

A Study on the Algorithms of Highways Analysis Using Graph Theory

Gwangyeon Lee*, Kisoeb Park**

*Professor, Dept. of Mathematics, Hanseo University, Seosan, Korea

**Professor, Dept. of IT Convergence Software, Seoul Theological University, Bucheon, Korea

[Abstract]

In this paper, we propose the algorithms of accessibility indices using graph theory to analyze the connectivity of the highway traffic network and predict the central city. First, we find a transportation network that represents the highway traffic network in 2025 using graph theory. And we implement the algorithms of accessibility indices to efficiently and accurately analyze and predict the connectivity of the highway traffic network in 2025 from a given transportation network. Through the analysis results of 2025 obtained by using the proposed algorithm, we can find a city that is the center city of transportation in the highway transportation network, and it is used as information to improve the connectivity of the nationwide highway traffic network in the future.

▶ **Key words:** Highway Traffic Network, Accessibility Indices, Transportation Network, Graph Theory, Algorithms

[요 약]

본 논문에서는 고속도로 교통망의 연결성을 분석하고 중심이 되는 도시를 예측하기 위하여 그래프 이론을 이용하여 접근성 지표의 알고리즘을 제안한다. 먼저 그래프 이론을 이용하여 2025년 고속도로 교통망을 운송네트워크로 표현한다. 그리고 운송네트워크로부터 2025년 고속도로 교통망의 연결성을 효율적이고 정확하게 분석하고 예측하기 위한 접근성 지표의 알고리즘을 구현한다. 제안된 접근성 지표의 알고리즘을 통하여 얻은 2025년의 분석 결과를 활용하여 고속도로의 운송네트워크에서 교통의 중심도시를 찾을 수 있고, 상대적으로 교통의 접근성이 낮은 도시를 찾아, 향후 전국의 고속도로 교통망의 연결성을 개선시키는 정보로 활용한다.

▶ **주제어:** 고속도로 교통망, 접근성 지표, 운송네트워크, 그래프 이론, 알고리즘

• First Author: Gwangyeon Lee, Corresponding Author: Kisoeb Park
*Gwangyeon Lee (gylee@hanseo.ac.kr), Dept. of Mathematics, Hanseo University
**Kisoeb Park (kisoeb@stu.ac.kr), Dept. of IT Convergence Software, Seoul Theological University
• Received: 2023. 03. 06, Revised: 2023. 06. 12, Accepted: 2023. 06. 12.

I. Introduction

우리나라의 고속국도법 제2조에 의하면 고속도로는 '자동차 교통망의 중추부분을 이루는 중요한 도시를 연결하는 자동차 전용의 고속교통에 속하는 도로'로 되어 있다. 이와 같은 고속도로는 도시와 도시를 효율적으로 연결하는 상호교환의 중요한 교통수단이며, 고속도로가 국가경제 뿐만 아니라 개인적인 소통을 원활히 한다는 점에서 국민의 일상생활, 기업의 산업 활동, 지역발전 등에 있어서 절대적인 영향을 미치는 핵심 사회간접자본시설이다.

고속도로 개통이 지역경제에 미치는 효과는 운송비용과 시간을 줄임으로 생산원가를 감소시켜 생산성 향상과 경쟁력을 강화시켜 지역분화 및 지역격차 해소, 도시화 촉진, 효율적인 생산 증진에 의한 물가안정, 고속도로 개통 및 관련된 기술혁신, 지역 고유성의 붕괴, 개방화, 삶의 질과 가치관 등의 다양한 변화가 나타난다[1].

우리나라에서 고속도로의 건설은 1960년대 초반에 논의되어 1970년대에 들어서면서 전국 주요 도시와 거점을 연결하는 고속도로를 건설하였고, 현재에는 그 당시보다 훨씬 많은 고속도로가 건설되었으며 계획 중이기도 하다. 고속도로의 건설로 인하여 우리나라 전체의 산업이 괄목상대할 만큼 발전했음에 이론의 여지가 없을 것이다. 고속도로 교통망의 분석으로부터 도출되는 각종 자료를 이용하여 국토를 균형적으로 발전시키는 정보로 활용할 수 있고, 새로운 일자리의 창출까지 이어질 수 있기 때문에 국민들에게 선택의 기회를 다양하게 제공할 수 있다. 교통망 네트워크의 어느 지점이 그 네트워크 안에서 서로 연결된 다른 지점에 대해 갖는 '상대적 위치'로 정의할 수 있는 접근성은 지역공간의 조직자의 역할을 하므로 입지분석의 핵심요인으로 간주되고 있다.

이와 같은 접근성을 측정하기 위한 모형 개발은 1950년에 이후부터 활발하게 진행되었다. Garrison[2]은 미국 남동부지역의 고속도로 연결을 그래프(Graph)로 나타내고, 그 그래프의 연결행렬을 이용하여 고속도로망의 접근도를 산출하는 연구를 하였다. 이 연구를 시작으로 교통 네트워크에 그래프 이론을 접목하는 연구가 활발히 진행되었으며, 모형의 수정·보완을 거치며 발전되어 왔다.

Fleming과 Hayuth[3]는 교통망의 공간 구조를 분석하기 위해 그래프 이론에서 도출되는 개념을 사용했다. 그 이후에 많은 학자들은 고속도로 교통망의 연결성과 관련한 지표로 접근성(accessibility)을 거론하며, 고속도로가 통과하는 도시의 접근성에 대하여 여러 연구가 진행되었다[4, 5, 6, 7]. 접근성은 교통 인프라의 체계적이고 효율적인 재편 방안을 결정하는 기준이 되며, 나아가 단계적 추진 로드맵을 제시하는 중요한 지표가 된다[8]. 일반적으로 접근성은 지표상의

한 지점이 주변의 다른 지점들로부터 도달하기 쉬운 정도를 나타내는 의미이며, 한 지역이 주변 지역에 대해 갖는 입지의 상대적 우위성을 나타내는 지표로도 활용된다[9]. 접근성은 교통인프라, 교육인프라, 에너지인프라 등의 사회간접자본 투자정책과 도시편익시설의 입지배분계획 등에서 중요한 지표로 활용되지만 의미의 모호성으로 인하여 접근성을 측정하는 여러 가지 방법이 제안되고 있다[10]. 지표공간 상에서의 공간적 분리를 극복하기 위한 이동의 용이함 정도로 접근성을 정의하면 한 도시가 다른 도시와 갖게 되는 상대적 위치의 유리함을 대변하는 지표로 표현될 수 있으므로 전체 도시에 대한 한 도시의 지리적 위치관계와 함께 그 도시가 고속도로 교통망에 의한 다른 도시들과의 연결성에 의해 분석될 수 있다고 한다[3].

본 연구의 목적은 그래프 이론을 이용하여 우리나라 고속도로망의 연결성을 분석하고 예측할 수 있는 알고리즘을 구현하고자 한다. 본 연구에서는 우리나라의 2025년에 통행 가능하고 건설 예정인 고속도로가 지나는 도시 70개를 선정하고 그래프 이론을 이용하여 고속도로 교통망을 운송네트워크로 표현한다. 고속도로 교통망을 그래프로 나타낸 운송네트워크를 구한다. 운송네트워크의 연결행렬을 구하고 연결행렬로부터 2025년에 해당하는 운송행렬을 구한다. 운송행렬로부터 얻어지는 각종 자료를 분석하여 2025년 고속도로를 통과하는 70개의 도시 각각의 접근지표, 연결수, 비교거리, 산포지수, 그래프의 지름 등을 구할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 이를 통하여 고속도로의 운송네트워크에서 2025년도의 교통의 중심이 되는 도시를 예측할 수 있고, 상대적으로 교통의 접근성이 낮은 도시를 예측하여, 향후 고속도로의 교통의 연결성을 높이는 정보로 활용할 수 있도록 한다. 이와 같이 2025년 고속도로 교통망을 모델로 하는 분석 방법을 제시하면 향후 고속도로 교통망을 효율적으로 분석하는데 활용할 수 있다.

II. Preliminaries

1. Mathematical Definition

본 연구는 그래프이론을 활용하여 고속도로 네트워크의 접근성을 비롯한 전체적인 연결성을 분석하는 것이다. 이를 위하여 연구에 필요한 수학적 정의를 간단히 알아보자.

그래프 G 는 정점(vertex)과 정점을 잇는 선인 이음선(edge)으로 구성된 집합이다. 일반적으로 그래프의 정점을 $1, 2, \dots, m$ 으로 표시하고, 이를 집합 $V = \{1, 2, \dots, m\}$ 로 나타낸다. 또 그래프의 이음선 e_{ij} 는 정점 i 와 정점 j 를 잇는 선이며, $e_{ij} = (i, j)$ 와 같이 정점의 순서쌍으로 나타

낸다. 이때 이음선들의 집합을 E 로 나타낸다. 즉, 공집합이 아닌 정점들의 집합을 V , 이음선들의 집합을 E 라 할 때, 그래프 G 는 $G=(V, E)$ 로 표현한다. 그래프 G 는 행렬로 표현할 수 있고, $G=(V, E)$ 의 연결행렬(connected matrix) $A=[a_{ij}]_{m \times m}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{이음선이 존재할 때} \\ 0, & \text{이음선이 존재하지 않을 때} \end{cases}$$

따라서 연결행렬 A 는 성분이 0 또는 1인 (0,1)-행렬이다.

한편, 네트워크(network)는 노드(nodes) 또는 에지(edge)가 속성을 갖는 그래프로서, 그래프 상에서 노드는 정점으로 에지는 이음선이다. 고속도로 교통망에서 각 도시에 번호를 지정하여 정점으로 하고 각각의 도시를 지나는 고속도로를 이음선으로 하면 고속도로 교통망을 그래프로 나타낼 수 있고, 이 그래프를 운송네트워크(transportation network)라 한다. 이때, 운송네트워크로부터 연결행렬 A 을 구할 수 있다. 여기서 두 도시 사이에 서로 다른 고속도로가 중복하여 건설되지 않았고 다른 도시를 거치지 않고 자기 자신으로 되돌아오는 고리(loop)가 없다고 가정하면 운송네트워크는 단순그래프(simple graph)이다.

본 연구에서는 운송네트워크가 단순그래프인 경우만 다룬다. 그러면 운송네트워크의 연결행렬 A 의 i 번째 행은 정점 i 에서부터 출발하여 한 번에 다다를 수 있는 정점들을 나타내므로 i 번째 행의 합은 정점 i 에서부터 시작되는 경로의 개수이다. 또 A 의 k 거듭제곱을 $A^k=[a^{(k)}_{ij}]$ 라 하면 $a^{(k)}_{ij}$ 는 정점 i 에서 정확히 k 단계를 거쳐 정점 j 에 다다른 방법의 가짓수이다.

연결행렬 A 를 이용하여 운송행렬(transportation matrix) $T=[t_{ij}]$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$T = A + A^2 + A^3 + \dots + A^s$$

여기서 s 는 운송행렬 T 의 성분이 모두 0이 아닐 때까지의 연결행렬 A 의 최소거듭제곱(lowest power)이다. 운송행렬 T 의 (i, j) 성분 t_{ij} 는 s 또는 그 보다 적은 단계로 정점 i 에서 정점 j 에 이르는 방법의 가짓수이다.

이제 m 개의 도시에 대한 운송네트워크의 운송행렬 $T=[t_{ij}]_{m \times m}$ 를 이용하여 정의되며 본 연구에서 필요한 여러 가지 수학적 개념에 대하여 알아보자.

운송네트워크의 정점 i 에서 다른 정점으로 이동할 수 있는 정도를 나타내는 것을 접근지표(accessibility)라 하고, x_i 로 나타낸다. 두 정점 i 와 j 의 거리(distance)는 가장 적은 개수의 이음선을 거쳐 정점 i 에서 정점 j 로 갈 때의 이음선의 개수이고, $s(i, j)$ 로 나타낸다. 정점 i 의 연결

수(associated number)는 정점 i 와 다른 정점 사이의 최대거리(maximum distance)이고, v_i 로 나타낸다. 정점 i 의 비교거리(relative distance)는 정점 i 로부터 다른 정점으로 가는 거리의 합이고, s_i 로 나타낸다. 운송네트워크의 산포지수(index of dispersion)는 모든 정점으로부터 다른 정점들로의 거리의 합이고, S 로 나타낸다. 마지막으로 운송네트워크의 지름(diameter)은 최대 연결수이고, V 로 나타낸다. 위의 정의로부터 접근지표, 연결수, 비교거리, 산포지수, 지름을 식으로 나타내면 각각 다음과 같다.

$$x_i = \sum_{j=1}^m t_{ij}, \quad v_i = \max_j s(i, j), \quad s_i = \sum_{j=1}^m s(i, j),$$

$$S = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m s(i, j) = \sum_{i=1}^m s_i, \quad V = \max_i v_i$$

한편, 연결수 v_i 가 가장 작은 도시를 중심도시(central city)라 한다. 특히 고속도로의 운송네트워크에서 최대의 접근지표와 최소의 연결수와 비교거리를 갖는 도시를 교통의 중심도시라고 한다.

2. Transportation Network

일반적으로 정점과 이음선으로 이루어진 운송네트워크로부터 한 도시에서 다른 도시까지 얼마나 연결성이 좋은지를 접근성 지표로 판단할 수 있고, 운송네트워크의 구조를 분석하는 중요한 지표로 활용된다. 따라서 접근성은 단순히 한 정점에서 다른 정점에 도달할 수 있는 방법의 수인 접근지표뿐만 아니라 연결수와 비교거리, 산포지수, 지름 등의 다양한 지표를 종합하여 판단할 수 있다.

Table 1. Vertices and Cities in 2025

V1)	City	V	City	V	City
1	Incheon	25	Jeonju	49	Jechon
2	Seoul	26	Gimcheon	50	Andong
3	Hongcheon	27	Daegu	51	Yeongdeok
4	Chuncheon	28	Pohang	52	Gunwi
5	Yangyang	29	Eonyang	53	Hwasan
6	Gangneung	30	Ulsan	54	Gwangju ²⁾
7	Ansan	31	Busan	55	Ganghwa
8	Suwon	32	Jangsu	56	Guri
9	Hwaseong	33	Hamyang	57	Yongin
10	Pyeongtaek	34	Goryeong	58	Daesan
11	Icheon	35	Changwon	59	Yeongwol
12	Yeosu	36	Jinju	60	Asan
13	Wonju	37	Tongyeong	61	Yesan
14	Donghae	38	Namwon	62	Eastcheonan
15	Anseong	39	Gwangju	63	Sejong
16	Jincheon	40	Gochang	64	Buyeo
17	Dangjin	41	Hampyeong	65	Gimje
18	Gongju	42	Mokpo	66	Seongju

1) V는 Vertex(정점)임.

2) 정점 39는 광주광역시이고, 정점 54는 경기도 광주임.

19	Cheonan	43	Suncheon	67	Changnyeong
20	Cheongju	44	Pocheon	68	Miryang
21	Sangju	45	Sokcho	69	Gangjin
22	Seocheon	46	Samcheok	70	Yeosu
23	Nonsan	47	Yangpyeong		
24	Daejeon	48	Chungju		

Table 1은 70개의 도시를 선정하여 2025년 고속도로 운송네트워크의 정점으로 정한 것이고, Fig. 1은 Table 1을 이용하여 2025년 고속도로 교통망을 운송네트워크로 나타낸 것이다. 운송네트워크에서 정점으로 선정한 도시들은 2025년에 통행 가능하고 건설 예정인 고속도로 상에서 종점인 경우, 두 개 이상의 고속도로가 만나 서로 교차하는 경우와 가능하면 고속도로가 통과하는 주변의 도시 중에서 큰 도시를 택하였다. 서울의 교통을 위해 개통된 고속도로인 서울외곽순환고속도로는 제외하였으며, 고속도로 상에서 서울과 매우 가까이 연결된 도시인 경우에는 정점을 서울 하나로 간주하였다. 그리고 안산과 시흥을 잇는 고속도로는 정점을 안산과 서울로, 안산과 신갈을 잇는 고속도로는 정점을 안산과 수원으로 선정하였다. 정점 39인 광주에 가까운 작은 도시들이 있고 광주 인권을 잇는 고속도로와 도시가 있지만 모두 광주권역으로 간주하여 광주 하나로 정점을 택하였고, 운송네트워크 전체로 보았을 때 지엽적인 영향만 있는 경우는 운송행렬의 크기를 고려하여 큰 도시 하나로 선정하였다.

고속도로에서 차선이 많고 적음에 따라 통행 여건이 다를 것이다. 하지만 본 연구에서는 고속도로의 여건이나, 통행량과 통행시간 등은 고려하지 않았으며, 각 도시 사이에 연결되어 통행 가능하고 건설 예정인 고속도로가 지나가는 도시를 선정하여 운송네트워크를 구성하였다.

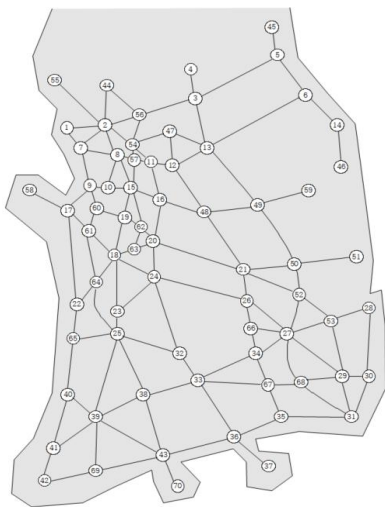


Fig. 1. Transportation networks in 2025

위와 같이 선정된 70개의 정점 도시를 이용하여 연결행렬 A_{2025} 를 구하면 Fig. 2와 같다.

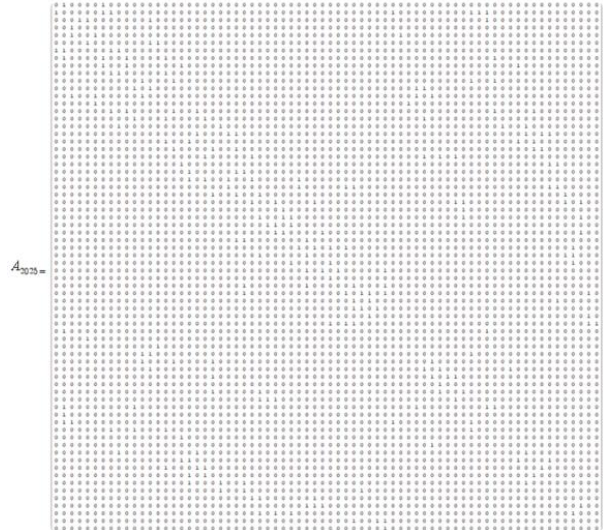


Fig. 2. Connected matrices in 2025

이 연결행렬 A_{2025} 을 이용하여 운송행렬 T_{2025} 을 구하면 다음과 같다.

$$T_{2025} = A_{2025} + A_{2025}^2 + \dots + A_{2025}^{13}$$

본 연구에서의 운송네트워크는 고속도로 교통망의 복잡성을 단순화시켜서 모든 도시를 정점으로 나타내고 도시와 도시를 연결하는 고속도로는 이음선으로 표현하는 그래프 이론을 이용하여 한 정점에서 다른 정점까지의 연결성이 좋은지 여부, 즉 각 도시들의 접근성을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 운송네트워크 전체로 보았을 때 새로운 고속도로 구간을 추가로 개통하였을 경우 어떤 도시의 접근성이 가장 크게 변화하는지, 어떤 고속도로 구간을 추가로 개통하면 도시 사이의 연결성을 극대화할 수 있는지 등에 대한 분석과 예측이 가능하며, 각 도시들의 상대적인 접근성 수준을 쉽게 파악할 수 있게 된다.

III. The Proposed Scheme

1. The Proposed Algorithms

고속도로의 운송네트워크를 구성하면 2025년의 경우 70개의 도시가 정점이다. 각 정점과 정점을 연결하는 이음선의 수는 125개이며, 이를 행렬로 나타낸 연결행렬 A_{2025} 과 운송행렬 T_{2025} 은 크기가 70×70 정사각형행렬이다. 이

3) 운송행렬 T_{2025} 의 경우, 행렬의 크기뿐만 아니라 행렬의 성분이 매우 큰 수이기 때문에 지면의 제약으로 본 논문에서 제시할 수 없으나 본 논문에서 제시한 연결행렬을 이용하면 구할 수 있음.

때 운송행렬 T_{2025} 은 연결행렬 A_{2025} 의 13승까지 구하여 더해야 한다. 이때 A 의 각각의 거듭제곱의 모든 성분들이 0이 아닌 것을 확인해야 한다. 이를 위하여 크기가 큰 행렬의 곱셈과 덧셈을 여러 번에 걸쳐 매우 지루한 작업을 해야 한다. 운송네트워크를 보다 효율적으로 분석하는데 필요한 접근지표, 연결수, 비교거리, 산포지수, 지름 등을 정확하게 결정하기 위한 접근성 지표의 알고리즘 구현이 필요하다.

먼저 고속도로 교통망으로부터 연결행렬을 얻고, 이를 이용하여 운송행렬과 접근지표를 얻는 알고리즘은 다음과 같다.

① 운송행렬과 접근지표를 구하는 알고리즘

[1] 2025년 고속도로 교통망에서 Table 1과 같이 각 도시에 번호를 부여하여 정점을 선정하고 각각의 도시를 통과하는 고속도로를 이음선으로 하는 고속도로 교통망을 그래프로 나타낸 운송네트워크를 구한다.

[2] 운송네트워크의 연결행렬 $A = [a_{ij}]_{m \times m}$ 를 구한다.

[3] 연결행렬 A 를 이용하여 운송행렬

$$T = [t_{ij}] = A + A^2 + A^3 + \dots + A^s \text{를 구한다.}$$

여기서 s 는 운송행렬 T 의 모든 성분이 0이 아닐 때까지의 A 의 최소거듭제곱이다.

[4] 운송행렬 T 에서 접근지표 $x_i = \sum_{j=1}^m t_{ij}$ 를 구한다.

또한, 연결행렬을 이용하여 비교거리, 연결수, 산포지수와 지름을 구하는 알고리즘을 구성하면 다음과 같다.

② 비교거리, 연결수, 산포지수와 지름을 구하는 알고리즘

[1] 연결행렬 A 에서 영이 아닌 성분을 1로 바꾼 행렬을 $D_0 (= A)$, 행렬 $A_1 = A + A^2$ 에서 영이 아닌 성분을 2로 바꾼 행렬을 D_1, \dots , 행렬 $A_{s-1} = \sum_{i=1}^s A^i$ 에서 영이 아닌 성분을 s 로 바꾼 행렬을 D_{s-1} 로 놓는다. 여기서 s 는 행렬 A_{s-1} 의 모든 성분이 0이 아닐 때까지의 최소거듭제곱이다.

[2] 행렬 $D_i (i=0, 1, \dots, s-1)$ 로부터, 행렬 $\hat{D} = \sum_{k=0}^{s-1} D_k$ 를 구한다.

[3] $t = \sum_{i=1}^s i$ 에 대하여, 행렬 \hat{D} 에서 각 성분에 $t-1, t-1 \rightarrow 2, t-3 \rightarrow 3, \dots, t-(t-s) \rightarrow s$ 로 대입하여 얻은 새로운 행렬을 $matD$ 로 놓는다.

[4] 운송네트워크에서 두 정점 i 와 j 의 거리행렬 $D = [d_{ij}] = matD - 2 \times I_m$ 를 구한다.

여기서, I_m 은 단위행렬이다.

[5] 거리행렬 $D = [d_{ij}]$ 로부터 비교거리 $s_i = \sum_{j=1}^m d_{ij}$, 연결

$$수 v_i = \max_j (d_{ij}), \text{ 산포지수 } S = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d_{ij} = \sum_{i=1}^m s_i, \text{ 지}$$

름 $V = \max_i (v_i)$ 를 차례로 구한다.

2. Analysis Results for Accessibility Indices

본 연구에서는 고속도로의 운송네트워크를 구성하면 2025년의 경우 70개의 도시가 정점이다. 본 절에서는 제안된 접근성 지표의 알고리즘을 통하여 얻은 2025년의 분석 결과를 살펴본다. 분석 결과로부터 얻은 운송네트워크의 정점 i 와 다른 정점 사이의 최대거리인 연결수 v_i , 정점 i 로부터 다른 정점으로 가는 거리의 합인 비교거리 d_i , 정점 i 에서 다른 정점으로 이동할 수 있는 정도인 접근지표 x_i 는 각각 Table 2와 같다.

Table 2. Associated number(v_i), Relative distance (d_i) and Accessibility(x_i) in 2025

City	v_i	d_i	x_i
1 Incheon	10	386	103153924
2 Seoul	9	336	257673400
3 Hongcheon	10	350	72710881
4 Chuncheon	12	421	12722805
5 Yangyang	12	413	27034922
6 Gangneung	12	390	34368677
7 Ansan	9	338	180678396
8 Suwon	8	313	274207151
9 Hwaseong	8	322	133557095
10 Pyeongtaek	8	322	170818345
11 Icheon	8	300	193893155
12 Yeosu	9	314	137265749
13 Wonju	10	329	108961390
14 Donghae	12	459	8713663
15 Anseong	7	281	320859771
16 Jinchon	7	268	224569819
17 Dangjin	9	317	95558204
18 Gongju	9	270	287187231
19 Cheonan	8	275	225922971
20 Cheongju	7	256	275182807
21 Sangju	7	270	253426405
22 Seochon	10	329	89823867
23 Nonsan	9	286	190005487
24 Daejeon	8	257	277418272
25 Jeonju	10	309	246410313
26 Gimcheon	7	271	260323155
27 Daegu	8	287	382790309
28 Pohang	9	374	79499768
29 Eonyang	9	339	261733611
30 Ulsan	10	394	118564514

31	Busan	10	378	168107081
32	Jangsu	9	289	172030142
33	Hamyang	9	306	209820620
34	Goryeong	9	320	228203216
35	Changwon	10	386	109587688
36	Jinju	10	353	117590105
37	Tongyeong	12	423	27822140
38	Namwon	10	326	191760244
39	Gwangju	12	346	203023908
40	Gochang	12	376	91328696
41	Hampyeong	12	395	79933651
42	Mokpo	13	453	41566216
43	Suncheon	12	375	152820465
44	Pocheon	10	382	96991636
45	Sokcho	12	482	6463780
46	Samcheok	13	527	2094039
47	Yangpyeong	10	336	111197044
48	Chungju	8	282	168912650
49	Jechon	9	302	105452372
50	Andong	8	290	146513596
51	Yeongdeok	9	358	34208107
52	Gunwi	7	286	234331274
53	Hwasan	8	316	223104254
54	Gwangju	9	318	224761555
55	Ganghwa	10	404	60671880
56	Guri	10	343	153829643
57	Yongin	8	317	238059058
58	Daesan	10	385	22471304
59	Yeongwol	10	370	24802943
60	Asan	9	310	122050513
61	Yesan	10	305	161599800
62	EastCheonan	8	286	235842537
63	Sejong	8	288	186535640
64	Buyeo	10	302	184155551
65	Gimje	12	341	100810461
66	Seongju	8	308	203145601
67	Changnyeong	9	341	182126860
68	Miryang	9	333	231775822
69	Gangjin	12	404	94469276
70	Yeosu	12	444	36226693

운송네트워크의 산포지수는 모든 정점으로부터 다른 정점들로의 거리의 합이고 운송네트워크의 지름은 최대 연결수이므로, 산포지수 S 와 지름 V 는 각각 다음과 같다.

$$S = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m s(i, j) = \sum_{i=1}^m s_i = 23,862, \quad V = \max_i v_i = 13$$

산포지수는 운송네트워크의 각 정점에서의 모든 비교거리의 합이므로 산포지수가 작을수록 고속도로 교통망에서 원격지로 여겨지는 도시가 적다는 것이다. 그리고 운송네트워크의 지름이 크다는 것은 그래프의 모양이 넓게 퍼져 있거나 이동하여 지나가는 도시가 많다는 것을 의미한다.

Table 2에서 알 수 있듯이 2025년 고속도로 교통망에서 연결수가 가장 적은 도시는 정점 15인 안성(Anseong), 정점 16인 진천(Jincheon), 정점 20인 청주(Cheongju), 정점 21인 상주(Sangju), 정점 26인 김천(Gimcheon)과 정점 52인 군위(Gunwi)로 연결수는 7이다. 청주(Cheongju)

의 비교거리는 256로 70개의 도시 중에서 가장 적고 대전(Daejeon)의 비교거리는 청주(Cheongju) 다음인 257이며, 진천(Jincheon)의 비교거리는 268로 좋은 편에 속하지만 청주(Cheongju)에 미치지 못한다. 접근지표는 대구(Daegu)가 382,790,309로 가장 좋고, 안성(Anseong)의 접근지표는 대구(Daegu) 다음인 320,859,771임을 알 수 있다. 따라서 2025년 운송네트워크에서 중심도시는 청주(Cheongju)임을 알 수 있다.

연결수가 8인 도시로는 수원(Suwon), 화성(Hwaseong), 평택(Pyeongtaek), 이천(Icheon), 천안(Cheonan), 대전, 대구(Daegu), 충주(Chungju), 안동(Andong), 화산(Hwasan), 용인(Yongin), 동천안(EastCheonan), 세종(Sejong), 성주(Seongju)이다. 청주(Cheongju), 대전(Daejeon), 진천(Jincheon) 이외에 비교거리가 300 이하인 도시로는 이천(Icheon), 안성(Anseong), 공주(Gongju), 천안(Cheonan), 상주(Sangju), 김천(Gimcheon), 대구(Daegu), 장수(Jangsu), 충주(Chungju), 안동(Andong), 군위(Gunwi), 동천안(EastCheonan), 세종(Sejong)이다. 또 대구(Daegu)와 안성(Anseong)을 제외한 접근지표가 300,000,000 미만이고 250,000,000 이상인 도시는 서울(Seoul), 수원(Suwon), 공주(Gongju), 청주(Cheongju), 상주(Sangju), 대전(Daejeon), 김천(Gimcheon), 언양(Eonyang)이다. 따라서 청주(Cheongju)를 제외한 연결수와 비교거리가 좋은 도시는 진천(Jincheon), 상주(Sangju), 김천(Gimcheon)이다. 비교거리와 접근지표가 좋은 도시는 공주(Gongju)와 대전(Daejeon)이고 연결수와 접근지표가 좋은 도시는 안성(Anseong), 대구(Daegu), 청주(Cheongju)이다. 이 결과로부터 청주(Cheongju)는 모든 경우에 포함되므로 중심도시가 될 가능성이 가장 높은 도시임을 알 수 있다.

한편 연결수가 13으로 가장 큰 도시는 목포(Mokpo)와 삼척(Samcheok)이며, 그 다음으로 춘천(Chuncheon), 양양(Yangyang), 강릉(Gangneung), 동해(Donghae), 통영(Tongyeong), 광주(Gwangju), 고창(Gochang), 함평(Hampyeong), 순천(Suncheon), 속초(Sokcho), 김제(Gimje), 강진(Gangjin), 여수(Yeosu)이다. 이들 도시의 비교거리는 각각 춘천(Chuncheon)이 421, 양양(Yangyang)이 413, 강릉(Gangneung)이 390, 동해(Donghae)가 459, 통영(Tongyeong)이 423, 광주(Gwangju)가 346, 고창(Gochang)이 376, 함평(Hampyeong)이 395, 목포(Mokpo)가 453, 순천(Suncheon)이 375, 속초(Sokcho)가 482, 삼척(Samcheok)이 527, 김제(Gimje)가 341, 강진(Gangjin)이

404, 여수(Yeosu)가 444이다. 이들 도시 중에서 접근지표가 10,000,000 미만인 도시로는 동해(Donghae)가 8,713,663, 속초(Sokcho)가 6,463,780, 삼척(Samcheok)이 2,094,039이다. 삼척(Samcheok)이 연결수, 비교거리와 접근지표가 가장 좋지 않은 도시이다. 따라서 삼척(Samcheok)이 2025년 고속도로 교통망에서 교통이 가장 좋지 않은 곳을 알 수 있다. 그 다음으로 동해(Donghae)와 속초(Sokcho)가 접근성 지표가 좋지 않은 도시로 모두 강원도에 포함된 도시이다.

이로부터 2025년 우리나라 고속도로 교통망은 청주(Cheongju)를 포함한 충청도 중심으로 건설되며, 상대적으로 전라도와 강원도는 교통의 접근성이 좋지 않음을 알 수 있다. 특히 강원도에 위치한 대부분의 도시들은 접근성이 좋지 않음을 확인할 수 있다.

IV. Conclusions

본 연구는 2025년에 통행 가능하고 건설 예정인 고속도로의 교통망을 그래프인 운송네트워크로 변환하여 그래프 이론을 이용하여 고속도로 교통망의 연결성을 분석하고 예측할 수 있는 알고리즘을 구현하여 전국 고속도로의 효율적 연결에 관한 이론적 배경을 주기 위함이다.

본 논문에서 다루는 운송네트워크는 고속도로 교통망의 복잡성을 단순화하여 복잡한 교통망을 정점과 이음선으로 구성된 기하학적 모형으로 추상화함으로써 정점과 이음선의 수만을 고려하여 운송네트워크의 구조적 특성이나 각 도시들의 접근성을 쉽게 파악할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 전체 운송네트워크에서 새로운 고속도로 구간을 추가하여 개통하였을 경우 어떤 도시의 접근성이 가장 크게 변화하는지, 어떤 고속도로 구간을 추가하여 개통하면 도시 사이의 연결도를 극대화할 수 있는지 등에 대한 분석과 예측이 가능하며, 각 도시들의 상대적인 접근성 수준을 쉽게 파악할 수 있게 된다. 따라서 그래프 이론을 이용한 고속도로 분석은 수학적으로 엄밀한 이론을 토대로 구한 정확한 접근성 지표를 제시하기 때문에 운송네트워크의 구조적 특징을 설명하는데 가장 객관적인 지표를 제공한다.

본 논문에서 2025년 고속도로 교통망의 연결성을 분석하고 예측하기 위하여 주어진 운송네트워크로부터 접근성 지표를 쉽게 계산할 수 있는 알고리즘을 구현하고, 이를 통하여 고속도로의 운송네트워크에서 2025년도의 교통의 중심이 되는 도시를 찾을 수 있다. 제안된 접근성 지표 알고리즘의 분석 결과로부터, 미래에 새롭게 건설되거나 계

획 중인 고속도로는 국토의 균형발전을 위하여 강원도에 위치한 도시들의 접근지표를 높이고, 전라도는 연결수와 비교거리를 줄일 수 있는 방향으로 건설되거나 계획되는 것이 바람직하다. 본 연구의 결과를 이용하면 향후 고속도로 교통망을 보다 효율적으로 분석하는데 활용할 수 있고, 교통을 포함한 여러 지역계획과정에서 체계적이고 합리적인 대안을 선정하기 위한 기준을 제공할 수 있을 것이다. 운송네트워크에 나타나는 정점에는 도시의 기능이나 규모 등은 전혀 고려되지 않으며 도로구간의 경우도 차선수와 구간속도 등이 전혀 고려되지 못한다는 한계가 있으므로, 추후연구로 고속도로의 여건이나, 통행량과 통행시간 등과 같은 구체적인 내용도 함께 고려하여 보다 개선된 알고리즘을 구현하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Seoul Theological University Research Fund of 2023 and the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (NRF-2021R1A2C1093105, NRF-2021R1F1A1061873)

REFERENCES

- [1] K.H. Won, "Study on the Impact of New Highway Construction on Regional Accessibility," Korean Urban Management Association, Vol. 16, No.1, pp.49-81, April, 2003. DOI : 10.15793/kspr.2020.107..002
- [2] W.L. Garrison, "Connectivity of the Interstate Highway System," Paper and Proceedings of Regional Science Association, Vol.6, pp.121-138, January, 1960. DOI : 10.1111/j.1435-5597.1960.tb01707.x
- [3] D.K. Fleming, Y. Hayuth, "Spatial characteristics of transportation hubs : centrality and intermediacy," Journal of Transport Geography, Vol.2, No.1, pp.3-18, March, 1994. DOI : 10.1016/0966-6923(94)90030-2
- [4] K. Lee, "A Generalized Measurement of Regional Accessibility", Application Geography, Vol, 18, pp. 25-55, 1995.
- [5] K. Lee, H.Y. Lee, "A New Algorithm for Graph-theoretic Nodal Accessibility Measurement", Geographical Analysis, Vol. 30, No, 1, pp, 1-14, 1995. DOI : 10.1111/j.1538-4632.1998.tb00385.x
- [6] G. Lee, K. Park, "Analysis on the Korean Highway in 2011 and 2017 Using Algorithms of Accessibility indices", Journal of the

- Korea society for simulation, Vol. 27, No. 4, pp. 9-18, 2018. DOI : 10.9709/JKSS.2018.27.4.009
- [7] J.Y. Kim, J.H. Han, "Straw effects of new highway construction on local population and employment growth", Habitat International, Vol.53, pp.123-132, 2016. DOI : 10.1016/j.habitatint.2015.11.009
- [8] K.S. Kim, "Concepts and Measures of Accessibility", Journal of Korea Transportation Research Society, Vol. 5, pp. 33-46, 1987.
- [9] J. Park, C. Kim, S. Lee, "The Effects of Transportation Accessibility on Influx of Population and Gross Regional Domestic Product," The Korea Spatial Planning Review, Vol. 107, pp.25-40, December, 2020.
- [10] H. Kang, S. Go, S. Lee, "An Analysis of the Effects of Metropolitan Railway and Highway Infrastructure Accessibility on the Occurrence of Building Construction : The Case of Gangnam Station Area and Hinterlands", Journal of Korea Planning Association, Vol.57, pp.55-68, 2022. DOI : 10.17208/jkpa.2022.12.57.7.55

Authors



Gwangyeon Lee received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Department of Mathematics from Sungkyunkwan University, Korea, in 1987, 1989 and 1993, respectively. Dr. Lee worked as a Visiting Post Doctoral Research

Fellow at University of Wyoming, USA in 1996. He is currently a Professor in the Department of Mathematics, Hanseo University. He is interested in Network, Graph theory and Matrix theory.



Kisoeb Park received the M.S. and Ph.D. degrees in Department of Mathematics from Sungkyunkwan University, Korea, in 2001 and 2007, respectively. Dr. Park worked as a Visiting Post Doctoral Research Fellow at

King's College London, UK in 2008. He is currently a Professor in the Department of IT Convergence Software, Seoul Theological University. He is interested in Big Data, Data Analysis and Computer Simulation, Network, Graph theory and Applied Mathematics.