

# GTX-A 노선의 수도권 통합대중교통 요금 Paradox 영향 추정

## Impact of GTX-A Line to Seoul Metropolitan Integrated Public Transit Fare Paradox

신 성 일\* · 김 석 호\*\* · 김 희 천\*\*\*

\* 주저자 : 서울연구원 공간교통연구실 연구위원

\*\* 공저자 : 서울교통공사 영업본부 본부장

\*\*\* 교신저자 : 서울대학교 행정대학원 박사과정

Seongil Shin\* · Seok Ho Kim\*\* · Hee Chun Kim\*\*\*

\* Research Associate, Dept. of Space Transportation Research, The Seoul Institute

\*\* Executive Vice President, Sales Operation Headquarter, Seoul Metro

\*\*\* Ph.D. Student, Graduate School of Public Administration, Seoul National University

† Corresponding author : Hee Chun Kim, kimhee1000@korea.kr

Vol. 22 No.1(2023)  
February, 2023  
pp.25~38

pISSN 1738-0774  
eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.1.25>

Received 9 January 2023  
Revised 2 February 2023  
Accepted 3 February 2023

© 2023. The Korea Institute of  
Intelligent Transport Systems. All  
rights reserved.

### 요 약

수도권 도시철도는 승객의 통행경로를 추정하지 못하는 경로미확정 이슈가 존재한다. 이 때문에 도시철도 요금은 승객이 최소이동거리를 통행한다는 가정으로 계산된다. 따라서 도시철도의 환승역이 추가되면 최소이동거리가 줄고 요금수입이 줄어드는 구간이 나타난다. 본 연구는 이러한 현상을 요금 Paradox(Shin, 2022)로 규정하고 GTX-A 개통에 의한 요금 Paradox 영향을 추정하였다. 이를 위해 GTX-A의 개통 전후의 시나리오를 구축하여 수도권 통합거리비례요금제에 의한 추가요금의 감소분을 추정하였다. 요금 Paradox는 일일 수입금의 약 0.024%에 해당되는 것으로 분석되었다. 향후 GTX-A, B, C, D 및 경전철 노선 신설 등의 요금정책 의사결정 틀로서 활용될 것으로 기대된다.

핵심어 : 수도권 도시철도, 경로미확정, 요금 Paradox, 통합거리비례요금제, 추가요금, GTX-A

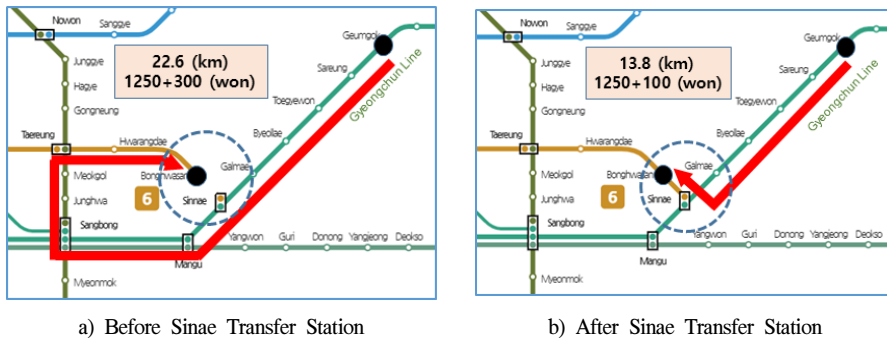
### ABSTRACT

Seoul Metropolitan Urban Railroad has an undecided route that does not estimate the passenger transportation route. For this reason, the fare of the urban railroad is calculated by the assumption that passengers pass through the minimum distance. Therefore, if a transfer station on the urban railroad is added, the trip shortest distance could be decreased and the fare also reduced. In this study, this phenomenon defines the fare paradox(Shin, 2022) and estimates the impact of the fare paradox by opening the GTX-A. For this purpose, a scenario before and after the opening of the GTX-A has been established, and an additional fare has been estimated by proportional planning of the Seoul Metropolitan Integrated Distance Based Fare Policy. Fare Paradox was analyzed to about 0.024 % of daily income. It is expected to be used as a plan to determine a rate policy, such as the establishment of a GTX-A, B, C, D, and a light rail line.

Key words : Seoul Metropolitan Urban Railroad, Undecided Route, Fare Paradox, Integrated Distance Based Fare Policy, Additional Fare, GTX-A

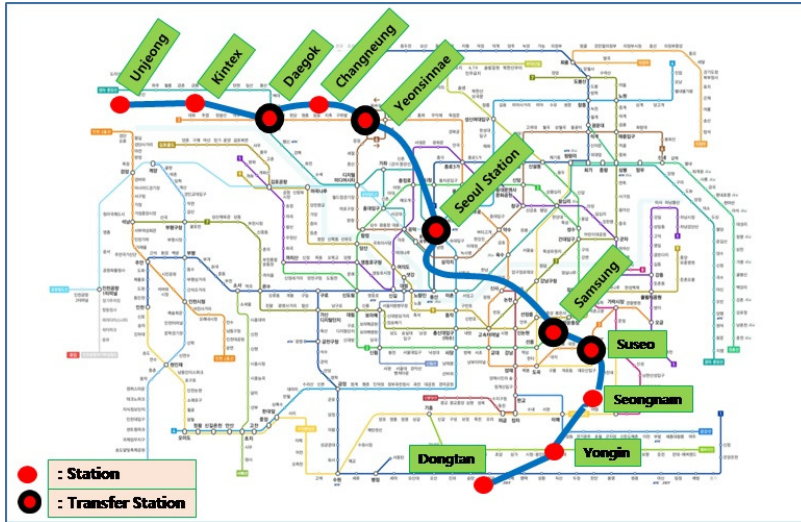
## I. 서론

수도권 도시철도는 승객의 통행경로에 대한 정보를 정확하게 추정하지 못하는 경향을 보인다. 이를 본 연구는 ‘경로미확정’으로 명명한다. 경로미확정은 도시철도 통행 승객의 최초 진입역 TagIn(이하 TagIn) 정보와 최종 진출역 TagOut(이하 TagOut) 정보에 한정되어 교통카드에 기록되기 때문에 나타난다. 즉, 승객이 어떤 환승역을 통과했는지에 대한 Tag 기록(이하 환승 Tag)이 존재하지 않는다. 경로미확정으로 인해 도시철도 요금 부과기준은 승객이 TagIn과 TagOut을 연결하는 최소이동거리를 계산하여 산정된다. 그러므로 새로운 역사 또는 노선신설과 같은 수도권 도시철도망의 변화로 인하여 요금이 감소하는 현상이 나타난다. Shin(2022)은 6호선과 경춘선을 환승으로 연결하는 ‘신내’역이 신설(2019.12.19)되면서 요금이 줄어드는 현상을 수도권 도시철도에서 확인했다. Shin(2022)은 이를 비합리적 교통투자의 유사한 사례로서 파악하고 수도권 도시철도 요금 Paradox(이하 요금 Paradox)로 정의하였다. 요금 Paradox란 수도권 도시철도의 노선신설로 인해 통행거리 및 통행시간에 대한 효율성이 향상되나 운송기관 입장에서는 요금수입의 감소로 연결되는 모순된 상황을 표현한다. <Fig. 1>의 신내역이 환승역으로 개통되기 전·후로 경춘선 금곡과 6호선 봉화산을 연결하는 최단 통행거리 산정에 따른 요금의 변화를 추정하였다. <Fig. 1-a>는 신내역으로 환승되기 전은 22.6(Km)로 최단 거리가 나타나서 기본요금 1250(원)과 추가요금 300(원)이 부과된다. 반면 <Fig. 1-b>는 신내역이 환승역으로 건설된 후 13.8(Km)의 추가요금 100(원)이 부과된다. 결과적으로 신내역이 환승역으로 개통되어 최단통행거리는 줄어들어 통행시간은 단축되었다. 그러나 이로 인해 수도권 거리비례요금제에 의해서 부과되는 통행 요금 200(원)이 감소하여 운송기관의 수입금 하락을 이끈다.



<Fig. 1> Shortest Distance and Fare Change After Sinae Transfer Station

한편 2024년 6월 개통 예정인 광역급행노선인 GTX-A 노선의 83.1(Km) 영업거리와 11개 역이 신설되는 수도권 도시철도망의 대규모 변화가 예상된다. 이 중 5개 역이 기존 역사를 환승역으로 이용하면서 역 간 최단 통행거리의 변화가 상당한 수준에 이를 것으로 판단된다. <Fig. 2>에서 나타나는 수도권 도시철도망에서 GTX-A 노선이 신설되는 환승역으로 인해 역간 최단거리 단축이 크게 나타나는 ‘연신내’, ‘서울역’, ‘삼성’이 연결되는 노선의 중앙부에서 크게 변화될 것으로 전망된다. 이러한 광역급행노선 신설계획이 GTX-A, B, C, D, E까지 계속 진행될 예정이다. 또한, 신규 역사 및 민자 경전철의 진입이 예상되는 상황에서 요금 Paradox에 대한 이해는 수도권 통합요금체계의 중요한 정책 판단 근거가 될 수 있다.



<Fig. 2> GTX-A Line in Seoul Metropolitan Railway Network

본 연구는 GTX-A 노선의 개통에 한정하여 역 간 최단거리의 단축으로 인한 요금의 감소로 나타나는 요금 Paradox에 의한 영향을 추정한다. 이를 위해 GTX-A노선이 개통되었다는 가정을 기반으로 일일 교통카드자료를 통해 줄어드는 요금의 총액수를 요금 Paradox로 설정한다. 현재 도시철도 요금은 통합환승 및 거리비례 요금제에 의한 복합적인 영향을 받고 있다. 따라서 요금 Paradox는 도시철도 단일통행과 함께 버스와 도시철도의 복합통행으로 구성된 연계통행(Trip Chain)을 전부 고려하는 상황이 필요하다. 본 연구는 이러한 사례연구를 대상으로 일일 운송기관의 수입금 대비 GTX-A의 요금 Paradox의 양을 산정한다. 본 연구가 갖는 시사점은 수도권 도시철도망 효율성의 증가는 요금 수입의 감소로 나타나는 현상을 정량적으로 이해하는 관점을 분석하는 것이다.

연구는 다음과 같이 진행된다. II장은 교통망에서 나타나는 Paradox 현상을 설명하고 수도권 요금체계의 내용을 검토한다. III장은 수도권 도시철도망에서 도시철도 교통카드를 TagIn 및 TagOut 하는 승객이 포함된 상황에서 최소거리의 감소로 나타나는 요금변화를 추정하는 방안을 구축한다. IV장은 2022년 5월의 하루 교통카드자료를 대상으로 사례연구를 시행한다. 수도권 도시철도망에 GTX-A 노선 전·후에 대한 시나리오를 구성하고 총 요금수입의 감소를 요금 Paradox로 산정하고, 일일 수도권 통합대중교통 요금체계와 수입금과 비교한다. V는 결론 및 향후 연구과제를 서술한다.

## II. 관련 자료 검토

### 1. 수도권 통합대중교통 요금체계

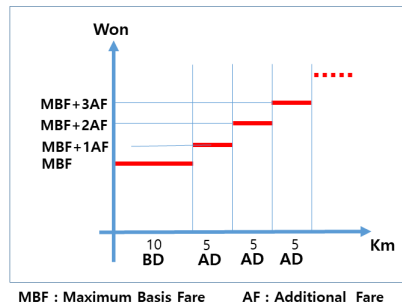
수도권요금체계에서 요금은 단독 및 환승 통행에 따른 구분이 필요하다. <Table 1>과 같이 단독통행에 대해서는 단일요금제도와 거리비례요금제도가 혼재되어 있다(Shin et al., 2019). 단독통행의 거리비례요금제도는 10Km의 기본요금과 추가되는 5Km마다 추가요금 100원이 부과되는 구조이다. 서울, 경기, 인천의 광역버스의 기본거리는 30Km이다. 도시철도의 경우는 3단계로 요금이 부과되는 구조로 10Km 기본요금, 10Km-50Km는 5Km마다

추가요금, 50Km 이상은 8Km마다 추가 요금이 부과된다.

<Table 1> Fare Data on Seoul Metropolitan Integrated Public Transport System

Area	Single Trip	Transfer Trip										
Seoul	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Single Fare : City bus, Town bus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metropolitan Unity Fare(Distance Based Fare) Basic Fare(City/Town 10km, Express 30km) (Charge Highest Fare among Used Modes) 100 won Added Every 5km(Youth: 80 won, Child: 50 won)</li> <li>• Basis Distance</li> </ul> <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>Seoul Arterial/Feeder Bus, Town Bus</td> <td rowspan="3">10km</td> </tr> <tr> <td>Gyeonggi City Bus, Town Bus</td> </tr> <tr> <td>Incheon Arterial/Feeder/Rapid Express/Intra-Inter Express/Airport Express Bus</td> </tr> <tr> <td>Metropolitan Subway</td> <td rowspan="3">30km</td> </tr> <tr> <td>Seoul Metropolitan Bus</td> </tr> <tr> <td>Gyeonggi Express/Nonstop Express /Suburb Circular/Metropolitan Bus</td> </tr> <tr> <td>Incheon Metropolitan Bus</td> <td></td> </tr> </table>	Seoul Arterial/Feeder Bus, Town Bus	10km	Gyeonggi City Bus, Town Bus	Incheon Arterial/Feeder/Rapid Express/Intra-Inter Express/Airport Express Bus	Metropolitan Subway	30km	Seoul Metropolitan Bus	Gyeonggi Express/Nonstop Express /Suburb Circular/Metropolitan Bus	Incheon Metropolitan Bus	
Seoul Arterial/Feeder Bus, Town Bus	10km											
Gyeonggi City Bus, Town Bus												
Incheon Arterial/Feeder/Rapid Express/Intra-Inter Express/Airport Express Bus												
Metropolitan Subway	30km											
Seoul Metropolitan Bus												
Gyeonggi Express/Nonstop Express /Suburb Circular/Metropolitan Bus												
Incheon Metropolitan Bus												
Incheon	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Single Fare : City bus</li> <li>• Distance Based Fare : Express Bus, Metropolitan Bus, M Bus</li> </ul>											
Gyeonggi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Single Fare : Part of City Bus Express Bus, Nonstop Express Bus Town Bus</li> <li>• Distance Based Fare : Great Part of City Bus Suburb Circular Bus, Metropolitan Rapid Bus</li> </ul>											
Metropolitan Subway	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distance Based Fare Within 10km : Basic Fare Within 10~50km : 100 won per Each 5km Excess of 50km : 100 won per Each 8km</li> </ul>											

복합교통수단의 이용에 대한 요금부과는 수도권요금제도의 기본원칙인 환승할인과 거리비례요금제도가 적용된다. 기본거리 10Km까지는 연계통행에 포함된 수단의 기본요금이 가장 높은 요금을 선정하고, 매 추가 거리 5Km마다 추가요금이 부과된다. <Fig. 3>은 기본운임거리(Basis Distance: BD)까지 기본요금(Basis Fare: BF)이 최대인 수단을 기본요금(Maximum Basis Fare: MBF)으로 부과한다. 이후 매 추가거리(Additional Distance: AD)에 따라 추가운임(Additional Fare: AF)이 적용되는 개념을 나타낸다.

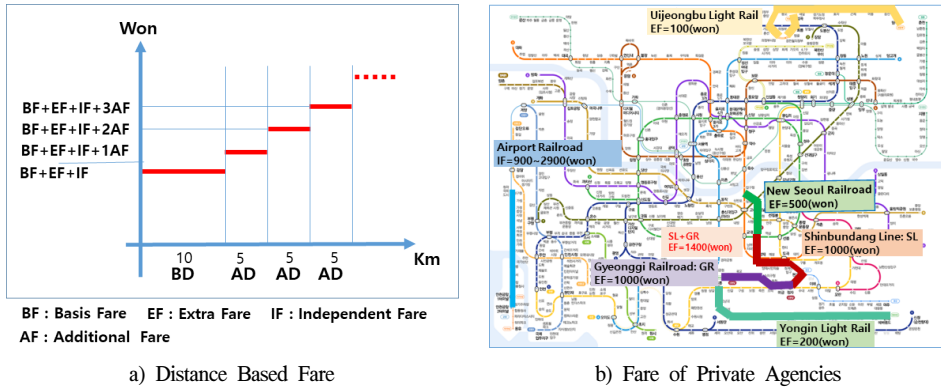


<Fig. 3> Concept of Distance Based Fare Policy

## 2. 수도권 도시철도 요금체계

2022년 13개 운송기관이 운영하는 수도권 지하철을 이용하는 통행에 대하여 요금은 4가지로서 기본요금, 추가요금, 별도요금, 독립요금이다. 기본요금과 추가요금은 도시철도를 이용하는 승객에게 거리비례요금제 방식에 의하여 산정된다. 도시철도 거리비례요금은 지하철 출발역사 단말기를 TagIn하는 과정에서 기본요금이 부과되고 기본거리를 초과하여 매 추가거리에 대하여 추가요금이 부과된다. 현재 일반기준으로 각각 기

본요금 1250(원), 기본거리 10(Km), 추가거리(5Km), 추가요금 100(원)이다. <Fig. 4-a>는 최초 기본요금과 추가요금이 계단형으로 증가하는 도시철도의 거리비례 요금구조를 나타내고 있다. 또한, 민자기관을 경유하는 승객은 거리비례요금과 함께 별도요금(Extra Fare: EF)과 독립요금(Independent Fare: IF)이 부과된다. 별도요금은 신분당선, 경기철도, 새서울철도, 의정부경전철, 용인경전철의 5개 민자기관에서 운영하고 있다. 독립요금은 공항철도의 일부 구간(청라국제도시~인천공항 제2터미널)에서 적용되고 있다. <Fig. 4-b>는 별도요금이 부과되는 5개 민자기관과 독립요금의 공항철도를 나타내고 있다.



<Fig. 4> Fare Imposition of Private Railroad Agencies

<Table 2>은 11개 운송기관의 기본요금, 별도요금, 독립요금의 일반인 기준의 요금을 나타내고 있다. 어린이와 청소년은 성인의 80% 및 50%의 요금이 적용되고 있다.

<Table 2> Fare Data of Thirteen Subway Operation Agencies (unit: won)

Mode Code	Operation Agencies	Total Fare	Basis Fare	Extra Fare	Independent Fare
201	Seoul Metro	1250	1250	0	-
202	KORAIL	1250	1250	0	-
203	Seoul Metro	1250	1250	0	-
204	Incheon Transport	1250	1250	0	-
205	Seoul Metro Line 9	1250	1250	0	-
206	Airport Railroad	1250	1250	0	900-2900
208	Shinbundang Line	2250	1250	1000	-
209	Gyeonggi Railroad	2250	1250	1000	
210	New Seoul Railroad	1750	1250	500	-
231	Yongin Light Rail	1450	1250	200	-
232	Uijeongbu Light Rail	1350	1250	100	-
235	UI Light Rail	1250	1250	0	-
236	Kimpo Gold Line	1250	1250	0	-
237	Sillim Light LRail	1250	1250	0	-

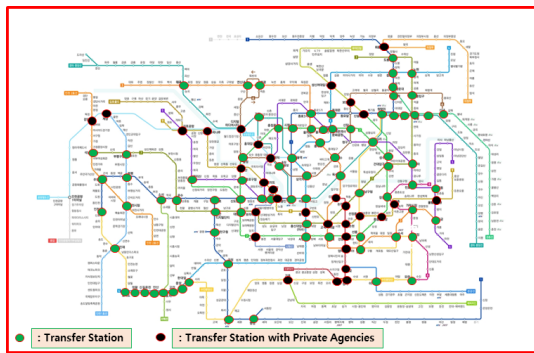
요금산정에 필요한 교통카드자료 사용자 코드는 <Table 3>과 같이 승객과 관련된 코드는 10가지로 구분된다. 요금이 부과되어 분석에 적용되는 코드는 “01”, “02”, “03”, “04”, “05”이며 일반, 청소년, 유아요금의 3단계로 구분된다. “01”과 “05”는 일반요금, “03”, “04”는 일반요금의 80%, “02”는 일반요금의 50%가 일반적으로 적용된다.

<Table 3> User Types

User Code	User Type	Fare Charged	User Code	User Type	Fare Charged
01	Adult	O	06	Senior(citizen)	X
02	Children	O	07	Disabled Person	X
03	Middle/High School Student	O	08	Men of national merit	X
04	Youth / Teenager	O	09	Public charge	X
05	University Student	O	10	Welfare card	X

### 3. 수도권 도시철도 경로미확정과 추가요금 감소

2022년 현재 카드 단말기 ID 770개, 역사 641개, 환승역 114개로 운영되고 있으나 승객의 경로는 환승역을 파악하지 못하는 문제로 인하여 경로가 확정되지 못한다. 이는 승객이 TagIn과 TagOut 하는 과정에서 환승역에 대한 정보가 교통카드자료에서 기록되지 못하기 때문이다. 한편 민자기관은 별도의 환승 Tag 단말기를 설치하여 환승정보를 자체적으로 판독하고 있다. 하지만 <Fig. 5>와 같이 114개 환승역에서 32개의 민자환승 단말기가 운영되고 있다. 따라서 경로미확정에 대한 이슈는 향후 도시철도망에서 지속적으로 존재한다.



<Fig. 5> Fare Separated Fare of Private Agencies

현재 경로미확정 문제는 승객의 이동경로를 파악하지 못하기 때문에 전체 도시철도망에서 승객의 이동경로는 TagIn과 TagOut을 연결하는 최소거리를 이동한 것으로 가정한다. 역 간 최소거리가 기본요금 거리보다 크면 매 추가 거리에 따라 추가요금이 산정된다. 따라서 전체 요금에 대한 영향은 네트워크의 변화에 따른 추가요금에 한정된다. 한편 독립요금과 별도요금은 민자 환승 단말기에서 승객의 이동이 기록되기 때문에 민자의 독자적인 수입으로 배분된다.

### Ⅲ. 수도권 대중교통 요금 Paradox 추정 모형

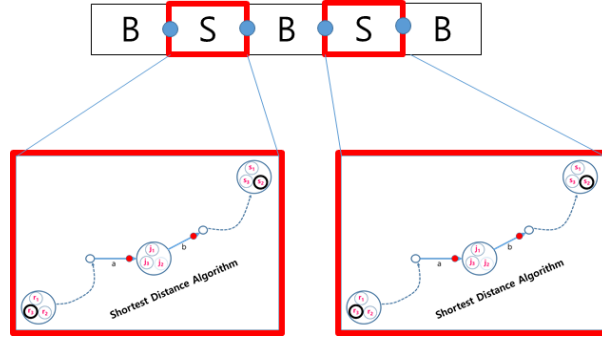
#### 1. 교통망 이론과 수도권 도시철도 요금 Paradox 비교

Paradox는 “합리적인 생각에도 불구하고 모순되어 있거나 잘못된 결론에 도달하는 논증이나 사고 실험”을 의미한다(wikipedia, 2022). Paradox를 반대로 해석하면 “불합리한 시도 또는 생각에도 불구하고 바람직한 결과가 도출되는 것”을 포함한다. 이는 교통망에서는 투자 대비 결과가 현상보다 악화되거나 또는 페널티(요금)를 부과했으나 현상이 개선되는 교통망 논리와 연관된다. 교통망 이론에서 Paradox는 크게 3가지(Braess, Down-Thompson’s, Edge-Worth)이다. 1) Braess Paradox(Braess, 1968)는 도로투자자와 교통혼잡에 대한 비합리적 결론을 도출하는 것을 설명한다. 교통혼잡을 감소시키기 위해서 도로망을 건설하면 통행비용을 줄이는 행태로써 특정 도로에 집중되어 결국 혼잡이 더욱 심해지는 상황이 나타나는 것을 의미한다. 따라서 통행선택에 있어 제한과 감소를 통하여 통행에 유리한 패턴을 찾을 수 있다는 논리의 근거가 된다. 2) Down-Thompson’s Paradox(Downs, 1962; Thompson, 1977)는 도로망에서 통행속도는 승용차보다 버스와 같은 대중교통에 의해 결정되는 논리이다. 승용차 속도를 높이는 투자 전략은 결과적으로 차량의 혼잡을 유발하고 이는 대중교통 속도를 감소시킨다. 결과적으로 승용차의 속도가 현상보다 악화하는 상황을 발생시킨다는 논리이다. 이는 대중교통정책을 장려하는 것이 사회적 비용을 줄이는 데 도움이 된다는 논리의 근거가 될 수 있다. 3) Edge-Worth Paradox(Mogridge, 1997)는 혼잡을 일으키는 차량에 페널티(통행료)를 부과하면 통행상황이 개선되는 것을 의미한다. 승용차 이용자에게 혼잡세를 부과하면 사회적 통행비용이 감소하는데 한계비용과 평균비용의 차이가 요금의 적정수준이라는 기준을 만드는 데 적용된다.

앞에서 소개한 3가지 Paradox는 도로망을 대상으로 설명되었다. 한편, 본 연구에서 소개되는 수도권 도시철도의 요금 Paradox는 대중교통망에서 발생하는 승객의 경로미확정 문제에서 시작된다. 승객이 도시철도를 교통카드를 이용해서 TagIn하고 TagOut하는 과정에서 환승경로를 포착하지 못하는 문제가 존재한다. 따라서 현재의 수도권 도시철도의 거리비례요금 부과는 승객의 최소통행거리를 기반으로 요금이 부과된다. TagIn하면서 최초의 기본요금과 추가거리가 발생하면서 추가요금이 부과되는 과정이다. 현재의 도시철도망을 기준으로 역 간 산정된 최소통행거리를 기반으로 추가요금이 산정된다. Shin(2022)은 수도권 통합대중교통 요금 체계에서 발생하는 요금 Paradox 현상을 처음으로 검토 및 제안하였다. 하지만 Shin(2022)은 6호선과 경춘선의 환승역인 ‘신내’역을 교통카드로 인해 나타나는 수요의 영향력이 적은 사례에 포함시키고 있다. 대규모 통행의 영향력을 판단할 수 있는 실험적인 부분에서는 수도권의 요금 Paradox의 검토가 필요한 상황이다.

#### 2. 수도권 통합요금체계와 요금 Paradox

수도권 도시철도에서 한정되어 경로미확정이 나타나며 망의 변화에 따라 요금이 변화되는 상황이 발생한다. 한편 수도권 통합요금체계는 버스(B)와 도시철도(S)의 이용이 5회까지 허용되는 환승할인과 요금은 거리에 비례하여 부과된다. 따라서 요금 Paradox는 S에만 나타나는 것이 아니라 S가 포함되는 연계통행(Trip Chain)까지 전부 포함한다. 현행 통합환승 거리비례요금제에서 포함되는 S에 대한 최소거리를 모두 합산하는 과정이 필요하다. <Fig. 6>은 특정 연계통행 BSBSB에 대하여 두 번의 경로미확정에 대한 TagIn과 TagOut 정보를 통해서 최소통행거리를 탐색하는 알고리즘의 구현이 수행됨을 나타내고 있다.



<Fig. 6> Shortest Distance Algorithm of “BSBSB” Trip Chain

지하철 역사를 구성하는 집합을 출발역 R, 도착역 S로 하며 TagIn 및 TagOut과 연관된 단말기ID를 r, s로 표기한다. 이때 r과 s가 교통카드에서 연결하는 경로를 최소거리경로로 탐색하는 알고리즘은 식(1)과 같다. r을 시작으로 링크a와 링크b로 이동하면서 링크b의 통행거리  $\Delta_b(\text{Km})$ 를 고려해서 Lee(2004)가 제안한 링크표지(Link Label)를 도입한다.  $D^{rb}$ 는 r에서 링크 b까지 최소통행거리(Km)를 나타내며,  $\Gamma_a^+$ 는 링크a의 도착노드가 출발노드인 링크집합을 의미한다.  $D^{rs}$ 는 r에서 s까지 최소통행거리를 나타낸다.

$$D^{rb} = \min (D^{ra} + \Delta_b, D^{rb} \mid b \in \Gamma_a^+) \dots\dots\dots (식1)$$

$$D^{rs} = \min (D^{rb} \mid b \in \Gamma_s^-) \dots\dots\dots (식2)$$

$TD^{TC}$ 는 연계통행(Trip Chain: TC)의 총통행거리로 M을 수도권 통합요금제에 참여하는 수단집합으로 정의하며 TC에 포함된 수단  $m \in M$ 의 최소통행거리( $D_m$ )의 합인 식(3)과 같다. 이때 수단m이 버스(B)인 경우는 r과 s의 최소거리는 r-s의 노선거리가 된다. 반면 도시철도(S)는 r-s의 최소거리는 식(1)과 식(2)에 의해서 결정된다.

$$TD^{TC} = \sum_{m \in M} D_m \dots\dots\dots (식3)$$

본 연구에서의 Paradox는 수도권 통합요금체에서 추가운임의 감소에서 발생한다. 수도권 도시철도 단독으로 발생하는 상황에서 최적경로를 탐색하면서 기본요금과 추가요금을 산정하는 방안은 Lee(2022)를 통해 제시되었다.

$$\Theta^{rb} = BF + AF \cdot (int) \left[ \frac{\max(D^{ra} + A_b - D_{BF}, 0)}{D_{AF}} + 1 - \epsilon \right] \dots\dots\dots (식4)$$

- 여기서  $BF$  : 최대수단 기본요금(원);  $AF$  : 추가요금(원)
- $D^{ra}$  : 출발지r에서 링크a의 도착지점까지 거리(Km)
- $A_b$  : 링크b의 거리(Km)



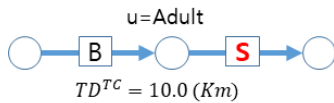
- $D_{BF}$  : 기본요금이 적용되는 거리(Km)
- $D_{AF}$  : 추가요금이 적용되는 단위거리(Km)
- $\epsilon$  : 추가요금경계구분 파라메타 (0.0001);
- $(int)[X]$  : 실수X의 정수값
- $\theta^{rb}$  : 출발r에서 링크b의 도착지점까지 거리비례요금(원)

수도권 통합대중교통요금체계에서 발생하는 Paradox는 연계통행(TC)의 끝단에서 추가요금을 산정하여 계산된다. 따라서 Lee(2022)가 제시한 (식4)를 기반으로 연계통행에 대한 추가운임을 산정하는 방안이 요구된다. 사용자(u)가 생성한 연계통행의 총통행거리를 기반으로 추가요금을 산정하는 방안은 (식5)와 같다.

$$AF_u^{TC} = (int) \left( \frac{\max(TD^{TC} - D_{BF}, 0)}{D_{AF}} + 1 + \epsilon \right) * AF_u \dots\dots\dots (식5)$$

- 여기서  $AF_u^{TC}$  : 사용자 u의 연계통행(TC)가 생성한 추가요금 (원)
- $TD^{TC}$  : TC의 총통행거리(Km)
- $AF_u$  : 사용자 u의 추가요금(원)

<Fig. 7>은 10.0(Km) 기본요금 구간에서 u=성인을 대상으로 2개 수단을 이용한 상황의 추가요금을 산정한 것이다. 거리비례요금제에서 10.0(Km)까지는 기본요금만 부과되며 추가운임은 0원이다.



$$AF_u^{TC} = (int) \left[ \frac{\max(10.0 - 10, 0)}{5} + 1 - 0.0001 \right]$$

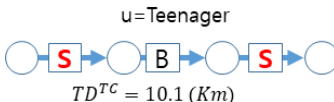
$$= 100 * (int)[0 + 1 - 0.0001]$$

$$= 100 * (int)[0.9999]$$

$$= 100 * 0 = 0 (won)$$

<Fig. 7> Distance Based Fare of 10.0(Km) Trip Distance (u=General)

<Fig. 8>은 3개 수단에 대한 10.1(Km) 기본요금 이상 구간에서 u=청소년을 대상으로 추가요금을 산정한 것이다. 거리비례요금제에서 10.1(Km)는 추가요금이 부과되며 성인 100(원)의 80%인 80(원)이다.



$$AF_u^{TC} = 80 \cdot (int) \left[ \frac{\max(10.1 - 10, 0)}{5} + 1 - 0.0001 \right]$$

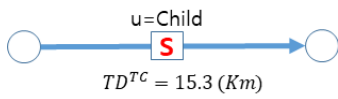
$$= 80 * (int)[0 + 1.02 - 0.0001]$$

$$= 80 * (int)[1.0199]$$

$$= 80 * 1 = 80 (won)$$

<Fig. 8> Distance Based Fare of 10.1(Km) Trip Distance (u=Teenager)

<Fig. 9>는 단일수단을 15.3(Km) 이용한 u=어린이를 대상으로 추가요금을 산정한 것이다. 거리비례요금제에서 10.0~15.0(Km), 15.0(Km) 이상 구간에서 5번 부과되며 추가운임이 성인 100(원)의 50%인 50(원)의 2번이므로 100(원)이다.

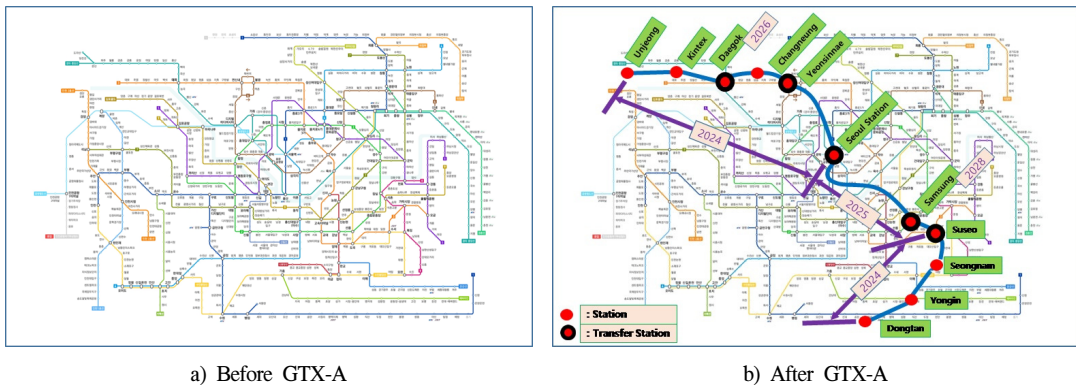


$$\begin{aligned} \theta^b &= 50 \cdot (int) \left[ \frac{\max(15.3 - 10, 0)}{5} + 1 - 0.0001 \right] \\ &= 50 \cdot (int) [1.15 + 1 - 0.0001] \\ &= 50 \cdot (int) [2.2499] \\ &= 50 \cdot 2 = 100 \text{ (won)} \end{aligned}$$

<Fig. 9> Distance Based Fare of 15.3(Km) Trip Distance (u=Child)

### IV. 사례연구

2022년 5월 31일 화요일의 수도권 교통카드자료를 대상으로 GTX-A의 개통에 의한 요금 Paradox 현상을 수입금 감소를 통해 추정한다. <Fig. 10>에서 <Fig. 10-a>은 현재의 수도권 도시철도망과 <Fig. 10-b>는 GTX-A 개통에 최종 고시된 11개 역사를 추가하여 나타낸 것이다. 선로는 복선으로 구성되며 최고속도는 180 (km/h), 표정속도는 101 (km/h)이다. GTX-A 노선의 개통은 2024년 수서 ↔ 동탄 및 운전 ↔ 서울역의 2개 구간을 시작으로, 2025년 서울역 ↔ 수서, 2026년 창릉역 개통, 2028년 삼성 무정차 통과로 나타난다. <Table 4>는 2024년 6월부터 개통이 시작될 예정인 GTX-A를 역간 연결되는 링크로 표현한 것이다.



<Fig. 10> Case Studies on GTX-A Paradox

<Table 4> GTX-A Link Length

Link		Length (km)
Start Station	End Station	
Unjeong	Kintex	6.7
Kintex	Daegok	6.9
Daegok	Changneung	6.2
Changneung	Yeonsinnae	3.7
Yeonsinnae	Seoul Station	9.5
Seoul Station	Samsung	10.1
Samsung	Suseo	5.2
Suseo	Seongnam	10.7
Seongnam	Yongin	10.9

Link		Length (km)
Start Station	End Station	
Yongin	Dongtan	11.2
Total Length		81.1

<Table 5>는 2022년 5월 31일 화요일에 대하여 일 교통카드자료를 대상으로 추출된 도시철도(S)가 포함된 총 8,270,305건의 연계통행(Trip Chain)을 보여주고 있다. S에서 경로미확정 문제가 발생하고 이들 연계통행에서 요금 Paradox에 의한 영향이 발생할 가능성이 있는 것으로 파악된다. S가 단독인 연계통행은 5934399로 전체의 71.7%를 차지하고 복합으로 포함된 연계통행은 28.3%이다. 이 시점은 COVID19의 영향에 의하여 통행수요의 감소가 약 20%~25% 정도로 나타나고 있다.

<Table 5> Trip Chains with Railroad Trip(S) in Smart Card Data

Sequence	Trip Chain	Count	Sequence	Trip Chain	Count
1	S	5934399	21	BSS	603
2	BS	1028076	22	BBSBB	525
3	SB	982691	23	SSB	471
4	BSB	219220	24	SBBSB	470
5	SBB	37342	25	BBBBS	401
6	BBS	28370	26	SBBBS	223
7	BSBB	7963	27	SBSBB	197
8	BBSB	6384	28	SBSBS	159
9	SBS	5194	29	BBSBS	99
10	SBBB	3515	30	BSSB	76
11	SS	3458	31	SSBB	9
12	BBBS	2171	32	BSSBB	4
13	SBBS	2090	33	SSS	4
14	SBSB	1272	34	BBSS	2
15	BSBBB	1115	35	SSSB	2
16	BSBS	1110	36	BBSSB	2
17	BBBSB	724	37	BSSS	2
18	SBBBB	685	38	SSBBS	1
19	BSBBS	666	39	BSSBS	1
20	BSBSB	608	40	SSBBB	1

<Table 6>는 <Table 5>에서 일부 9개 사례를 대상으로 S에 의한 거리감소가 추가요금에 영향을 주는 것을 분석한 것이다. 추가요금은 5개에서 100원의 감소로 나타났다. 사례 4, 5, 6, 7은 거리 감소는 있으나 5(Km) 단위로 산정되는 요금에 영향을 주지는 못하는 것으로 분석되었다. 이처럼 개별 연계통행에서 요금 Paradox가 나타나는 실증 사례를 보여주고 있다.

<Table 6> Fare Paradox of Trip Chain

Case No.	Basis Fare (Won)	T.C. Distance (Km)	Distance Reduction by GTX-A (Km)	Fare Paradox (Won)	Trip Chain	User
1	1250	15.7	1.9	100	BS	Adult
2	1250	15.9	2.7	100	SB	Adult
3	1250	35.7	1.2	100	S	Adult
4	1300	36.6	1.2	0	SB	Adult
5	1250	30.8	0.2	0	S	Adult
6	1250	30.8	0.2	0	S	Adult
7	1250	42.3	0.3	0	S	Adult
8	1300	36.4	2	100	BS	Adult
9	1300	36.2	2	100	SB	Adult

<Fig. 11>은 거리차이가 나타나는 165,588건의 연계통행에 대해 요금의 감소를 추정한 것이다. 최대거리 감소는 5.0(Km)로 나타났고, 최대요금 감소는 100(원)인 것으로 분석되었다. 이들 요금감소를 합하면 일일 요금 Paradox는 3,837,260(원)으로 추정되었다.

	Basis Fare (won)	Distance (Km)	Distance Diff. (Km)	Fare Paradox (Won)	T. C. User
165568	1250 (원)	25.5 (카드-Km)	1.2 (차이-Km)	100 (감소-원)	S 일반
165569	1250 (원)	28.6 (카드-Km)	2.5 (차이-Km)	0 (감소-원)	BS 일반
165570	1250 (원)	43.5 (카드-Km)	2.5 (차이-Km)	0 (감소-원)	S 일반
165571	1250 (원)	43.5 (카드-Km)	2.5 (차이-Km)	0 (감소-원)	S 일반
165572	1250 (원)	12.6 (카드-Km)	0.3 (차이-Km)	0 (감소-원)	S 일반
165573	1250 (원)	28.7 (카드-Km)	5.0 (차이-Km)	100 (감소-원)	S 일반
165574	1250 (원)	28.7 (카드-Km)	1.9 (차이-Km)	0 (감소-원)	S 일반
165575	1250 (원)	24.9 (카드-Km)	0.8 (차이-Km)	0 (감소-원)	BS 일반
165576	1250 (원)	23.7 (카드-Km)	0.8 (차이-Km)	0 (감소-원)	S 일반
165577	1250 (원)	15.4 (카드-Km)	1.2 (차이-Km)	100 (감소-원)	S 일반
165578	1250 (원)	36.0 (카드-Km)	0.3 (차이-Km)	0 (감소-원)	S 일반
165579	1250 (원)	36.8 (카드-Km)	0.3 (차이-Km)	0 (감소-원)	S 일반
165580	1250 (원)	27.4 (카드-Km)	2.0 (차이-Km)	0 (감소-원)	S 일반
165581	1250 (원)	21.3 (카드-Km)	1.0 (차이-Km)	0 (감소-원)	BS 일반
165582	1250 (원)	20.9 (카드-Km)	1.2 (차이-Km)	100 (감소-원)	S 일반
165583	1250 (원)	15.2 (카드-Km)	0.2 (차이-Km)	100 (감소-원)	S 일반
165584	1250 (원)	15.2 (카드-Km)	0.2 (차이-Km)	100 (감소-원)	S 일반
165585	1250 (원)	14.4 (카드-Km)	1.2 (차이-Km)	0 (감소-원)	S 일반
165586	1250 (원)	11.1 (카드-Km)	0.5 (차이-Km)	0 (감소-원)	S 일반
165587	1250 (원)	11.1 (카드-Km)	0.5 (차이-Km)	0 (감소-원)	S 일반
165588	1250 (원)	25.1 (카드-Km)	3.2 (차이-Km)	100 (감소-원)	S 일반
165589					
165590	Total Fare Paradox = 3837260 (won)				

<Fig. 11> Estimation of Total Fare Paradox

COVID19 전의 기준으로 Shin(2022)은 수도권 통합대중교통 일일정산금액을 약 198(억원)으로 추정하였다. COVID19 이후 총통행량의 감소가 20%로 나타나는 상황에서 약 158.4(억원)으로 일일정산금액이 예상된다. 요금 Paradox는 일일 총수입금의 약 0.024%에 해당한다. 이를 일 년으로 환산하면 약 14억, COVID19 이전으로는 약 18억 정도의 요금감소로 나타난다.

## V. 결 론

수도권 도시철도는 승객의 통행경로를 정확하게 추정하지 못하는 경로미확정 이슈가 존재한다. 이러한 경

로의 불추정 문제로 인해 도시철도 노선 신설 및 환승역 개통에 의한 네트워크 변화는 요금과 수입금 감소의 원인이 될 수 있다. 이는 수도권 도시철도의 요금부과에서 승객이 최소의 통행거리경로를 선택한다는 가정을 도입하면서 나타나는 현상이다. 본 연구는 네트워크 효율성 개선으로 인한 요금수입의 감소를 수도권 도시철도 요금 Paradox 현상으로 이해하고자 시도했다. 특히 GTX-A 노선과 같이 수도권 도시철도의 대규모 네트워크의 변화를 통하여 발생하는 요금수입의 하락에 대한 분석을 시행했다.

COVID19 이후 일일 교통카드자료를 토대로 GTX-A 노선의 전후 비교를 통하여 역간 통행거리 감소에 의한 추가요금의 감소가 어느 정도 나타나는지 분석하였다. 이때 요금의 감소는 도시철도가 포함되는 모든 연계통행에 영향을 미치기 때문에 개별 연계통행에 대한 거리감소로 인해 추가요금의 수입금 감소를 추정하였다. 분석 결과는 일일요금 Paradox를 3,837,260(원)으로 산정하였다. 요금 Paradox는 일일 총수입금의 약 0.024%에 해당하며 이를 연 단위로 환산하면 약 14억이다. COVID19 이전의 통행수요로는 약 18억 정도의 수입금 감소로 나타난다.

본 연구는 수도권 통합대중교통 요금체계에서 대규모 네트워크의 변화에 의한 효율성의 증가로 인하여 요금 및 수입의 감소가 발생하는 요금 Paradox 현상을 소개하고, 향후 수도권 교통정책에서 실제 현상에 관한 판단을 통하여 적절한 의사결정을 지원하는 정책의 기반이 되는 측면에서 의의를 찾을 수 있다.

한편 연구의 한계는 다음의 사항에서 나타나기 때문에 향후 연구의 제약에 대한 추가적인 반영이 요구된다. 1) 우선 수도권 도시철도의 네트워크 변화에 대한 요금감소를 Paradox의 현상으로 볼 수 있는가에 대한 깊이 있는 검토가 요구된다. 현재의 통합요금체계에서 신규철도로 인한 요금 및 수입금의 감소는 당연한 것으로 나타난다고 볼 수 있다. 본 연구는 지금까지 이러한 현상을 단순한 요금의 감소 문제가 아닌 효율성 대비 비경제성의 문제로 확대한 것이다. 향후 추가적인 논의가 필요한 사항이다. 2) 다음으로 통행수요의 전환 및 발생의 반영 여부이다. GTX-A와 같은 대규모 노선의 개통으로 인하여 수도권 통행의 흐름에 지대한 영향이 있는 것이 분명하므로 이에 대한 반영이 필요하다. 본 연구는 수요의 변화를 고려하지 않고 일일 교통카드자료에서 나타나는 고정수요를 가정하여 분석한 한계가 있다. 따라서 장래의 역사 및 망의 변화를 고려하지 못한 부분은 연구의 한계로 남는다고 볼 수 있다. 3) 또한 GTX-A 뿐만 아니라 다른 노선의 영향 및 다양한 효과 분석을 위한 시나리오를 반영하는 방안이 요구된다. 본 연구는 요금 Paradox를 실무적으로 적용한 것에 한정되어 있으며 향후 개념적 이론적인 부분에서 효과를 측정하고 이해하는 과정이 요구된다.

## ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 한국 ITS학회 2022년 추계 학술대회에서 발표된 논문을 수정하여 제출하는 것입니다.

## REFERENCES

- Braess, D.(1968), “Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung”, *Unternehmensforschung*, vol. 12, pp.258-268.
- Downs, A.(1962), “The Law of Peak-Hour Expressway Congestion”, *Traffic Quarterly*, vol. 16, pp.393-409.
- Lee, M.(2004), *Transportation Network Models and Algorithms Considering Directional Delay and*

- Prohibitions for Intersection Movement*, Doctoral Dissertation, University of Wisconsin at Madison.
- Lee, M.(2022), “Generalized K Path Searching in Seoul Metropolitan Railway Network Considering Entry-Exit Toll”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 21, no. 6, pp.1-20.
- Mogridge, M.(1997), “The Self-defeating Nature of Urban Road Capacity Policy: A Review Theories, Disputes and Available Evidence”, *Transport Policy*, vol. 4, no. 1, pp.5-23.
- Shin, H.(2022), *Estimating Revenues of Integrated Fare System for Seoul Metropolitan Public Transportation using Smartcard Data*, Doctoral Dissertation, Graduated School of Engineering, Seoul National University Civil & Environmental Engineering Major.
- Shin, S., Lee, C. and Cheon, S.(2019), “Analyzing Changes in Revenue of Subway Organization According to Bus Fare Increase in Seoul Metropolitan Area”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 37, no. 6, pp.486-498.
- Thomson, J. M.(1977), *Great Cities and Their Traffic*, Gollancz: London.
- Wikipedia, <https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%97%AD%EC%84%A4>, 2022.12.26.