

# 선로용량이 고려된 네트워크 흐름모형을 이용한 국내 하이퍼루프 네트워크 구상 연구\*

## A Study on the South Korea Hyperloop Network Planning Using Network Flow Model Considering Link Capacity

유한솔 Yoo Hansol\*\*, 김익기 Kim Ikki\*\*\*, 김종학 Kim Jonghak\*\*\*\*, 심재엽 Shim Jaeyob\*\*\*\*\*

### Abstract

A Hyperloop is technically feasible as a future mode of transportation that moves at super high speed in a partial vacuum tube with little friction. Before realizing the Hyperloop, a network plan reflecting Hyperloop characteristics must be considered. Therefore, it is necessary to study the basic concept of the Hyperloop network design and its specific plan. The characteristics of the Hyperloop mode include high speed, small-capacity vehicles, and short headway in operational aspects. Considering these characteristics, this study proposes that the final Hyperloop network in South Korea uses a three-step process. The first step is to select cities that will be served by the Hyperloop. The second step is to determine the minimized cost network using the network flow mathematical model. The third step is to design the network; this step will utilize professional judgement and the results of the mathematical analysis. In addition to the network design, the final network was chosen based on network capacity, travel time reduction, and possibility of a cyclical network. The study suggested a network structure that included the Gyeong-bu axis, Ho-nam axis, Jung-bu axis, and Yeong-dong axis in South Korea when assuming that 20% of Hyperloop use will be mid-long distance trips. This network structure for South Korea can provide Hyperloop services to as many cities as possible while minimizing construction costs. In addition, it has an alternative route axis that can decentralize the demand generated by many cities to avoid insufficient network capacity.

Keywords: Hyperloop, Network Capacity, Network Planning, Network Flow Model, Minimum Spanning Tree

### I. 서론

2012년에 엘론 머스크(Elon Musk)의 아이디어에서 시작된 하이퍼루프는 초음속이라는 의미인 ‘하이퍼(Hyper)’와 공기저항 없이 튜브를 타고 달리는 의미인 ‘루프(Loop)’의 조합으로 유래되었다. 5세대 교통수단

\* 본 논문은 ‘김종학 외. 2017. 초고속교통망 시대에 대비한 콤팩트 국토 형성방안 연구. 세종: 국토연구원의 일부를 수정·보완한 것이며 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2017R1D1A1B04035997).

\*\* 한양대학교 교통물류공학과 박사과정(제1저자) | Ph.D. Candidate, Transportation and Logistics Engineering, Hanyang Univ. | Primary Author | hansolyoo89@hanyang.ac.kr

\*\*\* 한양대학교 교통물류공학과 교수 | Prof., Transportation and Logistics Engineering, Hanyang Univ. | ikkikim@hanyang.ac.kr

\*\*\*\* 국토연구원 연구위원 | Research Fellow, Korea Research Institute for Human Settlements | jonghkim@krihs.re.kr

\*\*\*\*\* 한양대학교 교통물류공학과 박사과정(교신저자) | Ph.D. Candidate, Transportation and Logistics Engineering, Hanyang Univ. | Corresponding Author | jaeyob0407@hanyang.ac.kr

으로 불리는 하이퍼루프는 마찰력이 거의 없는 아(亞)진공 튜브 내부에서 캡슐차량이 초고속 상태로 이동하는 교통수단이다. 2013년, 미국 테슬라(Tesla)에서 발표한 ‘하이퍼루프 알파’(Hyperloop Alpha) 보고서는 하이퍼루프의 기본적인 제원과 구성요소를 오픈소스로 공개하였다. 현재 버진 하이퍼루프 원(Virgin Hyperloop One)에서 기술적인 실현 가능성이 최근에 입증되었으며 여러 국가에서 시험 선로를 구축하는 등 상용화를 위한 노력이 계속되고 있다(Virgin Hyperloop<sup>1)</sup>). 20~30명의 승객을 1,220km/h의 속도로 수송하는 캡슐은 초고속 차량으로 구상되었으며 상용화를 위한 연구가 전 세계적으로 진행되고 있다.

하이퍼루프 기술 시장은 2022년 13억 달러에서 2026년 63억 달러로 연평균 약 47.2%의 급격한 성장을 할 것으로 예상하고 있다. 시장 성장의 주요 요인으로 통행시간의 절감, 적은 인프라 유지보수 비용, 네트워크 구축에 필요한 토지가 적다는 점을 꼽는다(Markets and Markets).<sup>2)</sup> 여러 연구자들은 하이퍼루프 도입을 위한 지속적인 투자와 기초 원천기술 개발이 매우 중요하다고 한 목소리로 이야기하고 있다. 하이퍼루프 기술개발 선점은 세계건설시장 진출과 함께 신산업 창출 및 경제성장의 효과를 가지고 올 것으로 기대하고 있다(이관섭 2017; 이용재 2017; 배진용 2018; 백종대 2018; 이재선 2018).

하이퍼루프와 관련된 많은 연구들은 주로 진공관 기술과 캡슐차량(Pod)이 관련된 기계, 토목, 전기, 통신 분야 원천기술 연구에 집중해왔다. 하이퍼루프의 원천기술 확보는 하이퍼루프 도입의 첫 걸음으로써 국제 건설시장 개발에 큰 의미를 갖는다. 현재 우리나라에서도 원천기술 연구가 활발히 수행되고 있으며

근 미래에 실현될 가능성이 높을 것으로 보고되고 있다(백종대, 류승기, 노관섭, 김창용 외 2018). 하이퍼루프 네트워크 계획과 완공까지는 약 10년에서 20년이 걸릴 것으로 예상되며 토지 취득을 포함한 기반 시설 계획과 건설이 뒤따를 것이다. 하이퍼루프가 상용화될 경우 효율적이고 체계적인 운영 체계 구축은 필수적이다. 그리고 그 첫걸음은 하이퍼루프 네트워크 구상과 계획이다. 그러므로 하이퍼루프의 공간적 네트워크 구축에 관한 연구는 반드시 필요하다.

이 연구에서는 하이퍼루프의 운영전략 및 특성을 반영한 네트워크 형태를 제시하는 것이 연구의 목적이다. 교통 수요 패턴이 반영되는 동시에 하이퍼루프용 아진공관 건설비용을 최소화하는 네트워크를 최소 신장트리 문제(MST: Minimum Spanning Tree)와 최적 커뮤니케이션 걸침트리 문제(OCSTP: Optimum Communication Spanning Tree Problem)를 기반으로 기본적인 네트워크 뼈대를 탐색하고, 이를 기초로 현실적인 네트워크를 구상하였다. 사례연구로써 대한민국의 하이퍼루프 서비스 도시를 선정하고 선정된 도시를 모두 연결하는 네트워크를 제시하였다.

지역 간 교통수요패턴으로 한국교통연구원이 공식적으로 배포하고 있는 전국 OD자료를 활용하였다. 구상된 네트워크의 개략적인 효과를 분석하기 위해 하이퍼루프의 교통수단분담률 목표치에 따라 하이퍼루프 총 이용 수요와 네트워크의 용량을 함께 분석하였다.

본 논문은 다음과 같은 내용으로 구성되어 있다. 2장에서 하이퍼루프 도입효과 및 노선대 설정 관련 연구와 기존 연구와의 차별성을 서술하였으며, 3장에서는 하이퍼루프의 운영 전략과 네트워크 구축의 구상

1) <https://virginhyperloop.com/> (2020년 6월 20일 검색).

2) <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hyperloop-technology-market-87164486.html> (2020년 7월 20일 검색).

방향을 제시하였다. 4장에서 네트워크 구상의 방법론을 서술하였으며 교통축 탐색 방법론을 소개하였다. 5장에서 대한민국을 사례연구 대상으로 하여 모형의 결과와 최종 네트워크 구상결과를 제시하고 6장에서 결론을 맺는다.

## II. 기존 연구 고찰

### 1. 국내 하이퍼루프 연구

국내 하이퍼루프 연구는 2016년에 과학기술정보통신부에서 '아음속 캡슐트레인 기술 개발을 대형 장기 과제로 선정하여 수행되었다(미래창조과학부 2016). 현재 철도기술연구원, 울산과학기술원, 한국건설기술연구원 등 다수 연구기관에서 수행되고 있다. 한국철도기술연구원은 한국형 하이퍼루프인 '하이퍼튜브(HTX: Hyper Tube eXpress)'를 개발 중에 있다. 주요 연구내용은 공력통합설계 및 안전운영기술, 아음속 LSM추진 기술, 아진공 튜브 및 기밀유지기술, 운행제어기술 등이 있으며 최근 아진공 기밀튜브 기술을 개발하였다(이관섭, 유원희, 장용준, 여인호 외 2018; 한국철도기술연구원 2018; 한국철도기술연구원 홈페이지<sup>3)</sup>). 울산과학기술원에서는 차량의 공기역학과 안정성제어, 모터 추진, 전력공급, 통신, 외형, 승하차 디자인 등의 연구를 수행하고 있다(이재선 2018). 건설기술연구원은 차세대 초고속 이동체계의 노선 구상과 허브 스테이션 기술, 운송관 구축 기반기술, 터널기술, 에너지 시스템 기술, 지상 아진공관 최적 설계 및 시공, 인프라 핵심 기술 실증 등의 연구를 수행하였다(백종대, 류승기, 노관섭, 문학룡 외 2016; 백종대, 류승기,

노관섭, 김창용 외 2018).

### 2. 하이퍼루프 도입효과 관련 연구

하이퍼루프 노선 설정 및 도입효과와 관련된 국내 연구는 대부분 정부축을 가상적으로 설정하고 그에 대한 여러 가지 효과가 분석되었다. 백재욱, 이병주, 유호식(2016) 및 백재욱, 이병주, 유호식(2018a)의 연구에서는 서울~부산, 서울~목포, 대전~목포인 하이퍼루프 노선을 가치공학 기능항목 측면으로 접근하여 편익(통행시간 절감비용), 건설비용, 차량구입 비용을 예상하였다. 서울~부산 노선의 경우 40년간 총 8조 3,401억 원 편익이 발생하며 건설 및 차량비용은 총 7조 4,323억 원으로 분석하여 투자대비 효과가 있을 것으로 분석하였다. 백종대, 류승기, 노관섭, 문학룡 외(2016)는 화물수송을 목적으로 한 하이퍼루프 노선은 5대 물류권역과 대규모 항만을 중심으로 설정하여야 함을 제시하였다. 경부축 라인이 가장 타당한 것으로 제시하였으며 초고속 이동체계 노선 구상 및 계획 가이드라인이 필요함을 강조하였다. 엄진기, 이광섭, 성명연, 이관섭(2019) 연구는 하이퍼루프의 도입을 위한 사전 타당성 검토 연구로써 화물부문에 하이퍼루프가 도입되었을 경우 화물수송 편익을 산정하였다. 네트워크는 수도권, 강원권, 충청권, 전라권, 경상권을 모두 연결하는 X자 형태의 네트워크로 설정하였고 수도권~경상권을 잇는 직통 노선을 추가적으로 고려하였다. 공로의 화물차에서 전환되어 발생하는 총 편익은 3,166억 원으로 산정되었으며 그중 시간절감편익이 대부분(73.1%)을 차지한 것으로 분석되었다. 향후 수요기반 네트워크 재구축과 운영 전략이 필요하다라는 점을 주장하였다. 이광섭, 엄진기, 성명연,

3) [https://www.krri.re.kr/\\_prog/researcher/?site\\_dvs\\_cd=kr&menu\\_dvs\\_cd=070301&post\\_dvs\\_cd=01010301](https://www.krri.re.kr/_prog/researcher/?site_dvs_cd=kr&menu_dvs_cd=070301&post_dvs_cd=01010301) (2020년 7월 20일 검색).

이관섭(2019)은 하이퍼루프의 경제적 파급효과를 산업연관표를 바탕으로 생산, 부가가치, 고용유발효과를 분석하였다. 연구결과, 경부축 라인의 하이퍼루프와 인과관계에 있는 산업에 약 8조 4천억 원의 파급효과가 있는 것으로 분석되어 사회적으로 상당한 파급효과가 있을 것으로 예측하였다. 이재관(2020)은 국내 하이퍼루프 노선을 서울, 대전, 대구, 부산 경부축으로 가상노선을 설정하여 건설비용과 운영비용을 분석하였다. 건설비 산정은 한국개발연구원의 예비타당성조사 지침의 고속철도 건설단가에서 하이퍼루프의 특징을 반영하여 산정하였다. km당 건설비는 기존 KTX의 54%(265억 원/km), 운영비는 47%(1,289억 원/년)로 추정하였다.

### 3. 노선구축 방향 및 구상관련

이 밖에 노선대 설정을 위한 연구로 백재욱, 이병주, 유호식(2018b)은 하이퍼루프의 곡선반경과 가·감속 성능이 기존 대중교통 제원과 달라 최고속도로 주행하는 본선(Main Line)과 도심 역으로 분기·인입되는 지선(Branch Line)으로 구분하여 설계하여 노선대를 설정하여야 함을 제시하였다. 또한 하이퍼루프의 도입으로 국토공간의 압축효과를 분석한 연구도 있었다. 권역별 주요 교통축을 MST문제로 도출하였고 경부축을 대상으로 주요 도시별 압축효과를 살펴보았다(김중학, 변필성, 김준기, 고용석 외 2017). 또한 포용적 국가교통망을 MST문제로 전체적인 교통망을 도출한 연구가 있었다(김중학, 백정한, 배윤경, 고용석 외 2019). 대한민국, 한반도, 동북아시아의 교통망을 구상하여 KTX, 자기부상열차, 하이퍼루프에 의한 공간 압축효과를 살펴보았다.

### 4. 기존 연구와의 차별성

과거 하이퍼루프와 관련하여 수행되고 있는 연구는 캡슐차량과 진공관 기술 및 검증에 관한 연구가 대부분이었다. 이후 기술적 실현이 뚜렷해짐에 따라 하이퍼루프가 도입될 경우 발생하는 다양한 영향 요소들을 분석한 연구가 다수 이뤄졌다. 그러나 대부분 경부축을 대상으로 한 연구가 주로 수행되었으며 여객수송에 관한 연구가 자세히 다뤄지지 않았다. 또한 하이퍼루프 네트워크 계획을 장기적인 시각으로 바라본 연구가 없었다.

본 논문은 기존 연구들의 주제와는 달리 수학적 방법론에 기반을 두고 여객 통행을 기본 전제로 거시적이며 통합적 시각으로 효율적인 하이퍼루프 네트워크 구축 및 계획방법에 초점을 두었다. 네트워크 계획에서 용량을 고려하였으며 네트워크의 단계별 구축 계획도 함께 고려하였다. 즉 사례 연구에서와 같이 우리나라 전국 규모의 거시적 분석을 통해 하이퍼루프 서비스를 받게 될 도시 선정과 함께 용량을 고려한 다양한 교통축을 계량화 및 체계화된 네트워크 계획을 제시하였다.

## III. 하이퍼루프 운영전략 및 네트워크 구상 방향

### 1. 운영전략

하이퍼루프의 속성은 현재 운용되고 있는 대중교통의 특성과는 크게 다르다. 하이퍼루프는 캡슐 1대당 소량 인원(약 20~30명)을 태우고 항공기보다 빠른 속도(약 1200km/h)로 운용된다. 간선버스의 경우 차량 1대당 크기와 용량이 상대적으로 작고 속도도 느리다. 따라서 간선버스는 비교적 적은 수의 승객을 가진 단거리 및 중거리 통행에 일반적으로 사용된다. 현재 가

장 빠른 육상교통수단은 고속철도로, 한 차량에 최대 935<sup>4)</sup>명의 승객을 수송하는 지역 간 대중교통수단 중 하나이다. 하이퍼루프는 간선버스보다도 더 작은 규모의 소수 승객을 위한 수단이며, 동시에 고속철도보다도 더 빠른 초고속 교통수단의 특성을 가지는 새로운 교통수단이다. 따라서 하이퍼루프 네트워크 체계는 기존 수단의 네트워크 체계와 완전히 다른 개념에서 출발해야 할 것이다. <Table 1>은 기존 교통수단과의 차량용량, 속도, 편도 노선용량을 비교하여 정리한 것이다.

지역 간 간선버스처럼 용량이 낮은 네트워크설계는 적은 수요로 운영되기 때문에 대개 환승 횟수를 최소화하는 출발-도착 지점을 일대일로 직접 연결하는 형

태(One-to-one System)로 네트워크가 구성되는 경우가 보편적이다. 한편, 대량 수송 교통수단인 고속철도의 경우는 출발·도착지와 고속철도역까지 연결 역할을 하는 연계교통수단(Feeder)과 역사에서 역사로 고속이며 대량으로 수송하는 고속철도와 같은 대량 교통수단 노선(Trunk Line)으로 구성된 허브 앤 스포크(Hub and Spoke) 체계로 되어 있는 경우가 많다. 즉 고속철도와 같은 고속·대량교통수단의 서비스 체계는 허브 앤 스포크와 같은 다대다 네트워크 설계의 개념(Many-to-many System)으로 구성되는 것이 효과적이다.

초고속이지만 차량당 승객 용량이 낮은 하이퍼루프의 경우에는 차량당 요구 이용 수요가 적으므로 네트워크 구축체계는 지역 간 간선버스와 같은 일대일

Table 1\_ Characteristics of Hyperloop and Others

Mode		Vehicle Capacity (persons)	Speed (km/h)	Line Headway (second)	One way line Capacity
Public	Hyperloop <sup>1)</sup>	28	1,220	30~120	840 ~ 3,360 persons/h
	Airplane	132~544	1004~1089 <sup>2)</sup>	420 <sup>3)</sup>	1,056 ~ 4,352 persons/h
	High speed rail <sup>4)</sup>	935	305	210~331	9,350 ~ 15,895 persons/h
	Rail <sup>5)</sup>	318~422	120~140	472~745 <sup>6)</sup>	2,306 ~ 4,827 persons/h
	Subway	540~3,200 <sup>7)</sup>	80	120~600	3,240 ~ 96,000 persons/h
	Bus	28~458 <sup>8)</sup>	100~110	300	336 ~ 540 persons/h
Individual	Car <sup>9)</sup>	1~5	100~120	1.6~1.8 (LOS E)	2,000 ~ 11,500 persons/h/lane
	Bicycle <sup>9)</sup>	1	13.5	2.3	484 ~ 790 persons/h/lane
	Walk <sup>9)</sup>	-	4.5	3	1200 persons/h/m

Note: 1) Source: Musk, E. 2013.

2) Maximum Operating Limit Speed, Source: <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a380/innovation.html#details>, <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family/a318.html> (accessed July 15, 2020)

3) 2018 operation minutes per day(915)÷Flights from Gimpo to Jeju per day(129); The Gimpo-Jeju route is the busiest passenger air route in the world(IATA 2019).

4) Source: [https://www.kric.go.kr/jsp/railplaza/rcd/railDogam5Detail.jsp?p\\_id=A030503001&seq=53](https://www.kric.go.kr/jsp/railplaza/rcd/railDogam5Detail.jsp?p_id=A030503001&seq=53) (accessed July 15, 2020), Kim(2017).

5) ITX Saemaul, Mugunghwa.

6) Source: Bae, Kim, Kang and Park et al.(2012).

7) Number of seats~congestion rate 200%(Shin, Lee and Jeong 2011).

8) Express bus(economy and excellent grade).

9) Source: Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013).

4) KTX I 기준.

네트워크 체계로 갖추는 것이 적합하다. 일대일 체계는 1개 캡슐이 1개 OD 페어(pair)별로 직행 운행되는 것으로 중간 환승이 없어 통행자들이 좀 더 만족할 수 있는 서비스를 제공할 수 있는 환경이 될 것이다. 차량캡슐용량이 낮기 때문에 소량 다빈도 운영이 가능하여 수요에 따라 다양한 형태의 배차간격으로 운영이 가능할 것이다. 즉 비첨두시에는 2분에서 첨두시 30초 수준으로 수요에 따라 다양한 배차간격을 두고 운영할 수가 있게 된다. 하이퍼루프가 초고속 기능을 최대 활용하기 위해서는 승객의 출발 역사와 도착 역사가 충분히 먼 거리에 있어야 할 것이다. 그래야만 승객들이 초고속의 혜택을 피부로 크게 느낄 수가 있을 것이다. 하이퍼루프의 튜브(선로)는 아진공 상태로 유지되어야 하기 때문에 직경이 넓지 않게 될 것으로 예상하고 있다. 따라서 차량 내부 공간이 넓지 않기 때문에 아무리 운행속도가 빠르더라도 움직이기 힘든 좁은 공간 내에서의 승객 피로감으로 인해 매우 긴 장거리 통행은 회피될 것으로 예상된다. 따라서 차내 시간을 약 2~3시간으로 가정할 때 최대 약 2,400~3,600km를 이동 가능한 거리로 볼 수 있으며 국내 통행은 30분 이내로 가능할 것이다. 장시간에 의한 피로감 문제는 국내 하이퍼루프 통행에 적용되지 않을 것이다.

## 2. 네트워크 구상방향

하이퍼루프 네트워크 구상방향은 다음과 같다. 첫째, 총 네트워크 길이를 가능한 최소화한 네트워크를 구상한다. 네트워크 총 길이는 하이퍼루프 건설비용과 밀접한 관련이 있다. 노선 길이를 최소화한 구상은 본 논문에서 제시하는 수학적 모형 결과를 반영한다. 둘

째, 가능한 많은 도시를 경유하는 네트워크로 구상한다. 도시 수가 많을수록 교통서비스의 기회가 많아지며 많은 수요를 담당하게 된다. 이는 일대일 체계를 운영하기 위한 기본조건이다. 셋째, 수요를 충족할 수 있는 용량으로 네트워크를 구상한다. 수요가 집중되는 구간을 분산시키기 위하여 주요 도시 간 여러 경로(path)로 구축한다. 이는 가능한 여러 도시들에 교통서비스를 제공할 수 있도록 하는 계획이 될 것이다. 다만, 추가되는 도시는 튜브의 용량을 고려하여 선정 여부를 판단하여야 할 것이다.

## IV. 네트워크 구상방법

일반적으로 대중교통 네트워크 설계에서는 정차정류장 위치 결정, 노선 결정, 운영 스케줄, 승무원 스케줄 순서로 계획을 한다. 모든 단계를 동시에 결정하여 가장 최적의 체계를 결정하는 것은 불가능하며 한 단계마다 매우 어려운 문제를 가지고 있다. 따라서 대중교통 계획은 각 단계별로 여러 이해관계자들과 조건들을 고려하여 전문가적인 시각과 휴리스틱적<sup>5)</sup>인 접근으로 결정하게 된다. 하이퍼루프 네트워크 구상 또한 대중교통 계획 범주에 드는 분야로서 처음부터 가장 최적의 체계를 찾는 것은 어렵다. 따라서 본 논문에서는 3단계 절차로 네트워크를 구상하였다. 첫 번째로, 하이퍼루프가 서비스할 도시를 선정하였다. 두 번째로, 수학적 모형을 통해 시나리오별 교통축을 탐색하였다. 본 논문에서 수학적 모형은 네트워크 총 길이를 최소화하고 용량을 고려하는 모형으로 최종 네트워크 구상의 기초 틀을 마련하기 위해 적용되었다. 즉 교통축의 형태와 용량 부하 구간을 찾고 추가 대안노선

5) 해결하고자 하는 문제의 해를 탐색할 때 매우 많은 시간이 필요한 경우 경험적, 학습적인 방법 또는 연구자가 설정한 합리적인 알고리즘에 기반하여 빠른 시간 내에 근사해를 찾아내는 과정.

필요 여부를 판단하는 데 기초가 되는 아이디어를 제공하는 기초 분석이다. 마지막으로, 탐색된 교통축을 바탕으로 하이퍼루프 네트워크 구상계획을 완료하는 것이다.

## 1. 서비스 제공 도시 선정

하이퍼루프로 서비스를 제공하게 될 도시 선정의 기준으로 ‘도시 인구수’와 ‘해당 도시에서 출발 또는 도착하는 중장거리의 통행량’의 2가지 요소를 고려하였다. 인구수는 도시 규모를 나타내는 가장 대표적인 지표로서 사회 인프라 수요 및 교통 수요의 규모를 파악하기 위해 보편적으로 사용되고 있는 사회경제지표이다. 즉 인구규모는 통행발생량과 높은 상관관계를 보이는 지표이다. 인구규모는 한 지점 즉 도시 자체의 통행발생량 규모를 나타낸다면, 한국교통연구원(KTDB)에서 제공하는 있는 OD 통행량은 출발-도착 지점 간의 교통량 교류규모를 나타내는 지표이다. 이는 두 지점 간 교통 서비스 연결 필요성을 보여주는 중요한 지표로 도시 선정 결정 요소로서 고려하였다. 특히 하이퍼루프는 초고속이라는 특성으로 중장거리 통행을 담당하게 될 최상위 교통수단이다. 따라서 본 논문은 특정 도시  $i$ 를 기준으로 하여 중장거리로 멀

어져 있는 도시  $j$ 들 간 통행량( $T_{ij}$ )의 합( $T_i = \sum_j T_{ij}$ )을 도시선정 지표로 사용하였다. 국내 중장거리 통행은 도시 간 직선거리 기준으로 100km 이상 떨어져 있는 OD쌍 간의 통행으로 가정하였다.

도시 인구수와 중장거리 도시 간 통행량을 동시에 고려하기 위해 정규화(Normalization)하여 전국 도시 별로 인구수지표( $NPOP_i$ )와 중장거리 통행량 지표( $NMLT_i$ )를 산출하였다. 이후 각 지표를 동일한 가중치( $\alpha=0.5, \beta=0.5$ )를 적용하여 도시선택 지표( $CI_i$ , city index)를 산출하였다(<식 1> 참조).

$$CI_i = \alpha(NPOP_i) + \beta(NMLT_i) \quad <식 1>$$

$NPOP_i$ : 도시  $i$ 의 인구수지표

$NMLT_i$ : 도시  $i$ 의 중장거리통행량 지표

$CI_i$ : 도시  $i$ 의 선택 지표

$\alpha, \beta$ : 가중치 ( $\alpha + \beta = 1$ )

본 논문에서는 2018년 기준 인구수와 OD 통행량 자료를 사용하였다. 도시 선택지표에 의해 상위 20개 도시를 선정한 도시집합(이하 ‘도시set’)은 국내 전체 인구 중 64.1%를 차지하며 국내 중장거리 총 통행량 중 59.4%를 차지하는 것으로 분석이 되었다(<Table 2> 참조).

Table 2\_ Service City List (Top 20)

Rank	City	Population (2018)	Cumulative %	$NPOP_i$	Mid-Long trips per day (2018)	Cumulative %	$NMLT_i$	$CI_i$
1	Seoul	9,765,623	19.1%	10.6101	191,719	16.0%	10.1680	10.2786
2	Busan	3,441,453	25.8%	3.5050	61,169	21.2%	2.9617	3.0976
3	Incheon	2,954,642	31.6%	2.9581	48,566	25.2%	2.2661	2.4391
4	Daejeon	1,489,936	34.5%	1.3125	76,899	31.7%	3.8300	3.2006
5	Daegu	2,461,769	39.3%	2.4043	56,896	36.4%	2.7259	2.6455
6	Gwangju	1,459,336	42.2%	1.2781	37,215	39.5%	1.6395	1.5492
7	Cheongju	837,749	43.8%	0.5798	36,412	42.6%	1.5952	1.3413
8	Ulsan	1,155,623	46.1%	0.9369	23,322	44.5%	0.8726	0.8887

(continued)

Table 2\_ Service City List (Top 20) (continued)

Rank	City	Population (2018)	Cumulative %	$NPOP_i$	Mid-Long trips per day (2018)	Cumulative %	$NMLT_i$	$CI_i$
9	Suwon	1,201,166	48.4%	0.9881	15,276	45.8%	0.4285	0.5684
10	Changwon	1,053,601	50.5%	0.8223	18,112	47.3%	0.5850	0.6443
11	Jeonju	651,091	51.8%	0.3701	22,004	49.2%	0.7999	0.6924
12	Goyang	1,044,189	53.8%	0.8117	12,010	50.2%	0.2482	0.3891
13	Seongnam	954,347	55.7%	0.7108	12,985	51.3%	0.3021	0.4042
14	Yongin	1,035,126	57.7%	0.8015	11,205	52.2%	0.2038	0.3532
15	Hwaseong	758,722	59.2%	0.4910	11,832	53.2%	0.2384	0.3015
16	Bucheon	843,768	60.8%	0.5865	9,417	54.0%	0.1051	0.2255
17	Cheonan	646,075	62.1%	0.3644	13,201	55.1%	0.3139	0.3266
18	Gangneung	212,957	62.5%	-0.1222	21,885	56.9%	0.7933	0.5644
19	Sejong	314,126	63.1%	-0.0085	17,437	58.4%	0.5478	0.4087
20	Pohang	510,013	64.1%	0.2116	12,512	59.4%	0.2759	0.2598

2. 수식모형을 활용한 교통축 탐색

1) 하이퍼루프 노선망 생성모형

하이퍼루프 네트워크를 구축하기에 앞서 기본 구상의 아이디어 확보를 위해 건설비 최소화를 위한 네트워크 총 길이가 최소화가 되는 모형을 적용하였다.  $n$ 개의 도시와 도시 간 통행량, 거리 행렬(matrix)이 주어졌을 때 링크용량을 고려하여 비용 최소화가 되는 노선가지망(tree)<sup>6)</sup>을 찾는 문제를 제시하였다. 본 논문에서 제시하는 하이퍼루프 노선망 생성모형은 최소결침나무 문제(MST: Minimum Spanning Tree)의 목적함수와 도시 간 통행량을 고려하는 최적 통신결침나무 문제(OCST: Optimum Communication Spanning Tree)<sup>7)</sup>의 결정변수와 제한조건을 고려하여 모형을 구축하였다. 네트워크를 구성하는 링크가 복선 또는 복복선일 때를 고려하며 총 비용이 최소가 되는 노선가지망을

결정하는 문제인 것이다. 본 논문에서 제시한 모형은 기본적인 교통축의 형태를 우선 찾은 후에 용량부하 구간을 확인하며 추가적인 대안노선의 필요 여부를 판단하는 과정을 밟는 것이다.

$n$  : 서비스도시 개수

$L_{ij}$ : link  $ij$ 의 길이(km)

$$(L_{ij} = L_{ji}, L_{ii} = 0, \forall i, j \in V)$$

$f_{ij}$  : node  $i$ 와 node  $j$ 간 통행량(인/일) ( $f_{ij} \geq 0$ )

$C_H$  : Hyperloop Tube 건설비용(원/km)

$C_{stn}$ : Hyperloop Station 건설비용(원/개소)

$CAP$  : Hyperloop Line 복선용량(인/일)

$r$  : 복선 건설비 대비 1개 복선 확장비용 비율

$$(0 \leq r \leq 1)$$

$x_{ij}$ : Link $ij$ 가 Tree에 포함되어 있으면 1, 그렇지 않으면 0

$y_{ij}^{od}$ : Link $ij$ 가 경로 $od$ 에 포함되어 있으면 1, 그렇지 않으면 0(경로 $od$ 는  $o$ 와  $d$  간의 최단경로)

6) 트리(tree)는 그래프이론에서 순환형태를 가지지 않은 그래프 형태를 의미함( $n$ 개 node가 설정될 때 항상  $n-1$ 개 link를 갖는 형태).

7) 'Optimum Communication Spanning Tree'는 최소결침나무(MST)를 확장한 문제로 최소 비용으로 통신 요구를 만족시키면서 주어진 모든 노드를 연결하는 Tree를 찾는 문제. Hu, T. C.(1974)에 의해 처음 소개되었음.

$n_{ij}$ : Link $ij$ 가 Tree에 포함되어 있지 않으면 0, 복선이면 1, 복복선이면 2

$$\min Z = C_H \sum_{i,j \in V, i < j} L_{ij} \{x_{ij} + r(n_{ij} - x_{ij})\} + n C_{\text{stn}} \quad \text{<식 2>}$$

Subject to

$$\sum_{j \in V \setminus \{o\}} y_{oj}^{od} = 1 \quad \text{<식 3>}$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{j, d\}} y_{ij}^{od} - \sum_{k \in V \setminus \{j, o\}} y_{jk}^{od} = 0 \quad \forall j \neq o, d \quad \text{<식 4>}$$

$$y_{ij}^{od} + y_{ji}^{od} \leq x_{ij} \quad i < j, o < d \quad \text{<식 5>}$$

$$\sum_{i,j \in V} x_{ij} = n - 1 \quad i < j \quad \text{<식 6>}$$

$$\sum_{o,d \in V} f_{od} y_{ij}^{od} \leq CAP \times n_{ij} \quad i < j, o < d \quad \text{<식 7>}$$

$$x_{ij} \begin{cases} 1 : \text{Link } ij \text{ is in the tree.} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad i < j \quad \text{<식 8>}$$

$$y_{ij} \begin{cases} 1 : \text{Link } ij \text{ is in the pathod.} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad o < d \quad \text{<식 9>}$$

$$n_{ij} = \{0, 1, 2\} \quad i < j \quad \text{<식 10>}$$

<식 2>는 목적함수로써 튜브(Tube)의 건설비용과 역(Station) 건설비용의 합산으로 하이퍼루프 총 건설 비용을 의미한다. 복복선의 비용은 복선 건설비 대비 추가적 복선을 더 확장할 때 드는 비용 비율을 적용하여 계산하였다<sup>8)</sup>. <식 3>은 pathod에서 node  $o$ 에 연결된 링크(link)는 1개로 제한하는 것이다. <식 4>는 pathod의 연결성을 나타내는 것이며 <식 5>는 결정 변수  $x_{ij}$ 와  $y_{ij}^{od}$ 의 관계를 나타낸 것이다. <식 6>은

형성되는 해의 형태가 항상 노선가지망 형태로 나타내는 제한조건이다. <식 7>은 결정변수  $y_{ij}^{od}$ 와  $n_{ij}$ 의 관계를 나타내는 것으로써 링크(link)에 부하된 통행량만큼  $n_{ij}$ 의 값 즉, 복선인지 복복선인지 결정하는 제한조건이다. <식 8~10>은 결정변수로  $x_{ij}$ 는 링크  $ij$ 가 노선가지망에 포함되는지 여부를 결정한다.  $y_{ij}^{od}$ 는 링크 $ij$ 가 경로 $od$ 에 포함되는지 여부를 결정한다.  $n_{ij}$ 는 링크 $ij$ 가 tree에 포함될 경우 1 이상의 값을 결정한다. 링크에 부하되는 통행량에 따라서 복선은 1, 복복선은 2로 결정된다. 링크 $ij$ 가 노선가지망에 포함되지 않을 경우  $n_{ij}$ 는 0이다.

본 논문에서 제시하는 모형은 OCST를 기반으로 정수(integer) 속성의 결정변수( $n_{ij}$ )를 추가하였다. 전통적인 MST모형은 기준에 알려진 크루스칼 알고리즘(Kruskal algorithm)이나 프림 알고리즘(Prim's algorithm)으로 쉽게 해결이 가능하다. 그러나 OCST는 복잡한 조합최적화(Combinatorial Optimization Problem) 문제로 NP-hard에 속하여 최적해를 찾기가 매우 어렵다<sup>9)</sup>. 따라서 본 논문의 모형 또한 마찬가지로 NP-hard에 속하는 문제로 분류되어 전역(global) 최적해를 찾는 것은 어려운 문제에 속한다. 따라서 입력자료(node 개수)가 많은 경우에는 휴리스틱 접근 방법으로 근사 최적해를 찾는 방법이 필요하게 된다. 사례연구에서는 문제의 규모(size)를 작게 설정하여 최적해를 쉽게 탐색할 수 있도록 하였다(node 개수 최대 20개). 최적해는 IMB ILOG Cplex 12.3을 이용하여 탐색하였다.

## 2) 후보링크 네트워크

본 논문에서 제시한 모형을 이용하여 노선가지망

8) 예를 들어  $r = 0.8$ 일 경우 복복선의 건설비용은 복선건설비용 대비 1.8배로 계산됨. 본 논문에서는 0.8을 가정하여 적용하였음.

9) OCST는 Garey and Johnson(1979)에 의해서 NP-hard으로 밝혀졌음.

(Tree)을 생성하기 위해서는 먼저 노선의 후보 링크로 구성된 네트워크 생성이 필요하다. 후보링크 네트워크는 먼저 불규칙 삼각망(TIN: Triangulated Irregular Network)을 이용하여 생성하였다. 불규칙 삼각망은 지형의 구조를 불규칙한 삼각형 집합으로 표현하여 지리데이터를 저장하는 방식이다(박미정, 허현, 김태곤, 서교 외 2006). 김종학, 백정환, 배운경, 고용석 외 (2019)는 불규칙 삼각망은 인접 교통존과의 연결을 전제로 교통축 형성과 문제 교통축 구간을 설정하는 데 활용 가능성을 제시하였다. 본 논문에서도 불규칙 삼각망의 형태를 도시 간 네트워크로 적용하여 후보링크 네트워크로 생성하였다.

본 논문에서는 앞서 선정된 20개 도시를 대상으로 분석하였다. 탐색하는 노선후보 링크의 개수를  $(n^2 - n)/2$ 개에서 불규칙삼각망 링크 개수로 축소하여 문제의 규모를 축소하였다. 이후 불규칙 삼각망 네트워크 중 필요하지 않은 링크를 삭제하여 탐색 계산 부담을 줄여 주었다. 또한 현실적으로 필요할 것으로 고려되는 후보링크는 추가하여 분석하였다. 후보링크 네트워크 생성 및 모형결과 예시는 <Figure 1>에 제시하였다.

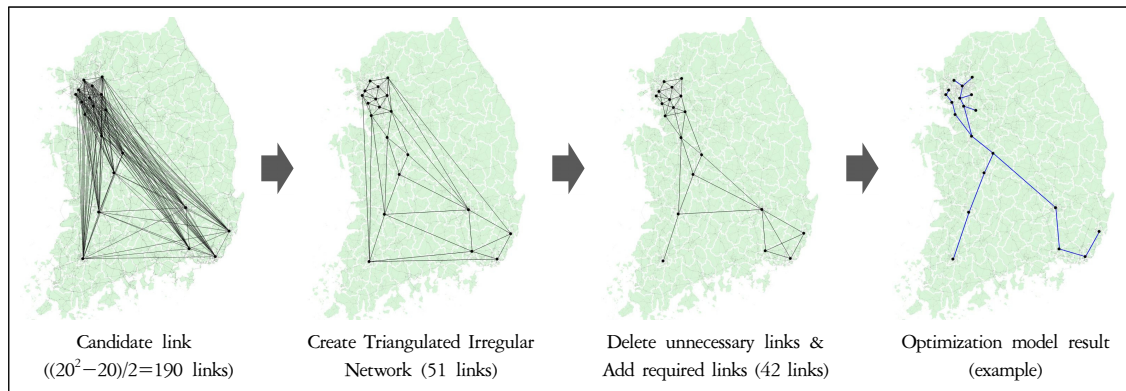
### 3) 입력 자료의 설정

본 논문에서 적용한 OD 통행량은 KTDB의 주수단 OD에서 모든 수단<sup>10)</sup> 통행량의 합인 OD 간 총 통행량을 사용하였다. 하이퍼루프를 이용하는 사람들은 주로 중장거리를 통행할 것으로 예상되어 도시 간 통행거리가 100km 이상인 OD 통행을 적용하였다. 하이퍼루프가 개통이 되면 중장거리 통행량 중 일부가 자연스럽게 하이퍼루프로 수단전환이 될 것으로 예상된다.

계획을 세워야 할 정부의 입장에서는 하이퍼루프의 수단 분담률 목표치를 설정하고 정책을 추진할 것으로 예상된다. 하이퍼루프의 수단분담률은 중장거리 통행의 수단분담률로 설정하였다. 따라서 본 논문에서는 다양한 하이퍼루프 수단분담률 정책 목표치로써 10, 20, 30%를 시나리오 대안으로 설정하여 분석하였다.

하이퍼루프의 튜브용량은 배차간격 1분과 캡슐 탑승인원 28명을 고려하여 계산하였다. 하이퍼루프 관련 연구에서는 운영 시 이론적으로 30초(첨두시간)에서 2분 배차간격을 제시하고 있다(Catherine, David and Lawrence 2016). 실제 하이퍼루프 운영 시 첨두시

Figure 1 \_ Hyperloop Candidate Link Network Creation and Optimization Result



10) 승용차, 버스, 일반철도/지하철, 고속철도, 항공, 해운.

간과 평상시운영 배차간격을 적절히 배분할 것으로 예상되어 대략적인 하루 평균 배차간격은 1분<sup>11)</sup>으로 가정하고 분석을 하였다. 따라서 하루 운영시간 18시간, 캡슐인원 28명으로 가정하여 튜브의 복선 용량을 설정하였고 하루에 60,480명/일을 소화할 수 있을 것으로 예상된다.

거리 행렬(matrix)은 도시 간 직선거리를 기준으로 하였다. 개략적이고 가능한 하이퍼루프 네트워크 형태를 파악하기 위하여 네트워크 상태에 영향을 받지 않는 불변 값인 직선거리를 입력 자료로 사용하였다. 튜브(Tube) 건설비용 및 역(Station) 건설비용은 Musk(2013)를<sup>12)</sup> 참고하였다.

## V. 네트워크 구성

### 1. 주요 교통축 구성

앞 절에서 설명한 모형을 이용해 서비스를 받는 도시 개수와 하이퍼루프 수단분담비율 목표치에 따라 여러 가지 시나리오를 분석하였다. 분석 결과 경부축, 호남축, 영동축이 주요 대표 교통축으로 도출되었다 (<Figure 2> 참조). 이러한 분석 결과는 최소 비용을 목적함수로 한 수학적 산출 결과임에도 불구하고 현재 한국의 도로망 체계와 유사한 결과가 나왔다. 즉 서비스를 제공할 도시 수가 적을수록 경부축만 존재하다가 서비스를 제공할 도시수가 증가하면서 호남축이 추가되고, 더욱 도시수를 증가하자 영동축도 추가 되는 것을 알 수 있다.

이와 같이 비용최소화를 목적함수로 하는 단순화된 수학적 모형에 의한 결과를 기본 구상 틀로 하여

합리적 교통축을 구상하는 단계를 가졌다. 각 서비스 교통축의 용량과 서비스 제공 대상 도시의 조합을 복합적으로 고려하면서 기본 구상 틀을 합리적으로 교통축을 검토하고자 하였다.

선정된 서울, 부산, 대구, 대전, 인천의 상위도시 5개에만 서비스를 제공할 경우, 하나의 경부축으로 계산 결과가 나왔다. 하이퍼루프 수단분담률이 최대 30%일 경우 용량 부족은 발생하지 않아 경부축 복선 네트워크 체계가 적합하다고 분석되었다.

서비스를 제공할 도시가 10개, 15개로 증가할 경우는 경부축과 호남축의 2가닥으로 나뉘는 네트워크 형상으로 계산 결과가 나왔다. 만일 하이퍼루프 수단분담률 목표가 30%일 경우 교통축의 용량 부족이 발생하여 수원에서 대전까지는 복복선의 서비스 제공이 필요한 것으로 분석되었다.

서비스를 제공할 도시 수가 20개로 증가될 경우는 영동선이 추가되고, 하이퍼루프 수단분담률 목표치가 30%일 경우 서울~대전 구간이 용량 부족으로 복복선이 필요한 것으로 분석되었다.

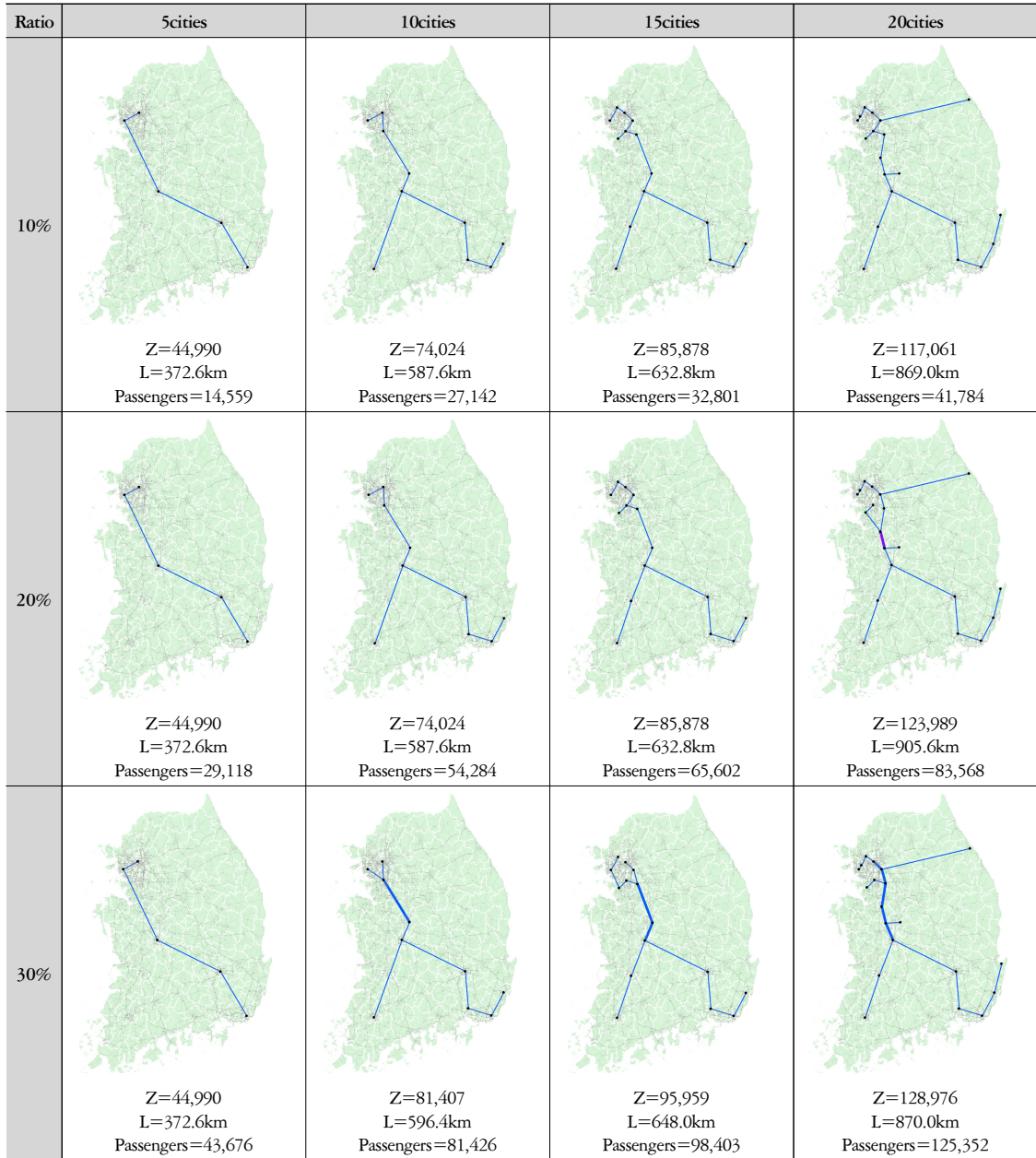
서비스를 제공할 도시 수가 증가할수록 그리고 하이퍼루프 수단분담률 목표치가 높아질수록 네트워크의 일부 구간에서 용량 부족으로 인해 복복선구간이 필요한 것으로 분석되었다.

복선체계하에서 용량이 부족한 구간에 대한 해결 방법으로 두 가지 접근방법이 있다. 첫 번째 방법은 공간적으로 동일한 교통축에 복선에서 복복선체계로 확대하는 방안이다. 두 번째 방법은 용량이 부족한 구간을 통과하는 수요를 분산 처리하도록 공간적으로 기존 축과는 다른 경쟁적 교통축을 제공하는 방안이다. 이는 수요 분산처리와 함께 기존 네트워크에서는

11) 30초 6시간, 1분 8시간, 2분 4시간.

12) 튜브 건설비용: 101.19억 원/km, 역 건설비용: 1456.45억 원/개소.

Figure 2\_Hyperloop Network Optimization Result by Number of Cities and Modal Shift Percentage



Double track capacity required, Quadruple-track capacity required

서비스를 받지 못했던 도시들이 추가적으로 하이퍼루프 서비스 혜택을 받도록 하는 방안이다. 본 논문은 후자의 방법을 더 적합한 용량부족 해결 방법으로 고

려하였다. 따라서 용량 부족 구간에 대해서는 공간적으로 분리된 경쟁적인 추가 교통축을 설정하였다. 전체적인 교통축과 용량 부족 구간을 살펴보기 위

하여 <Figure 2>의 결과를 중첩하여 살펴보았다. 중첩결과 수도권 및 경부축의 서울~대전 구간에서 용량 부족 구간으로 나타났다. 수도권 내 노선의 용량 부족 구간에 대하여 2개 선로로 처리하기 위해 수도권 서부축을 고려하였으며 서울~대전 구간은 중부축을 대체노선으로 설정하였다.

<Figure 3>은 20개 도시 및 하이퍼루프 수단분담률 정책목표치 10~30%의 결과를 중첩한 결과와 추가교통축을 구상한 것이다.

## 2. 교통축별 구상 및 중첩

우리나라 주요 교통축과 용량 부족을 해결하기 위한 추가 대안교통축을 하이퍼루프 노선망 생성모형을 통해 기초구상 교통망을 구상하였다. 각 교통축별 결과를 중첩하여 전체적인 하이퍼루프 네트워크 형상을 구상하였다. 주요 교통축은 경부축과 호남축 그리고 추가 대안노선인 중부축(영동축 포함)을 대상으로 하였다. 교통축에 포함되는 도시는 앞서 제시한 도시선택지수( $CI_i$ )에 의해 선정된 도시가 교통축상에 포함 된 경우 서비스 도시로 설정하였다. 이렇게 추가적으

로 고려한 교통축별 네트워크 구축과 모든 교통축을 통합하여 중첩한 네트워크 결과는 <Figure 4>와 같이 분석되었다.

경부축상에 있는 20개 도시를 연결하는 노선은 10% 및 20%의 수단분담 목표치를 복선 용량으로 충분히 운영 가능할 것으로 분석되었다. 호남축(18개 도시 대상) 또한 같은 결과를 보였다. 30%를 분담하는 경우에는 서울~대전 내 일부구간에서 복선 용량을 초과하는 것으로 분석되었다.

중부축은 영동축을 포함하여 19개 도시를 대상으로 노선 형상을 살펴보았다. 강릉시와 중부축 중간에 위치한 도시들의 통행량이 많지 않아 복선 용량 내에서 10~30%를 분담 가능한 것으로 나타났다.

주요 교통축의 형상을 모두 중첩한 네트워크는 전국 주요 도시를 포함한 29개 도시를 연결하는 네트워크로 형성이 된다. 수도권과 동남권 사이에 2개 대안 노선 형상이 나타나 서울~대전에서 부하되는 교통량을 분산시킬 수 있는 네트워크 구조이다. 이에 대한 용량 검토는 다음 절에서 제시하였다.

## 3. 네트워크 용량 검토

경부축, 호남축, 중부축(영동축 포함)을 중첩한 네트워크에서 하이퍼루프의 수단분담률 수준에 따라 네트워크 용량 검토가 필요하다. 앞서 제시한 서비스 도시별 구상결과와 교통축별 구상결과에서 공통적으로 서울~대전에서 용량부하가 걸릴 것이라는 결과를 보였다. 따라서 앞서 제시된 중첩된 네트워크에서 하이퍼루프 수단분담률에 따른 용량 부하를 검토하였다.

수도권을 중심으로 스크린라인(Screen line)을 설정하여 스크린라인을 통과하는 통행량 대비 용량비(V/C)를 수단분담률에 따라 <Table 3>에 산출하였다. 스크린라인 용량은 <Table 3> 그림의 지점①와

Figure 3\_Overlapping Hyperloop Network Optimization Results and Additional Axis Plan

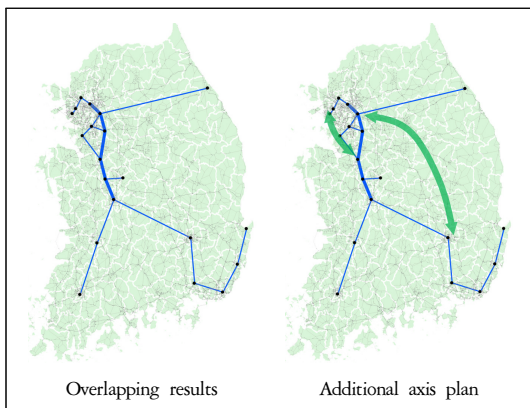














Figure 4\_Hyperloop Network Optimization Result(main axis) and Overlap

Ratio	Gyeong-bu axis	Ho-nam axis	Jung-bu axis*	Overlap
10%	 <p>Z=86,765 L=569.6km Passengers=33,722</p>	 <p>Z=81,075 L=542.1km Passengers=24,804</p>	 <p>Z=94,410 L=659.5km Passengers=19,118</p>	 <p>L=1,178.0km Passengers=53,185</p>
20%	 <p>Z=86,765 L=569.6km Passengers=67,445</p>	 <p>Z=81,075 L=542.1km Passengers=49,607</p>	 <p>Z=94,410 L=659.5km Passengers=38,236</p>	 <p>L=1,178.0km Passengers=106,369</p>
30%	 <p>Z=96,530 L=620.4km Passengers=101,167</p>	 <p>Z=88,335 L=582.1km Passengers=74,410</p>	 <p>Z=94,410 L=659.5km Passengers=57,353</p>	 <p>L=1,278.1km Passengers=159,553</p>

Double track capacity required,  Quadruple-track capacity required

\* Include Young-dong axis

지점②의 복선투브 용량을 합산하였다. 앞서 분석된 경부축결과(a)와 중부축결과(b)는 모두 수도권~동남권 간의 통행량(d)이 포함되어 있다. 따라서 스크린라

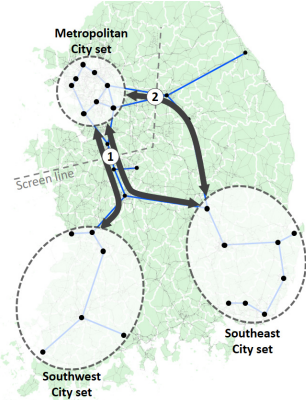
인의 총 통행량은 (a)+(b)+(c)에서 수도권~동남권 간의 중복통행량(d)을 제외하여 계산하였다.

분석 결과, 수단분담률이 10%인 경우 복선투브로

Table 3\_ Hyperloop Screen Line Capacity Analysis Results

(unit: trips/day)

Factors		Hyperloop share ratio		
		10%	20%	30%
(a)	Gyeong-bu axis result, trip volume of point①	28,480	56,961	85,441
(b)	Ho-nam axis result, trip volume of point①	23,360	46,719	70,079
(c)	Jung-bu axis result, trip volume of point②	16,916	33,832	50,749
(d)	Metropolitan cities ~ Southeast cities trip volume	14,468	28,936	43,404
(e)*	Screen line trip volume	54,288	108,577	162,865
(f)**	Screen line V/C	0.45	0.90	1.35



Note: \* (e)=(a)+(b)+(c)-(d)

\*\* (f)=(e)/Tube capacity, Tube capacity=60,480prs/day

충분한 용량을 가질 것으로 분석되었다. 이는 교통축 상의 도시를 더 추가할 수 있는 여지가 있음을 의미하는 것이다. 수단분담률이 20%인 경우 용량상태에 근접하게 운영될 것으로 분석되었다. 수단분담률이 30%인 경우에는 복선용량을 초과하여 제시된 네트워크로는 감당하지 못하는 것으로 분석되었다. 이것은 용량 증진 대책이 필요함을 의미하는 것이다. 본 논문에서는 하이퍼루프의 수단분담률을 10~20% 수준으로 가정하여 네트워크를 구상한 사례를 바탕으로 설명하고자 한다.

#### 4. 최종 네트워크 구상

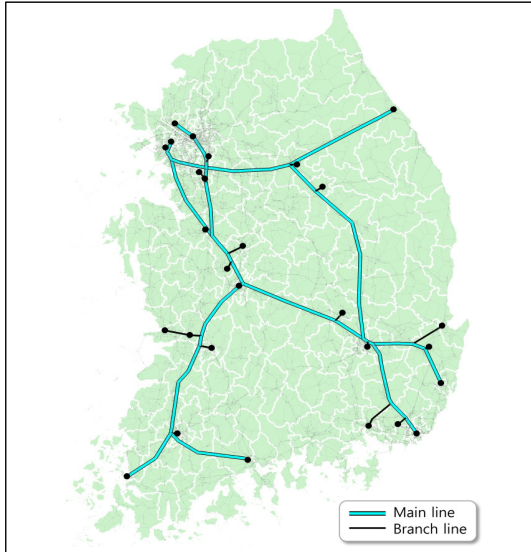
최종 네트워크 구상 단계는 용량과 축별 최소비용을 고려한 수학적 분석 결과를 기본 아이디어를 바탕으로 순환네트워크 형태 및 통행자행태 차원의 시간단축 효과를 고려한 전문가적 판단이 반영되었다. 최종 네트워크 구상에 앞서 하이퍼루프 교통수단의 기본 속성에 부합된 네트워크가 구성될 필요가 있음을 인식하여야 할 것이다. 즉 초고속이며 소규모 차량용량

이라는 특성을 고려할 때 하이퍼루프 네트워크는 본선(Main Line)구간과 지선(Branch Line)구간으로 구분하여 기능별 노선 네트워크가 설정될 필요가 있을 것이다(백재욱, 이병주, 유호식 2018b). 본선구간은 최고속도로 주행이 가능한 튜브이며 지선구간은 도시에 위치한 역으로 분기하여 인입하는 튜브이다. 이러한 특성을 고려하여 주요 교통축을 바탕으로 여러 주요 도시를 환승 없이 1대 1로 중장거리에 대해서만 서비스를 제공하는 네트워크 구조를 기본 가정으로 하였다.

앞의 수학적 분석 결과인 기본 네트워크 구상과 최종 네트워크 구조의 거의 유사하나 효율성과 편리성을 고려한 부분적으로 개선을 추가하였다. 하이퍼루프 수단분담률을 20%로 가정할 때 본 논문에서 제안한 최종 네트워크 구조는 <Figure 5>와 같다.

먼저 본선구간과 지선구간을 구분하여 기본 네트워크를 수정하였다. 각 서비스 도시 위치를 일일이 모두 경유하는 선형보다 도시 사이 적절한 지역을 가능한 직선 형태인 본선으로 통과하고 지선으로 도시를 연결하는 네트워크가 적절할 것이다. 이는 앞서 제시

Figure 5 \_ Korea Hyperloop Network Plan



한 하이퍼루프 운영 특성을 반영한 형태이다.

서울~대전 구간 용량 부족을 해소하기 위해 경부축과 중부축 2개 축으로 분산하는 구상으로 수학적으

로 산출된 기본 네트워크 구조를 그대로 유지하였다. 서울~대구 및 부산 간의 통행이 중부축으로 분산하는 효과가 있을 것으로 판단된다.

수도권 지역 네트워크는 인천방향과 서울방향으로 분리하여 수정하였다. 인천지역과 서울지역으로의 통행을 노선용량 측면에서 적절히 분배하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 또한 대도시 간 많은 통행량을 우선적이고 효율적으로 처리하기 위해서 대구와 부산을 직접적으로 연결하는 형상으로 수정하였다.

하이퍼루프 네트워크는 단계적인 건설로 추진될 것으로 예상되며 장기간에 걸쳐 <Figure 5>와 같은 완결된 네트워크가 구축될 것이다. 그래서 최대 수요 구간부터 단계별로 서비스를 제공한다는 원칙 하에서 중요 노선부터 단계별로 건설하는 구상을 <Figure 6>과 같이 제안하였다. 먼저 1단계는 우리나라 주요 교통축인 경부축으로 설정하였다. 대한민

Figure 6 \_ Korea Hyperloop Network Planning Stages

Network plan	Network plan		
	Stage1	Stage2	Stage3
Cities	11	21	29
Total Length	411.2km	802.2km	1,403.6km
Total Construction cost	57,631 trillion KRW	111,761 trillion KRW	184,269 trillion KRW
Passengers	42,818	73,383	106,369

국의 가장 많은 교통 수요가 발생하는 주요 교통축이기 때문이다. 정부축은 교통수요가 많은 주요 도시들을 노선 중간역으로 포함하고 있어 그 노선 건설의 효율성이 가장 높은 교통축이다. 이용 승객은 약 4만 2천 명으로 추정되며 대략적인 총 건설비용은 5조 7,600억 원으로 추산되었다. 2단계는 정부축에 호남축을 연결 건설하는 상태에서 21개 도시가 서비스를 받게 되며 튜브의 최대 용량 대비 교통량(V/C)은 0.81로 용량 문제는 발생하지 않을 것으로 예상된다. 이후 3단계는 중부축, 영동축과 수도권 서부축 건설을 통해 더 많은 도시가 하이퍼루프 서비스를 받도록 하며, 증가된 수요를 추가적 대안 노선축에서 용량을 확보하도록 하는 것이다. 대안 노선축을 추가적으로 더 확보하여 도시 수가 증가함에 따라 용량 대비 수요를 나타내는 V/C가 최대 0.90까지 될 것으로 예측되었다.

## VI. 결론

본 논문은 하이퍼루프가 대한민국에 도입될 시 네트워크의 구상 방향과 방법을 제시하고, 20%의 수단분담률을 가정할 때 적합한 하이퍼루프 네트워크 구조를 제안하였다. 현재 하이퍼루프는 기술적인 면에서 실현 가능한 교통수단으로 근 미래에 도입될 가능성이 높은 교통수단으로 고려되고 있다. 따라서 하이퍼루프 도입 전 네트워크 구상방향과 계획이 사전에 준비되어야 한다는 필요성이 본 논문의 동기가 되었다.

본 논문에서는 하이퍼루프 네트워크의 구상 원칙을 3가지로 설정하였다. 첫째는 총 네트워크의 길이가 최소가 되는 네트워크(건설비용 최소화), 둘째는 가능한 많은 도시들에 서비스를 제공할 수 있는 네트워크, 셋째는 현재와 미래의 수요량과 튜브 용량에 적합한 네트워크를 구축하는 구상 원칙이 적용되었다.

두 번째 원칙인 최소비용건설의 네트워크 해를 찾기 위해 본 논문에서는 수학적 모형인 최소결집나무 문제(MST: Minimum Spanning Tree)와 최적 통신결집나무 문제(OCST: Optimum Communication Spanning Tree)를 응용한 하이퍼루프 노선망 생성모형을 제시하여 적용하였다.

본 논문은 3단계의 과정을 거쳐 최종 하이퍼루프 네트워크를 제안하였다. 첫 번째 단계는 하이퍼루프 서비스를 받게 될 도시를 선정하는 단계이다. 두 번째 단계는 수학적 모형인 하이퍼루프 노선망 생성모형을 통해 최소비용의 네트워크를 찾는 단계이다. 세 번째 단계는 수학적 분석 결과를 바탕으로 용량, 통행시간 단축, 순환적 네트워크 등 전문가의 판단에 따른 최종 네트워크 결정 단계이다.

이와 같은 네트워크 구상원칙과 분석 단계를 거쳐 최종적으로 제안된 하이퍼루프 네트워크는 20% 분담률을 전제로 할 때 정부축, 호남축, 중부축, 영동축을 포함하는 구조로 분석되었다. 이러한 네트워크 구조는 건설비용은 최소화하면서도 가능한 많은 도시에 하이퍼루프 서비스를 제공한다. 또한 많은 도시에서 발생하는 수요를 분산 처리할 수 있는 대안 경로 축을 갖추어 용량 부족 문제가 발생하지 않는 네트워크 구조인 것이다.

본 논문은 하이퍼루프의 상용화 시점과 차이가 있는 현재 관측자료를 사용한 한계점이 존재한다. 그러나 하이퍼루프 네트워크의 형태를 찾는 과정과 분석 결과에 대하여 연구초점을 두고 미래 수요예측의 불확실성을 최소화하기 위하여 현재 관측 자료를 이용하였다.

하이퍼루프 상용화에 앞서 본 논문이 네트워크 구축 기본 방향과 골격을 제시함으로써 향후 하이퍼루프 계획 시 의미 있는 참고 자료 또는 기초연구로써 활용될 수 있기를 기대한다. 향후 자율주행차 군집주

행처럼 하이퍼루프 캡슐도 근집주행 기술이 적용될 것으로 기대된다. 이에 따라서 캡슐근집주행에 의한 선로용량 증대를 고려하여 하이퍼루프 네트워크 설계가 향후연구로 제시된다. 또한 통일 대한민국 및 아시아, 유럽과의 연결 서비스 제공을 위한 국제 하이퍼루프 노선망에 대한 연구도 장래에 필요하게 될 것으로 전망된다.

### 참고문헌 ●●●●●

1. 국토교통부. 2013. 도로용량편람. 세종: 국토교통부.  
Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2013. *Korea Highway Capacity Manual*. Sejong: Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
2. 김종학, 변필성, 김준기, 고용석, 김상록, 김익기, 유한솔 외. 2017. 초고속교통망 시대에 대비한 콤팩트 국토 형성방안 연구. 세종: 국토연구원.  
Kim Jonghak, Byun Pilseong, Kim Junki, Go Yongsuk, Kim Sangrok, Kim Ikki and Yoo Hansol et al. 2017. *The Formation of Compact Territory for Super-High-Speed Rail Era*. Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements
3. 김종학, 백정환, 배운경, 고용석, 김준기, 김익기, 이범규 외. 2019. 혁신과 포용을 위한 국가교통망 구상 연구. 세종: 국토연구원.  
Kim Jonghak, Baek Jeonghan, Bae Yunkyeong, Go Yongsuk, Kim Junki, Kim Ikki and Lee Beomgyu et al. 2019. *National Transport Network for Inclusiveness and Innovation of Territory*. Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.
4. 김형준. 2017. 병목구간을 고려한 고속철도 선로용량 산정 연구. 한국도시철도학회논문집 5권, 2호: 825-832.  
Kim Hyoungjun. 2017. The study on capacity of high speed railway in consideration with the bottleneck section. *Journal of Korean Society for Urban Railway* 5, no.2: 825-832.
5. 미래창조과학부. 2016. 최양희장관 초고속철도 신기술 개발 현장방문, 10월 19일. 보도자료.  
Ministry of Science, ICT & Future Planning. 2016. Minister Choi Yang-hee visited the site of the development of new high-speed railway technologies. October 19, Press release.
6. 박미정, 허현, 김태곤, 서교, 이정재, 2006. 크루스칼 알고리즘과 불규칙 삼각망을 이용한 유역 추출 알고리즘. 한국농공학회 48권, 4호: 3-12.  
Park Meejeong, Heo Hyun, Kim Tae-Gon, Suh Kyo and Lee Jeong-Jae. 2006. Watershed delineation algorithm using Kruskal's algorithm and triangulated irregular network. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 48, no.4: 3-12.
7. 배영규, 김인철, 강중혁, 박은경, 유승열, 김현지, 최성균. 2012. 선로용량 증대를 위한 철도건설의 적정성에 관한 연구. 2012년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집: 1296-1307.  
Bae Yeonggyu, Kim Incheol, Kang Junghyuk, Park Eunkyung, Yu Seungyeol, Kim Hyunji and Choe Seonggyun. 2012. A Study on the adequacy of railway construction to increase the line capacity in railway. *Proceeding of Autumn Annual Conference of the Korean Society for Railway*: 1296-1307.
8. 배진용. 2018. 하이퍼루프(HYPERLOOP) 핵심 기술동향. 대한전기학회 춘계학술대회 논문집: 11-15.  
Bae Jinyong. 2018. The core technical trends of Hyperloop. *Proceeding of Spring Annual Conference of The Korean Institute of Electrical Engineers*: 11-15.
9. 백재욱, 이병주, 유호식. 2016. 하이퍼루프의 가치공학적 이해. 유신기술회보 23권, 19-44. 서울: (주)유신.  
Baek Jaeuk, Lee Byeongju and Yoo Hosik. 2016. Understanding the value engineering of Hyperloop. *Yoosbin Technical Newsletter* 23, 19-44. Seoul: Yoosbin Engineering Corporation.
10. 백재욱, 이병주, 유호식. 2018a. 하이퍼루프의 경제적 효과 분석. 2018년도 한국철도학회 춘계학술대회 논문집: 178-179.  
Baek Jaeuk, Lee Byeongju and Yoo Hosik. 2018a. An economic efficiency analysis for Hyperloop. *Proceeding of 2018 Spring Annual Conference of the Korean Society for Railway*: 178-179.
11. \_\_\_\_\_. 2018b. 하이퍼루프의 노선대 선정을 위한 가치중심적 접근. 2018년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집: 150-151.  
Baek Jaeuk, Lee Byeongju and Yoo Hosik. 2018b. Value-centered approach for corridor selection of Hyperloop. *Proceeding of 2018 Autumn Annual Conference of the Korean Society for Railway*: 150-151.

12. 백종대, 류승기, 노관섭, 문학룡, 김영록, 이유화, 이상혁 외. 2016. 차세대 초고속 이동체계(Hyperloop) 기반기술 개발. 고양: 건설기술연구원.  
Baek Jongdae, Ryu Seongki, Rho Gwansub, Moon Hakryong, Moon Hakryong, Kim Youngrok, Lee Yuhwa, Lee Sanghyeok and Han Daeseak et al. 2018. *Development of Infrastructure Technology for Hyper Speed Transportation System*. Goyang: Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.
13. 백종대, 류승기, 노관섭, 김창용, 문학룡, 송재준, 강재운 외. 2018. 차세대 초고속 이동체계(Hyperloop) 인프라 핵심 기반 기술 개발(1/5). 고양: 건설기술연구원.  
Baek Jongdae, Ryu Seongki, Rho Gwansub, Kim Changyong, Moon Hakryong, Song Jaejun, Gang Jaeyun and Park Heounsuk et al. 2018. *Research on Infrastructure Technologies for Next-Generation Hyper Speed Transportation System*. Goyang: Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.
14. 백종대. 2018. 초고속 튜브 교통 수단의 개발 동향. 철도저널 21권, 5호: 29-36.  
Baek Jongdae. 2018. Super high speed transportation mode development trends. *The Korean Society For Railway* 21, no.5: 29-36.
15. 신성일, 이창훈, 정현진. 2011. 대중교통카드를 활용한 도시 철도 혼잡도 지표개발연구. 서울: 서울연구원.  
Shin Seongil, Lee Changhoon and Jeong Hyunjin. 2011. *Congestion Index of Urban Rail Transit Using Public Transportation Card Data*. Seoul: Seoul Development Institute.
16. 엄진기, 이광섭, 성명연, 이관섭. 2019. 하이퍼튜브(HTX) 도입에 따른 국내 화물수송 편익 분석. 한국도시철도학회논문집 7권, 3호: 435-443.  
Eom Jinki, Lee Kwangsub, Seong Myeongyeon and Lee Kwansup. 2019. Analysis of domestic freight transportation benefit by introducing HTX(Hyper Tube express). *Journal of Korean Society for Urban Railway* 7, no.3: 435-443.
17. 이관섭. 2017. 시속 1000km 하이퍼튜브: 미래혁신 5세대 신 교통 튜브트레인. 철도저널 20권, 2호: 17-20.  
Lee Kwansup. 2017. 1000km/h Hyper Tube: Future innovation 5th generation new transportation tube train. *Railway Journal* 20, no.2: 17-20.
18. 이관섭, 유원희, 장용준, 여인호, 이창영, 엄진기, 사공명 외. 2018. 아음속 캡슐트레인 핵심기술개발(3차년도). 의왕: 한국철도기술연구원.  
Lee Kwansup, Yoo Wonhi, Jang Yongjun, Yeo Inho, Lee Changyoung, Eom Jinki and Sa Gongmyeong et al. 2018. *Core Technology Development of Subsonic Capsule Train*. Uiwang: Korea Railroad Research Institute.
19. 이광섭, 엄진기, 이관섭. 2019. 초고속열차 하이퍼튜브(HTX) 국내 도입에 따른 사회경제적 파급효과 분석. 한국도시철도학회논문집 7권, 1호: 13-24.  
Lee Kwangsub, Eom Jinki and Lee Kwansup. 2019. Socio-economic impacts of introducing HTX(Hyper Tube eXpress). *Journal of Korean Society for Urban Railway* 7, no.1: 13-24.
20. 이용재. 2017. 하이퍼루프(Hyperloop). 월간교통 2월호, 80-81. 세종: 한국교통연구원.  
Lee Yongjae. 2017. Hyperloop. *Monthly KOTI Magazine on Transport*, February, 80-81. Sejong: The Korea Transport Institute.
21. 이재관. 2020. 시속 1,200km 미래교통-하이퍼튜브 HTX. 융합연구리뷰 6월호, 21-59. 서울: 한국과학기술연구원 융합연구정책센터.  
Lee Jaekwan. 2020. 1200km/h future transportation-Hypertube(HTX). *Convergence Research Review*, June, 21-59. Seoul: Korea Institute of Science and Technology Convergence Research Policy Center.
22. 이재선. 2018. 하이퍼루프(Hyperloop): 새로운 교통 패러다임의 전환. 철도저널 21권, 5호: 13-19.  
Lee Jaeseon. 2018. Hyperloop-the transition to a new transportation paradigm. *Railway Journal* 21, no.5: 13-19.
23. 철도산업정보센터. [https://www.kric.go.kr/jsp/railplaza/rcd/railDogam5Detail.jsp?p\\_id=A030503001&seq=53](https://www.kric.go.kr/jsp/railplaza/rcd/railDogam5Detail.jsp?p_id=A030503001&seq=53) (2020년 7월 15일 검색).  
Railway Industry Information Center. [https://www.kric.go.kr/jsp/railplaza/rcd/railDogam5Detail.jsp?p\\_id=A030503001&seq=53](https://www.kric.go.kr/jsp/railplaza/rcd/railDogam5Detail.jsp?p_id=A030503001&seq=53) (accessed July 15, 2020).
24. 한국철도기술연구원. 2018. 철도연, 시속 1,200km 하이퍼루프 아진공 기밀튜브 개발. 5월 24일, 보도자료.  
Korea Railroad Research Institute. 2018. KRRI, Vacuum tube development of 1,200 km/h Hyper Loop. May, 24, Press release.
25. 한국철도기술연구원 홈페이지. 하이퍼튜브 연구팀. [https://www.krri.re.kr/\\_prog/researcher/?site\\_dvs\\_cd=kr&m](https://www.krri.re.kr/_prog/researcher/?site_dvs_cd=kr&m)

- enu\_dvs\_cd=070301&post\_dvs\_cd=01010301 (2020 7월 20일 검색).
- Korea Railroad Research Institute Homepage. Hyper Tube Express (HTX) Research Team. [https://www.krri.re.kr/\\_prog/researcher/?site\\_dvs\\_cd=kr&menu\\_dvs\\_cd=070301&post\\_dvs\\_cd=01010301](https://www.krri.re.kr/_prog/researcher/?site_dvs_cd=kr&menu_dvs_cd=070301&post_dvs_cd=01010301) (accessed July 20, 2020).
26. Airbus Passenger aircraft A320 Family. <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family/a318.html> (accessed July 15, 2020).
27. Airbus Passenger aircraft A380. <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a380/innovation.html#details> (accessed July 15, 2020).
28. Catherine, L. T., David, J. H. and Lawrence, C. B. 2016. *Hyperloop Commercial Feasibility Analysis: High level overview*. Cambridge, MA: U.S. Department of Transportation.
29. Garey, M. R. and Johnson, D. S. 1979. *Computers and Intractability: A guide to the theory of NP-completeness*. San Francisco: Freeman.
30. Hu, T. C. 1974. Optimum communication spanning trees. *SIAM Journal on Computing* 3, no.3: 188-195.
31. IATA. 2019. WATS: World Air Transport Statistics 2019. Geneva: IATA.
32. Markets and Markets. Hyperloop Technology Market. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hyperloop-technology-market-87164486.html> (accessed July 20, 2020).
33. Musk, E. 2013. *Hyperloop Alpha*. Hawthorne, CA: SpaceX.
34. Virgin Hyperloop. <https://virginhyperloop.com> (accessed July 20, 2020).

- 
- 논문 접수일: 2020. 9. 8.
  - 심사 시작일: 2020. 10. 7.
  - 심사 완료일: 2020. 11. 2.

---

## 요약

주제어: 하이퍼루프, 네트워크용량, 네트워크구상, 네트워크흐름, 최소신장트리

하이퍼루프는 마찰력이 거의 없는 아진공 튜브내부에서 초고속 상태로 이동하는 교통수단으로 기술적으로 실현 가능성이 있는 것으로 알려져 있다. 하이퍼루프의 도입에 앞서 하이퍼루프의 특성이 반영된 네트워크 계획이 세워져야 한다. 따라서 기본적인 네트워크 구상방향과 계획에 관한 연구가 필요하다. 하이퍼루프는 초고속이며, 소량용량의 차량 그리고 다빈도 배차 기능의 특성을 지닌 교통수단이다. 이러한 특성을 고려하며 본 연구에서는 3단계의 과정을 거치며 최종 하이퍼루프 네트워크를 제안하였다. 첫 번째 단계는 하이퍼루프 서비스를 받게 될 도시를 선정하는 단계이고, 두 번째 단계는 수학적 모형을 통해 최소비용의 네트워크를 찾는 단계이며, 세 번째 단계

는 수학적 분석 결과를 바탕으로 용량, 통행시간 단축, 순환적 네트워크 등 전문가의 판단에 따른 최종 네트워크 결정 단계이다. 이와 같은 3단계의 분석을 거쳐 최종적으로 제안된 우리나라의 하이퍼루프 네트워크는 중장거리통행량의 20% 분담률을 전제로 할 때 경부축, 호남축, 중부축, 영동축을 포함하는 네트워크 구조가 바람직한 결과로 분석되었다. 이러한 네트워크 구조는 건설비용을 최소화 하면서 가능한 많은 도시에 하이퍼루프 서비스를 제공하는 네트워크 구조이다. 또한 많은 도시에서 발생하는 수요를 분산 처리할 수 있는 대안 경로 축을 갖추어 용량 부족 문제가 발생하지 않게 하는 네트워크 구조이기도 한 것이다.

