

접근성 지표의 알고리즘을 이용한 2011년과 2017년의 우리나라 고속도로 분석

이광연 · 박기섭[†]

Analysis on the Korean Highway in 2011 and 2017 Using Algorithms of Accessibility indices

Gwangyeon Lee · Kisoeb Park[†]

ABSTRACT

This paper proposes new algorithms of accessibility indices to analyze the connectivity of the Korean highway network. First of all, we find a transportation network that presents Korea's highway network in graphs in 2011 and 2017. And we analyze and compare the nation's highway network in 2011 and 2017 using concepts such as associated number, the relative distance, the accessibility, the degree of connectivity, the index of dispersion, the diameter of graph theory. To do this, an algorithm is presented which can easily obtain various accessibility indices from a given transportation network.

Using the simulation results of this study, we can find city that is the center of traffic in the highway transportation network. In addition, cities that are included in the network but are relatively underdeveloped can be found and used as basic data for enhancing the connectivity of the nationwide traffic in the future. Moreover, the proposed algorithms of accessibility indices, which are modeled on highway transport networks, can help identify the accessibility space structure of each city and provide criteria for efficient and reasonable selection of alternatives in various regional planning processes, including transportation.

Key words : transportation network, connected matrix, transportation matrix, accessibility indices, algorithms

요 약

본 논문에서는 우리나라 고속도로의 교통망의 연결성을 분석하기 위하여 새로운 접근성 지표의 알고리즘을 제안한다. 먼저 2011년과 2017년 우리나라의 고속도로 교통망을 그래프로 나타낸 운송네트워크를 구한다. 그리고 그래프 이론의 연결수, 비교거리, 접근지표, 연결도, 산포지수, 지름 등의 개념을 이용하여 2011년과 2017년 우리나라의 고속도로 교통망을 분석하고 비교한다. 이를 위하여 주어진 운송네트워크로부터 다양한 접근성 지표를 쉽게 얻을 수 있는 알고리즘을 제시한다.

본 연구의 시물레이션 결과를 이용하여 고속도로의 운송네트워크에서 교통의 중심이 되는 도시를 찾을 수 있다. 또 네트워크에는 편입되어 있지만 상대적으로 교통이 낙후된 도시를 찾아, 향후 전국의 교통의 연결성을 높이는 기초자료로 사용할 수 있도록 한다. 더욱이 고속도로 교통망을 모델로 하는 접근성 지표의 알고리즘을 제안하면 각 도시들의 접근성 공간구조를 파악할 수 있고, 교통을 포함한 각종 지역계획과정에서 효율적이고 합리적인 대안선정을 위한 기준을 제공할 수 있을 것이다.

주요어 : 운송네트워크, 연결행렬, 운송행렬, 접근성 지표, 알고리즘

* 이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2017R1E1A1A03070225)

Received: 2 July 2018, Revised: 4 September 2018,

Accepted: 13 September 2018

[†] Corresponding Author: Kisoeb Park

E-mail: kisoeb@gmail.com

Dept. of Mathematics, Incheon National University, Korea

1. 서론

교통 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(Davidson, 1977; Lee and Lee, 1998). 고속도로를 연구하는 많은

학자들은 흔히 교통의 연결성(connectivity)과 관련한 일반적인 지표로 접근성을 지목하며, 고속도로가 통과하는 도시의 접근성에 대하여 많은 연구가 진행되었다(Kwon and Cho, 2017; Won, 2003; Lee and Lee, 1997). 접근성은 교통시설의 설치나 교통수단의 공급을 결정하는 기준이 되며, 또한 이들 시설이나 수단의 적정성 여부를 판단하는 지표가 된다(Kim, 1987). 지금까지 개발된 접근성 지표들은 크게 교통망상의 거리의 근접성, 상호작용에 대한 잠재력, 지역의 상대적 경제이익의 세 유형으로 분류할 수 있다(Lee, 1995). 특히 Garrison(1960)은 그래프 이론을 이용하여 고속도로 교통망의 접근도를 산출하는 연구를 하였다. 이 연구를 시작으로 교통 네트워크에 그래프 이론을 접목하는 연구가 활발히 진행되었으며, 모형의 수정·보완을 거치며 발전되어 왔다. 이와 같은 접근성 측정 방법에 대하여 Fleming과 Hayuth(1994)는 접근성을 단순히 지표공간 상에서의 공간적 분리를 극복하기 위한 이동의 용이함 정도로 정의하면 전체지역에 대한 지역의 지리적 위치관계와 함께 그 지역이 교통 네트워크에 의한 다른 지역들과의 연계성에 의해 측정될 수 있다고 했다. 외국의 경우 교통 네트워크를 그래프를 활용하여 분석한 연구가 많은 반면, 우리나라의 경우에, 고속도로 네트워크를 그래프로 나타내고 그래프의 연결행렬을 이용하여 접근성 지표의 알고리즘을 구현하여 비교 분석한 연구는 없다.

본 연구에서는 2011년과 2017년에 통행 가능한 우리나라 고속도로의 교통망(한국도로공사제공)에 대하여 이와 같은 접근성 지표를 접근성 지표의 알고리즘을 이용하여 도출한 후, 2011년과 2017년의 고속도로 교통망의 접근성 지표를 비교분석한다. 2011년에 비하여 2017년에 통행 가능한 고속도로가 어떤 지역을 중심으로 건설되었으며, 각각의 도시를 연결하는 상태는 어떻게 변했으며, 한 도시에서 다른 도시로 이동할 수 있는 수단은 또 어떤 변화를 가져왔는지 등을 분석하면 인적·물적 자원을 여러 지역과 교류하기 편리할 것이다. 이로 인하여 각종 생산품의 물동량 및 인적자원의 이동 불편으로 인한 중복투자를 막아 균형 있는 국토 발전을 견인할 수 있기 때문에 고속도로를 분석하는 것은 필요하며 매우 중요하다. 아울러 2011년과 2017년의 고속도로 교통망의 분석으로부터 도출되는 각종 자료와 정보를 활용하면 미래에 건설되거나 확충될 새로운 교통의 연결성에 있어서 경쟁력 있는 지역을 구체적으로 찾을 수 있기 때문에 국토를 균형적으로 발전시키는 기초자료로 활용할 수 있다.

본 연구에서는 우리나라의 2011년에 통행 가능한 고

속도로가 지나는 도시 43개와 2017년에 통행 가능한 고속도로가 지나는 도시 54개를 선정하여 각각의 고속도로 교통망을 그래프로 나타낸 운송네트워크를 구한다. 운송네트워크의 연결행렬을 구하고 연결행렬로부터 2011년과 2017년에 해당하는 운송행렬을 구한다. 두 운송행렬로부터 얻어지는 각종 자료를 분석하여 2011년과 2017년 우리나라 고속도로를 통과하는 43개 도시와 54개의 도시 각각의 접근지표, 연결수, 비교거리, 그래프의 지름, 산포지수 등을 비교한다. 이때 여러 가지 접근성 지표를 구할 수 있는 알고리즘을 제시하고, 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 이를 통하여 두 고속도로의 운송네트워크에서 해당 연도의 교통의 중심이 되는 도시를 찾아 2011년과 2017년에 중심도시가 어떻게 변화되었는지 분석한다.

2. 본론

2.1 수학적 정의

그래프 $G=(V, E)$ 의 연결행렬(connected matrix) $A=[a_{ij}]_{m \times m}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{변 } e_{ij} = (i, j) \text{이 존재할 때} \\ 0, & \text{변 } e_{ij} = (i, j) \text{이 존재하지 않을 때} \end{cases}$$

네트워크(network)는 그래프의 양적인 속성을 순수한 구조적 관계로 갖는 그래프이고, 네트워크에서 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 을 구할 수 있다. 운송네트워크의 연결행렬 A 를 이용하여 운송행렬(transportation

matrix) $T=[t_{ij}]$ 를 $T=\sum_{i=1}^s A^i$ 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), $d(i, j)$ 는 정점 i 에서 정점 j 로의 거리(distance), v_i 는 정점 i 의 연결수(associated number), d_i 는 정점 i 의 비교거리(relative distance), D 는 산포지수(index of dispersion), V 는 지름(diameter)이다. 접근지표, 연결수, 비교거리, 산포지수를 식으로 나타내면 각각

다음과 같다.

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

$$D = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d(i, j) = \sum_{i=1}^m d_i, \quad V = \max_i v_i$$

한편, m 개의 정점과 n 개의 변을 갖는 단순그래프의 연결도(degree of connectivity) 는 $K = \frac{m(m-1)/2}{n}$ 로 정의한다. 또 가장 작은 연결수 v_i 를 갖는 도시를 중심 도시(central city)라 한다. 특히 운송네트워크에서 교통의 중심도시는 최대의 접근지표와 최소의 연결수와 비교 거리를 갖는 도시라고 할 수 있다.

2.2 우리나라의 2011년과 2017년 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 2011 and 2017¹⁾

정점	도시	정점	도시	정점	도시	정점	도시
1	인천	15	안성	29	언양	43	순천
2	서울	16	진천	30	울산	44	포천
3	홍천	17	당진	31	부산	45	속초
4	춘천	18	공주	32	장수	46	삼척
5	양양	19	천안	33	함양	47	양평
6	강릉	20	청주	34	고령	48	충주
7	안산	21	상주	35	마산	49	제천
8	수원	22	서천	36	진주	50	안동
9	화성	23	논산	37	통영	51	영덕
10	평택	24	대전	38	남원	52	군위
11	이천	25	전주	39	광주	53	화산
12	여주	26	김천	40	고창	54	광주 ²⁾
13	원주	27	대구	41	함평		
14	동해	28	포항	42	목포		

Table 1은 우리나라의 2011년과 2017년 고속도로 운송네트워크에서 각각 43개의 도시와 54개의 도시를 선정

하여 운송네트워크의 정점으로 정한 것이고, Figure 1은 Table 1을 이용하여 2011년과 2017년 우리나라 고속도로 교통망을 운송네트워크로 나타낸 것이다. 2017년의 운송네트워크는 2011년 운송네트워크를 건설하기 위해 선정했던 도시들을 나타내는 정점 43개를 바탕으로 2017년에 개통되었거나 통행이 가능해진 도시 11개를 더 선정했다. 그 결과 2011년 운송네트워크는 정점이 43개이고 2017년 운송네트워크는 정점이 54개이다. Table 1에서 알 수 있듯이, 2017년 고속도로 운송네트워크는 2011년을 바탕으로 새로 11개 도시를 선정했다. 따라서 두 운송네트워크에서 1부터 43까지의 정점은 같은 도시를 나타내고, 정점 44부터 정점 54까지는 새롭게 선정된 도시로 2011년 운송네트워크에는 존재하지 않는다.

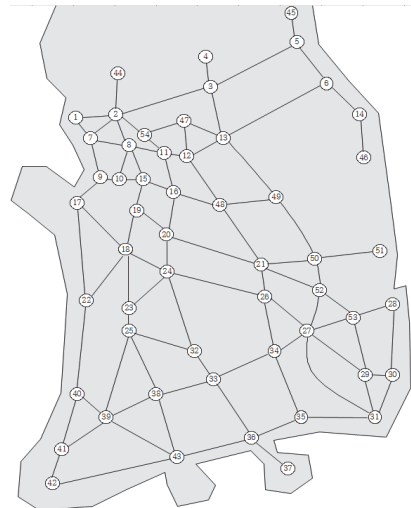


Fig. 1. Transportation networks in 2011 and 2017³⁾

운송네트워크에서 정점으로 선정한 도시들은 2011년과 2017년에 각각 통행 가능한 고속도로 상에서 고속도로의 종점인 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 서울외곽순환 고속도로와 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 구

1) 2011년 운송네트워크의 도시들은 옅은 회색으로 표시했고, 2017년 운송네트워크에 추가된 도시들은 색을 입히지 않았다.
2) 정점 39는 광주광역시이고, 정점 54는 경기도 광주이다.

3) 정점 1부터 정점 43까지는 2011년 운송네트워크의 도시이고, 정점 44부터는 2017년 운송네트워크에서 새롭게 선정된 도시들이다.

리 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 광주주의 경우에도, 광주에 가까운 작은 도시들이 있고 광주를 둘러서 지나가는 여러 고속도로와 도시가 있지만 모두 광주주의 권역으로 간주하여 정점을 광주 하나로 정하였다. 이외에도 운송네트워크 전체로 보면 지역적인 영향만 있는 경우는 행렬의 크기를 고려하여 주변의 큰 도시 하나로 정하였다. 그 이유는 이와 같은 지역적인 도로의 개통은 그 지역의 유통량의 증가에 부응하여 그 수요를 충족하는 역할을 담당하므로 국가전체 운송네트워크에 미치는 영향은 상대적으로 미약하며, 수도권지역, 대전권지역, 광주지역, 대구지역, 울산지역, 부산지역 등의 세분화된 운송네트워크 분석으로 처리될 수 있기 때문이다. 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.

2011년 운송네트워크와 2017년 운송네트워크로부터 얻은 연결행렬 A_{2011} 과 A_{2017} 는 Figure 2와 같다. 또 A_{2011} 과 A_{2017} 을 이용하여 각각의 운송행렬 T_{2011} 과 T_{2017} 을 구하면 다음과 같다.

$$T_{2011} = \sum_{i=1}^9 A_{2011}^i, \quad T_{2017} = \sum_{j=1}^{12} A_{2017}^j \quad 4).$$

본 연구에서 다루는 운송네트워크는 고속도로 교통망의 복잡성을 단순화시켜서 모든 도시를 정점으로 나타내고 도시와 도시를 잇는 고속도로는 변으로 나타낸 그래프이다. 운송네트워크를 이용하여 고속도로를 분석하는 것은 복잡한 교통망을 점과 선으로 구성된 기하학적 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.

반면에 운송네트워크에 나타나는 정점에는 도시의 기능이나 규모 등은 전혀 고려되지 않으며 도로구간의 경우도 차선수와 구간속도 등이 전혀 고려되지 못한다는 단점도 있다. 그러나 그래프론적인 분석과 해석은 수학적으로 엄밀한 이론을 바탕으로 계산된 정확한 지표를 제시하기 때문에 운송네트워크의 상황을 설명하는데 가장 객관적인 자료를 제공한다.

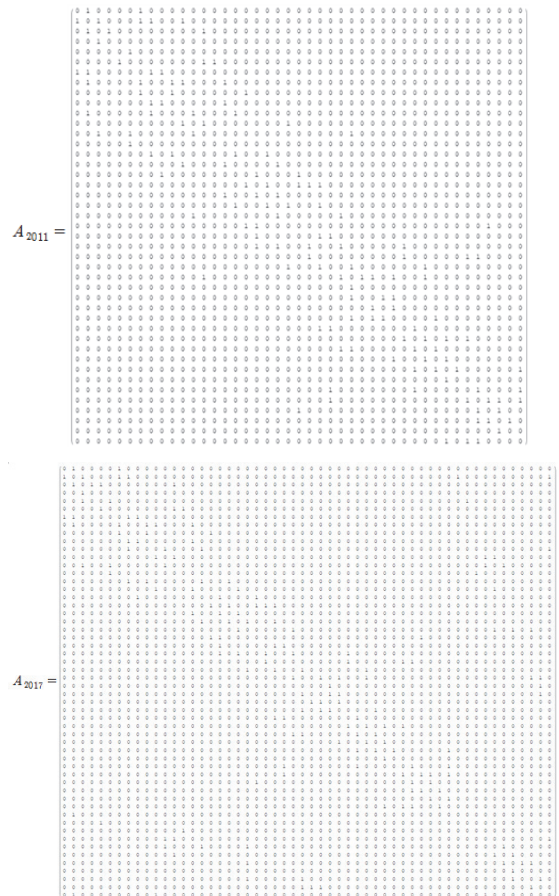


Fig. 2. Connected matrices in 2011 and 2017

2.3 접근성 지표의 알고리즘

우리나라 고속도로의 운송네트워크를 구성하면 2011년의 경우 43개, 2017년의 경우 54개의 도시가 정점이다. 각 정점과 정점을 연결하는 변의 수는 각각 70개와 92개이며, 연결행렬 A_{2011} , A_{2017} 과 운송행렬 T_{2011} , T_{2017} 은

4) 두 운송행렬 T_{2011} 과 T_{2017} 의 경우, 행렬의 크기뿐만 아니라 행렬의 각각의 성분이 매우 큰 수이기 때문에 지면의 제약으로 본 논문에 제시할 수 없다. 그러나 본 논문에서 제시한 연결행렬과 알고리즘을 이용하면 구할 수 있다.

각각 크기가 43×43 와 54×54 이다. 이때 운송행렬 T_{2011} 은 연결행렬 A_{2011} 의 9승까지, 운송행렬 T_{2017} 은 연결행렬 A_{2017} 의 12승까지 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 운송행렬 T 와 접근지표 x_i 를 구하는 알고리즘
- [1] 해당 연도의 고속도로 교통망에서 Table 1과 같이 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 $T = [t_{ij}] = A + A^2 + A^3 + \dots + A^s$ 를 구한다.
- [4] 운송행렬 T 에서 접근지표 $x_i = \sum_{j=1}^m t_{ij}$ 를 구한다.

예를 들어 2017년 운송네트워크에 위의 알고리즘을 적용하여 Mathematica⁵⁾로 운송행렬과 접근지표를 구하는 구체적인 시뮬레이션 과정은 다음과 같다.

Table 2. Simulation Step for Transportation matrix and Accessibility in 2017 by using Mathematica

운송행렬 T 와 접근지표 x_i 를 구하는 Mathematica 시뮬레이션 단계
1. matA (2017 고속도로의 운송네트워크의 벡터형태)
2. MatrixForm[MatrixPower[matA], s] (연결행렬의 2제곱부터 s제곱까지의 행렬)
3. T=MatrixForm[Sum[MatrixPower[matA, k], {k, 1, s}]] (운송행렬)
4. x=Total[T, {2}] (접근지표)

연결행렬을 이용하여 비교거리와 연결수를 구하는 알고리즘을 구성하면 다음과 같다.

- ② 비교거리 d_i 와 연결수 v_i 를 구하는 알고리즘
- [1] 연결행렬 A 에서 영이 아닌 성분을 1로 바꾼 행렬을 $B_0 (= A)$, 행렬 $A_1 = A + A^2$ 에서 영이 아닌 성분을 2로 바꾼 행렬을 B_1, \dots , 행렬 $A_{s-1} = \sum_{i=1}^s A^i$

에서 영이 아닌 성분을 s 로 바꾼 행렬을 B_{s-1} 로 놓는다. 여기서 s 는 행렬 A_{s-1} 의 모든 성분이 0이 아닐 때까지의 최소거듭제곱이다.

- [2] 행렬 $B_k (i=0, 1, \dots, s-1)$ 로부터, 행렬 $\hat{B} = \sum_{k=0}^{s-1} B_k$ 를 구한다.
- [3] $t = \sum_{i=1}^s i$ 에 대하여, 행렬 \hat{B} 에서 각 성분으로 $t \rightarrow 1, t-1 \rightarrow 2, t-3 \rightarrow 3, \dots, t-(t-s) \rightarrow s$ 로 대입하여 얻은 새로운 행렬을 $matB$ 로 놓는다.
- [4] 단위행렬 I_m 을 이용하여 운송네트워크에서 두 정점 i 와 j 의 거리행렬 $B = [b_{ij}] = matB - 2 \times I_m$ 를 구한다.
- [5] 거리행렬 $B = [b_{ij}]$ 로부터 비교거리 d_i , 연결수 v_i , 산포지수 D , 지름 V 을 차례로 구한다.

이렇게 되면 2017년 운송네트워크에 위의 알고리즘을 적용하여 Mathematica로 비교거리와 연결수를 구하는 구체적인 시뮬레이션 과정은 다음과 같다.

Table 3. Simulation Step for Relative distance and Associated number in 2017 by using Mathematica

비교거리 d_i 와 연결수 v_i 를 구하는 Mathematica 시뮬레이션 단계
1. matA (2017년 고속도로의 운송네트워크의 벡터형태)
2. A[s-1]=Sum[MatrixPower[matA ,k], {k, 1, s}] ($matA + \dots + matA^s$ 의 행렬)
3. B[s-1] = A[s-1] /. x_ /; x > 0 -> s (A[s-1]의 0이 아닌 성분을 s로 대입)
4. $\hat{B} = \text{Sum}[B[i], \{i, 0, s-1\}]$ ($B[0] + \dots + B[s-1]$ 의 벡터형식)
5. MatrixForm[\hat{B}] (\hat{B} 의 행렬)
6. t = Sum[i, {i, 1, s}] (1+...+s까지의 합)
7. matB = \hat{B} /. {t -> 1, t-1 -> 2, t-3 -> 3, t-6 -> 4, t-10 -> 5, t-15 -> 6, t-21 -> 7, t-28 -> 8, t-36 -> 9, t-45 -> 10, t-55 -> 11, t-66 -> 12}
8. MatrixForm[B=matB-2*IdentityMatrix[m]] (도시 i 와 j 의 거리의 행렬, m: 도시수)
9. d = Total[B, {2}] (비교거리)
10. D = Total[d] (산포지수)
11. v = Table[Max[B[[All, i]]], {i, m}] (연결수)
12. V = Max[v] (지름)

2.4 2011년과 2017년의 접근성 지표에 대한 시뮬레이션 결과

본 절에서는 접근성 지표의 알고리즘을 통하여 얻은

5) Mathematica는 수학용 컴퓨터 프로그램이다.

2011년과 2017년의 시뮬레이션 결과를 살펴본다.

시뮬레이션 결과로부터 얻은 접근성 지표들인 연결수 v_i , 비교거리 d_i , 접근지표 x_i 는 각각 Table 4와 Table 5와 같다.

Table 4. Associated number, Relative distance and Accessibility in 2011

도시	연결수(v_i)	비교거리(d_i)	접근지표(x_i)
1 인천	8	187	132,191
2 서울	7	158	272,742
3 홍천	8	156	126,616
4 춘천	9	197	33,576
5 양양	9	216	14,144
6 강릉	8	175	53,092
7 안산	8	169	226,137
8 수원	8	169	303,092
9 화성	7	168	146,114
10 평택	8	181	178,402
11 이천	8	159	242,327
12 여주	8	150	155,667
13 원주	7	138	168,538
14 동해	9	216	14,114
15 안성	7	167	226,295
16 진천	7	157	183,835
17 당진	7	157	147,327
18 공주	6	138	267,856
19 천안	6	151	190,358
20 청주	6	141	228,548
21 상주	7	142	174,942
22 서천	7	158	143,415
23 논산	6	145	215,677
24 대전	5	127	315,683
25 전주	7	164	232,110
26 김천	6	129	277,300
27 대구	6	130	299,917
28 포항	7	171	79,603
29 언양	7	164	154,356
30 울산	7	196	91,663
31 부산	6	156	188,026
32 장수	6	147	204,713
33 함양	6	145	224,374
34 고령	6	135	255,518
35 마산	7	161	160,265
36 진주	7	170	157,031
37 통영	8	211	41,888
38 남원	7	162	225,471
39 광주	7	167	226,471
40 고창	8	175	126,019
41 함평	8	194	101,725
42 목포	9	235	27,337
43 순천	7	182	162,669
합계	308	7,116	7,397,144

Table 5. Associated number, Relative distance and Accessibility in 2017

도시	연결수(v_i)	비교거리(d_i)	접근지표(x_i)
1 인천	9	264	8,812,908
2 서울	9	233	18,843,526
3 홍천	9	235	10,602,659
4 춘천	10	287	2,726,385
5 양양	10	279	4,405,171
6 강릉	10	269	5,378,279
7 안산	8	230	15,130,201
8 수원	8	227	21,279,891
9 화성	7	223	9,692,915
10 평택	8	235	12,527,645
11 이천	8	216	18,121,742
12 여주	8	214	16,715,573
13 원주	9	225	14,838,408
14 동해	12	320	1,480,656
15 안성	7	210	17,833,015
16 진천	7	199	20,547,772
17 당진	8	215	10,008,530
18 공주	9	204	19,771,953
19 천안	8	202	15,593,199
20 청주	7	191	23,779,716
21 상주	6	189	31,552,703
22 서천	9	226	9,763,357
23 논산	9	216	15,865,103
24 대전	8	193	26,772,203
25 전주	10	246	15,976,711
26 김천	7	191	31,427,276
27 대구	7	208	41,097,689
28 포항	8	273	10,381,913
29 언양	8	250	26,646,074
30 울산	9	291	15,218,681
31 부산	8	243	24,501,027
32 장수	9	224	15,328,488
33 함양	9	229	17,698,161
34 고령	8	215	26,473,788
35 마산	9	250	15,820,301
36 진주	10	263	12,474,783
37 통영	12	317	3,157,206
38 남원	10	254	15,828,021
39 광주	12	260	15,540,332
40 고창	10	254	8,461,402
41 함평	12	287	7,542,325
42 목포	12	310	5,196,677
43 순천	12	278	12,570,348
44 포천	10	285	4,899,129
45 속초	12	332	1,157,671
46 삼척	12	375	389,780
47 양평	9	241	11,290,686
48 충주	7	197	20,904,092
49 제천	8	213	14,156,437
50 안동	7	205	20,080,824
51 영덕	8	257	5,023,390
52 군위	6	205	29,723,388
53 화산	7	229	26,735,038
54 광주	8	238	12,481,655
합계	479	13,122	820,226,803

2.4.1 운송네트워크의 분석

m 개의 정점과 n 개의 변을 갖는 단순그래프의 연결도 K 가 1에 가까울수록 그래프의 정점을 연결하는 변의 개수가 많다는 것이므로 훨씬 조밀한 운송네트워크가 된다. 2011년과 2017년 운송네트워크의 변의 수는 각각 70과 92이므로 연결도는 각각 $K_{2011} = 12.9$ 와 $K_{2017} \approx 15.55$ 이다. 운송네트워크에서 모든 정점으로부터 다른 모든 정점들로의 거리의 합인 산포지수와 운송네트워크의 최대 연결수인 지름은 각각 $D_{2011} = 7,116$, $V_{2011} = 9$, $D_{2017} = 13,122$, $V_{2017} = 12$ 이다. 산포지수는 주어진 네트워크의 각 정점에서의 모든 비교거리의 합이므로 산포지수가 작을수록 교통망에서 원격지로 여겨지는 곳이 적다는 것이다. 또 그래프의 최대 연결수인 지름이 크다는 것은 그래프의 모양이 넓게 퍼져있었다든가 또는 이동단계가 많다는 것을 의미한다. 2011년과 2017년 운송네트워크에서 2017년 운송네트워크의 산포지수와 지름이 모두 커졌다. 이는 2011년도에 비하여 2017년도의 운송네트워크가 넓게 퍼졌음을 알 수 있다.

연결도, 산포지수, 지름이 2011년에 비하여 2017년이 모두 증가했다. 그런데 연결도는 12.9에서 15.55로 2.65만큼 증가했지만 지름은 9에서 12로 3만큼 증가했다. 즉, 지름에 대한 연결도의 변화는 2011년과 2017년에 각각 33(%)에서 29.6(%)⁶⁾이므로 상대적으로 2017년의 연결도가 2011년의 연결도보다 약간 좋다고 판단할 수 있다.

연결도, 산포지수, 지름에 대한 위와 같은 결과로부터 2011년보다 2017년 운송네트워크의 조밀한 정도는 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 2011년에 비하여 2017년에 새로 추가된 정점 11개를 고려하면 새롭게 접근할 수 있는 도시가 그만큼 증가한 것이다. 또 정점을 잇는 새로운 경로인 54-47-13, 48-49, 21-50-51, 21-52-53-29 등은 2017년에 새로 개통된 고속도로를 고려하면 2011년에 비하여 2017년의 운송네트워크의 접근성이 나빠졌다고 단정할 수는 없다.

한편, Table 6은 2011년과 2017년 운송네트워크의 연결수, 비교거리, 접근지표에 대한 평균, 분산, 표준편차를 나타낸 것이다. 통계에서 분산과 표준편차가 자료의 흩어진 정도를 나타내지만 여기서는 흩어진 정도를 $\frac{(\text{표준편차})}{(\text{평균})} \times 100(\%)$ 로 수치화하여 평균으로부터 어

는 정도 흩어져 있는지 알아보자. 먼저 2011년의 경우에, 연결수는 약 13.55%, 비교거리는 약 14.97%, 접근지표는 약 46.73%이다. 2017년의 경우에는, 연결수는 약 18.8%, 비교거리는 약 16.5%, 접근지표는 약 57.4%이다. 2011년과 2017년의 경우에 각각 연결수와 비교거리는 흩어진 정도가 모두 비슷하지만 두 해의 경우 모두 접근지표의 흩어진 정도는 매우 크다고 할 수 있다. 이로부터 두 해의 각 도시의 접근지표는 도시에 따라서 매우 큰 편차를 보이고 있으므로 모든 면에서 접근성이 좋다고는 할 수 없다.

Table 6. Mean, Variance and Standard deviation for Accessibility Indices of Transportation network⁷⁾

접근성 지표		운송네트워크(2011)	운송네트워크(2017)
연결수	최솟값	5	6
	최댓값	9	12
	평균	7.16	8.87
	중앙값	7	9
	최빈값	7	8
	분산	0.95	2.79
	표준편차	0.97	1.67
	합	308	479
비교거리	최솟값	127	189
	최댓값	235	375
	평균	165.49	243
	중앙값	162	234
	최빈값	158	235
	분산	614.21	1,612.19
	표준편차	24.78	40.15
	합	7,116	13,122
접근지표	최솟값	14,114	389,780
	최댓값	315,683	41,097,689
	평균	172,026.60	15,189,385.24
	중앙값	174,942	15,273,584.5
	최빈값	N	N
	분산	6,461,576,871	7.60×10^{13}
	표준편차	80,383.93	8,719,188.40
	합	7,397,144	820,226,803

6) 2011년은 $\frac{12.9-9}{9} \times 100 \approx 33.3$,

2017년은 $\frac{15.55-12}{12} \times 100 = 29.6$ 이다.

7) 이 표를 포함하여 본 논문에서 제시된 소수는 반올림하여 소수점 둘째 째까지만 나타내기로 한다. 또 두 운송네트워크에서 접근지표의 최빈값은 모두 나타나지 않았다. 이로부터 접근지표가 같은 정점은 없음을 알 수 있다.

운송네트워크에서 두 접근성 지표인 연결수와 비교거리는 작을수록 좋고, 접근지표는 클수록 좋다. 세 가지 접근성 지표의 평균에 대한 변화율을 각각 구하면 다음과 같다.

(연결수의 평균에 대한 변화율)= 0.16

(비교거리의 평균에 대한 변화율)= 7.05

(접근지표의 평균에 대한 변화율)= 1,365,214.42

위의 값을 두 운송네트워크의 각각의 접근성 지표의 최솟값과 최댓값 그리고 평균과 분산과 비교하면 연결수와 비교거리의 경우는 크게 변하지 않았음을 알 수 있다. 반면 접근지표의 경우에 평균에 대한 변화율은 1,365,214.42로 2011년 운송네트워크의 접근지표와 비교하면 매우 큰 값임을 알 수 있다.

2.4.2 중심도시

먼저 2011년 운송네트워크를 살펴보자. Table 4에서 알 수 있듯이 2011년 우리나라 고속도로 교통에서 연결수가 가장 작은 도시는 정점 24의 대전으로 연결수는 5이다. 대전 다음으로 연결수가 작은 도시로는 공주, 천안, 청주, 논산, 김천, 대구, 부산, 장수, 함양, 고령 등으로 연결수가 6이다.

비교거리가 가장 작은 도시는 대전으로 127이다. 대전 이외에 비교거리가 150 이하인 도시는 김천 129, 대구 130, 고령 135, 원주 138, 공주 138, 청주 141, 상주 142, 함양 145, 논산 145, 장수 147, 여주 150 순이다.

접근지표가 가장 큰 도시는 대전으로 315,683이다. 대전 이외에 접근지표가 250,000 이상인 도시는 수원 303,092, 대구 299,917, 김천 277,300, 서울 272,742, 공주 267,856, 고령 255,518 순이다. 따라서 2011년 운송네트워크의 중심도시는 대전임을 알 수 있다. 연결수가 6이며 비교거리가 작고 접근지표가 크기 때문에 대전 다음의 중심적인 도시라 할 수 있는 도시로는 대구, 김천, 고령, 공주 등을 들 수 있다.

한편, 연결수가 가장 큰 도시는 춘천, 양양, 동해, 목포로 9이다. 비교거리가 가장 큰 도시는 목포로 235이다. 목포 다음으로 비교거리가 큰 도시는 양양 216, 동해 216, 통영 211, 춘천 197, 울산 196 순이다. 접근지표가 가장 작은 도시는 동해로 14,114이다. 동해 다음으로 접근지표가 작은 도시는 양양 14,144, 목포 27,337, 춘천 33, 576, 통영 41,888이다. 이 중에서 목포, 동해, 양양은 연결수가 모두 9이고, 비교거리는 목포가 235로 가장 크며 동해와 양양은 216으로 같다. 하지만 접근지표에서 동

해가 14,114이고 양양이 14,144, 목포가 27,337이므로 2011년 고속도로 교통에서 가장 낙후된 도시는 동해, 양양, 목포라고 할 수 있다. 따라서 2011년 이후에 건설될 고속도로는 이런 도시들의 접근성을 높일 수 있도록 설계되는 것이 타당해 보인다.

이제 2017년 운송네트워크를 살펴보자. Table 5에서 알 수 있듯이 2017년 우리나라 고속도로 교통에서 연결수가 가장 작은 도시는 정점 21의 상주와 정점 52의 군위로 연결수는 6이다. 상주의 비교거리는 189로 54개의 도시 중에서 가장 적지만 군위의 비교거리는 205로 좋은 편에 속하지만 상주에 미치지 못한다. 접근지표는 대구가 41,097,689로 가장 좋고, 상주의 접근지표는 대구 다음인 31,552,703이며, 군위의 접근지표는 29,723,388임을 알 수 있다. 따라서 2017년 운송네트워크에서 중심도시는 상주라고 할 수 있다.

상주와 군위 다음으로 연결수가 7인 도시로는 화성, 안성, 진천, 청주, 김천, 대구, 충주, 안동, 화산이다. 상주 이외에 비교거리가 200 이하인 도시로는 진천, 청주, 대전, 김천, 충주이다. 또 대구를 제외한 접근지표가 30,000,000 이상인 도시는 상주, 김천이 있고, 접근지표가 30,000,000 미만이고 25,000,000 이상인 도시는 대전, 언양, 고령, 군위, 화산이다. 따라서 상주를 제외한 연결수와 비교거리가 좋은 도시는 진천, 청주, 김천, 충주이다. 비교거리와 접근지표가 좋은 도시는 김천과 대전이고 연결수와 접근지표가 좋은 도시는 김천, 군위, 화산이다. 이 결과로부터 김천은 모든 경우에 포함되므로 상주를 제외하면 중심도시가 될 가능성이 높은 것을 알 수 있다.

한편 연결수가 12로 가장 큰 도시는 동해, 통영, 광주, 함평, 목포, 순천, 속초, 삼척이다. 이들 도시의 비교거리는 각각 동해가 320, 통영이 317, 광주가 260, 함평이 287, 목포가 310, 순천이 278, 속초가 332, 삼척이 375이다. 이들 도시 중에서 접근지표가 2,000,000 미만인 도시로는 동해가 1,480,656, 속초가 1,157,671, 삼척이 389,780이다. 이 도시들의 연결수는 모두 같지만 삼척이 비교거리와 접근지표가 가장 좋지 않다. 따라서 삼척이 2017년 고속도로 교통망에서 교통 여건이 가장 좋지 않은 도시임을 알 수 있다. 동해와 속초가 그 다음으로 좋지 않은 도시로 모두 강원도에 포함된 도시이다.

3. 결론

운송네트워크의 연결도는 2011년에 12.9이고, 2017년에 15.55이다. 그런데 운송네트워크의 정점이 2011년에

는 43개, 2017년에는 54개이므로 최소 연결도는 각각 21.5와 27이므로 퍼센트로 나타내면 $\frac{12.9}{21.5} \times 100 = 60(\%)$ 와 $\frac{15.55}{27} \times 100 \approx 57.59(\%)$ 이다. 또 두 운송네트워크에서 각각의 연결도는 지름보다 크므로 2011년과 2017년 운송네트워크의 연결도는 비교적 좋지 않은 결과라 할 수 있다.

또 분산과 표준편차를 이용한 각 지표의 흩어진 정도는 2011년의 경우에, 연결수는 약 13.55%, 비교거리는 약 14.97%, 접근지표는 약 46.73%이고, 2017년의 경우에는, 연결수는 약 18.8%, 비교거리는 약 16.5%, 접근지표는 약 57.4%이다. 2011년과 2017년의 경우에 각각 연결수와 비교거리는 흩어진 정도가 모두 비슷하지만 두 해의 경우 모두 접근지표의 흩어진 정도는 매우 크다고 할 수 있다. 이로부터 두 해의 각 도시의 접근지표는 도시에 따라서 매우 큰 편차를 보이고 있으므로 여러 면에서 접근성이 좋아졌다고 단정할 수는 없다.

그러나 시뮬레이션을 통하여 얻은 연결수, 비교거리, 접근지표의 평균에 대한 변화율을 살펴보면, 운송네트워크의 정점이 11개 증가하며 운송네트워크의 조밀함이 감소하는 미세한 변화가 있었지만 전체 운송네트워크에서 각 도시에서 다른 도시로 접근할 수 있는 방법은 매우 큰 폭으로 증가하였음을 알 수 있다. 따라서 2011년보다는 2017년의 고속도로를 통한 도시간의 접근 방법이 현저하게 좋아졌음을 알 수 있다.

접근성 지표의 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과로부터 얻은 연결수, 비교거리, 접근지표로 운송네트워크를 분석하면, 2011년에 중심도시는 대전이었다. 연결수가 6이며 비교거리가 작고 접근지표가 크기 때문에 대전 다음의 중심적인 도시라할 수 있는 도시로는 대구, 김천, 고려, 공주였다.

한편 2017년에 중심도시는 상주이다. 상주를 제외하고 연결수와 비교거리가 좋은 도시는 진천, 청주, 김천, 충주이다. 비교거리와 접근지표가 좋은 도시는 김천과 대전이고 연결수와 접근지표가 좋은 도시는 김천, 군위, 화산이다. 이로부터 김천은 모든 경우에 포함되므로 상주를 제외하면 중심도시가 될 가능성이 높은 것을 알 수 있다. 반면에 2011년 중심도시였던 대전은 접근성 지표에서 비교적 좋은 성적을 거두기는 했지만 2017년에는 중심도시가 되지 않았다. 더욱이 김천보다도 좋지 않은 접근성 지표를 기록했다. 2011년과 2017년에 세 가지 접근성 지표가 좋은 도시들은 대부분 대전 근처와 대구 근처에 위치

하고 있음을 알 수 있다. 특히 상주, 김천, 대구, 화산 등의 도시는 모두 경상도에 위치하고 있다.

2011년 운송네트워크에서 접근성 지표가 모두 좋지 않은 도시는 목포, 동해, 양양이다. 이들은 연결수가 모두 9이고, 비교거리는 목포가 235로 가장 크며 동해와 양양은 216으로 같다. 하지만 접근지표에서 동해가 14,114이고 양양이 14,144, 목포가 27,337이므로 2011년 고속도로 교통에서 가장 낙후된 도시는 동해, 양양, 목포로 판단된다.

2017년 운송네트워크에서 접근성 지표가 모두 좋지 않은 도시는 목포, 동해, 삼척, 속초이다. 이 도시는 연결수와 비교거리가 크고, 접근지표가 상대적으로 작다. 특히 목포와 동해는 2011년 운송네트워크에서도 접근성 지표가 좋지 않은 도시였는데, 2017년에도 변함이 없었다.

지금까지 조사된 사실로부터 2011년과 2017년 우리나라 고속도로 교통망은 대구를 포함한 경상도 지역을 중심으로 건설되었으며, 전라도와 강원도는 상대적으로 접근성이 좋지 않음을 알 수 있다. 특히 강원도에 위치한 도시들 대부분은 접근성이 좋지 않았다. 물론 우리나라의 지리적 여건으로 어쩔 수 없는 상황이 있을 수 있지만, 고속도로 건설에도 불구하고 전국의 도시들이 비슷한 수준의 교통여건을 제공받지 못했음을 알 수 있다. 이를테면 서울, 인천, 부산, 목포, 속초 등은 모두 우리나라의 한쪽에 치우쳐 위치해 있지만 고속도로 접근성 지표에서는 현저한 차이를 보이고 있다. 또 대전의 경우 거의 우리나라의 중심에 위치하고 있음에도 불구하고 대구를 포함한 경상북도 부근의 접근성 지표에 미치지 못하고 있다. 이는 결과적으로 고속도로가 어느 한 지역의 접근성을 높이는 방향으로 건설되었음을 알 수 있다.

위의 결과로부터 미래에 건설되거나 계획 중인 고속도로는 국토의 균형발전을 위하여 강원도에 위치한 도시들의 접근성을 높이고, 전라도의 연결수와 비교거리를 줄일 수 있는 방향으로 설계되는 것이 바람직하다.

References

- Davidson, K.B. (1977) "Accessibility in transport/land use modeling and assessment", *Environment and Planning A*, 5, 1401-1416.
- Fleming, D.K. and Y. Hayuth (1994) "Spatial characteristics of transportation hubs : centrality and intermediacy", *Journal of transport Geography*, 2(1), 3-18.
- Garrison, W.L. (1960) "Connectivity of the Interstate

- Highway System”, *Paper and Proceedings of Regional Science Association*, 60, 121-138.
- Kim K.S. (1987) “Concepts and Measures of Accessibility”, *Journal of Korea Transportation Research Society*, 5(1), 33-46.
- (김광식 (1987) “접근성의 개념과 측정치”, *대한교통지리학회지*, 제5권, 제1호, 33-46.)
- Kwon, O.S. and H.J. Cho (2017) “Design and Implementation of Real-time Shortest Path Search System in Directed and Dynamic Roads”, *The Journal of Multimedia Information System*, 20(4), 649-659.
- (권오성, 조형주 (2017) “방향성이 있는 동적인 도로에서 실시간 최단 경로 탐색 시스템의 설계와 구현”, *멀티미디어학회 논문지*, 제20권, 제4호, 649-659.)
- Lee H.Y. and J.Y. Lee (1997) “A Study on the Analysis of the Integrated Accessibility for Transportation Network Systems - The Case of Kangnam-Gu, Seoul”, *Korea Planning Association*, 32(5), 119-135.
- (이희연, 이종용 (1997) “교통망체계의 종합접근성 분석에 관한 연구 : 강남구를 사례로 하여”, *대한국토·도시계획학회*, 제32권, 제5호, 119-135.)
- Lee K. (1995) “A Generalized Measurement of Regional Accessibility”, *Application Geography*, 18, 25-55.
- (이금숙 (1995) “지역 접근성 측정을 위한 일반모형”, *응용지리*, 제18권, 25-55.)
- Lee, K. and H.Y. Lee (1998) “A New Algorithm for Graph-theoretic Nodal Accessibility Measurement”, *Geographical Analysis*, 30(1), 1-14.
- Won, K.H. (2003) “Study on the Impact of New Highway Construction on Regional Accessibility”, *Korean Urban Management Association*, 16(1), 49-81.
- (원광희 (2003) “고속도로건설에 따른 지역간 접근성 변화분석”, *한국도시행정학회/도시행정학회보*, 제16권, 제1호, 49-81.)



이 광 연 (gylee@hanseo.ac.kr)

1987 성균관대학교 수학과 학사
 1989 성균관대학교 수학과 석사
 1992 성균관대학교 수학과 박사
 1996~ 1997 미국 와이오밍주립대학교 박사후과정
 2004~ 2006 미국 아이오와주립대학교 방문연구교수
 1992~ 현재 한서대학교 수학과 교수

관심분야 : 산업수학, 조합론, 수학사



박 기 섭 (kisoeb@gmail.com)

1999 한서대학교 수학과 학사
 2001 성균관대학교 수학과 석사
 2007 성균관대학교 수학과 박사
 2008~ 2010 King's College London(영국) 학진해외포닥
 2013~ 2016 성균관대학교 수학과 초빙교수
 2016~ 현재 인천대학교 수학과 객원교수

관심분야 : 산업수학, 데이터분석&시뮬레이션, 금융수학, 편미분방정식