

그래프 이론을 이용한 고속도로 분석 알고리즘에 관한 연구

오하일[○], 손수호^{*}, 장수경^{*}, 박기섭^{*}, 김문성^{*}, 이광연^{**}

[○]서울신학대학교 IT융합소프트웨어학과,

^{*}서울신학대학교 IT융합소프트웨어학과,

^{**}한서대학교 수학과

e-mail: simon0615@stu.ac.kr[○], {chansarobin, skjang514, kisoeb, moonseong}@stu.ac.kr^{*},
gylee@hanseo.ac.kr^{**}

A Study on the Algorithms of Highways Analysis Using Graph Theory

Hail Oh[○], Suho Son^{*}, Sookyeong Jang^{*}, Kisoeb Park^{*}, moonseong Kim^{*}, Gwangyeon Lee^{**}

[○]Dept. of IT Convergence Software, Seoul Theological University,

^{*}Dept. of IT Convergence Software, Seoul Theological University,

^{**}Dept. of Mathematics, Hanseo University

● 요약 ●

본 논문에서는 고속도로의 교통망의 연결성을 분석하고 예측하기 위하여 그래프 이론을 이용하여 접근성 지표의 알고리즘을 제안한다. 먼저 2025년 고속도로 교통망을 그래프로 나타낸 운송네트워크를 구한다. 그리고 그래프 이론의 연결수, 비교거리, 접근지표, 연결도, 산포지수, 지름 등의 개념을 이용하여 2025년 고속도로 교통망의 연결성을 분석하고 예측하기 위하여 주어진 운송네트워크로부터 다양한 접근성 지표를 쉽게 얻을 수 있는 알고리즘을 제시한다. 이를 통하여 고속도로의 운송네트워크에서 교통의 중심이 되는 도시를 찾을 수 있다.

키워드: 운송네트워크(transportation network), 접근지표(accessibility), 알고리즘(algorithms)

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 인구와 산업이 집적된 도시와 도시를 연결시켜 상호교환 효율성을 극대화시키는 중요한 교통수단임에 틀림없다. 고속도로의 건설로 인하여 우리나라 전체의 산업이 괄목상대할 만큼 발전했음에 이론의 여지가 없을 것이다.

고속도로를 연구하는 많은 학자들은 흔히 교통의 연결성(connectivity)과 관련한 일반적인 지표로 접근성을 지목하며, 고속도로가 통과하는 도시의 접근성에 대하여 많은 연구가 진행되었다[1, 2, 3, 4]. 접근성(accessibility)은 교통시설의 설치나 교통수단의 공급을 결정하는 기준이 되며, 또한 이들 시설이나 수단의 적정성 여부를 판단하는 지표가 된다[5]. 일반적으로 접근성은 지표상의 한 지점이 주변의 다른 지점들로부터 도달하기 쉬운 정도를 나타내는 개념이며, 한 장소가 주변 지역에 대해 지니는 입지의 상대적 우위성을 나타내는 지표로도 사용된다[6].

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 선정하여 각각의 고속도로 교통망을 그래프로 나타낸 운송네트워크를 구한다. 운송네트워크의 연결행렬을 구하고 연결행렬로부터 2025년에 해당하는 운송행렬을 구한다. 운송행렬로부터 얻어지는 각종 자료를 분석하여 2025년 우리나라 고속도로를 통과하는 70개의 도시 각각의 접근지표, 연결수, 비교거리, 그래프의 지름, 산포지수 등을 구할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 이를 통하여 고속도로의 운송네트워크에서 해당 연도의 교통의 중심이 되는 도시를 찾을 수 있고, 상대적으로 교통이 낙후된 도시를 찾아, 향후 전국의 교통의 연결성을 높이는 기초자료로 사용할 수 있도록 한다.

II. Preliminaries

1. 수학적 정의

본 연구는 그래프와 행렬 이론을 활용하여 우리나라의 고속도로 네트워크의 접근성을 비롯한 전체적인 연결성을 분석하는 것이다. 이를 위하여 연구에 필요한 수학적 정의를 간단히 알아보자. 유한개의 정점들의 집합을 V , 변들의 집합을 E 라 할 때, 그래프 $G = (V, E)$ 로 표현한다. 그래프 G 는 행렬로 표현할 수 있다. 그래프 $G = (V, E)$ 의 연결행렬(connected matrix) $A = [a_{ij}]_{m \times m}$ 는 다음과 같이 정의된다.

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

네트워크(network)에서 노드(nodes)와 아크(arcs)는 주어진 그래프에 있어서 각각 정점과 변이다. 고속도로 교통망에서 각 도시에 번호를 부여하여 정점으로 하고 각각의 도시를 통과하는 고속도로를 변으로 하면 고속도로 교통망을 그래프로 나타낼 수 있다. 이를 고속도로의 운송네트워크(transportation network)라 하며, 운송네트워크의 연결행렬 A 를 구할 수 있다. 이때 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. 운송네트워크의 연결행렬 A 를 이용하여 운송행렬(transportation matrix) $T = [t_{ij}]$ 를 $T = \sum_i A^i$ 와 같이 정의하는데, s 는 운송행렬 T 의 모든 성분이 0이 아닐 때까지의 A 의 최소 거듭제곱(lowest power)이다. 운송네트워크에서 x_i 는 접근지표(accessibility), $s(i, j)$ 는 정점 i 에서 정점 j 로의 거리(distance), v_i 는 정점 i 의 연결수(associated number), s_i 는 정점 i 의 비교거리(relative distance), S 는 산포지수(index of dispersion), V 는 지름(diameter)이다. 접근지표, 연결수, 비교거리, 산포지수를 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, 가장 작은 연결수 v_i 를 갖는 도시를 중심도시(central city)라 한다. 특히 운송네트워크에서 교통의 중심도시는 최대의 접근지표와 최소의 연결수와 비교거리를 갖는 도시라고 할 수 있다. 그러나 운송네트워크에서 중심도시는 단순히 연결성에 중점을 두고 있으므로 일반적인 도로의 교통망에서 생각하는 ‘교통의 중심지’라는 의미와는 약간 차이가 있다.

2. 운송네트워크

일반적으로 접근성은 운송네트워크의 구조를 분석하는 중요한 지표이고, 정점과 변으로 이루어진 운송네트워크로부터 한 도시에서 다른 도시까지 얼마만큼 연결성이 좋은지의 여부를 접근성으로 판단할 수 있다.

Table 1. Vertices and Cities in 2025

정점	도시	정점	도시	정점	도시	정점	도시
1	인천	19	천안	37	통영	55	강화
2	서울	20	청주	38	남원	56	구리
3	홍천	21	상주	39	광주	57	용인
4	춘천	22	서천	40	고창	58	대산
5	양양	23	논산	41	함평	59	영월
6	강릉	24	대전	42	목포	60	아산
7	안산	24	전주	43	순천	61	예산
8	수원	26	김천	44	포천	62	동천안
9	화성	27	대구	45	속초	63	세종
10	평택	28	포항	46	삼척	64	부여
11	이천	29	언양	47	양평	65	김제
12	여주	30	울산	48	충주	66	성주
13	원주	31	부상	49	제천	67	창녕
14	동해	32	장수	50	안동	68	밀양
15	안성	33	함양	51	영덕	69	강진
16	진천	34	고령	52	군위	70	여수
17	당진	35	마산	53	화산		
18	공주	36	진주	54	광주 ¹⁾		

Table 1은 우리나라의 2025년 고속도로 운송네트워크는 70개의 도시를 선정하여 운송네트워크의 정점으로 정한 것이고, Fig. 1은 Table 1을 이용하여 2025년 우리나라 고속도로 교통망을 운송네트워크로 나타낸 것이다. 운송네트워크에서 정점으로 선정한 도시들은 2025년에 통행 가능하고 건설 예정인 고속도로 상에서 고속도로의 종점이 경우와 두 개 이상의 고속도로가 교차하는 경우이다. 정점이 되는 도시를 선정할 때, 고속도로가 통과하는 주변의 크고 작은 도시 중에서 가능하면 큰 도시를 선정했다. 또, 정점 2인 서울의 경우에 서울외곽순환고속도로와 같이 서울의 교통을 위하여 건설된 고속도로는 제외하였으며, 서울과 연결된 고속도로 상의 도시 중에서 서울과 매우 가까운 경우에는 수도권으로 간주하여 정점을 서울 하나로 정하였다. 서울외곽순환, 판교와 구리 사이, 구리와 퇴계원 사이 고속도로 등은 서울을 중심으로 건설되었으므로 교통망에서는 서울로 간주하였다. 또 안산과 시흥을 잇는 고속도로는 안산과 서울을 잇는 고속도로로, 안산과 신갈을 잇는 고속도로는 안산과 수원을 잇는 것으로 간주했다. 정점 39인 광주의 경우에도, 광주에 가까운 작은 도시들이 있고 광주를 둘러싸고 지나가는 여러 고속도로와 도시가 있지만 모두 광주의 권역으로 간주하여 정점을 광주 하나로 정하였다. 이외에도 운송네트워크 전체로 보면 지역적인 영향만 있는 경우는 행렬의 크기를 고려하여 주변의 큰 도시 하나로 정하였다.

1) 정점 39는 광주광역시이고, 정점 54는 경기도 광주이다.

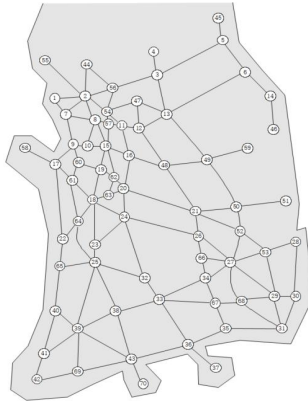


Fig. 1. Transportation networks in 2025

고속도로에서 차선이 많고 적음에 따라 통행 여건이 다를 것이다. 그러나 본 논문에서는 도로개선이나 여건, 통행량, 통행시간 등은 고려하지 않았으며, 각 도시 사이에 연결되어 통행이 가능한 고속도로만을 단순화하여 운송네트워크를 구성하였다.

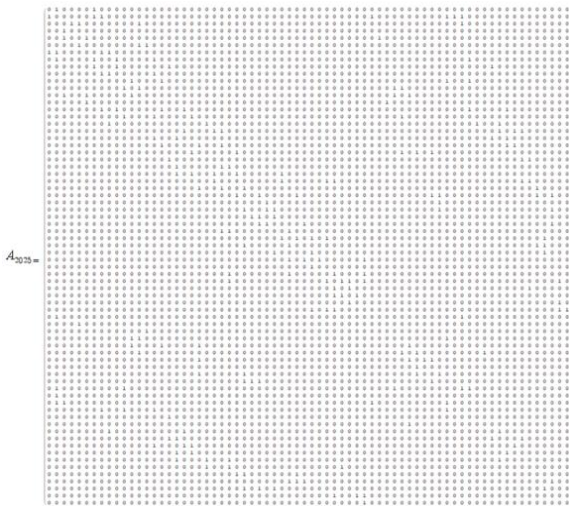


Fig. 2. Connected matrices in 2025

2025년 운송네트워크로부터 얻은 연결행렬 A_{2025} 는 Fig. 2와 같다. 또 A_{2025} 을 이용하여 운송행렬 T_{2025} 을 구하면 다음과 같다.

$$T_{2025} = \sum_{j=1}^{13} A_{2025}^j \quad (2)$$

본 연구에서 다루는 운송네트워크를 이용하여 고속도로를 분석하는 것은 복잡한 교통망을 점과 선으로 구성된 가하학적 모형으로 단순화함으로써 점과 선의 수만을 고려하여 운송네트워크의 구조적 특성이나 각 정점들의 접근성을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 또 전체 운송네트워크에서 새로운 도로구간을 추가하였을 경우 어떤 정점의 접근성이 가장 크게 변화하는지, 어떤 도로구간을 추가하면 정점 사이의 연결도를 최대화할 수 있는지 등에 대한 분석이 가능하며, 각 정점들의

상대적인 접근성 수준을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 그래프론적인 분석과 해석은 수학적으로 엄밀한 이론을 바탕으로 계산된 정확한 지표를 제시하기 때문에 운송네트워크의 상황을 설명하는데 가장 객관적인 자료를 제공한다.

3. 접근지표의 알고리즘

우리나라 고속도로의 운송네트워크를 구성하면 2025년의 경우 70개의 도시가 정점이다. 각 정점과 정점을 연결하는 변의 수는 125개이며, 연결행렬 A_{2025} 과 운송행렬 T_{2025} 은 크기가 70×70 이다. 이때 운송행렬 T_{2025} 은 연결행렬 A_{2025} 의 13승까지 구하여 더해야 한다. 이를 바탕으로 접근지표, 연결수, 비교거리, 산포지수, 지름 등을 보다 효율적이고 정확하게 계산하기 위한 접근성 지표의 알고리즘이 필요하다.

먼저 운송네트워크로부터 운송행렬과 접근지표를 얻는 알고리즘은 다음과 같다.

① 운송행렬과 접근지표를 구하는 알고리즘

[1] Table 1과 같이 해당연도의 각 도시에 번호를 부여하여 정점으로 정하고 각각의 도시를 통과하는 고속도로를 변으로 하는 고속도로 교통망을 그래프로 나타낸 운송네트워크를 구한다.

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

[3] 연결행렬 A 를 이용하여 운송행렬

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

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

② 비교거리와 연결수를 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

$$D_1, \dots, \text{행렬 } A_{s-1} = \sum_{i=1}^s A^i \text{에서 영이 아닌 성분을 } s \text{로 바꾼}$$

행렬을 D_{s-1} 로 놓는다. 여기서 s 는 행렬 A_{s-1} 의 모든 성분이 0이 아닐 때까지의 최소거듭제곱이다.

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

구한다.

[3] $t = \sum_{i=1}^s i$ 에 대하여, 행렬 \hat{B} 에서 각 성분

$$t-1, t-1-2, t-3-3, \dots, t-(t-s)-s$$

대입하여 얻은 새로운 행렬을 $matD$ 로 놓는다.

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

[5] 거리행렬 $D = [d_{ij}]$ 로부터 비교거리 d_i , 연결수 v_i , 산포지수 S , 지름 V 을 차례로 구한다.

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

III. Conclusions

본 연구는 본 연구는 2025년에 통행 가능하고 건설 예정인 우리나라 고속도로의 교통망을 그래프인 운송네트워크로 변환하여 그래프 이론을 이용하여 우리나라 고속도로망의 연결성을 분석하고 예측할 수 있는 알고리즘을 구현하여 고속도로의 효율적 연결에 관한 이론적 배경을 주기 위함이다. 본 연구에서 다루는 운송네트워크를 이용하여 고속도로를 분석하는 것은 복잡한 교통망을 점과 선으로 구성된 가하학적 모형으로 단순화함으로써 점과 선의 수만을 고려하여 운송네트워크의 구조적 특성이나 각 정점들의 접근성을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 또 전체 운송네트워크에서 새로운 도로구간을 추가하였을 경우 어떤 정점의 접근성이 가장 크게 변화하는지, 어떤 도로구간을 추가하면 정점 사이의 연결도를 최대화할 수 있는지 등에 대한 분석이 가능하며, 각 정점들의 상대적인 접근성 수준을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 그래프론적인 분석과 해석은 수학적으로 엄밀한 이론을 바탕으로 계산된 정확한 지표로 제시하기 때문에 운송네트워크의 상황을 설명하는데 가장 객관적인 자료를 제공한다. 2025년 고속도로 교통망의 연결성을 분석하고 예측하기 위하여 주어진 운송네트워크로부터 다양한 접근성 지표를 쉽게 얻을 수 있는 알고리즘을 제시하여, 이를 통하여 고속도로의 운송네트워크에서 교통의 중심이 되는 도시를 찾을 수 있다. 제시된 접근지표 알고리즘의 결과로부터 미래에 건설되거나 계획 중인 고속도로는 국토의 균형발전을 위하여 강원도에 위치한 도시들의 접근성을 높이고, 전라도의 연결수와 비교거리를 줄일 수 있는 방향으로 설계되는 것이 바람직하다. 향후 전국의 교통의 연결성을 높이는 기초자료로 사용할 수 있도록 한다.

Vol. 30, No. 1, pp. 1-14, 1995.

- [4] 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.
- [5] K.S. Kim, "Concepts and Measures of Accessibility", Journal of Korea Transportation Research Society, Vol. 5, No. 1, pp. 33-46, 1987.
- [6] 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 2003.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2022년도 대학혁신사업의 지원과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(NRF-2021R1F1A1061873, NRF-22021R1A2C1093105)

REFERENCES

- [1] Y.-H. Jeon, J.-H. Rho, J.-S. Jang, "Development of Estimation Model of Trip Generation Model and Trip Distribution Model Reflecting Coefficient of Accessibility", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, No. 6, pp. 576-584, 2017.
- [2] K. Lee, "A Generalized Measurement of Regional Accessibility", Application Geography, Vol, 18, pp. 25-55, 1995.
- [3] K. Lee, H.Y. Lee, "A New Algorithm for Graph-theoretic Nodal Accessibility Measurement", Geographical Analysis,