 곱의 항목이 목적함수와 제약식에 존재하기 때문이다. 이 문제를 쉽게 풀기 위해서 선형계획모형(LP) 또는 이차계획모형(Quadratic programming: QP)²⁾을 고려할 수 있으나, 변환은 불가능하다. 다만, 결정변수를 모수값으로의 전환을 통해 선형화를 고려할 수는 있으나, 이는 본래의 모형취지에 어긋난다. 더욱이 전통적인 비선형 최적화 방법인 라그랑지 승수의 적용 역시 불가능하다. 따라서 발견적 기법(Heuristic algorithms)의 적용이 가능한데, 먼저, 결정변수중의 하나인 빈도변수(x_{ij}^{xy})가 정수에 근접할 때까지 완화(Relaxation)하는 방법을 통해 이들의 범위를 변환함으로써 반복적으로 계산한다. 그 다음, 또 다른 결정변수인 객차변수(b_{ij}^{xy})를 혼합정수문제(Mixed integer programming: MIP)의 방법을 통해 구하게 된다. (Claessens, 1994)

본 고에서 고려된 기법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 이러한 기법은 결정변수 및 모수의 개수를 줄여주며, 아울러 목적식 및 제약식의 크기를 감해주는데 결정적인 역할을 하게 된다.

첫째, 구간의 개수를 감소하기 위한 방안으로 구간 xyz 에서 $n_{xyz} = \max[n_{xy}, n_{yz}]$ 이고 $f_{xyz}^{\min} = \max[f_{xy}^{\min}, f_{yz}^{\min}]$, $f_{xyz}^{\max} = \min[f_{xy}^{\max}, f_{yz}^{\max}]$ 일 때, 〈그림 5〉와 같은 축소된 구간의 네트워크를 사용하였다. 실제 운영되는 역은 구간과 구간 사이의 시작점과 끝점으로 표시되며, 운영주체의 판단에 의해서 운행되므로 이러한 적용은 무리가 없을 것으로 판단된다.

둘째는 요구되는 열차의 용량의 상한 제약에 관한 것이다. 철도이용자는 용량의 제약아래 임의의 구간을 통과하게 되는데, 열차를 운영함에 있어 실제의



〈그림 5〉 실제 네트워크와 선별 네트워크

2) 목적함수는 2차식, 제약식은 1차식.

수요보다 더 많이 운영될 수도 있을 것이다. 이는 운영비용의 추가요소로서 적자보존의 원인이 될 수 있으며, 효율성 측면에서 고려한다면 제거가 가능하다.

최근에는 직접 비선형정수계획법(MINLP)의 해를 구하고자 하는 많은 연구가 이루어져, 비볼록(Non-convex) 상태의 최적해(Global optimum solution)의 해법(Smith, 1997) 및 분지한계(Branch and bounds) 알고리즘의 변형을 고려 중에 있다.

V. 모형의 적용 및 결과

1. 모형의 적용

위에서 언급한 두 가지 목적함수와 제약식들은 부분적 사례대상인 경부선 및 호남선 구간을 대상으로 장래 고속철도 1단계 개통시기인 2004년 이후의 운행패턴을 기준으로 분석하였다. 차종은 고속열차, 장거리열차, 구간연계열차로 설정하였으며, 분석대상의 시기가 장래인 점을 고려하여 경부선 구간인 서울, 남서울, 천안, 조치원, 대전, 김천, 동대구, 삼랑진, 부산과 호남선 구간인 서대전, 익산, 송정리(광주), 목포역을 적용하였다. 각종 계수값의 구득은 철도청에서 발행된 "철도통계연보, 철도수송계획, 경영성적 보고서, 각 년도"의 내용을 참고하였다. 총 변수의 개수는 176개로서 모두 정수조건을 지닌 변수이며, 제약식은 총 210개로서 이 중 26개는 비선형 형태를 지닌 식을 사용하였다.

2004년에 계획된 시나리오의 내용은 호남선 전철화사업 완료로 고속열차가 직결운행 되고, 경부고속철도 1단계 사업으로 도입된 고속차량 46편성(편성당 20량 935석)이 운용된다. 또한 고속열차 도입에 따라 현 새마을호, 무궁화호, 통일호의 역할이 바뀔 예정인데 일반 여객열차의 등급별 개념을 운행구간별 개념으로 재정립될 것이다. 새로운 열차 명은 향후 선정되겠지만, 이들 종별 열차의 역할은 고속열차 미운행 노선 위주로 투입이 예상되며, 주요 구간을 연계 운행하는 목적을 가지게 된다.

추후 본 연구에서 전국범위의 확대를 고려할 때, 동행수요 O/D의 특성을 분석하고, 구간별 모든 열차가 실제로 단일 편성으로 운행될 수 없음을 감안한다면, 현 목적함수와 제약식의 축소를 규모를 줄일 수

있음을 확인하였다. 경부선 및 호남선 구간의 사례연구를 통해 모형의 가능성을 확인하며, 추후 연구내용의 방향을 설정함으로써 새로운 알고리즘의 개발을 가능하게 한다.

1) 수송수요 적용

수송수요의 경우, 장래의 역간 O/D를 적용하는 것이 정확하고, 그 내용을 확인함에 있어 용이하나, 여러 여건을 감안한 2004년 이후의 수송수요는 현재 추정단계에 있다. 고속철도 수요는 한국철도기술연구원의 "경부고속철도 연계교통망 구축 연구, (2002)"에서의 역간 수요를 년도별로 사용하였으며, 호남선 전철화 구간에 대한 수요는 철도청의 "호남선 전철화 타당성 조사 및 기본계획, (2001)"에서 제시된 패턴을 이용하여 "경부고속철도 연계교통망 구축연구"에서 제시된 호남선 전철화 고속철도 수요를 적용하였다. 일반선에 대한 기본수요는 "철도투자평가편람, (2001)"의 것을 사용하였다. 화물수요는 철도청에서 제시된 수요를 활용하였으며, 소화물열차는 현재와 같은 수준으로 고려하였다.

2) 운영비용(원가)의 추정

운영비용의 추정은 보통 과거의 실적자료나 통계자료에 의존하게 되는데, 장래의 비용추정은 비용함수의 개발을 통해 적용되는 것이 일반적이다. 일반열차의 경우, 그동안 축적된 자료와 성과의 존재로 이를 추정하는데 있어 별 어려움이 없으나 고속열차는 국내에 새로 도입되게 되는 시스템으로서 운행에 필요한 세부항목을 정의하고 그 항목에 대한 비용을 합계하여 전체 운영비용을 산출하는 방법을 활용할 수 있다. 그러나 본 고에서는 이에 대한 방법론과 추정은 연구의 범위에 벗어나므로 고속열차의 단위운영비용은 가장 최근 자료인 한국철도기술연구원의 "고속철도 운영정책에 관한 연구, (2001.12)"의 연구결과를 인용하여 48.7원/인-km를 적용하였으며, 일반열차는 철도청의 "1994년~2000년 경영성적보고서"의 여객등급별 경영성적(순수원가)을 바탕으로 재추정한 것으로 2004년 예상되는 각 종별 단위운영비용을 51.5원/인-km, 37.3원/인-km, 107.3원/인-km로 산출하였다. 이에 근거한 객차-km당 비용과 열차-km당 비용은 <표 1>과 같다.

〈표 1〉 비용계수의 산정

종 별	단위비용	량당 평균 승차인원	열차당 평균 환산량수	객차-km당 비용	열차-km당 비용
고속열차	48.7(원/인-km)	45인	20량	2,191.50원	43,830원
중, 장거리 열차	51.5(원/인-km)	34인	13.59량	1,729.89원	23,509원
구간연계 열차	37.3(원/인-km)	56인	9.66량	2,088.05원	20,170원
통근열차	107.3(원/인-km)	36인	6.17량	3,905.72원	24,098원

주: 1) 변화되는 새마을, 무궁화, 통일호의 명칭은 각각 중·장거리열차, 구간연계열차, 통근열차로 대체시킴.
 2) 고속열차의 단위비용을 제외한 각각의 산출비용은 공식적인 것이 아님.

3) 기타계수의 적용

거리 및 통행시간은 정형화되어 있는 자료이며, 객차용량 및 표정속도의 경우 현행 새마을, 무궁화, 통일호의 용량을 그대로 수용하였다. 아울러 역간 운임은 고속철도의 경우 비용계수의 추정과 동일하게 한국철도기술연구원의 “고속철도 운임정책에 관한 연구, (2001.12)”의 내용을 참고로 하였다. 기존의 새마을호 요금에 일정 비율을 곱함으로써 산출하였으며, 호남선의 경우 거리에 준하는 비율을 동일하게 적용하였다. 내용은 〈표 2〉와 같다.

〈표 2〉 고속철도 구간별 운임수준

구 간	1단계 개통시	2단계 개통시
서울↔천안	1.86	1.86
서울↔대전	1.81	1.83
서울↔대구	1.61	1.64
서울↔부산	1.50	1.74
천안↔대전	1.62	4.66
천안↔대구	1.56	1.60
천안↔부산	1.45	1.76
대전↔대구	1.50	1.54
대전↔부산	1.41	1.79
대구↔부산	1.42	2.22
평 균	1.57	1.76

자료 : 한국철도기술연구원, 고속철도 운임정책에 관한 연구, 2001.

2. 최적화 해석도구의 소개

본 연구에서는 LINGO 7.0 프로그램³⁾을 사용하여 해를 구하는 것을 검토하였다. 선형, 비선형, 정수 계획법의 해를 해결하는 도구로서 비선형문제일 경우 Generalized Reduced Gradient(GRG) 알고리즘을

바탕으로 해를 산출하며, 도구 자체의 모형제작 언어를 포함하고 있어 쉬운 표현을 가능하게 한다. 대규모(Large-scale) 형태의 모형 적용시 간단한 모형구현과 Excel, Database 자료 및 DLL, OLE의 연결이 용이하여 널리 사용되고 있다. 다만, 전문적인 비선형정수계획법(MINLP)의 여러 알고리즘을 구현한 전문적인 프로그램⁴⁾이 소개되고 있으므로, 추후 연구에서 이를 이용한 해결도 바람직하다 할 수 있겠다.

3. 대안별 분석결과

최적화 모형을 사용해 개발한 3개의 운행패턴 대안에 추가하여 검토하여야 할 대안들이 있다. 우선 2002년 5월에 철도청에서 개발한 “고속철도운영관련 주요추진 방향 검토, 철도청”의 운행패턴(이하 통합열차 II라 호칭: 기본대안으로 채택)이 있으며, 2000년에 개발된 철도청의 “통합열차운영계획(안)”(이하 통합열차 I이라 호칭: 시나리오 1 기준)도 있으므로 이를 검토할 필요가 있다. 또한 고속철도의 도입에도 불구하고 현재의 새마을, 무궁화 및 통일호의 운행패턴을 그대로 유지하는 방안(이하 기존대안이라 호칭)을 대안으로 추가로 채택하였다.

이와 같은 추가 대안을 고려하면, 전체적으로 고려할 대안은

- 1) 대안 1 : 기존대안
- 2) 대안 2 : 통합열차 I (2000년, 철도청)
- 3) 대안 3 : 통합열차 II (2002년 5월, 철도청)
- 4) 대안 4 : 시간 최소화안
- 5) 대안 5 : 비용 최소화안
- 6) 대안 6 : 수익 극대화안

3) LINDO Systems, Inc. USA, www.lindo.com.
 4) AlphaECP, BARON, DICOPT, MINLP, SBB 등.

으로 구성된다. 여기서는 기존의 통합열차 I 및 II의 경우는 자세히 언급하지 않기로 하나, 이후의 종합분석에서 비교 대상으로 한다.

1) 운영비용 최소화 모형

무엇보다도 비용계수의 신뢰성 있는 추정과 환산계수(scale factor)의 적용을 통해 모형의 적합성을 높였다. 운영비용의 최소화의 경향은 운영비용이 큰 고속열차의 편성수가 적게 나타났다. 이는 고정된 수요를 충족하는데 있어서 서울-부산간을 운행하는 고속열차의 수요가 중장거리 열차로 전이되는 결과로서

<표 3> 각 모형별 운행패턴(회/편도)

(a) 2004년 기준

차종	운행구간	대안 1 (기존대안)	대안 2 (통합열차 I)	대안 3 (통합열차 II)
고속열차	서울-부산	25	32	42
	서울-동대구	15	10	16
	광명-부산	-	12	-
	광명-동대구	-	12	-
	용산-서대전	-	4	-
	용산-목포	14	6	8
	용산-광주	6	10	10
	용산-익산	-	-	4
	소 계	60	86	80
중·장거리열차	서울-부산	48	10	7
	서울-해운대	1	-	-
	서울-포항	2	4	1
	서울-목포	12	2	9
	서울-광주	13	-	-
	서대전-목포	-	4	-
	소 계	76	20	17
구간연계열차	서울-대전	1	-	16
	서울-부산	-	10	-
	서울-포항	-	1	-
	서울(용산)-서대전	-	-	4
	서울-동대구	1	-	-
	용산-목포	-	5	-
	대전-동대구	-	-	16
	대전-부산	1	-	-
	대구-부산	8	-	-
	동대구-부산	-	-	16
	동대구-부산진	2	-	-
	서대전-목포	-	-	4
	김천-부산	1	-	-
소 계	14	16	56	
합 계		150	122	153

(b) 2004년 기준(<표 3> 계속)

차종	운행구간	대안 4 (시간최소화)	대안 5 (비용최소화)	대안 6 (수익극대화)
고속열차	서울-부산	40	24	52
	서울-동대구	16	3	13
	서울-대전	3	13	-
	용산-목포	28	15	10
	용산-광주	-	2	13
	용산-익산	-	-	8
소 계	87	57	96	
중·장거리열차	서울-부산	9	10	5
	서울-김천	3	-	-
	서울-동대구	-	10	-
	서울-대전	14	5	10
	서울-목포	3	9	12
	소 계	29	34	27
구간연계열차	서울-대전	16	25	19
	대전-동대구	14	15	16
	동대구-부산	17	17	-
	조치원-부산	-	-	5
	서대전-익산	4	4	3
	소 계	51	61	43
합 계	167	152	166	

(c) 2006년 기준(<표 3> 계속)

차종	운행구간	대안 4 (시간최소화)	대안 5 (비용최소화)	대안 6 (수익극대화)
고속열차	서울-부산	36	28	52
	서울-동대구	21	14	13
	광명-동대구	5	-	11
	서울-대전	-	17	-
	광명-부산	28	-	-
	용산-목포	31	26	28
	용산-광주	-	2	-
	용산-익산	-	-	3
	소 계	121	87	107
중·장거리열차	서울-부산	13	16	15
	서울-동대구	9	-	-
	서울-대전	-	11	12
	서울-목포	4	6	18
	소 계	26	33	45
구간연계열차	서울-대전	8	8	14
	대전-동대구	7	8	15
	동대구-부산	8	9	-
	서대전-익산	-	-	4
	서대전-송정리	4	-	-
	소 계	27	25	33
합 계	174	145	185	

(d) 2008년 기준(〈표 3〉 계속)

차종	운행구간	대안 4 (시간 최소화)	대안 5 (비용 최소화)	대안 6 (수익 극대화)
고속열차	서울-부산	36	40	58
	서울-동대구	22	-	17
	광명-대전	5	-	-
	서울-대전	-	26	-
	광명-부산	28	-	-
	용산-목포	28	24	11
	용산-광주	-	2	17
	용산-익산	-	-	10
소 계	119	92	113	
중·장거리 열차	서울-부산	11	13	8
	서울-김천	1	-	-
	서울-동대구	-	11	-
	서울-대전	10	6	12
	서울-목포	4	9	11
	소 계	26	39	31
구간연계열차	서울-대전	8	15	13
	대전-동대구	8	6	22
	동대구-부산	9	9	-
	서대전-익산	5	5	4
	천안-김천	-	-	7
	소 계	30	35	46
합 계		175	166	190

오히려, 고정된 고속열차의 객차수를 변동 가능하게 한다면 고속열차의 편성수를 증편할 수도 있다. 위의 기본안과 대비 추가된 운행구간은 중장거리 열차의 서울-동대구 구간으로서 운영비가 높은 고속열차의 서울-동대구

구간의 열차가 감소되면서 추가된 구간으로 사료된다.

2) 통행시간 최소화의 모형

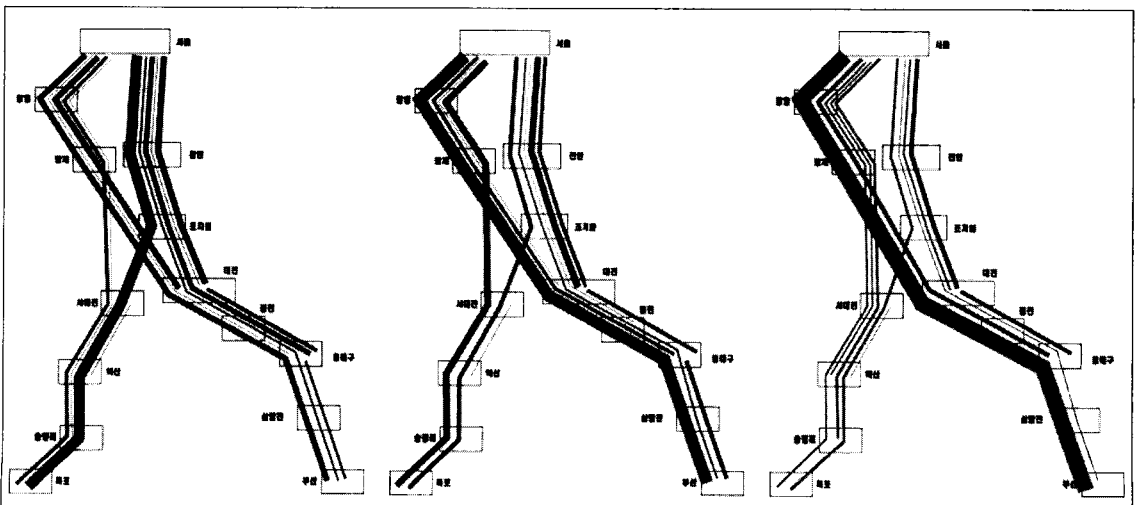
통행시간에 관한 모형은 총통행시간의 최소화와 정차시간 손실의 최소화를 고려할 수 있다. 본 연구에서는 총 통행시간에 관한 최소화를 시도하였는데, 이는 각 열차종별간의 표정속도 차이와 운행거리에 따른 것으로서, 역간 OD를 처리함에 있어 가장 빠른 통행시간을 가지는 고속열차가 증편되는 결과를 보였다. 중장거리 열차 및 구간연계열차의 편성수는 감소하였다.

3) 운영자 수익 최대화의 모형

수익 극대화 모형은 객차 1량당 이용하는 평균탑승객에 출발/도착간의 운임을 곱함으로써 산출된다. 전체 수익의 최대화를 목적으로 하며, 역간 OD를 처리함에 있어 가장 요금이 비싼 고속열차의 편성수가 증편되었다. 구간연계열차의 경우, 요금이 가장 저렴한 이유로 가장 적은 편성수를 보였으며, 동대구-부산 구간의 구간연계열차는 편성되지 않았다. 고속열차의 서울-부산 구간의 편성수가 크게 늘어나는 이유로 동대구-부산 구간의 제외된 것으로 사료된다.

4) 대안의 종합

비용 최소화문제와 통행시간 최소화문제의 노선체계는 각각 〈그림 6〉과 같다. 또한 각 대안의 편성수에 대한 열차운영계획의 비교분석은 아래의 표와 같



*범례 : 서울역 기준으로 왼쪽부터 고속열차, 중·장거리열차, 구간연계열차

〈그림 6〉 2004년의 비용, 통행시간 최소화 및 수익 최대화에 따른 운행패턴

다. 참고적으로 두 모형의 분석은 Windows XP 운영체제를 기반으로 한 Intel Xeon 2GHz PC에서 실시되었으며, 각각 소요되는 CPU 시간은 24분, 18분, 22분의 결과를 보였다.

대안들의 2004년의 구간별 운행패턴(회/편도)은 <표 4>, <표 5>, <표 6>, <표 7>, <표 8>, <표 9>과 같다.

Ⅴ. 열차운행패턴 대안의 평가

1. 개요

다양한 열차운행전략에 따라 지역 간 열차운행패턴

대안이 개발되었다. 이러한 대안들에 대해서 각 대안의 목표 달성정도를 평가하고, 가장 합리적인 대안을 선정하는 과정이 필요하다. 각 열차운행패턴 대안은 다양한 효과를 발생하게 되는데, 이러한 효과를 객관적인 효과척도(MOE:measure of effectiveness)를 사용하여 분석하는 것이 필요하다. 또한 이러한 효과척도는 각 목적(objective)에 따라서 정의가 된 것이다. 각 대안에 대한 효과분석이 완료되면, 분석결과를 종합화하는 평가과정을 거치게 되는데, 통상 사용된 효과척도 사이의 가중치(weight)를 결정하는 단계가 필요하며 이를 위해서는 사회적 합의(societal consensus)가 필요한 전 장에서 설명하였다.

<표 4> 대안1(기존대안)간의 구간별 용량 분포

구 간	선로 용량	고속 열차	일반여객열차			화물 열차	열차 합계	기타선 회수	여유 용량	
			중장거리 열차	구간연계 열차	통근 열차					
경부선	서울-시흥	172	60	76	2		8	146	21	5
	시흥-천안	162		76	2		32	110	20	32
	천안-조치원	158		76	2	2	35	115	9	34
	조치원-조차장	158		76	2	2	35	115	9	34
	조차장-대전	158	40	51	2	2	35	130		28
	대전-김천	156	40	51	2	2	29	124		32
	김천-동대구	156	40	51	3	2	29	125		31
	동대구-삼랑진	159	25	49	12	1	26	113		46
호남선	삼랑진-부산	158	25	49	12		26	112		46
	서대전-익산	142	20	25		3	16	64	8	70
	익산-송정리	139	20	25		2	2	49		90
	송정리-목포	143	14	12		3	2	31		112

<표 5> 대안2(통합열차 I)간의 구간별 용량 분포

구 간	선로 용량	고속 열차	일반여객열차			화물 열차	열차 합계	여유 용량	
			중장거리 열차	구간연계 열차	통근 열차				
경부선	서울-시흥	172	62	32	55		8	157	15
	시흥-천안	162		32	55		32	119	43
	천안-조치원	158		28	41	2	35	106	52
	조치원-조차장	158		28	49	2	35	114	44
	조차장-대전	158	66	16	26	2	35	145	13
	대전-김천	156	66	16	22	2	29	135	21
	김천-동대구	156	66	16	22	2	29	135	21
	동대구-삼랑진	159	44	12	36	1	26	119	40
	삼랑진-부산	158	44	10	26		26	106	52
호남선	서대전-익산	142	16	16	23	3	16	74	68
	익산-송정리	139	16	9	11	2	2	40	99
	송정리-목포	143	6	6	5	3	2	22	121

〈표 6〉 대안3(통합열차II)간의 구간별 용량 분포(2004년)

구 간	선로 용량	고속 열차	일반여객열차			화물열차	열차 합계	여유 용량	
			중장거리 열차	구간연계 열차	통근 열차				
경부선	서울-시흥	172	80	54	20		8	162	10
	시흥-천안	162		54	20		32	106	56
	천안-조치원	158		39	20	2	35	96	62
	조치원-조차장	158		38	26	2	35	101	57
	조차장-대전	158	58	11	22	2	35	128	30
	대전-김천	156	58	11	16	2	29	116	40
	김천-동대구	156	58	11	19	2	29	119	37
	동대구-삼랑진	159	42	8	29	1	26	106	53
	삼랑진-부산	158	42	11	24		26	103	55
호남선	서대전-익산	142	22	27	12	3	16	80	62
	익산-송정리	139	18	16	8	2	2	46	93
	송정리-목포	143	8	13	4	3	2	30	113

〈표 7〉 대안4(시간최소화) 간의 구간별 용량 분포

구 간	선로 용량	고속 열차	일반여객열차			화물열차	열차 합계	여유 용량	
			중장거리 열차	구간연계 열차	통근 열차				
경부선	서울-시흥	172	87	29	16		8	140	11
	시흥-천안	162		29	16		32	77	65
	천안-조치원	158		29	16	2	35	82	67
	조치원-조차장	158		29	16	2	35	82	67
	조차장-대전	158	59	26	16	2	35	138	20
	대전-김천	156	56	12	14	2	29	113	43
	김천-동대구	156	56	9	14	2	29	110	46
	동대구-삼랑진	159	40	9	17	1	26	93	66
	삼랑진-부산	158	40	9	17		26	92	66
호남선	서대전-익산	142	28	3	4	3	16	54	80
	익산-송정리	139	28	3		2	2	35	104
	송정리-목포	143	28	3		3	2	36	107

〈표 8〉 대안5(비용최소화)간의 구간별 용량 분포

구 간	선로 용량	고속 열차	일반여객열차			화물열차	열차 합계	여유 용량	
			중장거리 열차	구간연계 열차	통근 열차				
경부선	서울-시흥	172	57	34	25		8	124	27
	시흥-천안	162		34	25		32	91	51
	천안-조치원	158		34	25	2	35	96	53
	조치원-조차장	158		34	25	2	35	96	53
	조차장-대전	158	40	25	25	2	35	127	31
	대전-김천	156	27	20	15	2	29	93	63
	김천-동대구	156	27	20	15	2	29	93	63
	동대구-삼랑진	159	24	10	17	1	26	78	81
	삼랑진-부산	158	24	10	17		26	77	81
호남선	서대전-익산	142	17	9	4	3	16	49	85
	익산-송정리	139	17	9		2	2	30	109
	송정리-목포	143	15	9		3	2	29	114

〈표 9〉 대안6(수익극대화)간의 구간별 용량 분포

구 간	선로 용량	고속 열차	일반여객열차			화물열차	열차 합계	여유 용량	
			중장거리 열차	구간연계 열차	통근 열차				
경부선	서울-시흥	172	96	27	19		8	150	1
	시흥-천안	162		27	19		32	78	64
	천안-조치원	158		27	19	2	35	83	66
	조치원-조차장	158		27	24	2	35	88	61
	조차장-대전	158	65	15	24	2	35	141	17
	대전-김천	156	65	5	21	2	29	122	34
	김천-동대구	156	65	5	21	2	29	122	34
	동대구-삼랑진	159	52	5	5	1	26	89	70
호남선	삼랑진-부산	158	52	5	5		26	88	70
	서대전-익산	142	31	12	3	3	16	65	69
	익산-송정리	139	23	12		2	2	39	100
	송정리-목포	143	10	12		3	2	27	116

2. 효과척도

앞 절에서 보았듯이, 대안작성을 위해 활용한 목표(objective)를 근거로 효과척도를 개발하는 것이 순서이다. 본 연구를 위해서는 다양한 효과척도를 사용하였다.

1) 철도수요 변화

기존 경부고속철도 관련 수요추정 연구에서 보면 고속철도에 대한 수요추정 시, 기존 일반철도는 대체적으로 현재와 같은 서비스 형태와 수준을 보이는 것으로 가정하고 있다. 그러나 위의 표에서도 보았듯이 서울-시흥간의 용량 제약 등으로 인해 고속철도의 운행과 일반철도의 운행이 서로 상관관계를 가지고 있어 독립적이지 못하다. 이는 다르게 말하면, 고속철도의 운행을 치중하게 되면 일반철도의 운행이 제약을 받게 되고, 결과적으로 일반철도의 수요를 제약하게 되는 현상을 초래하게 될 것이다.

또한 고속철도의 경우도, 일반철도의 운행이 제약을 받게 되면 일반철도에서의 전환량이 더 높아지는 현상을 보일 확률이 크다. 따라서 앞서 개발한 각종 운행대안이 고속열차 일반철도의 수요에 대해 미치는 영향을 분석하는 것은 매우 중요하다. 만약 이들 수요에 대한 효과가 크다면, 운행대안을 다시 작성하는 환류(feedback)과정이 필요하게 된다.

2) 수요만족을 위한 소요자원(Resource)

또 다른 차원에서는 주어진 수요를 만족스럽게 수송하기 위해서 필요한 철도 운행과 관련한 자원(resource)

의 소요량을 활용할 수 있다. 이는 비용 효율성(cost-effectiveness) 차원에서의 접근과 일맥상통하는데 여기에는 차량·km, 수송비용 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 차량·km만 고려하였는데 이는 수송비용이 차량·km와 비례하기 때문이다.

3) 사용자 차원의 고려

사용자 입장에서 보면 기존의 철도서비스와 비교해 볼 경우, 향상되는 집단도 있을 수 있고, 또 한편으로는 지금보다 서비스 지수가 악화되는 집단도 발생할 것이다. 이는 이미 파레토 최적(Pareto optimum)의 상태가 발생하기 어렵다는 것을 설명한 바가 있다. 이에 고려될 수 있는 사항으로 인·km에 근거한 비용, 통행을 완결하기 위한 환승 수, 환승대기를 포함한 대기시간의 합, 인·hour을 고려할 수 있다.

3. 철도운행패턴대안의 효과분석

개발된 각 효과척도에 근거하여 각 운행패턴 대안에 대한 효과를 체계적으로 분석하였다. 분석에 사용한 자료와 방법에 대한 설명 후에 분석결과를 제시한다.

1) 분석방법

수송수요는 이미 진술한 바가 있으며, 각종 효과를 체계적으로 분석하기 위해 노선망 분석(Network Analysis)을 시행하였다. 사용된 네트워크는 경부선, 호남선에 대해서 서비스별로 대중교통망(Transit Network)을 개발하였는데, 이러한 네트워크의 형태는

통상적인 대중교통망이 아니라 소위 말하는 Hyper N/W의 형태를 갖게 된다. 분석도구는 수요분석 및 각종 효과척도 계산을 위해 TRANPLAN⁵⁾ 프로그램을 사용하였다.

2) 분석결과

각 운영계획을 철도수요 변화, 열차·km의 변화, 환승객의 변화를 대상으로 분석하였다. <표 10>은 대안별 철도수요의 변화와 열차·km의 변화, 대안별 수입의 변화를 <표 11>은 수단간의 환승객 수를 나타내었다.

4. 최적 대안의 선택

<표 10>에서 제시된 각종 효과척도에 대하여 철도 운영목표에 가장 잘 부합하는 "최적대안"을 선정하는 것이 필요하다. 각 효과척도간의 가중치는 전술한 바와 같이 사회적 합의를 전제로 하나, 본 논문에서는 현재의 효과척도의 단순 비교를 통해 최적대안을 선정한다. 이는 새로운 문제를 야기할 수 있으나, 현재에서 각 입장의 의견을 적용할 수 없는 이유이다. 이를 해결하는 방법으로 공청회 등의 절차를 활용할 필요가 있으며, 설문조사를 통해 추후 보완해야 할 것이다.

본 연구에서는 추가적인 논의를 전제로 통합열차 운영계획Ⅱ를 최적대안으로 선택하였다. 이는 사회적 측면에서 타 대안보다 시설활용률이 높고, 수요

의 처리정도, 새로운 고속철도의 유발가능성 등이 고려된 것이다. 시설활용률이 높다고 하는 것은, 특히 서울-시흥의 경우 제한된 용량을 사용하는 1회의 열차운행이 대전에서 반복을 하는 것보다는, 동대구까지 가서 반복하는 것이 대전이남 지역의 서비스 빈도를 높일 수 있을 것이라는 것을 의미하기도 한다.

Ⅶ. 결론 및 향후연구과제

1. 결론

기존의 열차운행계획은 과거 통계자료 및 구간 수요를 근거로 작성되었다. 그동안 철도가 공공성을 고려하여 비효율적인 경영정책이 이루어졌음을 감안할 때, 장래 변화하는 철도시스템에서는 경쟁력 있는 변화도 모색할 수 있을 것이다. 하지만, 열차운행계획의 경험 및 통계적 기법의 도입은 자칫 주관적일 수 있기 때문에, 수리학적 계획모형으로 접근하여 객관성을 확보토록 노력하기 위해 본 연구에서는 세 가지 모형을 적용하여 기존 철도청에서 선정된 계획을 비용, 통행시간 최소화, 운전자 수익 최대화에 근거한 모형으로 새로이 작성해 보았다. 비록 전국 역사를 대상으로 한 전국노선의 사례연구는 아니었지만, 2004년 이후 도래할 새로운 운영계획을 작성하고 전략에 따른 비교를 통해 실행가능성을 점검해 보았다.

<표 10> 대안의 효과

MOE	단위	기존대안	운영계획1	운영계획2	시간최소화	비용최소화	수익최대화
인-천km		105,390	100,091	106,646	96,905	100,837	100,542
인-hour		102,050	96,320	101,770	93,620	97,690	95,810
수요변화1)	인/일	560,830	614,120	621,470	589,130	605,730	598,470
대안별 열차·km	열차·km	102,898	83,960	83,992	89,500	74,136	96,120
환승객수 변화	인/일	23,611	24,849	26,920	22,930	23,915	25,488

<표 11> 환승객 수 변화

(단위:인)

환승수단	대안 1 (기존대안)	대안 2 (통합열차 I)	대안 3 (통합열차Ⅱ)	대안 4 (시간최소화안)	대안 5 (비용최소화안)	대안 6 (수익극대화안)
고속철도- 구간연계열차	5,968	8,570	9,491	7,471	7,134	9,013
중장거리- 구간연계열차	11,063	5,637	7,811	5,995	7,146	6,861

5) URBAN ANALYSIS GROUP, TRANPLAN VER 9.0

결과적으로 기존의 철도청에서 작성한 운영계획과 다른 다양한 패턴의 운행구간과 종별 편성수의 차이를 확인하였다. 비록 본 논문에서 설정한 세 개의 모형이 최적의 대안으로 채택되지는 않았으나, 효과적도의 적용을 통해 추후, 모형개발의 연구 시 정책 판단에 용이할 것으로 사료된다. 이러한 결과를 산출함에 있어, 어려운 점은 각 구간의 기하급수적 증가, 결정변수의 초기값 선정 등이 있으나, 본 고에서는 그동안 연구된 각종 경험적 기법의 적용과 실제 편성 가능한 변수의 적용을 통해 이를 해결하였다.

운행전략에 따른 열차운영계획은 열차종별 운행회수 및 정차역 결정 등에 따른 역무자동화설비 구축, 시설·장비수급계획, 유지보수계획, 운영조직 및 인력 확보 등의 기초자료로도 활용이 가능하며 운영효율화 및 철도서비스 개선에 도움을 줄 수 있을 것이다.

2. 향후연구과제

향후 더욱 정확한 전략효과를 계량적으로 정확하게 측정할 수 있는 효과적도(MOE)의 적용을 위해 모형을 재 설계할 필요가 있다. 무엇보다도 실제 자료의 적용이 가능하고, 이를 통합하여 계산할 수 있는 새로운 해법과 기법의 개발이 선행되어야 한다. 또한 자료 전체 절차의 활용이 쉽게 하고, 장래의 철도계획에도 반영될 수 있도록 객관적인 지표를 제시하는 연구가 필요하다. 또한 대규모 자료의 처리 문제 및 효율적인 알고리즘의 개발의 지속적인 연구로, 전국적인 철도망에 확장함으로써 철도운영주체의 전략수립에 도움을 줘야 할 것이다.

운행전략의 수립시 운영목적의 동시 고려도 아울러 생각해 볼 수 있을 것이다. 동시 고려를 위해 다목적 계획법 (Multiobjective planning)의 적용이 용이하나, 이 또한 가중치에 의존한 제3의 목적식이 산출되므로 신중히 고려되어야 할 사항이다. 부수적인 즉, 수송수요, 비용, 용량 등의 객관성 확보 및 추정시 신뢰성을 바탕으로 한 자료의 획득 또한 무엇보다 열차 운영계획에서 중요한 사항이라 할 수 있겠다.

참고문헌

1. 이종득(1989), 철도공학, 노해출판사.
2. Andreas Faludi(1973), "A Reader in Planning

- Theory", Pergamon Press, Oxford.
3. R. N. Anthony(1965), "Planning and control systems: A framework for analysis", Harvard, Boston.
4. Y. H. Chang, C. H. Yeh, C. C. Shen(2000), "A Multiobjective Model for Passenger Train Services Planning: Application to Taiwan's High-Speed Rail Line", Transportation Research 34B, pp.91~106.
5. Jean-François cordeau, Palo Toth & Daniele Vigo(1998), "A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling", Transportation Science Vol. 32, No. 4, pp.380~404.
6. Arjang A. Assad(1980), Modelling of Rail Networks: Toward A Routing/Makeup Model, Transportation Research 14B, pp.101~114.
7. M. R. Bussieck, T. Kreuzer & U. T. Zimmermann(1996), "Optimal Lines for Railway System", European Journal of Operational Research Vol. 96, pp.54~63.
8. M. T. Claessens(1994), "A Mathematical Programming Model to Determine a Set of Operation Lines at Minimal Costs", Murthy, T. K. S., Mellitt, B., Brebbia, C. A., Scutto, G., Sone, S.(Eds.), Computers in Railways IV, Railway Operations, Vol. 2. Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, pp.117~123
9. M. T. Claessens, N. M. van Dijk, P. J. Zwaneveld(1998), "Cost Optimal Allocation of Rail Passenger lines", European Journal of Operational Research Vol. 110, pp.474~489.
10. J. H. M. Goossens, C. P. M. van Hoesel, L. G. Kroon(2001), "A Branch-and-Cut Approach for Solving Line Planning Problems", METEOR Research Memorandum RM/01/016, University of Maastricht.
11. 한국철도기술연구원(2002), "기존간선과 고속선의 수요분담과 선로용량 할당시스템 개발", 철도청.
12. Edward M. B. Smith & Constantinos C. Pantelides(1997), "Global Optimisation of Nonconvex MINLPs", Computers and Chemical

- Engineering Vol. 21, Suppl. 1, pp. S791 ~S796
13. Arjang A. Assad(1980), "Models for Rail Transportation", Transportation Research 14A, pp.205~220..
 14. Michael Bussieck(1998), "Optimal Lines in Public Transport, PhD thesis, Braunschweig University of Technology.
 15. LINDO Systems Inc (2002), LINGO-User's Manual.
 16. 강맹규(1991), "네트워크와 알고리즘", 박영사.
 17. 철도청(각년도), "철도통계연보, 철도수송계획".

✉ 주 작 성 자 : 김기현

✉ 논문투고일 : 2002. 11. 1

논문심사일 : 2002. 11. 16 (1차)

2003. 1. 3 (2차)

심사판정일 : 2003. 1. 3

✉ 반론접수기한 : 2003. 4. 30