

단계적 최적화 기법을 통한 관광지역 내 궤도교통수단의 요금결정 연구

양재호 · 김응철* · 최은진
인천대학교 건설환경공학과

A Study on Determining Fares for Rail Transit in Tour Regions Using a Stepwise Optimization

YANG, Jae Ho · KIM, Eungcheol* · CHOI, Eunjin

Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, Incheon 406-772, Korea

Abstract

Fare is critical variable when deciding project feasibility for a monorail system in tour regions. This study aims to estimate optimal fare balancing operators and users. An object of this study is Wolmi-eunha circulation monorail at Jung-Gu, Wolmido in Incheon metropolitan city. This study introduces a stepwise optimization technique to decide relevant fare ranges between operator's cost and user's cost. We found that the optimized station interval is 0.532km, the optimized headway is 0.206hour, optimal number of stations is 12, optimal number of vehicles is 3. Using these optimized variables, minimum user cost and minimum operator cost can be calculated. Optimal fare range is calculated from 1,261 Won to 5,063 Won. It is also found that sightseeing transport system has less sensitivity on access cost because distance differences among sightseeing transport stations located in the tour regions are negligible.

관광지역 내 궤도교통수단 요금은 사업 타당성 판단의 중요한 변수가 되는 요소이다. 기존 운영자 위주의 요금 결정에서 벗어나, 이용자 측면까지 동시에 고려된 요금을 산출함으로써 운영자와 이용자를 동시에 만족시키는데 본 연구의 목적이 있다. 본 연구의 대상은 인천광역시 중구 월미도 일대를 순환하는 월미은하레일이다. 본 연구에서는 요금의 적정 범위를 판단하기 위해 운영자 비용과 이용자 비용을 최적화하는 모형을 구축하였다. 최적화된 모형을 활용하여 각 변수의 값을 산출한 결과, 정류장 간격은 0.532km, 운행 간격은 0.206시, 정류장 수는 12개소, 운행 대수는 3대로 도출되었다. 이렇게 도출된 변수들을 활용하여 이용자가 지불해야 하는 최소요금과 운영자가 징수해야 하는 최소요금을 산출하고, 이를 근거로 요금의 적정범위를 분석한 결과 최소 1,261원에서 최대 5,063원인 것으로 분석되었다. 관광교통수단의 경우 정류장 자체가 관광지 내에 위치하므로 모형 적용시 접근거리 감소폭이 매우 적어 접근비용의 변화폭이 미미하다는 점을 확인할 수 있었다.

Keywords

access cost, determining fares, monorail, rail transit, stepwise optimization
접근비용, 요금결정, 모노레일, 궤도교통수단, 단계적 최적화

* : Corresponding Author
eckim@incheon.ac.kr, Phone: +82-32-835-8469, Fax: +82-32-835-0775

Received 30 July 2013, Accepted 31 October 2013

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

관광교통수단 중 하나인 모노레일의 최적요금을 산정하기 위해서는 운영자와 이용자를 동시에 고려한 요금을 산정할 필요가 있다. 관광교통수단으로서 기존의 최적요금산정방법을 찾기 위해 해남 땅끝모노레일, 삼척 대금굴, 정선 화암동굴, 철원 평화전망대, 문경 가은 영상타운에 설치되어 있는 모노레일의 각각의 설치 업체와 접촉하여 요금산정방법을 확인한 결과 지역이나 각 지자체 실정에 맞게 요금을 설정하고, 기존 모노레일 및 케이블카의 요금수준을 참고하여 요금을 결정하는 것으로 확인되었다. 즉, 기존의 최적요금 산출방법은 기 설치된 모노레일의 요금과 지자체의 실정을 파악하여 개략적인 요금을 결정하는 것이었다. 본 연구에서는 해석적 검토를 통해 이용자와 운영자 측면에서 각각 합리적인 요금을 산출하여 그 범위를 산정하고자 한다. 국내의 경우, 운영자가 요금을 결정하다 보니 요금 결정시 고려되는 사항은 주로 운영자의 입장과 관련된 것들이었다. 이러한 요금 결정 방식 때문에 실제 수요자인 이용자에게 관한 사항이 상당부분 배제되어 온 것이 사실이다. 사회적으로 최적 요금은 운영자와 이용자를 동시에 고려한 요금이 되어야 할 것이므로, 본 연구에서는 이 두 가지를 동시에 고려한 요금을 산정하는 방법을 개발코자 한다.

2. 연구의 대상과 범위

연구의 대상은 인천 월미관광특구 모노레일로 선정하였다. 이 모노레일은 아직까지 운행이 되지 않은 상태로 운영자의 입장만 고려된 요금을 적용할 계획으로 있는 전형적인 사례이다. 그리하여 본 논문에서 적용된 이용자가 동시에 고려된 요금산정식을 적용하여 비교한다면, 기존의 산출된 요금과 차이점을 분명하게 가려낼 수 있을 것이라 판단되어 인천 월미관광특구 모노레일을 연구의 대상으로 선정하였다.

인천 월미관광특구 모노레일은 궤도거더 위에 걸쳐 주행하는 좌좌식(跨座式) 방식으로 기본계획상 1단계 사업은 6.265km(차고지 인입선 1.154km 포함)를 순환식으로 운영하고 총 5개의 정류장 설치, 4편성(2량 1편성)의 차량을 도입하여 운행하도록 되어 있었다. 실시 설계 과정을 거치면서 약간의 변화가 있었지만 기본적인



Figure 1. The study site - Wolmi-eunha monorail

목적과 기능 등은 유지되어 2009년 설치가 완료되었다. 이 중에서 본 연구는 인천 월미관광특구 모노레일의 노선길, 배차간격, 정류장간격 등 운영자비용과 이용자비용에 영향을 미치는 변수 추출이 가능한 1단계 구간만을 연구대상으로 선정하였다.

3. 연구의 방법 및 흐름

총 비용의 평균과 한계비용을 산출하기 위해서, 본 연구는 모노레일 노선에 대해 규모의 경제가 있다고 가정하였고, 독립된 궤도를 주행하게 되므로 외부경제효과와 혼잡비용은 제외하였다.

| | | |
|--|---|-----------------|
| 1. Introduction | Background and goal | Object and site |
| | Method | Flow |
| 2. Literature review | Study on cost function for calculating fee | |
| | Cost functions based on economies of scale | |
| | Transportation cost functions based on traffic operations | |
| 3. Modeling for calculating fee | Estimation of optimal price | |
| | Estimation of total cost | |
| | Estimation of operation cost | |
| | Estimation of user cost | |
| | Estimation of optimal price model | |
| 4. Model application and result analysis | Data collection | |
| | Analysis of application results | |
| | Estimation of optimal variation value | |
| | Estimation of operation, average, marginal cost | |
| | Estimation of optimal price | |
| 5. Conclusion | Integration of results | |
| | Conclusions and Further research | |

Figure 2. Study flow

II. 선행연구의 고찰

1. 요금 산출을 위한 비용함수 관련 연구

모노레일의 비용 최적화 방안에 대한 기존사례를 찾기 어려울 뿐만 아니라, 도심 관광용 모노레일에 대한 우리나라 사례가 없어 본 연구에서는 대중교통수단의 운영 최적화에 관한 선행연구들을 중심으로 비용함수 등을 도출하는데 주력했다. 또한 최적화된 운영은 곧 운영비용의 최소화를 의미하는 것으로 판단하고, 이러한 측면에서 운영의 최적화는 비용의 최적화와 밀접한 관련이 있다고 판단하여 이와 관련된 문헌을 검토하였다.

대중교통수단의 최적요금 산정모형은 Jansson(1980)이 제시하였는데, 연구에서 제시한 산정 방법은 운영자비용과 이용자비용의 합으로 정의한 노선의 총 교통비용을 최소화시키는 것이었다. 운영자비용은 정차지체와 정류장간격을 고려한 차량대수와 시간당 차량운행비용의 곱으로 산출하였고, 이용자비용은 이용자가 모노레일로부터 제공받을 수 있는 서비스지역의 범위와 정류장까지의 접근범위를 고려한 접근시간비용과 통행시간비용, 대기시간비용의 합으로 산출하였다. 최소화된 총 비용을 산출하기 위하여 비용에 영향을 미치는 배차간격, 노선길이, 정류장 간격에 대해서는 Mohring 법칙을 적용하여 최적화된 값을 산출하여 적용하였으며, 최소화된 총 비용은 교통경제학의 이론적 결과를 바탕으로 평균비용, 한계비용의 값을 산출, 운영자와 이용자간의 최적요금을 산출하였다.

Lee S. H.(1999)은 버스 운행특성을 고려한 운영효율 최적화 방안에 관한 연구를 통해 기존의 연구에서 제한요인으로 인해 충분히 고려하지 못한 정류장 간격에 따른 이용자의 접근시간, 버스의 정류장 진출입시 감·가속으로 인한 지체, 그리고 승객의 승·하차로 인한 지체를 고려한 모형을 구축하였다. 그 모형은 대중교통의 운영효율을 최대화하고, 운영비를 최소화 할 수 있는 운행간격, 버스정류장의 정차시간, 정류장 간격 및 보유대수 등을 복합적으로 도출할 수 있는 모형으로 기존 단변수적인 차원에서 모형개발과는 달리 영향요인 간 복합적 변수를 고려한 보다 현실성 있는 모형개발을 시도하였다.

Lee S. H.이 현실적인 모형개발을 시도하였다면, Seo J. Y.(2002)은 현실적인 모형에 정부의 보조금 개념을 도입하여 한걸음 더 나아간 모형개발을 시도하였다. 서준영은 노선운영에 있어 이용자 비용과 운영자 비

용을 구성하는 여러 결정계수(노선길이, 배차간격, 정류장간격)를 고려한 총 교통비용 모형, 평균교통비용 모형, 한계교통비용 모형을 정립하였다. 또한 Mohring 법칙을 적용하여 결정계수, 이용자비용과 운영자비용을 합으로 하는 총비용, 평균비용, 한계비용을 최소화하였다. 서준영의 연구는 그러한 과정을 통해 정립한 모형을 인천시 시내버스 41개 표본노선(도시형버스 38개노선, 좌석버스 3개 노선)에 대해 적용하여, 규모의 경제에 기초한 보조이론을 배경으로 노선별 최적 정부보조금 지급수준을 산정하였다.

2. 교통 운영에 기초한 교통비용 함수

버스 운영에 관련된 연구들 중 Jan Owen Jansson (1980)에 의한 연구는 총 비용을 버스의 운행비, 승객의 대기시간, 승객의 통행시간을 금전으로 환산한 비용으로 보아 1개 노선, 고정된 수요에 대해 총비용을 최소화하는 최적인영시격에 관하여 연구하였다.

Vijayakumar S.(1986)은 차량의 감·가속시간을 고려하여 모형을 정립하였으며, 또한 정거장마다의 승·하차인원의 변동을 고려하였다.

본 연구에서는 규모의 경제성 존재를 가정하고 교통 운영에 기초한 모형식에 적용하여 최적요금을 산출해 보기로 한다. 추가적으로 교통운영에 기초한 최소화 된 총 비용 산정시 이용자의 접근시간비용을 고려하여 실제 인천 월미관광특구 모노레일의 계획자료를 이용, 최적화된 결정계수값(최적노선길이, 최적 배차간격, 최적 정류장 간격)을 산출해 보기로 한다.

3. 기존 요금산정 결과와 모형의 결과 비교

관광지역내의 관광교통수단과 기존 퀘도교통수단의 요금 산정과 관련된 공통점은 운영자 중심의 건설비용 및 운영비용의 회수에 중점을 두고 요금을 산정한다는 점이다. 두 수단의 차이점을 살펴보면 관광교통수단은 이용자의 통행 목적이 여가통행이 주를 이룬다는 것과 정류장의 증가에 따른 접근거리 감소폭이 매우 적다는 것 등이 있고, 기존 퀘도교통수단은 통행의 목적이 다양하며, 정류장 증가에 따른 접근거리 감소폭이 다양하게 나타난다는 것 등이다.

본 논문과 기존요금산정방법과의 결정적인 차이점은 이용자 측면의 요금이 고려되었다는 것이다. 즉, 개략적

Table 1. Comparisons of existing cases and this study

| | Existing case | This study |
|------------------------------------|---|--|
| Method of Calculation | Considering a local government and level of location. Decision of existing fee cases. Calculation of rough fare considering user side only. | Calculating user and operator optimal fare and decision of minimum and maximum fare. |
| Example of fare calculating method | Resioin of tourist resort like Haenam and Mungyeong decide to 4,000won. Sparsely settled regions like Cheorwon decide to 3,000won | Optimal minimum user cost is 5,063won, optimal minimum operator cost is 1,261. So, we decide fare range from 1,261won to 5,063won. |

요금판단보다는 각각의 최적요금식을 도출하고, 도출된 최적요금식을 교통공학적 관점에서 산출한 수요에 적용시켜 이용자 요금의 최소값과 운영자요금의 최소값을 산출하여 요금의 적정범위를 산출했다는 점이다.

4. 기존 사례의 문제점

현재 대한민국에서 운영중인 모노레일은 여러 가지가 있으나 그 중 관광용 모노레일로 운행되고 있는 곳은 정선군 화암동굴, 해남 땅끝관광지, 삼척 대금굴, 철원 평화전망대, 문경 가운영상타운이 있다. 이러한 기존의 사례를 조사해 본 결과, 기존 요금설정은 최적요금의 개념이 아닌 운영자 측면만을 고려한 단순개략적인 방법을 이용한 요금산출 방법을 사용하고 있었다. 이 방법은 이용자의 입장은 전혀 고려되지 않은 방법으로 두 주체를 모두 고려한 요금산출 방법의 개선이 필요하다.

그러나 현재까지 적정 요금을 산정하지 못한 이유는 첫째, 관광교통수단이면서 공로상을 모노레일로 주행하

Table 2. Monorail fares in existing systems

(Jan, 2013)

| Classification | Adult | Youth | Child | note |
|-----------------------------|-------|-------|-------|------------|
| Jeongseon Hwaam cave | 2,000 | 1,500 | 1,000 | One-way |
| Haenam Ttangkkeut | 4,000 | 3,000 | 2,000 | Round trip |
| Samcheok Daeguem cave | 5,000 | 5,000 | 3,000 | Round trip |
| Cheorwon Peace observatory | 3,000 | 3,000 | 2,000 | Round trip |
| Mungyeong Gaeun Cinema town | 4,000 | 3,000 | 2,000 | Round trip |

는 국내 유사 설치사례가 없고, 둘째, 실질적인 모노레일 운송원가 산정 등의 기준 없이 원가 산정시 운영자 측면만을 고려한 요금, 즉 일정기간의 운영비용을 평균화하여 일일 모노레일 운영대당 운송운가를 원가로 산정한다는 점이다.

위와 같은 상황으로 인해 발생할 수 있는 문제점은 첫째, 요금을 지불하는 승객의 입장은 전혀 고려가 되어있지 않다는 것이고, 둘째, 일반적으로 수용하기 힘든 가격이 책정될 경우는 곧바로 탑승수요의 감소로 연결되어 사업성이 감소할 가능성이 있다는 것이며, 셋째, 이용자 측면의 요금을 적용하려 해도 사람마다 느끼는 한계비용의 차이가 있어 그 다양한 변수를 최적값을 통해 적용한 사례가 없다는 점이다.

이에 본 연구는 관광교통수단의 요금산출기법이 존재하고 있지 않음에 착안하여 가장 유사한 산출기법들의 검토를 통해 공공교통수단의 요금결정 방법론을 관광교통수단에 맞도록 수정·보완하여 적용하였다. 즉, 운영자 측면에서의 비용 제시만이 아닌 모노레일을 이용하는 이용자의 비용도 포함하는 요금을 산출하여 관광교통수단이 가질 수 있는 최적요금 산출방안을 제시하였다. 최적요금 산출방법은 운영자비용과 이용자 비용에 영향을 주는 변수들의 최적값을 통해 최적 요금범위를 산정한다. 이렇게 함으로써 운영자 측면과 이용자 측면 모두 최대 만족을 얻을 수 있는 요금을 결정할 수 있게 될 것이다.

III. 요금산출 모형 도출

1. 최적요금의 산정

본 연구에서는 이용자 최적요금과 운영자 최적요금을 산출하는 산출식을 도출하여 각각의 요금의 최소값을 산출, 상호 인정할 수 있는 요금의 범위를 도출하도록 한다.

본 연구는 노선운영에 따른 최적 요금의 적정수준을 Frankena의 규모의 경제에 기초한 보조이론으로 한다. Frankena의 규모의 경제에 기초한 보조이론에 근거하여 승객수가 증가하면 노선운영에 따른 장기평균비용곡선은 음(-)의 기울기를 갖게 될 것이며, 장기한계비용곡선은 장기평균비용곡선의 아래에 놓이게 될 것이다. 관광교통수단이 존재하는 환경에서 효율적인 통행량 수준은 모노레일의 통행수요곡선과 장기한계비용곡선이 교차하는 점에서 결정된다. 또한 노선운영에 있어 승객수 OQ를 생산하는데 소요되는 장기총비용을 최소화되도록

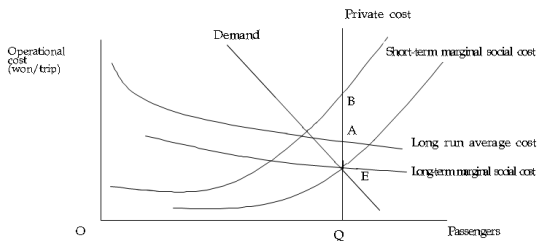


Figure 3. Calculation of optimal fare considering operator and user cost.

운영시설과 운행서비스를 공급한다면, 장기한계비용 곡선과 승객 수요 곡선의 교차점에서 단기한계비용곡선도 교차하게 될 것이다. 여기서 혼잡비용을 무시한다면, 모노레일 이용승객수준에서 통행시간가치, 대기시간가치, 접근시간가치를 산정할 수 있고, 이러한 사적 시간비용은 '비용'곡선으로 나타낼 수 있다. 또한 시간당 모노레일 운영자가 얻는 수입은 승객수 OQ 와 요금 BE 의 곱, $OQ \times BE$ 로 나타낼 수 있다. 요금 적정수준을 살펴보기 위하여 운영에 따른 비용을 비교해야 하는데, 만일 승객수 OQ 가 발생할 경우 승객이 지불해야하는 접근시간, 대기시간, 통행시간 비용은 QB 이고 모노레일 운영에 따른 통행당 비용은 $OQ \times AB$ 가 된다. 결론적으로 본 관광교통수단의 적정비용은 $OQ \times EB$ 와 $OQ \times AB$ 사이의 비용으로 결정된다.

2. 총 비용 모형

총 비용모형은 모노레일 운행비용, 접근비용, 대기시간비용 및 통행시간 비용의 합으로 설정한다.

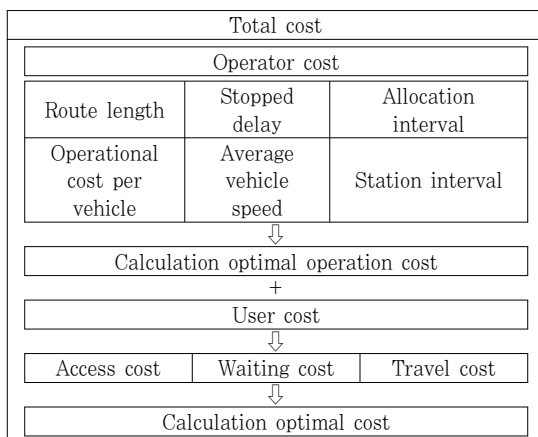


Figure 4. Components of total cost

Table 3. Variables and definitions

| Operator's variables and definitions | User's variables and definitions |
|---|--|
| C_0 : Operational cost | C_u : User cost |
| F : Number of vehicle | C_{uw} : Waiting cost |
| M : Operational cost per vehicle (won/hour-vehicle) | C_{ua} : Access cost |
| H : Allocation interval (hour/vehicle) | C_{ut} : Travel cost |
| D : Route length(km) | T_p : Delay time (hour/person) |
| V : Average vehicle speed (km/hour) | Q : Total number of user(person/hour) |
| T_m : Stopped delay(hour) | aw : Value of user waiting time(won/hour-person) |
| S : Station interval(km) | aa : Value of user access time(won/hour-person) |
| V_w : Station access speed(km/hour) | at : Value of user travel time(won/hour-person) |
| | L : Average moving distance to station(km) |

본 논문에서 사용된 변수의 정의는 Table 3과 같다.

모형을 위한 가정은 고정된 노선과 고정된 운행 스케줄 서비스가 노선에 제공되고, 승객의 정류장 도착분포는 균일 분포를 따르고 모노레일의 도착은 정기성을 가지고, 수요는 모노레일 노선을 따라 균일하게 분포하는 연속확률분포를 따르고 모노레일 승차를 위해 도보로 관광지에서 가장 인접한 모노레일 정류장으로 간다는 것이다. 관광지에서 모노레일 정류장까지는 도보가 유일한 접근수단이며, 모노레일의 최대 운행대수를 모노레일 보유대수로 한다. 축은 균일한 노선길이 D 를 가지고 있고, 단일궤도상을 주행하는 노선체계이다. 시간당 이용승객은 전체 축과 시간에 대해서 균일하게 분포되어 있으며 모노레일 서비스의 질에 대해서는 영향을 받지 않는다. 모노레일 이용객은 정류장에서만 타고 내리며, 정류장마다 정차하는 서비스로 운영된다. 이용승객은 차량용량을 초과하지 못하며, 인입선을 타고 관제센터로 출입하는 교대차량의 운행은 분석에서 제외한다. 모노레일의 건설에 사용되는 초기투자비용은 관광교통수단으로서 지방자치단체 차원의 공공자원이 투자된 수단이고, 초기투자비용의 회수 개념이 적용되지 않는 공공 인프라 구축의 특수성이 있으므로 분석에서 제외한다. 이 부분은 본 연구의 한계로, 초기투자비용의 제외는 기존의 분석방법과 다소 차이가 있는 방법이지만 현실적인 차원에서 비용을 계산하여야 했으므로 부득이하게 제외하였다.

운영자 비용은 운영에 필요한 보유대수에 비례한다고

가정하여 모노레일 운행대수와 대당 운행비용의 곱으로 표현했다. 여기서 모노레일 운행대수는 1회 순환하는데 소요되는 시간에 시간당 운행대수에 해당하는 운행간격으로 나누어서 산출된다. 그리고 1회 순환하는데 소요되는 시간은 모노레일의 주행시간과 정류장에서의 정지체체의 총합으로 구성된다. 정지지체는 모노레일이 정류장에 들어가고 나올 때 감·가속으로 인한 지체(Tm)와 정류장에서 승객의 승·하차로 인한 지체(Tp)의 합으로 구성된다. 총 정지지체는 모노레일이 각 정류장에서 감·가속으로 인한 지체에 정류장 수를 곱하고 승객의 승·하차로 인한 지체에 대당 모노레일의 평균 승객 수를 곱하여 산출한다.

따라서 1회 순환하는데 소요되는 시간은 다음과 같다.

$$R = \frac{D}{V} + Tm \times N + Tp \times Q \times H \quad (1)$$

여기서 정류장 수는 노선의 총 길이를 정류장 간격으로 나눈 값이다.

$$N = \frac{D}{S} \quad (2)$$

$$R = \frac{D}{V} + Tm \times \frac{D}{S} + Tp \times Q \times H \quad (3)$$

모노레일 운행 대수는 1회 왕복 소요시간을 운행간격으로 나눈 것이다.

$$F = \frac{R}{H} = \frac{1}{H} \left(\frac{D}{V} + Tm \times \frac{D}{S} + Tp \times Q \times H \right) \quad (4)$$

따라서 운영자 비용은 다음과 같다.

$$C_0 = F \times M = \frac{M}{H} \left(\frac{D}{V} + Tm \times \frac{D}{S} + Tp \times Q \times H \right) \quad (5)$$

본 연구에서 승객의 시간가치 비용은 모노레일 접근시간비용과 모노레일의 대기시간비용, 통행시간비용으로 구분될 수 있다. 이용자비용의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Cu = C_{uw} + C_{ua} + C_{ut} \quad (6)$$

Cu : 이용자비용(원/시)

Cuw : 대기시간비용(원/시)

Cua : 접근시간비용(원/시)

Cut : 통행시간비용(원/시)

승객의 대기시간비용은 시간당 대기시간의 가치에 총 탑승객수와 승객당 평균대기시간의 곱으로 표현된다. 본문에서 대기시간은 모노레일의 운행간격의 1/2로 가정한다. 즉, 승객의 정류장 도착분포는 균일 분포를 따르고 모노레일의 도착은 정시성을 지닌다는 것을 의미한다. 따라서, 대기시간비용은 다음과 같다.

$$C_{uw} = a_w \times Q \times \frac{H}{2} \quad (7)$$

승객의 접근시간비용은 시간당 접근시간 가치에 총 탑승객수와 승객당 평균 접근시간을 곱해서 산출한다. 그리고 승객당 평균 접근시간은 평균 접근거리를 평균 접근 속도로 나누어서 계산한다. 수요는 노선을 따라 균일하게 분포하고, 모노레일 승차를 위해 도보로 출발지에서 가장 인접한 정류장으로 간다고 가정했으므로, 평균 접근거리는 연속확률분포로 가정하면 정류장 간격의 1/4에 해당한다. 또한 정류장의 접근수단은 도보로 국한되므로, 접근시간비용은 다음과 같다.

$$C_{ua} = a_a \times Q \times \frac{S}{4V_w} \quad (8)$$

승객의 통행시간 비용은 시간당 통행시간가치와 총 탑승객수와 평균통행시간의 곱으로 설정한다. 평균 통행시간은 주행에 따른 승객의 평균 주행시간과 정류장에서의 정지지체로 인한 통행시간의 증가의 합으로 구성된다. 승객의 평균 주행시간은 평균통행거리를 모노레일의 평균속도로 나누어서 산출한다. 정지지체로 인한 통행시간의 증가는 모노레일의 감·가속 정지지체와 승객의 승·하차로 인한 지체의 합으로 구성된다. 모노레일의 감·가속 정지지체는 승객의 평균통행거리를 정류장간격으로 나누고 모노레일의 감·가속으로 인한 지체시간을 곱해서 산출한다. 승객의 승하차로 인한 지체는 승객의 평균통행거리를 노선의 총 길이로 나눈 값에 대당 평균 승객수와 승객의 평균 승하차시간을 곱해서 결정된다. 그러므로 평균주행시간은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{ut} &= \frac{L}{V} + Tm \times \frac{L}{S} + Tp \times Q \times H \times \frac{S}{D} \times \frac{L}{S} \\ &= L \left(\frac{1}{V} + Tm \times \frac{1}{S} + Tp \times Q \times H \times \frac{S}{D} \times \frac{1}{S} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

평균통행시간비용은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Cut} &= at \times Q \times \text{Tut} \\ &= atQL \left(\frac{1}{V} + Tm + \frac{1}{S} + Tp \times Q \times H \times \frac{1}{D} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

따라서 대기시간비용, 접근시간비용, 통행시간비용의 합으로 구성된 이용자 비용모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Cu} &= aw \times Q \times \frac{H}{2} + aa \times Q \times \frac{S}{4Vw} + at \times Q \\ &\quad \times L \left(\frac{1}{V} + Tm + \frac{1}{S} + Tp \times Q \times H \times \frac{1}{D} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

총비용은 운영자비용과 이용자비용의 합으로 구성되므로 총교통비용의 모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{TC} &= \text{Co} + \text{Cu} = \frac{M}{H} \left(\frac{D}{V} + Tm \times \frac{D}{S} + Tp \times Q \times H \right) \\ &\quad + aw \times Q \times \frac{H}{2} + aa \times Q \times \frac{S}{4Vw} \\ &\quad + atQL \left(\frac{1}{V} + Tm + \frac{1}{S} + Tp \times Q \times H \times \frac{1}{D} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

위 식은 운행간격과 정류장 간격을 최적화하기 위해 사용된다. 총 비용을 각각 변수들에 대해서 미분한 값을 0으로 놓고 풀면 최적 운행간격과 정류장 간격이 산출된다.

총비용을 최소화하는 정류장 간격은 총비용함수(TC)를 정류장 간격(S)에 대해서 미분한 값을 0으로 설정함으로써 해결이 되며, 이차 도함수는 식(14)와 같다.

$$\frac{\partial \text{TC}}{\partial S} = -\frac{M}{H} Tm \frac{D}{S^2} + aa \frac{Q}{4Vw} - atQTm \frac{L}{S} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial S^2} = 2 \frac{M}{H} Tm \frac{D}{S^3} + 2atQTm \frac{L}{S^3} \geq 0 \quad (14)$$

TC의 2차 도함수가 최소값을 갖기 위해서는 헤시안 행렬식(Hessian Matrix)을 산정하고 그 값이 0보다 큼을 확인하여 최소값의 존재여부를 검증하여야 한다. 이를 위한 헤시안 행렬식은 식(15)와 같다.

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial S^2} & \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial S \partial H} \\ \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial H \partial S} & \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial H^2} \end{vmatrix} = \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial S^2} \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial H^2} - \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial S \partial H} \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial H \partial S} > 0 \quad (15)$$

식을 계산하면 0보다 큰 값을 얻어 최소값이 존재함을 검증할 수 있다. 최소값의 존재함을 검증하였고, TC는 S에 대해서 convex 이므로 식(14)는 총교통비용을 최소화하는 정류장간격(S*)를 산출한다. 위 식을 풀면, 최적 정류장 간격이 산출되고 다음과 같다.

$$S^* = \sqrt{\frac{4VwTm}{\alpha a Q} \left(\frac{MD}{H} + \alpha tQL \right)} \quad (16)$$

총 비용을 최소화하는 운행 간격은 총비용함수(TC)를 차량운행간격 H에 대해서 미분한 값을 0으로 설정함으로써 해결이 되며, 이차 도함수는 식(18)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{TC}}{\partial H} &= -\frac{M}{H^2} \left(\frac{D}{V} + Tm \frac{D}{S} \right) + awQ \frac{1}{2} \\ &\quad + atQ2Tp \frac{L}{D} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial H^2} = \frac{2MD}{H^3} \left(\frac{1}{V} + \frac{Tm}{S} \right) \geq 0 \quad (18)$$

식(18)을 헤시안 행렬식을 통해 부호검증을 하면 식(19)와 같다.

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial H^2} & \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial H \partial S} \\ \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial S \partial H} & \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial S^2} \end{vmatrix} = \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial H^2} \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial S^2} - \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial H \partial S} \frac{\partial^2 \text{TC}}{\partial S \partial H} > 0 \quad (19)$$

식을 계산하면 0보다 큰 값을 얻어 최소값이 존재함을 검증할 수 있다. 최소값의 존재함을 검증하였고, TC는 S에 대해서 convex 이므로 다음 식으로 총비용을 최소화하는 운행간격(H*)를 산출할 수 있다.

$$H^* = \sqrt{\frac{MD \left(\frac{1}{V} + \frac{Tm}{S} \right)}{Q \left(\frac{1}{2} aw + \alpha tTpQ \frac{L}{D} \right)}} \quad (20)$$

위에서 결정된 정류장 간격은 철두시 수요를 충족시키도록 결정되며 위에서 산출한 두 값 들을 이용하여 정류장 수, 정류장 지체와 모노레일 보유대수를 산정한다.

정류장 수는 노선의 총 길이를 정류장 간격으로 나누어서 산출한다. 정류장의 정차시간(d)는 모노레일이 정류장에서 가·감속으로 인한 지체와 승·하차로 인한 지체의 합으로 구성된다. 가·감속으로 인한 지체는 일정한 상수값을 취하고 승·하차로 인한 지체는 승객수에 비례한다. 즉, 승·하차로 인한 지체는 평균승객당 승·하차시간에 각 정류장의 평균승객수를 곱해서 산출한다.

각 정류장의 평균 승객수는 시간당 승객수요에 운행 간격을 곱한 값인 차량당 승객을 정류장 수로 나누어서 산출한다. 따라서 정류장의 수와 정류장의 정차시간은 다음과 같다.

$$N^* = \frac{D}{S^*} \tag{21}$$

$$d^* = T_m + T_p \times Q \times H^* \times \frac{1}{N^*} \tag{22}$$

위에서 운영자 비용 산정시 언급했듯이 운행대수는 1회 순환하는데 소요되는 시간에 시간당 운행대수에 해당하는 운행간격으로 나누어서 산출된다.

$$F^* = \frac{R}{H^*} = \frac{1}{H^*} \left(\frac{D}{V} + T_m \times \frac{D}{S^*} + T_p \times Q \times H^* \right) \tag{23}$$

IV. 모형의 적용 및 결과분석

1. 자료수집

본 장에서는 계획된 운영과 모형 적용의 결과를 분석해 보기로 한다. 침투 수요를 충족시키는 정류장 간격과 운행간격을 구하고 이에 따른 정류장 수, 정차시간 및 보유대수를 산출한 후, 인천 월미관광특구 모노레일 Data를 이용하여 적용, 결과를 분석하였다.

승객의 접근속도는 4.3km/h, 모노레일이 정류장에 들어가고 나올 때의 감·가속으로 인한 지체는 14초, 승객의 승·하차로 인한 지체는 3.5초, 차량의 용량은 70명/대, 모노레일의 보유대수는 예비차량을 포함하여 4대, 시간당 운영비는 200,000원, 차량운행간격은 0.10시/대, 노선길이는 6.1km, 평균주행속도는 19.3km/h, 정류장간격은 1.525km로 정의하였다. 정류장에 접근하는 속도는 4.3km/h 이고 이용자의 정류장까지의 평균 이동거리는 0.315km 였다. 자료는 인천 월미관광특구 모노레일의 운영계획자료를 사용하였다. 통행시간계수 at는 한국개발연구원(KDI) 도로 철도 부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완연구(제5판) 열차의 비업무 통행시간가치(2007년 기준)를 인용하되, 4판의 2003년 기준치와 비교하여 보간법을 사용, 2013년 예측치를 적용하였다. 대기시간비용계수와 접근시간비용계수는 현재까지 정확히 산정된 값이 없으므로 Seo J. Y.(2003)의 연구에서 제시된 바와 같이 통행시간가치의 1.5배를 가정, 같은 값으로 적용하였다.

Table 4. Operational plan of Incheon Wolmi special tourist zone monorail.

| Operator cost variables and definitions | |
|---|--------------------------|
| Co : Operator cost | |
| F : Number of vehicle | 4 vehicles |
| M : Operational cost per vehicle (won/hour-vehicle) | 200,000 won/hour-vehicle |
| H : Allocation interval (hour/vehicle) | 6/60=0.10hour/vehicle |
| D : Route length(km) | 6.1km |
| V : Average vehicle speed (km/hour) | 19.3km/hour |
| Tm : Stopped delay(hour) | 14sec=0.003889hour |
| S : Station interval(km) | 6.1/4=1.525km |
| Vw : Station access speed (km/hour) | 4.3km/hour |

| User cost variables and definitions | |
|---|-------------------------|
| Cu : User cost | Cua = Access cost |
| Cuw : Waiting cost | Cut = Travel cost |
| Tp : Delay time (hour/person) | 3.5sec/person=0.00972 |
| Q : Total number of user (person/hour) | 404person/hour |
| aw : Value of user waiting time (won/hour-person) | 7,529 won/hour · person |
| aa : Value of user access time (won/hour-person) | 7,529 won/hour · person |
| at : Value of user travel time (won/hour-person) | 5,300 won/hour · person |
| L : Average moving distance to station (km) | 0.315km |

2. 모형의 적용

기존의 운영자 비용은 식(5)에 의해 741,774원-대/시로 산출된다. 기존 이용자 비용은 식(11)에 의해 905,966원-대/시로 산출된다. 그러므로 기존 총 비용은 식(12)에 의해 1,647,739원-대/시로 산출된다.

모형을 적용하기 위한 최적 정류장 간격(S^*)은 식(16)에 의해 약 532m로 산출된다. 최적 운행간격(H^*)은 식(20)에 의해 약 12분/대로 산출된다. 최적 정류장 수(N^*)는 식(21)에 의해 약 12개소인 것으로 산출된다. 최적 정차시간(d^*)은 식(22)에 의해 약 38초로 산출된다.

최적운행대수(F)는 식(23)에 의해 3대(예비차 포함 4대)로 산출된다. 위에서 도출된 비용을 바탕으로 도출된 운영자비용은 다음과 같다.

$$Co^* = F \times M$$

$$= \frac{M}{H^*} \left(\frac{D}{V} + Tm \times \frac{D}{S^*} + Tp \times Q \times H^* \right) \quad (24)$$

각각의 값을 넣어 계산하면 도출된 운영자 비용은 428,833원-대/시로 산출된다.

도출된 운영자 비용에 총 운행시간을 곱해주고, 총 운행시간과 시간당 운행횟수의 곱인 총 운행횟수를 나누어 주면 대당 운행비용으로 환산이 가능하고, 환산된 비용을 대당 탑승인원수로 나누어주면 1인당 운영비용을 계산할 수 있다. 이를 계산하면 1인당 운영비용은 1,261 원으로 계산되어 진다.

마찬가지로 도출된 이용자 비용은 다음과 같다.

$$Cu^* = Cuw + Cua + Cut$$

$$= aw \times Q \times \frac{H^*}{2} + aa \times Q \times \frac{S^*}{4Vw} + atQL$$

$$\left(\frac{1}{V} + Tm + \frac{1}{S^*} + Tp \times Q \times H^* \times \frac{1}{D} \right) \quad (25)$$

각각의 값을 넣어 계산하면 도출된 이용자 비용은 1,721,359원-대/시로 산출된다.

도출된 이용자 비용에 총 이용시간을 곱해주고, 총 운행시간과 시간당 운행횟수의 곱인 총 이용횟수를 나누어 주면 대당 이용비용으로 환산되고, 환산된 비용을 대당 탑승인원수로 나누어주면 1인당 부담해야 하는 이용비용을 계산할 수 있다. 이를 계산하면 1인당 이용비용은 5,063원으로 계산되어 진다. 그러므로 도출된 총 비용은 도출된 이용자 비용과 도출된 운영자 비용의 합인 2,150,192원-대/시로 산출된다. 위와 같이 모형을 적용한 결과값을 정리하면 Table 5와 같다.

Table 5를 분석해 보면 기존 버스같은 대중교통 수단의 경우 비용 최적화시 정류장까지의 접근시간비용 감소폭이 크게 나타나 총비용이 크게 줄어들게 되나, 관광용 모노레일의 경우는 정류장 자체가 관광지 내에 위치하므로 접근거리의 감소폭이 매우 적어 비용 감소폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 정류장 간격의 감소로는 총비용을 감소시키는 것이 어렵다는 것을 의미하는데, 이는 관광지 입지특성이 반영된 결과로 판단된다. 모델링에 의해 도출된 운영계획에 따른 총 비용은 기존 운영계획에 의한 총 비용보다 증가하였으나 이는 추가적인 투자를 통한 추가수익의 발생이 가능성을 의미하므로 운영계획의 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

Table 5. Results of application

| Items | Operational plan | Modeling operation |
|-----------------------------------|------------------|--------------------|
| Station interval(km) | 1.525 | 0.532 |
| Allocation interval(hour/vehicle) | 0.1 | 0.206 |
| Number of station | 4 | 12 |
| Stopped delay(sec) | 56 | 38 |
| Number of vehicle | 4 | 3 |
| Operator's cost(won-vehicle/hour) | 741,774 | 428,833 |
| User's cost(won-vehicle/hour) | 905,966 | 1,721,359 |
| Total cost(won-vehicle/hour) | 1,647,739 | 2,150,192 |

Table 6. Comparing existing cases of station interval and calculated station interval

| Classification | Route length (m) | Number of station | Average length of station interval(m) |
|-----------------------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|
| Jeongseon Hwaam cave | 500 | 2 | 250 |
| Haenam Ttangkkeut | 400 | 2 | 200 |
| Samcheok Daegeum cave | 610 | 2 | 305 |
| Cheorwon Peace observatory | 280 | 2 | 140 |
| Mungyeong Gaeun Cinema town | 330 | 2 | 165 |
| Calculated interval | 6100 | 12 | 532 |

또한 정류장의 간격의 적정성 역시 따져보아야 하는데, 현재 관광수단으로서의 모노레일과 관련된 정류장 간격은 기 규정된 시설규정이 없는 상태이다. 따라서 기존 사례 조사를 통해 적정성을 검토해 보았다.

빠른 속도로 주행하는 인원수송용 대중교통수단으로서의 모노레일이 본 모노레일처럼 약 500m 간격의 정류장 간격을 갖는다면 그 자체로도 문제가 될 것이나, 본 관광용 모노레일은 평균시속 20km도 되지 않는 저속주행 관광시스템임을 감안하여 기존의 사례들과 비교하여 볼 때, 약 500m정도의 정류장 간격은 큰 무리없이 운행 가능한 시스템이라고 판단된다.

V. 결론

운영자 비용과 이용자 비용의 차이는 모노레일의 운행 및 정류장 간격 등의 차이에 의해서 발생하는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 운영자와 이용자를 동시에 고려할 수 있는 변수들만을 가려내어, 현재 책정되고 있는 요금을 되짚어보고, 각종 경전철 및 모노레일 사업시 시행되고

있는 민감도 분석에서의 효율적 분석방안을 통해 최적요금을 산출할 수 있는 범위를 제시하였다. 연구결과, 적정요금의 범위는 최소 1,261원, 최대 5,063원으로 정해져야 할 것이며, 이 요금이 민감도 분석 및 타당성 검토 시 적용 가능한 요금이 될 수 있다.

향후 사회적 관점에서 최적인 총 비용을 산출하는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 각각의 주체별 연구과제로 운영자 측면에서는 정류장 제작 등에 관련된 추가적인 운영자 비용의 분석이 필요할 것으로 판단되고, 이용자 측면에서는 관광교통수단의 승객시간가치 산출방안과 개통·운영 후 이용자의 지불의사와 관련된 설문조사를 실시하여 이용자가 실질적으로 느끼는 요금을 산출한 후, 민감도 분석을 통해 얻은 비용과 비교, 분석 후 보다 현실적인 요금산출 방안을 강구하여야 할 것이다.

REFERENCES

Anton H., Busby R. C. (2004, Translator Ko H. J., Kim J. G., Kim C. B., Seo D. Y., Lee C. H., Jung G. D.), CONTEMPORARY LINEAR ALGEBRA, WILEY Press(Haksuljungbo Press), 680-689.

Frankena M. W. (2001, Translator Noh J. H.), Traffic Economics Theory and Policy, Nanam Press, 170-171.

Incheon Transit Cooperation (2007), Wolmi Special Tour Region Monorail Operation Feasibility Study Final Report.

Incheon Transit Cooperation (2007), Wolmi Special Tour Region Monorail Operation Master Plan Final Report.

Jansson J. O. (1980), A Simple Bus Line Model for Optimization of Service Frequency and Bus Size.

Korea Development Institute (2004), A Study on Roadway · Railway Part Feasibility Study Standard Guideline Supplementation and Amendment (4th Edition), 190.

Korea Development Institute (2008), A Study on Roadway · Railway Part Feasibility Study Standard Guideline Supplementation and Amendment (5th Edition), 332.

Lee S. H. (1999), A Methodology for Determining

Optimal Bus Operation With Respect to Operation Characteristics, Seoul National University, A Master Dissertation.

Seo J. Y. (2003), The Derivation of the Optimal Subsidy Using the Passenger and Operator's Cost, Hanyang University, A Master Dissertation.

Vijayakumar S. (1986), Optimal Vehicle Size for Road Based Urban Public Transport in Developing Countries.

Won J. M. (2003), Transit Economy Theory, Bosunggak, 134-166.

佐藤信之 (2008, Translator Baek N. W., Lee S. H., Kim J. I., Chun M. C., Lee B. S., Lee S. J.), Monorail and New Transportation System, Goldenbell Press, 48.

알림 : 본 논문은 대한교통학회에서 주최한 제68회 학술 발표회(2013. 2. 23)에서 발표한 "관광지역 내 레도 교통수단의 요금결정 연구"의 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

- ☞ 주 작성자 : 양재호
- ☞ 교신저자 : 김응철
- ☞ 논문투고일 : 2013. 7. 30
- ☞ 논문심사일 : 2013. 9. 4 (1차)
2013. 10. 1 (2차)
2013. 10. 17 (3차)
2013. 10. 31 (4차)
- ☞ 심사판정일 : 2013. 10. 31
- ☞ 반론접수기한 : 2014. 4. 30
- ☞ 3인 익명 심사필
- ☞ 1인 abstract 교정필