

■ 論 文 ■

도로 네트워크의 노드 연계성 산정에 관한 연구

Measuring the Connectivity of Nodes in Road Networks

박 준 식

(한국교통연구원 책임연구원)

강 성 철

(한국교통연구원 책임연구원)

목 차

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> I. 서론 <ul style="list-style-type: none"> 1. 연구의 배경 및 목적 2. 연구의 범위 및 내용 II. 기존 연구 검토 <ul style="list-style-type: none"> 1. 노드의 중심성 2. 네트워크의 신뢰성 III. 도로 네트워크의 연계성 평가 모형 | <ul style="list-style-type: none"> 1. 네트워크 연계성의 개념 2. 노드의 네트워크 연계성 산정 모형 3. 경로집합 생성 알고리즘 IV. 도로 네트워크 연계성 평가 모형의 적용 V. 결론 및 향후 연구과제 <p>참고문헌</p> |
|--|---|

Key Words : 노드의 연계성, 연계성 지수, 도로 네트워크, 신뢰성, 경로집합
Connectivity of a Node, Connectivity Index, Road Networks, Reliability, Route Set

요 약

본 연구에서는 도로 네트워크에서 노드의 연계성 평가 모형을 제시하였다. 우선 두 노드 간의 경로 수, 경로의 굴곡도, 설계속도 및 용량을 고려하여 노드 간 연계성 지수를 정의하였다. 노드의 연계성은 그 노드와 타 대상 노드들 간의 연계성 지수의 가중 평균으로 산출되는데, 여기서 대상 노드들과의 연결 가중치는 통행수요와 거리에 의해 결정된다. 본 연구에서 개발한 연계성 평가 모형을 가상 가로망에 적용한 결과 모형이 적용 가능하고 적절한 결과를 산출하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 연계성 평가 모형은 통행 단위를 통일시키고 철도 링크의 용량 산정 문제를 해결하면 철도 네트워크를 포함하는 통합 교통 네트워크의 연계성 분석에도 활용될 수 있다.

This study proposes a model for measuring the connectivity of nodes in road networks. The connectivity index between two nodes is characterized by the number of routes, degree of circuitousness, design speed, and route capacity between the nodes. The connectivity index of a node is then defined as the weighted average of the connectivity indexes between the node and other nodes under consideration. The weighting factor between two nodes is determined by the travel demand and distance between them. The application of the model to a toy network shows that it reasonably well quantifies the level of connectivity of nodes in the network. If flow of rail networks can be measured in the same scale as that of road networks and the capacity of rail links can be estimated, the model proposed in this paper could be applied to intermodal transportation networks as well.

본 연구는 국토해양기술연구개발사업 교통체계효율화사업(과제번호 : 09교통체계 미래-01 “교통물류 거점중심 연계교통망 구축기술 개발”)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

국민경제의 발전을 위해 1962년에 제1차 경제개발 5개년 계획이 발표된 이후 현재까지 수도권을 비롯한 대도시로 인구, 산업, 경제 및 교통시설이 집중되었다. 이러한 집중은 교통 혼잡을 비롯하여 소위 도시문제라 통칭되는 여러 가지 바람직하지 못한 산출물들을 양산하게 되었고 이러한 문제들의 주된 해결방법은 추가적인 시설의 공급이었다.

교통 측면으로 한정하자면 차가 막히는 지역에 도로를 더 건설함으로써 교통 혼잡을 완화시키고자 한 것이다. 그러나 교통시설의 공급은 추가적인 통행수요를 유발하고 이로 인해 교통 혼잡은 더욱 가중되어 공급의 추가가 근본적인 해결방안이 되지 못함을 실증적으로 확인할 수 있었다. 대도시와 달리 지방에서는 도로가 어느 정도 막히는지와 같은 교통 서비스의 질적인 측면의 문제가 발생하기 이전에, 어느 지역으로 직접 연결된 도로가 있는지와 같은 절대적인 교통 시설의 부족에 관한 문제가 지속적으로 부각되어 왔다.

교통시설투자를 위한 (예비)타당성평가에서는 사회적 측면과 정책적 측면이 일부 고려되기는 하지만, 투자된 비용 대비 발생하는 편익의 크기로 산출되는 경제성이 사업 추진여부의 절대적인 기준으로 작용한다(정성봉·박준식, 2009). 이러한 타당성평가의 구조는 대도시 교통시설의 추가 공급을 부추기면서 지방의 교통시설 확보를 가로막는 주요한 원인으로 작용하고 있다.

국토해양부는 2009년 6월, 기존의 「교통체계효율화법」을 “육상, 해상, 항공분야의 복합수송체계의 발전, 글로벌 교통물류 경쟁 격화 등 대내외 여건변화에 적극 대처하기 위하여 교통시설투자의 효율성 증대, 거점중심 연계 교통망 구축, 지능형 교통체계 개발 등 고효율·저비용형 국가통합교통체계 구축을 촉진하고 법률의 시행과정에 나타난 제도적 미비점을 전면적으로 개선·보완하기 위해” 「국가통합교통체계효율화법」으로 전부 개정하였다(국토해양부, 2008).

개정된 「국가통합교통체계효율화법」(국토해양부, 2009)에서 중요하게 다루는 내용 중 하나가 교통물류거점의 연계교통체계 고도화 부분이다. 이는 교통 소통상태가 혼잡한 지역의 교통 혼잡을 완화하기 위해 교통시설을 추가로

공급하던 기존의 교통시설 구축방향을 국가 전체적인 통합 교통 네트워크의 효율성을 향상시키기 위해 교통물류 거점 중심의 교통 연계체계를 구축하는 방향으로 패러다임을 전환시키고자 하는 의도이다.

이를 위해서는 교통물류거점을 중심으로 한 교통 네트워크의 연계성 분석이 필요하다. 여기서 교통물류거점은 교통 네트워크에서 특정한 노드에 해당하므로 분석의 대상은 노드가 되고 분석의 내용은 노드의 연계성이 된다. 그러나 불행히도 기존의 교통 네트워크 분석은 노드가 아닌 링크를 대상으로 이루어져왔고, 교통 네트워크에서 노드의 특성을 분석하는 모형이나 방법론에 대한 연구는 찾아보기가 어렵다. 또한 분석의 내용 역시 기존에는 이동성에 초점이 맞추어져왔기 때문에 연계성 분석에 관한 연구도 그다지 많지 않으며, 개념적으로도 접근성(accessibility) 또는 신뢰성(reliability)과 혼동되어 사용되고 있다.

이에 본 연구에서는 교통 네트워크에서 연계성의 개념을 구체화하고 노드를 중심으로 한 연계성 분석 모형을 개발하여 교통 네트워크에서 교통물류거점의 연계체계를 분석하는 방법론을 제시하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 내용

교통 네트워크는 도로 네트워크와 대중교통 네트워크로 구분할 수 있다. 도로 네트워크는 지형 공간상에 실제로 설치된 도로 구간을 링크로, 도로 구간 간의 연결점을 노드로 모형화하는 반면, 대중교통 네트워크는 지형 공간상에 설치된 물리적 시설이 아닌 대중교통 노선의 운행계통을 네트워크로 표현한다. 즉, 대중교통 네트워크는 운행 차량이 승객의 승하차를 위해 서비스하는 정류장의 순차적 연결을 나타내는 가상의 네트워크라 볼 수 있다. 따라서 대중교통 네트워크에서 링크의 속성은 해당 링크를 운행하는 노선의 속성에 따라 가변적이기 때문에 도로 네트워크와 동일한 분석 틀을 적용하는데 한계가 따른다. 본 연구의 연계성 분석은 기본적으로 도로 네트워크를 대상으로 하는데 결론 부분에서 대중교통 네트워크를 포함한 전체 교통 네트워크로의 확장성에 대해서 간략히 검토하기로 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 사회 네트워크 분석에서 많이 사용되는 중심성 분석 모형과 교통 네트워크의 신뢰성 분석 모형을 고찰한다. 3장에서는 노드의 연계성에 대한 개념을 정의하고 도로 네트워크에서 노드

의 연계성을 평가할 수 있는 모형을 제시한다. 4장에서는 3장에서 제시한 모형을 소규모 가상 가로망에 적용하여 모형의 적용성과 결과의 적정성을 검증한다. 5장에서는 본 연구에서 개발한 노드의 네트워크 연계성 평가 모형의 활용방안을 검토하고 이에 필요한 향후 연구과제들을 제안하면서 논문을 마무리한다.

II. 기존 연구 검토

1. 노드의 중심성

교통 부문에서 노드의 속성이 네트워크 차원에서 분석된 사례는 찾아보기 힘들다. 교통 네트워크 분석에서는 특정 링크 또는 경로의 추가 및 용량확대가 주변 교통상태의 개선에 미치는 효과에 대한 평가가 주로 수행되었기 때문에 분석의 대상은 노드가 아닌 링크에 한정되었다. 또한 네트워크 전체의 연결 상태나 서비스수준을 개략적으로 평가하거나, 특정 기종점을 연결하는 경로의 용량 및 통행시간 신뢰성 분석이 네트워크 차원에서 이루어지지만 이러한 분석 및 평가모형에서도 노드는 분석의 대상이 되지 못하고 있다.

사회과학 분야에서는 1970년대부터 사회 구성원들 개 개인의 속성 분석에서 벗어나 개인들 간의 상호관계를 네트워크 차원에서 분석하기 위해 사회 네트워크 분석에 관한 연구가 이루어져왔다(Borgatti and Everett, 1997). 사회 네트워크 분석에서는 노드의 중심성(centrality) 분석이 주를 이루는데, 노드의 중심성은 크게 degree, betweenness, closeness centrality(Freeman, 1979)와 eigenvector centrality(Bonacich, 1972)의 4가지로 분류된다. 이러한 노드의 중심성을 나타내는 지표들은 각각의 정의에 따라 그 값이 상이하게 산출되지만 대체적으로 네트워크를 구성하는 노드들을 순위 매김하는 역할을 하며, 이를 통해 정보나 질병의 전파 등에 대한 효과적 대처방안을 모색하기 위해 활용된다.

사회 네트워크 분석에서는 사람들이 맺는 인간관계, 웹의 연결형태, 병의 전염경로, 바이러스의 전파형태 등이 주요 분석 대상이 된다. 여기서 네트워크는 물리적으로 연결된 네트워크가 아닌 개념적인 연결 상태를 네트워크로 표현한 것이기 때문에 일반적으로 노드와 링크의 용량 제약이 없으며 링크는 단순히 연결된 상태만을 나타낸다.

교통 네트워크는 이와 달리 물리적인 연결 상태를 그대

로 모형화한다. 따라서 노드와 링크가 수용할 수 있는 용량제약으로 인해 한 노드에 연결될 수 있는 링크의 수가 한정되며, 링크 길이나 차로수와 같은 링크의 속성값에 따라 노드들 간의 연결 강도에 있어서 차이를 갖는다. 즉, 사회 네트워크 분석에서 사용되는 노드의 중심성 분석을 교통 네트워크에 바로 적용하기에는 적당치 않다.

2. 네트워크의 신뢰성

신뢰성 이론에서는 신뢰성을 “시스템이 주어진 조건 하에서 의도된 기능을 적절하게 수행할 확률”로 정의한다. 교통 부문에서는 네트워크의 성능평가에 신뢰성의 개념을 도입하여 사용하고 있다.

Bell(2000)은 네트워크 신뢰성에 네트워크 연결성(network connectivity)과 성능 신뢰성(performance reliability)의 두 가지 측면이 있음을 언급하였는데, 성능 신뢰성은 성능을 판단하는 기준에 따라 통행시간 신뢰성(travel time reliability)과 용량 신뢰성(capacity reliability)으로 구분된다.

네트워크 연결성은 일반적으로 특정 링크의 단절로 인해 기종점 간 연결이 단절될 확률로 표현되는데, 링크의 용량을 0과 1의 이진 변수로 볼 경우 용량 신뢰성은 네트워크 연결성을 나타내므로 네트워크 연결성은 용량 신뢰성의 특수한 형태로 볼 수 있다(Chen 등, 2002).

Bell(2000)은 네트워크의 신뢰성에 대해 “이용자들이 네트워크의 상태에 대해서 극단적으로 비판적인 경우에도 예상 통행비용이 수용 가능한 네트워크는 신뢰할 만하다”고 정의하였는데, 여기서 통행비용을 통행시간으로 보면 통행시간 신뢰성이 된다.

Chen 등(2002)은 용량 신뢰성(capacity reliability)을 “네트워크가 어떤 통행 수요를 주어진 서비스수준 하에서 감당할 수 있을 확률”로 정의하였고, Morlok and Chang(2004)은 교통 시스템의 용량 유연성(capacity flexibility)을 “교통 시스템이 만족할 정도의 성능을 유지하면서 통행수요의 변화나 변동을 감당할 수 있는 능력”으로 정의하였다.

신뢰성이 확률적인 개념이기 때문에 기존에 제시된 여러 가지 교통 네트워크 신뢰성도 확률값으로 산출된다. 이를 요약하자면 <표 1>과 같이 정리된다. 산출하고자 하는 확률값은 해석적으로 계산할 수 없기 때문에 링크 용량과 통행 수요를 변화시켜 가면서 통행시간이나 용량이 기준

치를 초과하는지를 확인하는 과정을 반복하여 최종적인 확률값을 산출하게 된다. 제약조건을 무제약, 용량제약, 수요제약의 세 가지로 구분할 수 있으나 이는 단지 계산의 양에 관계된 사항이므로 의미의 차이는 없다고 볼 수 있다. Bell(2000)이 언급한 바와 같이 네트워크 신뢰성의 측정은 매우 복잡한 문제로 결과값을 산출하는 것이 그다지 용이하지 않다.

네트워크 신뢰성이 네트워크의 연결 상태와 강도를 아우르는 개념으로 본 연구에서 제시하고자 하는 네트워크의 연계성과 개념적으로 유사하다. 그러나 기존에 제시된 네트워크 신뢰성 측정 지표들은 연결 상태, 통행시간 측면에서의 연결 강도, 용량 측면에서의 연결 강도와 같이 하나의 속성만을 설명하고 있어 신뢰성의 전체 개념을 포괄하는 측정 지표로써는 한계를 갖는다. 또한 용량이나 통행수요의 변화 범위에 따라 산출값이 달라지기 때문에 분석 결과에 분석자의 임의성이 내재되어 있는 한계가 있다. 즉, 누가 어떤 자료를 가지고 분석하는지에 따라 동일한 네트워크의 성능이 다르게 평가되므로 분석의 객관성을 확보하기 어려운 문제가 있다.

III. 도로 네트워크의 연계성 평가 모형

본 연구에서 제시하고자 하는 네트워크 연계성은 네트워크의 연결 상태와 강도를 포괄하는 개념으로 연계성 측정 지표는 네트워크의 연결 상태와 강도를 모두 반영해야 한다. 또한 시간과 공간의 변화 및 통행자들의 인지수준 차이에 따른 가변적인 확률적 변동을 배제하여 결과의 일관성과 객관성을 확보하고자 한다. 즉, 본 연구에서는 네트워크의 연결 상태와 강도를 모두 포괄하며 확률적인 변동이 없는 객관적인 측정 지표를 개발하고자 한다.

1. 네트워크 연계성의 개념

본 연구에서는 네트워크 연계성을 네트워크의 성능을

평가하기 위한 새로운 지표로 제시하고자 한다. 네트워크의 연결 상태와 강도를 포괄하는 개념으로 네트워크 신뢰성과 평가의 목적과 방향은 유사하지만 개념의 구성성 향상, 지표산출의 용이성 확보, 입력자료의 임의성에 따른 결과의 신뢰도 저하 등을 개선시키기 위해 확률적인 개념을 배제하도록 한다. 또한 네트워크 신뢰성은 특정 기종점 또는 네트워크 전체가 평가의 대상이 되는 반면, 네트워크 연계성은 특정 노드가 평가의 대상이 된다. 즉, 본 연구에서 제시하는 네트워크 연계성은 교통물류거점과 같은 특정 노드가 네트워크 내의 타 노드들과 얼마나 많이, 어느 정도로 강하게 연결되어 있는지를 평가하기 위한 지표가 된다. 본 연구에서는 노드의 네트워크 연계성을 다음과 같이 정의한다.

“노드의 네트워크 연계성이란 네트워크 내의 타 노드들과 연결되어 있는 정도를 나타낸다. 즉, 네트워크 내의 타 노드들과 용량이 크고 통행시간이 짧은 여러 경로들로 연결되어 있는 노드는 네트워크의 연계성이 좋다고 말할 수 있다.”

위의 정의에서 “타 노드들”은 어떤 노드들을 나타내는지 명확하지 않다. 기본적으로 타 노드들은 네트워크를 구성하는 노드집합의 모든 원소들을 대상으로 하고 있다. 그러나 속성이 다른 링크를 연결하는 연결점이나 단지 기하구조의 변화를 모사하기 위한 단절점 등은 노드 자체가 어떤 의미를 갖지 않기 때문에, 연계성의 의미를 살리기 위해서는 통행 기종점이나 주요 간선도로와의 연결점과 같이 의미를 부여할 수 있는 노드들로 대상 노드의 집합을 한정할 필요가 있다. 이와 같이 연계성 측정을 위한 대상 노드를 한정하는 방법은 노드 집합의 원소를 한정하는 방법과 노드의 연결 가중치를 적용하는 방법을 생각할 수 있다. 본 연구에서는 노드의 연결 가중치를 적용하는 방법을 사용하는데 이에 대해서는 연계성 산정 모형 부분에서 자세히 설명하도록 한다.

“타 노드들과 연결되어 있는 정도”란, 연결 상태와 연결 강도를 포괄하는 연계성의 측정지표로 본 연구에서 제시하고자 하는 새로운 지표가 된다.

<표 1> 제약조건과 변화요인에 따른 네트워크 신뢰성의 산출값

구분	제약조건	변화요인	산출값
통행시간 신뢰성	-	링크 용량과 통행수요 변화에 따라	특정 기종점(또는 네트워크 전체의 모든 기종점)의 통행시간이 기준치를 초과하지 않을 확률
	주어진 링크 용량 하에서	통행수요 변화에 따라	
	주어진 통행수요 하에서	링크 용량의 변화에 따라	
용량 신뢰성	-	링크 용량과 통행수요 변화에 따라	특정 기종점(또는 네트워크 전체의 모든 기종점)의 통행량이 용량을 초과하지 않을 확률
	주어진 링크 용량 하에서	통행수요 변화에 따라	
	주어진 통행수요 하에서	링크 용량의 변화에 따라	

2. 노드의 네트워크 연계성 산정 모형

1) 두 노드 간의 연계성

연계성 측정 지표가 연결 상태와 연결 강도를 모두 포괄하기 위해서는 연결된 경로의 수, 경로의 용량, 통행시간 등 다양한 요소들이 반영되어야 한다. 우선 두 노드를 대상으로 위의 요소들이 어떻게 반영되는지를 설명하도록 한다.

<그림 1>의 (가)에서 ①번 경로를 보면 두 노드가 연결되어 있기는 하지만 여러 지점을 경유하기 때문에 연결 거리가 길다. 이에 반해 ②번 경로는 두 노드가 직선거리로 연결되어 있어 ①번 경로에 비해 연결 정도가 좋다고 할 수 있다. 이와 같은 경로의 연결 정도 차이는 두 노드 간 직선거리 대비 경로의 거리의 비율로 표현되는 경로의 굴곡도(circuitry)로 반영할 수 있다.

<그림 1>의 (나)에서 두 노드를 연결하는 경로의 수가 많은 ②번의 경우가 ①번의 경우보다 두 노드 간 연결 정도가 좋다고 볼 수 있다.

<그림 1>의 (다)는 설계속도가 다른 두 경로를 비교한 것으로 타 조건이 동일할 경우에 설계속도가 높은 경로가 그렇지 않은 경로보다 통행속도가 높고 통행시간이 짧아 두 노드 간 연결 정도를 좋게 한다. 그러나 통행시간의 차이는 설계속도뿐만 아니라 경로의 굴곡도에도 종속적이기 때문에 설계속도와 굴곡도를 동시에 고려하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 굴곡도를 거리의 비율이 아닌 통행시간의 비율로 산출하여 설계속도의 차이를 동시에 반영하고자 한다.

<그림 1>의 (라)는 경로의 용량 차이에 따른 연결 정도

의 차이를 보여주는 것인데, <그림 1>의 (나)에서 두 노드를 연결하는 모든 경로들의 용량이 동일하지 않다면 단지 경로의 수만으로 ②번의 경우가 ①번의 경우보다 연결 정도가 좋다고 말하기 어려울 것이다. 즉, 경로의 수는 각 경로의 용량과 같이 고려되어야 함을 알 수 있다.

연결 정도에 영향을 미치는 이상의 4가지 속성을 종합적으로 고려하여 네트워크의 노드 a에서 노드 b로의 연계성 지수 CI_{ab} 를 식(1)과 같이 정의한다.

$$CI_{ab} = \sum_{r \in R_{ab}} \frac{T_{ab}}{T_{ab}^r} \times q_{ab}^r \quad (1)$$

여기서,

T_{ab} : a에서 b까지 직선거리를 최대 설계속도로 통행할 경우의 통행시간

T_{ab}^r : a에서 b까지 연결하는 경로 r의 통행시간

q_{ab}^r : a에서 b까지 연결하는 경로 r의 용량

R_{ab} : a에서 b까지 연결하는 경로의 집합

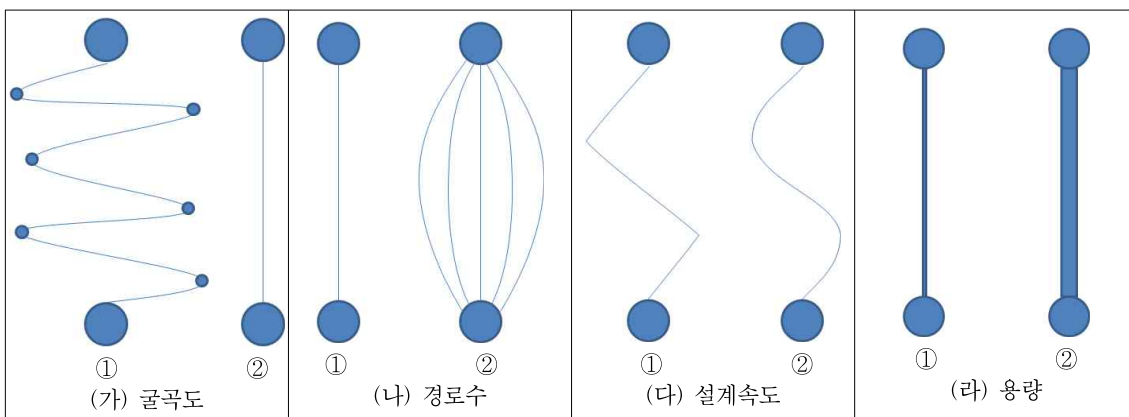
노드 a에서 노드 b를 연결하는 경로 r의 용량은 경로를 구성하는 링크들의 용량 중 최소값으로 정의된다. 즉,

$$q_{ab}^r = \min\{q_\ell, \ell \in L_r\} \quad (2)$$

여기서, q_ℓ : 링크 ℓ 의 용량

L_r : 경로 r을 구성하는 링크의 집합

식(1)에서 T_{ab} 는 두 노드 간의 이상적인 최소 통행시간이고, T_{ab}^r 는 현실적인 통행시간으로 T_{ab}/T_{ab}^r 는 경로 r의 굴곡도를 통행시간의 비로 표현한 것이다. $T_{ab} \leq T_{ab}^r$



<그림 1> 노드 간 연계성에 영향을 미치는 요소

이므로 T_{ab}/T_{ab}^* 는 0과 1사이의 값을 갖는다. 여기서 T_{ab}^* 에 통행량이 없는 상태에서의 자유통행시간을 적용하면 순수한 공급 측면에서의 연계성을 평가할 수 있으며, 통행량이 배정된 상태에서의 통행시간을 적용하면 통행자들이 체감하는 연계성을 평가할 수 있다.

두 노드를 연결하는 링크가 양방향 대칭이고, 네트워크 내 모든 노드에서의 회전제약이 없을 경우에는 노드 a 에서 노드 b 로의 연계성 지수 CI_{ab} 와 노드 b 에서 노드 a 로의 연계성 지수 CI_{ba} 가 동일하게 산출된다. 그러나 현실의 도로망은 양방향 링크가 대칭이 아닌 경우가 많고 또한 노드에서의 회전제약이 이동 방향별로 상이하기 때문에 CI_{ab} 와 CI_{ba} 는 서로 다른 것이 일반적이다. 즉, 노드 a 에서 노드 b 로 가는 경로와 노드 b 에서 노드 a 로 가는 경로가 서로 대칭일 경우에만 CI_{ab} 와 CI_{ba} 가 동일하며, 그렇지 않을 경우에는 CI_{ba} 와 CI_{ab} 가 서로 다르다.

2) 노드의 연계성

앞에서는 네트워크에서 두 노드 간의 연계성 지수를 산정하는 방법에 대하여 논하였다. 여기에서는 이를 바탕으로 개별 노드의 연계성 지수를 산정하는 방법을 제시한다.

네트워크에서 노드 a 의 연계성을 평가하기 위해서는 i) 노드 a 에서 다른 노드들로의 연계성뿐만 아니라 ii) 다른 노드들에서 노드 a 로의 연계성을 모두 고려해야 한다. 여기서 i)의 연계성을 노드 a 의 유출연계성(outbound connectivity), ii)의 연계성을 노드 a 의 유입연계성(inbound connectivity)이라 부른다.

노드 a 의 유출연계성 지수 CI_a^+ 는 식(3)과 같이 노드 a 에서 타 노드들로의 연계성 지수의 가중평균으로 정의된다.

$$CI_a^+ = \sum_{k \in N} \theta_{ak}^+ CI_{ak} \tag{3}$$

여기서 N 은 노드집합이며, θ_{ak}^+ 는 노드 a 에서 노드 k 로의 유출 연결 가중치를 의미한다($\sum_{k \in N} \theta_{ak}^+ = 1$).

반면에 노드 a 의 유입연계성 지수 CI_a^- 는 식(4)에 나타난 바와 같이 타 노드들에서 노드 a 로의 연계성 지수의 가중평균으로 정의된다.

$$CI_a^- = \sum_{k \in N} \theta_{ka}^- CI_{ka} \tag{4}$$

여기서 θ_{ka}^- 는 노드 k 에서 노드 a 로의 유입 연결 가중

치를 의미한다($\sum_{k \in N} \theta_{ka}^- = 1$).

노드 a 의 연계성 지수 CI_a 는 식(5)와 같이 노드 a 의 유출연계성 지수와 유입연계성 지수의 평균값으로 계산된다.

$$CI_a = \frac{1}{2}(CI_a^+ + CI_a^-) \tag{5}$$

연결 가중치 θ_{ak}^+ 와 θ_{ka}^- 는 노드 a 에 대한 노드 k 의 연결 중요도를 의미하는데 이를 규정하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 두 노드 간 통행량이 많을수록 연결 중요도가 높고, 인접한 노드일수록 연결 중요도가 높다고 볼 수 있으므로 본 연구에서는 대상 노드 간의 거리와 통행량을 이용하여 식(6)과 같이 유출, 유입 연결 가중치를 산정한다.

$$\theta_{ak}^+ = \frac{g_{ak}}{\sum_{k \in N} g_{ak}}, \quad \theta_{ka}^- = \frac{g_{ka}}{\sum_{k \in N} g_{ka}} \tag{6}$$

여기서, $g_{ij} = \frac{q_{ij}}{d_{ij}}$

q_{ij} : 노드 i 에서 노드 j 로의 통행량

d_{ij} : 노드 i 에서 노드 j 까지의 직선거리

예를 들어 <그림 2>와 같은 네트워크에서 1번 노드의 유출 연결 가중치는 다음과 같이 산정된다.

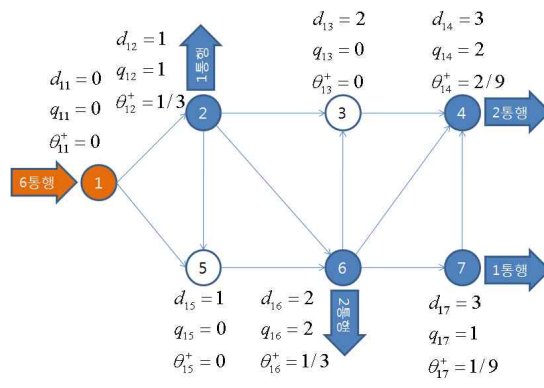
$$d_{1k} = [0, 1, 2, 3, 1, 2, 3]^T$$

$$q_{1k} = [0, 1, 0, 2, 0, 2, 1]^T$$

$$g_{1k} = [0, \frac{1}{1}, 0, \frac{2}{3}, 0, \frac{2}{2}, \frac{1}{3}]^T$$

$$\theta_{1k}^+ = [0, \frac{1}{3}, 0, \frac{2}{9}, 0, \frac{1}{3}, \frac{1}{9}]^T$$

통행수요가 없는 3번과 5번 노드의 연결 가중치는 0으



<그림 2> 연결 가중치 설정

로 산출되어 연계성 산정 대상에서 제외되고, 나머지 노드의 연결 가중치는 거리와 통행량에 따라 거리가 가깝고 통행량이 많을수록 크게 산정되었다.

3. 경로집합 생성 알고리즘

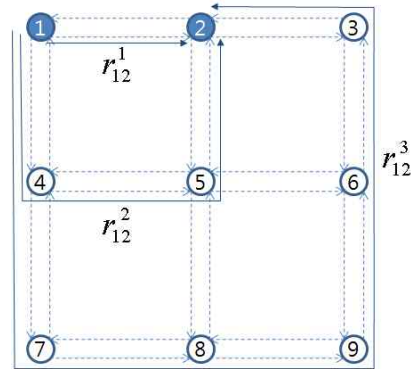
2절에서는 노드의 네트워크 연계성 산출 모형을 제시하고 모형에 사용되는 모든 변수와 계수들의 개념 및 산정 방법을 구체적으로 명시하였다. 그러나 두 노드를 연결하는 경로의 집합 R_{ab} 는 구체화하지 않았다. 경로의 수와 용량이 노드의 네트워크 연계성에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 경로 집합을 구체화하는 것이 연계성 산출 모형을 구체화하는데 가장 큰 비중을 차지한다고 볼 수도 있다. 여기서는 경로 집합을 생성하는 방법을 제시한다.

소규모 네트워크일 경우에는 노드 간 경로 집합을 구성하는데 큰 어려움이 없지만, 네트워크의 규모가 커짐에 따라 경로의 수는 기하급수적으로 증가하기 때문에 경로 집합 생성을 위한 알고리즘이 필요하다. 경로 집합 생성을 위한 알고리즘은 분석 목적에 따라 매우 다양하게 제시되어 있다. 본 연구에서는 노드 간 최대 용량을 확보하는 경로 집합을 찾는 것이 목적이므로 최대 유량(max flow)을 산출하는 고전적 알고리즘인 Ford-Fulkerson 알고리즘(1956)을 기반으로 한 아래의 경로 생성 알고리즘을 제시한다.

<노드 a에서 b로의 경로집합생성알고리즘>

- Step 1. (반복주기 i) 노드 간 최단시간경로 r_{ab}^i 탐색
- Step 2. $k = \operatorname{argmin}\{q_\ell, \ell \in r_{ab}^i\}$
- Step 3. q_k (즉, 경로 r_{ab}^i 를 구성하는 링크 중 여유용량이 최소인 링크의 용량)가 0이면 종료, 그렇지 않으면 경로 r_{ab}^i 를 경로집합 R_{ab} 에 포함
- Step 4. 경로 r_{ab}^i 의 모든 링크의 용량을 q_k 만큼 감소시키고 링크 k 의 통행시간은 ∞ 로 설정
- Step 5. $i = i + 1$ 그리고 Step 1로 돌아가서 반복함

<그림 3>에서 노드 1에서 노드 2로의 경로를 생각해보자. 경로 r_{12}^2 는 경로 r_{12}^1 과 중복되는 링크가 없으며 우회 정도가 심하지 않으므로 경로집합 R_{12} 에 포함시키는데 무리가 없다. 그러나 경로 r_{12}^3 은 경로 r_{12}^2 와 링크 (1,4)를 공유하고 있으며 우회 정도가 매우 커서 이를 경로집합 R_{12} 에 포함시키는 것이 적절인지 판단하기 어렵다. 물론 경로 r_{12}^2 의 최소용량이 링크 (1,4)의 용량에 의해 결정되면



<그림 3> 경로 제약조건 설정을 위한 예시

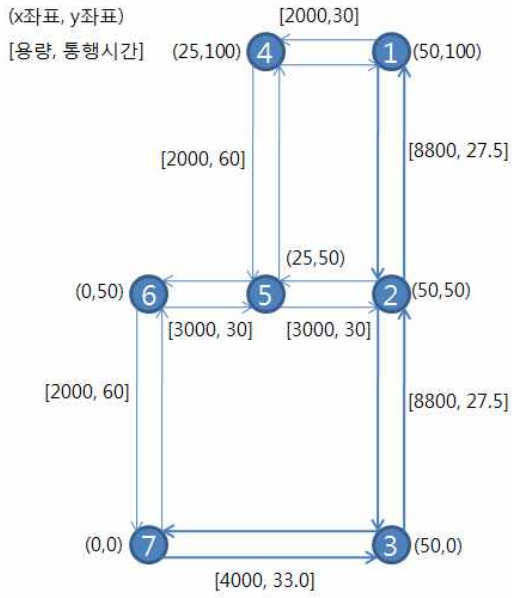
경로 r_{12}^3 은 탐색되지 않을 것이며, 탐색된다고 하더라도 우회 정도가 크기 때문에 T_{12}/T_{12}^3 의 값이 매우 작게 산출될 것이므로 CI_{12} 에 미치는 영향은 매우 작을 것이다. 즉, 일반적인 교통상황 하에서는 경로 r_{12}^3 을 선택하는 이용자가 거의 없을 것이기 때문에 일반적인 교통상황을 가정한 연계성 분석에서는 경로 r_{12}^3 을 경로집합에서 제외시키는 것이 바람직해 보인다. 또한 네트워크 규모가 커짐에 따라 경로의 수가 기하급수적으로 증가하기 때문에 결과에 미치는 영향이 매우 작은 수많은 경로들을 탐색하는데 소요되는 계산 시간을 감안하면 경로 집합을 한정하는 것이 바람직해 보인다.

그러나 일반적인 교통상황이 아닌 지진이나 홍수 등과 같은 자연재해로 인해 링크 (1,2)와 (5,2) 등이 단절된 상황을 가정해보면 경로 r_{12}^3 은 경로 집합 R_{12} 에 당연히 포함되어야 할 것이다. 즉, 경로집합의 구성은 분석의 목적에 따라 상이하므로 분석 목적에 무관한 일반적인 경로집합 생성 조건을 제시하기는 어려워 보인다. 따라서 분석 목적의 상이함과 분석 결과의 정밀도와 계산시간의 상호 대체관계를 고려할 수 있는 경로 집합 생성 제약조건이 필요하다.

경로의 제약조건은 여러 가지로 생각할 수 있으나 본 연구에서는 이상적인 최소 통행시간(T_{ab}^*)에 대한 경로의 통행시간(T_{ab})의 비율값에 대한 기준치를 사용하여 경로 집합 R_{ab} 를 식(7)과 같이 제한한다.

$$R_{ab} = \{r \mid T_{ab}/T_{ab}^* \geq \epsilon, 0 \leq \epsilon \leq 1\} \tag{7}$$

통행시간 비율의 기준치 ϵ 이 클수록 계산시간이 절약되



<그림 4> 가상 가로망

지만 결과의 정밀도가 낮아지는 반면, ϵ 이 작을수록 결과의 정밀도는 높아지지만 계산시간이 증가하게 된다. 계산시간과 결과의 정밀도는 분석의 목적에 따라 달라지므로 ϵ 은 분석자의 경험에 기반하여 조정하는 파라미터가 된다.

경로의 제약조건 (7)을 반영하여 수정된 경로 집합 생성 알고리즘은 다음과 같다.

<노드 a에서 b로의 경로집합생성수정알고리즘>

- Step 1. (반복주기 i) 노드 간 최단시간경로 r_{ab}^i 탐색
- Step 2. $T_{ab}/T_{ab}^{r_{ab}^i} < \epsilon$ 이면 종료, 아니면 Step 3으로 감
- Step 3. $k = \operatorname{argmin}\{q_k^i, \ell \in r_{ab}^i\}$
- Step 4. q_k^i (즉, 경로 r_{ab}^i 를 구성하는 링크 중 여유용량이 최소인 링크의 용량)가 0이면 종료, 그렇지 않으면 경로 r_{ab}^i 를 경로집합 R_{ab} 에 포함
- Step 5. 경로 r_{ab}^i 의 모든 링크의 용량을 q_k^i 만큼 감소시키고 링크 k의 통행시간은 ∞ 로 설정
- Step 6. $i = i + 1$ 그리고 Step 1로 돌아가서 반복함

IV. 도로 네트워크 연계성 평가 모형의 적용

3장에서 개발한 도로 네트워크의 연계성 평가 모형의 적용성과 결과의 적정성을 검증하기 위해 소규모 가상 가로망에 모형을 적용해보기로 한다. 모형 검증에 사용된 가

<표 2> 기준점 통행량(통행/일)

D \ O	1	2	3	4	5	6	7	합계
1	-	3,000	2,000	1,000	1,000	500	1,000	8,500
2	3,000	-	3,000	500	1,000	500	1,500	9,500
3	2,000	3,000	-	500	500	500	2,000	8,500
4	1,000	500	500	-	1,000	500	500	4,000
5	500	1,000	500	500	-	500	500	3,500
6	500	1,000	1,000	500	500	-	1,000	4,500
7	500	1,000	1,500	500	500	1,000	-	5,000
합계	7,500	9,500	8,500	3,500	4,500	3,500	6,500	43,500

<표 3> 유출 연결 가중치 θ^+

D \ O	1	2	3	4	5	6	7	합계
1	-	0.39	0.13	0.26	0.12	0.05	0.06	1.00
2	0.30	-	0.30	0.04	0.20	0.05	0.11	1.00
3	0.14	0.43	-	0.03	0.06	0.05	0.28	1.00
4	0.46	0.10	0.06	-	0.23	0.10	0.06	1.00
5	0.09	0.41	0.09	0.10	-	0.21	0.09	1.00
6	0.08	0.22	0.16	0.10	0.22	-	0.22	1.00
7	0.05	0.17	0.36	0.06	0.11	0.24	-	1.00

<표 4> 유입 연결 가중치 θ^-

D \ O	1	2	3	4	5	6	7	합계
1	-	0.30	0.14	0.52	0.15	0.10	0.09	
2	0.43	-	0.43	0.12	0.35	0.14	0.20	
3	0.14	0.30	-	0.06	0.08	0.10	0.38	
4	0.28	0.04	0.04	-	0.17	0.12	0.05	
5	0.06	0.20	0.06	0.13	-	0.27	0.09	
6	0.05	0.10	0.10	0.12	0.17	-	0.19	
7	0.03	0.07	0.22	0.06	0.08	0.27	-	
합계	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	

상 가로망은 <그림 4>와 같이 노드 7개, 링크 16개로 구성되어 있으며 기준점 간 통행량은 <표 2>와 같다. 링크의 최대 설계속도는 120km/h로 가정한다.

<표 3>과 <표 4>에는 노드 간 통행량과 거리를 바탕으로 식(6)에 의해 산출된 각 노드의 유출 및 유입 연결 가중치가 나타나있다. 네트워크의 링크는 방향별로 대칭이나 통행량이 양방향 비대칭이기 때문에 유출 연결 가중치와 유입 연결 가중치가 서로 상이하며, 통행수요가 많고 거리가 가까울수록 연결 가중치가 높게 산출된 것을 확인할 수 있다.

경로 집합 생성시 고려되는 통행시간 비율의 기준치 ϵ 을 0.2로 설정하여 노드 간 연계성 지수를 산출하였다. <그림 5>는 노드 5에서 노드 3으로의 연계성 지수 α_{53} 의 산출과정을 예시하고 있다. 최초 탐색된 경로 r_{53}^1 (5→2→3)의 통행시간 비율은 0.486으로 기준치인 0.2보다 크므로 경로 r_{53}^1 의 연계성 지수 1.458을 저장하고 링크의 용량과 통행시간을 갱신한다. 두 번째 탐색된 경로 r_{53}^2 (5

<표 5> 노드 간 연계성 지수 CI_{ab}

D \ O	1	2	3	4	5	6	7	합계
1	-	8,417	8,469	833	2,079	1,690	3,299	24,788
2	8,417	-	8,000	1,593	1,250	1,665	2,927	23,852
3	8,469	8,000	-	2,090	1,912	1,973	3,030	25,475
4	833	1,593	2,090	-	1,405	859	1,561	8,341
5	2,079	1,250	1,912	1,405	-	1,250	1,548	9,445
6	1,690	1,665	1,973	859	1,250	-	1,456	8,892
7	3,299	2,927	3,030	1,561	1,548	1,456	-	13,820
합계	24,788	23,852	25,475	8,341	9,445	8,892	13,820	114,613

→6→7→3)의 통행시간 비율은 0.227로 역시 기준치보다 크므로 경로 r_{53}^2 의 연계성 지수 454를 저장하고 링크의 용량과 통행시간을 갱신한다. 세 번째로 탐색된 경로 r_{53}^3 (5→4→1→2→3)은 통행시간 비율이 0.193으로 기준치보다 작으므로 경로집합에 포함될 수 없다. 이로써 CI_{53} 산출과정이 종료되고 CI_{53} 는 1,912으로 계산된다. 모든 노드 간 연계성 지수 산출 결과는 <표 5>와 같다. 네트워크의 링크가 방향별로 대칭이고 노드에서의 회전제약도 없기 때문에 노드 간 연계성 지수도 대칭적으로 산출된 것을 확인할 수 있다.

<표 5>의 노드 간 연계성 지수를 <표 3>과 <표 4>의 유출, 유입 연결 가중치로 각각 가중한 결과는 <표 6>과 <표 7>에 나타나 있다. <그림 6>은 연결 가중치에 따라 <표 5>의 결과가 <표 6>과 <표 7>과 같이 변화하는 과정을 예시한다. 노드 1의 경우 노드 2와 노드 3으로의 연계성 지수 CI_{ab} 가 비슷하게 계산되었다. 하지만 연결 가중치는 가깝고 통행량이 많은 노드 2가 높기 때문에 노드 2로의 가중 연계성 지수 $\theta_{ab} CI_{ab}$ 가 노드 3으로의 가중 연계성 지수보다

<표 6> $\theta_{ab}^+ CI_{ab}$

D \ O	1	2	3	4	5	6	7	합계
1	-	3,281	1,101	217	242	78	192	5,110
2	2,523	-	2,398	71	250	83	310	5,635
3	1,202	3,407	-	72	121	99	860	5,763
4	381	163	116	-	321	88	86	1,154
5	192	516	177	145	-	258	143	1,431
6	133	369	309	85	277	-	323	1,497
7	179	502	1,103	92	168	353	-	2,398

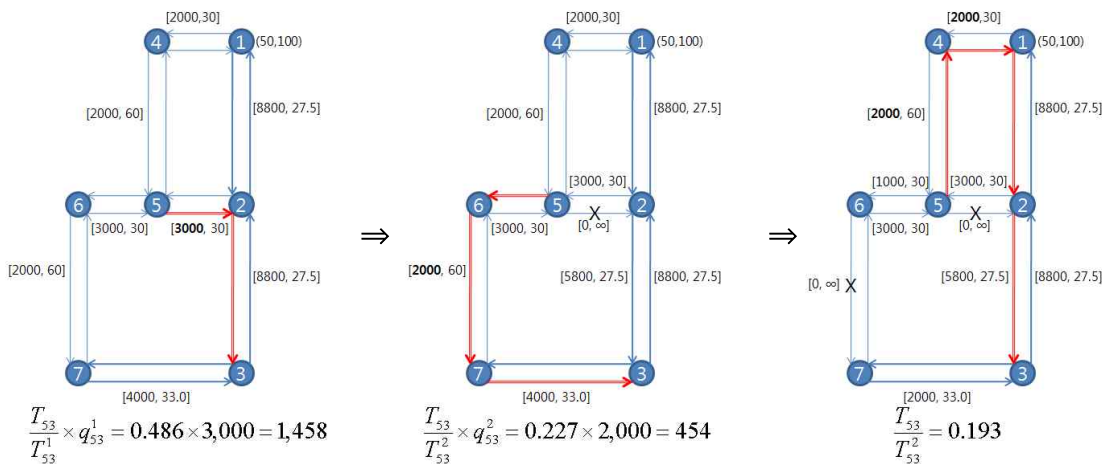
<표 7> $\theta_{ab}^- CI_{ab}$

D \ O	1	2	3	4	5	6	7
1	-	2,487	1,228	430	321	164	284
2	3,595	-	3,480	184	432	228	597
3	1,206	2,364	-	131	148	191	1,166
4	237	70	73	-	243	105	73
5	132	246	124	181	-	342	133
6	85	164	202	99	216	-	280
7	105	204	659	98	120	388	-
합계	5,360	5,534	5,767	1,122	1,479	1,428	2,533

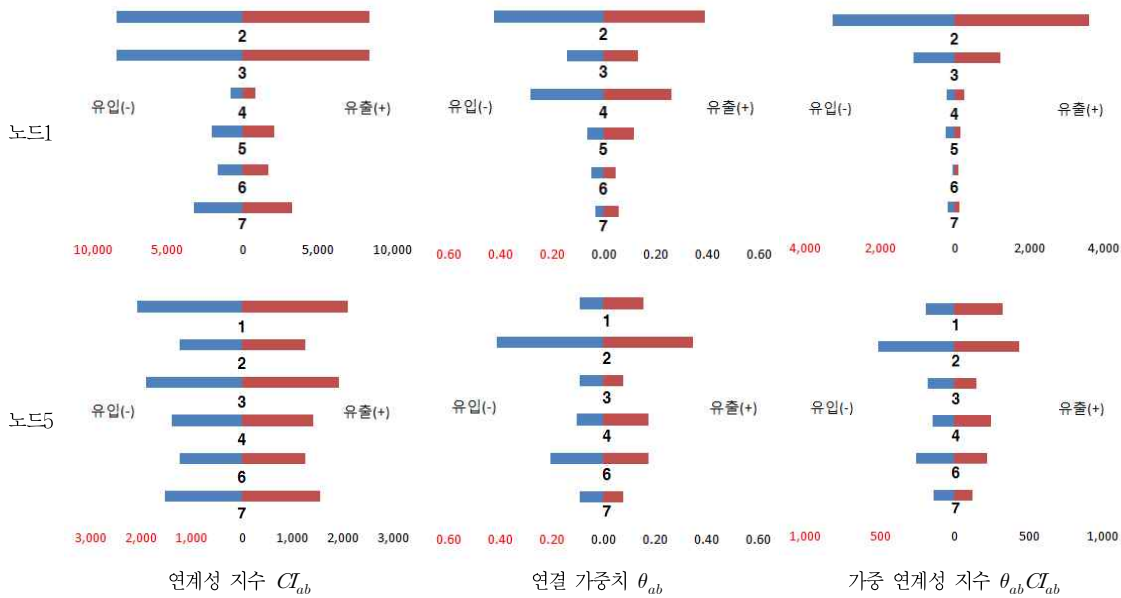
<표 8> 노드의 연계성 지수 CI_a

노드	CI_a^+	CI_a^-	CI_a
1	5,110	5,360	5,235
2	5,635	5,534	5,585
3	5,763	5,767	5,765
4	1,154	1,122	1,138
5	1,431	1,479	1,455
6	1,497	1,428	1,462
7	2,398	2,533	2,465

높게 나타나고 있다. 또한 노드 7로의 연계성 지수는 다소 높게 계산되지만 노드 1로부터 멀리 떨어져 있기 때



<그림 5> 경로 생성 및 CI_{53} 산출 과정



<그림 6> 연결 가중치에 따른 가중 연계성 지수 산출 결과

문에 연결 가중치가 낮아 가중 연계성 지수 역시 낮게 산출된다.

노드 5의 경우는 모든 노드로의 연계성 지수가 비슷하게 계산되었지만, 거리와 통행량에 따라 연결 가중치가 다르게 산출되어 가중 연계성 지수는 연결 가중치의 영향을 크게 받은 것을 알 수 있다. 예를 들어 노드 1로의 연계성 지수가 노드 2로의 연계성 지수보다 크지만 연결 가중치는 가까운 노드인 노드 2가 높아 가중 연계성 지수도 노드 2가 노드 1보다 크게 산출된 것을 확인할 수 있다.

<표 8>은 최종적인 각 노드의 연계성 지수를 보여주고 있다. 노드 3의 연계성 지수가 5,765로 가장 높고 노드 2, 노드 1, 노드 7이 그 뒤를 따르고 있다. 통행속도가 빠르고 용량이 큰 링크로 연결될수록 연계성 지수가 높게 산출되어 본 연구에서 정의한 연계성의 개념을 적절하게 반영하고 있다고 판단된다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 교통 네트워크에서 연계성의 개념을 구체화하고 노드의 네트워크 연계성을 정의하였다. 정의에 따라 노드의 연계성을 정량적으로 측정할 수 있는 모형을 개발하였고, 새로운 경로 집합 생성 알고리즘을 사용하여 노드의 연계성 지수를 산출하는 방법론을 제시하였다. 모형과 방법론을 검증하기 위해 가상 가로망에 적용한 결과 본 연

구에서 개발한 모형이 적절한 결과를 산출하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 분석 대상을 도로 네트워크로 한정하였다. 그러나 통합교통체계 분석을 위해서는 도로 네트워크 뿐만 아니라 철도를 포함한 대중교통 네트워크도 포괄해야 한다. 서론에서 언급한 바와 같이 대중교통 네트워크는 도로 네트워크와 특성이 다르기 때문에 동일한 분석 틀을 적용하는데 한계가 있다. 그러나 대중교통 중에서 철도의 경우는 도로 네트워크와 같이 물리적으로 고정된 네트워크 시설을 사용하기 때문에 본 연구의 연계성 분석 모형을 적용하는 것이 불가능한 것은 아니다. 그러나 본 연구에서 제시한 연계성 분석 모형을 철도 네트워크를 포함한 통합 교통 네트워크로 확장시키기 위해서는 통행의 단위를 통일시키는 것과 철도 링크의 용량 산정 문제를 해결해야 한다. 도로 네트워크에서 통행의 단위는 승용차 환산 차량수인 반면, 철도 네트워크에서는 여객은 통행자 수, 화물은 톤이 될 것이기 때문에 분석의 단위가 다른 문제가 있다. 또한 철도 링크의 용량은 도로 링크의 용량과 같이 단순히 산정되지 않는다. 왜냐하면 철도 링크의 용량은 운영조건에 따라 상이하므로 네트워크 내의 타 링크에 의한 영향을 크게 받기 때문이다. 이와 같은 두 가지 문제를 해결하면 본 연구에서 개발한 연계성 분석 모형은 철도 네트워크를 포함한 통합 교통 네트워크에도 충분히 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 국토해양부(2008), 교통체계효율화법 전부 개정(안) 입법예고.
2. 국토해양부(2009), 국가통합교통체계효율화법.
3. 정성봉·박준식(2009), 지속가능발전을 위한 교통 SOC 투자평가방법 개선 연구, 한국교통연구원.
4. Bell, M.G.H.(2000), "A game theory approach to measuring the performance reliability of transportation networks", Transportation Research Part B, 34, pp.533~545.
5. Bonacich, P.(1972), "Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification", Journal of Mathematical Sociology, 2, pp.113~120.
6. Borgatti, S.P. and Everett, M.G.(1997), "Network analysis of 2-mode data", Social Networks, 19, pp.243~269.
7. Chen, A., Yang, H., Lo, H.K. and Tang,

- W.(2002), "Capacity reliability of a road network: An assessment methodology and numerical results", Transportation Research Part B, 36, pp.225~252.
8. Ford, L.R. and Fulkerson, D.R.(1956), "Maximal flow through a network", Canadian Journal of Mathematics 8, pp.399~404.
9. Freeman, L.C.(1979), "Centrality in networks: I. Conceptual clarification", Social Networks, 1, pp.215~239.
10. Morlok, E.K. and Chang, D.J.(2004), "Measuring capacity flexibility of a transportation system", Transportation Research Part A, 34, pp.125~136.

✉ 주 작성자 : 박준식
 ✉ 교신저자 : 강성철
 ✉ 논문투고일 : 2010. 3. 19
 ✉ 논문심사일 : 2010. 6. 14 (1차)
 2010. 8. 13 (2차)
 ✉ 심사판정일 : 2010. 8. 13
 ✉ 반론접수기한 : 2010. 12. 31
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필