

가중 방향성 네트워크에서 삼각매개중심성의 측정 방법*

Triangle Betweenness Centrality in Weighted Directed Networks

이재윤 (Jae Yun Lee)**

초 록

이 연구에서는 도서관 상호대차나 물류교통 네트워크처럼 링크에 방향성과 가중치 정보가 모두 포함되는 네트워크를 분석하기 위해서 방향성 네트워크에 적용할 수 있는 새로운 전역중심성 지수를 개발하고자 하였다. 이런 경우 기존에는 가중 페이지랭크가 주로 사용되어왔지만 실험 데이터에 대해 적용해본 결과 가중 페이지랭크는 지역중심성을 측정하는 이웃중심성과 유사한 결과를 보였다. 가중 네트워크를 위한 전역중심성 지수인 삼각매개중심성은 링크의 방향을 고려하지 못하는 한계가 있다. 따라서 기존의 삼각매개중심성 지수를 변형하여 신뢰 네트워크에 적용할 수 있는 삼각매개중심성-T(TBC-T)와 흐름 네트워크에 적용할 수 있는 삼각매개중심성-F(TBC-F)를 개발하였다. 도서관 상호대차 네트워크 두 가지를 대상으로 지수 산출 실험을 수행해본 결과, TBC-T 지수는 내향 링크의 가중치만 반영하고 TBC-F 지수는 내향 링크와 외향 링크의 가중치를 모두 반영하는 특성을 확인할 수 있었다. 새로 개발된 TBC-T와 TBC-F는 가중 방향성 네트워크에서 노드의 전역중심성을 측정하기 위한 지수로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

ABSTRACT

This study aims to develop novel centrality measures applicable to networks that include both directional and weighted information, such as interlibrary loan networks and logistics transportation networks. While weighted PageRank has traditionally been used in such cases, experimental results reveal that it yields similar outcomes to neighborhood centrality, which measures local centrality. However, triangle betweenness centrality (TBC), despite assessing global centrality in weighted networks, does not consider link directions. To address these limitations, we propose two modified versions of the existing TBC measure: TBC-T for trust networks and TBC-F for flow networks. Applying these measures to two interlibrary loan networks, we find that TBC-T considers only the weights of inlinks, while TBC-F incorporates both inlink and outlink weights. These newly developed measures are expected to be useful for measuring node global centrality in weighted directed networks.

키워드: 가중 방향성 네트워크, 중심성 지수, 가중 네트워크, 방향성 네트워크, 삼각매개중심성, 전역중심성
weighted directed networks, centrality measure, weighted networks, directed networks,
triangle betweenness centrality, global centrality

* 이 논문은 2023년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(NRF-2023S1A5A2A03085177).

이 연구에서 사용한 데이터와 중심성 지수 측정 프로그램은 저자에게 이메일을 통해 요청하면 제공할 수 있으며, 프로그램은 cafe.daum.net/wnets에서 다운받을 수도 있음.

** 명지대학교 문헌정보학과 교수(memexlee@mju.ac.kr)

■ 논문접수일자: 2024년 8월 29일 ■ 최초심사일자: 2024년 9월 17일 ■ 게재확정일자: 2024년 9월 17일
■ 정보관리학회지, 41(3), 511-533, 2024. <http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2024.41.3.511>

※ Copyright © 2024 Korean Society for Information Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>) which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided that the article is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

1. 서론

가중 네트워크는 네트워크를 구성하는 링크의 강도가 동일하지 않고 차이를 가질 수 있는 네트워크이다. 실세계의 네트워크에서 링크의 중요도는 서로 완전히 동일하지 않은 것이 사실이지만 네트워크로 모형화하여 분석할 때에는 문제를 단순화하기 위해서 가중치가 없는 이진 네트워크로 다루는 경우도 흔하다. 그러나 링크의 가중치를 무시하는 것은 어느 정도의 정보 손실을 가져오게 되므로 현실 세계를 제대로 반영하지 못하게 된다. 특히 인용 데이터와 같은 계량서지적 데이터는 인용빈도나 출현빈도와 같은 정보가 중요한 의미를 담고 있으므로 가중 네트워크로 표현할 필요가 크다. 이에 따라서 네트워크의 링크 가중치를 고려할 수 있는 방법들이 개발되어서 활용되고 있다(이재운, 2006a; Opsahl, 2010; Xing & Ghorbani, 2004). 국내 네트워크 분석 논문을 수집하여 내용분석한 정은경(2021)은 논문 데이터를 대상으로 하여 가중 비방향 네트워크를 형성하는 것이 가장 일반적이라고 하였다.

가중 네트워크에서 노드의 중요도를 측정하는 중심성 지수 중에서 계량서지 데이터에 자주 적용되고 있는 지수로는 전역중심성을 측정하는 삼각매개중심성 지수(이재운, 2006a)와 지역중심성을 측정하는 이웃중심성 지수(이재운, 2015)가 있다. 특히 삼각매개중심성은 단어동시출현분석, 공동연구 네트워크, 교통 물류 네트워크 등 다양한 경우에 적용되고 있다.

그런데 이외에 도서관 상호대차 네트워크나 학술지 상호인용 네트워크는 가중 네트워크임에도 불구하고 삼각매개중심성을 적용한 사례

가 없었다. 상호대차 네트워크를 이진 네트워크로 변환하여 분석하거나(박영애, 이재운, 2010; 유종덕, 2013; 최원실, 정은경, 2019) 학술지 상호인용 횟수를 합산한 값을 이용해서 비방향성 관계로 변환하여 분석해왔다(Klavans & Boyack, 2006; Zhang et al., 2009). 교통물류 네트워크에서도 방향성 관계를 비방향성 관계로 변환하여 삼각매개중심성을 적용하고 있다(Chung et al., 2020; Qi & Kwon, 2021). 이처럼 가중 방향성 네트워크를 이진 네트워크로 변환하거나 비방향성 가중 네트워크로 변환하여 분석하는 것은 데이터에 담긴 가중치나 방향성 정보 중 일부를 누락한다는 점에서 불완전한 분석에 그치게 된다. 물론 학술지 상호인용 네트워크나 교통물류 네트워크는 두 노드가 주고받는 가중치 차이가 크지 않은 것이 보통이므로 비방향성 관계로 변환하는 것이 큰 문제가 아닐 수도 있다. 그러나 도서관 상호대차와 같이 요청하는 측과 제공하는 측이 비대칭적인 관계일 경우에는 방향성 정보를 보존한채로 가중 네트워크 분석을 수행하는 것이 바람직하다.

따라서 이 연구에서는 비방향성 중심성 지수인 삼각매개중심성 지수를 가중 방향성 네트워크에 적용할 수 있도록 개선하여 새로운 지수를 제안하는 것을 목표로 한다. 새로 개발하는 지수를 도서관 상호대차 네트워크에 적용해보고 그 특징을 다른 가중 방향성 중심성 지수와 비교하여 살펴보기로 한다. 비교 대상에는 가중 페이지랭크(Xing & Ghorbani, 2004), 이웃중심성(이재운, 2015), 가중 매개중심성과 가중 근접중심성(Opsahl, 2010) 지수를 포함하였다. 분석 대상으로는 선행 연구(박영애, 이재운, 2010; 유종덕, 2013)에서 사용된 상호대차

데이터를 사용하였다.

2. 가중 네트워크 중심성 분석 선행연구

링크에 가중치가 있는 가중네트워크를 위한 중심성 지수로는 페이지랭크를 변형해서 링크 가중치를 고려한 가중페이지랭크(Xing & Ghorbani, 2004), 동시인용이나 서지결합과 같은 계량서지 네트워크를 고려해서 개발된 삼각매개중심성(이재운, 2006a)과 이웃중심성(이재운, 2015), 전통적인 이진네트워크 중심성 지수를 변형해서 경로를 구성하는 링크들의 가중치를 고려할 수 있도록 고안한 가중 연결중심성, 가중 매개중심성, 가중 근접중심성(Opsahl, 2010) 등이 있다.

이중에서 가중 연결중심성은 노드로 들어오거나 나가는 링크의 가중치의 합계인 노드 강도(node strength)에 기반한 산출방식이고 링크 가중치의 평균으로 측정하는 평균연관성(이재운, 2006a)과도 거의 같은 지수이다(이재운, 2013). 이 유형의 지수들은 네트워크 구조를 반영하지 못한다. 예를 들어 공동연구 네트워크에서 노드 강도가 10일 경우, 공동연구한 상대가 10명인지 아니면 한 명과 10회 공동연구한 것인지를 구분하지 못한다. 따라서 네트워크 구조를 고려하지 않는 이런 중심성 지수들은 별도로 실험에 포함하지 않고 내향 연결 가중치 합계(상호대차의 경우 총 상호대차 제공 건수)와 외향 연결 가중치 합계(상호대차의 경우 총 상호대차 요청 건수)를 네트워크에서 측정하여 간접적으로 비교하였다.

가중 네트워크에서 노드의 중요도를 측정하는 중심성 지수 중에서 계량서지 데이터에 적용되고 있는 지수로는 전역중심성을 측정하는 삼각매개중심성 지수와 지역중심성을 측정하는 이웃중심성 지수(이재운, 2015)가 있다. 특히 삼각매개중심성은 단어동시출현 네트워크(이혜경, 이용구, 2023; 최상희, 2023; 최예진 외, 2023), 키워드 서지결합 네트워크(이재운, 정은경, 2022), 저자서지결합 네트워크(오현정, 이찬구, 2021), 저자프로파일링 네트워크(Park, 2022), 공동연구 네트워크(이재운, 2014), 학술지 동시인용 네트워크(유소영, 이재운, 2008), 고속철도 네트워크(Qi & Kwon, 2021), 항공운송 네트워크(Chung et al., 2020; Qi & Kwon, 2021) 등 다양한 경우에 적용되고 있다.

하지만 문헌정보학 분야의 네트워크 중에서 링크에 방향성과 가중치가 모두 존재하는 대표적인 네트워크인 도서관 상호대차 네트워크와 학술지 상호인용 네트워크에 대해서 가중치와 방향성을 모두 고려하는 분석을 수행한 경우는 없었다. 대학도서관 상호대차 네트워크를 분석한 최원실과 정은경(2019)은 연간 30회 이상의 상호대차가 있는 경우만 링크를 형성하여 가중네트워크를 이진 네트워크로 변환한 후 기관과 지역의 방향성 매개중심성과 방향성 근접중심성, 페이지랭크를 측정하였다. 링크의 방향성은 보존하였지만 가중치에 담긴 정보는 대부분 누락한 채 분석한 경우이다. 경기도 기초자치단체 사이의 도서관 상호대차 네트워크를 분석한 유종덕(2013)은 중심성 지수를 적용하지 않고 상호대차 건수 기준을 75회부터 200회까지 단계적으로 높이면서 시각적으로 네트워크 구조의 변화를 살펴보는데 그쳤다. 또한 경기도 A

시에 소개한 17개 도서관 사이의 상호대차 관계를 분석한 박영애와 이재윤(2010)도 상호대차 의존도 공식을 적용하여 값이 0.03 이상인 경우만 링크를 표시하여 시각적인 분석을 하는데 그쳤다. A 도서관의 B 도서관에 대한 상호대차 의존도는 A 도서관이 B 도서관에 요청한 건수를 분자로 하고 A 도서관의 총 요청건수와 B 도서관의 총 제공건수의 기하평균으로 나누어 정규화해서 산출한다. 따라서 링크 강도와 방향성을 보존하는 공식이지만 이 상호대차 의존도를 방향성 가중치로 삼은 중심성 분석은 이루어지지 않았다. 이처럼 상호대차 네트워크를 분석한 선행연구들은 모두 특정한 기준값을 적용하여 이진 방향성 네트워크로 변환한 후 분석하고 있다.

상호대차에 참여한 도서관들의 전체 연결 구조를 다루지 않고 한 도서관 중심의 예고 네트워크를 분석한 사례로 육지혜 외(2015)가 있다. 이들은 S 대학도서관이 다른 4개 대학도서관과 주고받은 상호대차 데이터를 분석하면서 공동연구를 위해 개발된 col-hs-지수(Lee & Choi, 2013)를 응용하여 두 기관 사이에 여러 주제에 걸쳐서 상호대차가 이루어지는가를 측정하였다. 이를 통해서 방향성과 가중치를 모두 고려하였다. 그런데 5개 도서관 사이의 전체 네트워크가 아닌 S 대학도서관 중심의 예고 네트워크만 시각화하여 분석하는 것에 그쳤다.

학술지 상호인용 네트워크를 분석하는 연구들은 가중 페이지랭크를 적용하는 경우를 제외하면 방향성 정보를 누락하고 비방향성 네트워크로 변환하여 분석하는 경우가 많았다. 이재윤(2011b)은 국내 인용 데이터베이스인 한국과학기술정보연구원의 KSCD를 대상으로 가

중 페이지랭크 공식을 변형하여 적용하는 방안을 연구하였다. 이 경우는 가중 페이지랭크 공식을 사용함으로써 방향성과 가중치를 모두 반영하는 분석을 수행하는 효과를 얻었다. 유소영과 이재윤(2008)은 Y대학교 생명시스템대학 생명공학과 전·현직 교수진이 2006년과 2007년에 발표한 학술논문의 인용 네트워크를 분석하면서 학술지 사이의 상호인용네트워크를 구축하였으나 시각적으로만 분석하였고, 동시인용네트워크를 별도로 구축하여 삼각매개중심성, 가중페이지랭크 등의 지표를 측정하였다. 또한 삼각매개중심성을 사용하지 않았지만 다른 방법으로 학술지 상호인용 네트워크를 분석하는 연구(Klavans & Boyack, 2006; Zhang et al., 2009)들도 상호 간 인용횟수를 합산한 값을 이용해서 비방향성 관계로 변환하여 분석하였다.

계량서지 데이터 이외에 대표적인 가중 방향성 네트워크로는 물류나 교통 네트워크, 또는 소통 네트워크를 들 수 있다. 컨테이너항만 네트워크가 항만 생산성에 미치는 영향에 대해 연구한 임병학(2011)과 항로수를 기준으로 국내 주요 항만의 물류 네트워크 변화를 분석한 손유미와 김화영(2023)은 가중 네트워크를 구축했음에도 불구하고 매개중심성이나 근접중심성과 같은 이진네트워크 중심성 지수를 측정하는데 그쳤다. 정부 부처 간의 문서 수발 네트워크를 분석한 박치성 외(2011)도 부처 간 문서 수발량의 중앙값 이상인 링크만 활성화하는 방법을 적용하여 가중 방향성 네트워크를 이진 방향성 네트워크로 변환하여 내향연결정도 중심성과 매개중심성을 측정하였다. 철도와 항공 운송 네트워크를 분석한 Qi와 Kwon(2021)은

두 도시 사이에 오가는 승객수를 합산하여 비방향성 네트워크로 만든 후 삼각매개중심성을 측정함으로써 방향성 정보를 제외하였다. 가중 방향성 네트워크에 해당하는 네트워크 중에서 물류/운송 네트워크나 학술지 상호인용 네트워크는 보통 보내는 링크 가중치와 받는 링크 가중치의 차이가 크지 않다. 두 도시나 공항 간 교통량은 일방적으로 한 방향으로 치우치지 않고 비슷한 규모로 오가기 때문이다. 학술지 간에도 많이 인용하는 학술지로부터 많은 인용을 받는 것이 일반적이다. 이런 경우에는 가중 방향성 관계를 가중 비방향성 관계로 단순화하더라도 상실되는 정보가 비교적 크지 않다. 이와 달리 도서관 상호대차 관계는 상호 호혜적이기 보다는 일방적으로 요청하는 도서관과 제공하는 도서관의 입장으로 구분되는 경우가 많으므로 링크의 방향 정보를 제거함으로써 감수해야 하는 손실이 더 크다.

반면에 전역중심성이 아닌 지역중심성은 비교적 쉽게 방향성 가중 네트워크에 적용할 수 있다. 단순히 들어오거나 나간 링크의 가중치를 합산하는 방식으로 가중 연결정도 중심성을 측정하면 되기 때문이다. 대학 학과 간 복수전공 네트워크(조장식, 2012), 축구경기 패스 네트워크(최승배 외, 2011), 산업부문간 네트워크(한지혜 외, 2016) 등에서는 이런 방식으로 가중 연결정도중심성만 측정하고 전역중심성 지수는 측정하지 않았다. 또한 가중네트워크를 위한 지역중심성 지표인 이웃중심성 지수(이재윤, 2015)도 방향성 네트워크에 그대로 적용할 수 있다.

따라서 이 연구에서는 전역 중심성 지수인 삼각매개중심성 지수를 변형하여 링크의 방향

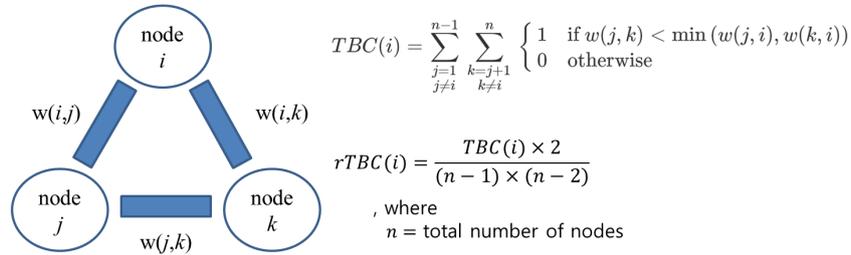
정보와 가중치 정보를 모두 고려하는 전역중심성 지수를 개발하고, 이를 기존의 가중방향성 전역중심성 지수인 가중페이지랭크, 가중매개중심성, 가중근접중심성, 그리고 기존의 가중방향성 지역중심성 지수인 이웃중심성과 비교해보기로 한다.

3. 방향성을 고려한 삼각매개중심성 지수 변형

3.1 삼각매개중심성의 개념과 측정방식

방향성을 고려하지 않는 기존의 삼각매개중심성(TBC로 약칭)은 다음 그림으로 설명할 수 있다. 노드 i 의 삼각매개중심성 $TBC(i)$ 는 자신을 제외한 임의의 두 노드 j 와 k 사이의 링크 가중치 $w(j,k)$ 보다 각자와의 링크 가중치 $w(i,j)$, $w(i,k)$ 가 모두 더 큰 경우의 수를 의미한다. 이는 노드 j 와 k 사이의 관계가 가깝지 않더라도 이들 각자와 더 가까운 노드 i 가 둘 사이를 매개해 줄 수 있는 경우의 수를 세는 것이다. 삼각매개중심성의 가능한 최댓값은 전체 노드의 수가 n 개일 경우 $(n-1)(n-2)/2$ 가 되며, 가능한 최댓값으로 삼각매개중심성을 나누어서 0에서 1 사이의 값으로 정규화한 상대적 삼각매개중심성 $rTBC$ 를 산출할 수 있다(이재윤, 2006a).

방향성을 고려하도록 삼각매개중심성을 변형할 때에는 가중네트워크의 성격에 따라 두 가지로 나누어 접근해볼 수 있다. 첫째는 신뢰 정도를 반영하는 신뢰 네트워크(trust network)인 경우를 전제로 하는 경우이고, 둘째는 사람이나 물류 등이 이동하는 흐름 네트워크(flow



$$TBC(i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} \sum_{\substack{k=j+1 \\ k \neq i}}^n \begin{cases} 1 & \text{if } w(j, k) < \min(w(j, i), w(k, i)) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$rTBC(i) = \frac{TBC(i) \times 2}{(n-1) \times (n-2)}$$

, where
 n = total number of nodes

〈그림 1〉 삼각매개중심성 산출 공식

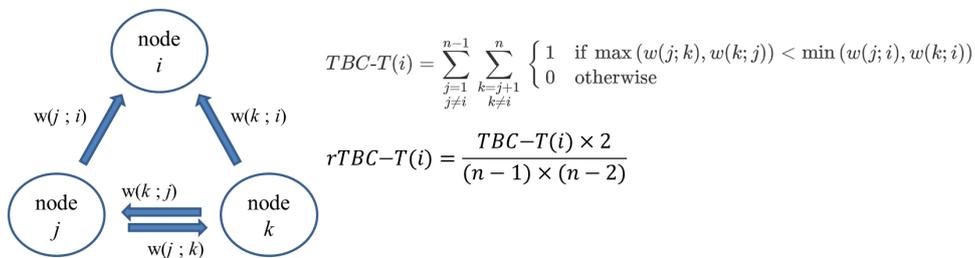
network)를 전제로 하는 경우이다. 동일한 네트워크일지라도 주로 받는 입장(내향 링크)에 해당하는 신뢰 관계를 가정한 경우와, 주고 받는 입장(외향과 내향 링크)에 해당하는 흐름 관계를 가정한 경우에 개별 노드의 입지는 다르게 해석될 수 있으므로 두 관점에 해당하는 지표를 각각 개발하고자 하였다.

3.2 신뢰 네트워크에서 방향성을 고려한 삼각매개중심성 측정

신뢰 네트워크는 노드 사이의 신뢰 관계로 구성된 사회 네트워크이며(Zhang & He, 2013) 판단하는 주체인 신뢰하는 측(trustor)으로부터 판단 대상인 신뢰받는 측(trustee)으로 이어지는 방향성 관계로 구성되어 있다(Yuan et

al., 2011). 신뢰 네트워크는 구조가 일반적으로 계층적이기보다는 뒤얽힌 형태이기 때문에 신뢰망(Web of Trust)이라고도 불린다. 소셜미디어, 전자상거래, 네트워크 보안 등 온라인 공간의 다양한 영역에서 신뢰 네트워크가 중요하게 탐구되고 있다.

한 노드가 다른 노드를 신뢰하는 정도를 반영한 가중 방향성 신뢰 네트워크에서 측정하는 삼각매개중심성은 삼각매개중심성-T(Triangle Betweenness Centrality-T)라고 부르며 TBC-T로 약칭하기로 한다. 노드 *i*의 TBC-T는 자신을 제외한 임의의 두 노드 *j*와 *k*가 각자 노드 *i*를 신뢰하는 값 $w(j;i)$ 와 $w(k;i)$ 중 최솟값이, *j*와 *k*가 서로를 신뢰하는 양방향 값 $w(k;j)$ 와 $w(j;k)$ 중 큰 값보다 더 큰 경우의 수로 측정한다(〈그림 2〉 참조). 이는 노드 *j*와 *k*가 서로



$$TBC-T(i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} \sum_{\substack{k=j+1 \\ k \neq i}}^n \begin{cases} 1 & \text{if } \max(w(j; k), w(k; j)) < \min(w(j; i), w(k; i)) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$rTBC-T(i) = \frac{TBC-T(i) \times 2}{(n-1) \times (n-2)}$$

〈그림 2〉 가중 방향성 신뢰 네트워크 상황에서의 삼각매개중심성 TBC-T 산출 공식

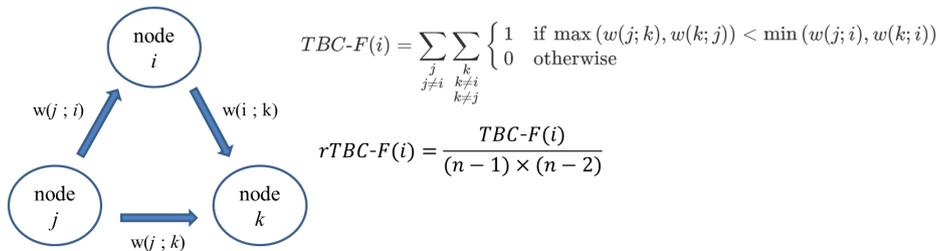
를 신뢰하는 정도보다 이들이 노드 i 를 더 신뢰한다면 노드 i 가 둘 사이를 매개해 줄 수 있다고 보는 것이다. TBC-T의 가능한 최댓값은 전체 노드의 수가 n 개일 경우 $(n-1)(n-2)/2$ 가 되며, 이 최댓값으로 TBC-T를 나누어서 0에서 1 사이의 값으로 정규화한 상대적 삼각매개중심성-T($rTBC-T$)를 산출한다.

3.3 흐름 네트워크에서 방향성을 고려한 삼각매개중심성 측정

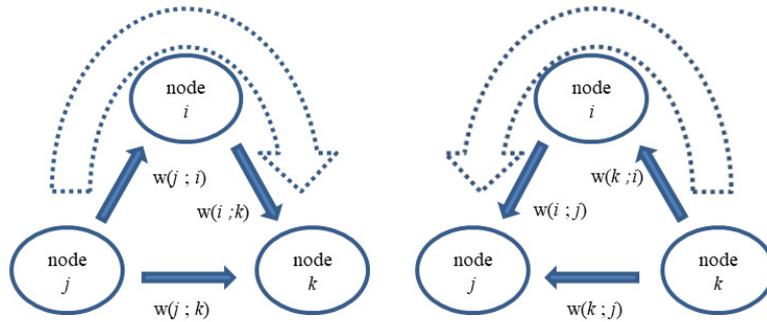
흐름 네트워크는 두 노드 사이에 사물의 물리적인 이동 혹은 지식이나 감정과 같은 추상적인 개념의 전달이 발생하는 네트워크이다. 그래프 이론에서 네트워크 흐름(network flow) (Ahuja, 1993)이라는 용어로 오랫동안 다루어져왔다. 자연계에서 사물의 흐름은 높은 곳에서 낮은 곳을 향하여 발생하기 마련이므로 흐름 네트워크는 신뢰 네트워크와 달리 계층 구조를 보이는 경우도 종종 있다. 흐름 네트워크는 오래 전부터 교통, 물류, 통신, 전기, 유체흐름 등 현실 세계의 물리 현상을 다루는 다양한 영역에서 탐구되어 왔으며 지식의 전달과 같은 개념적인 흐름을 분석할 경우에 적용되기도 한다. 신뢰 관계는 상호 호혜적인 경우도

흔하지만 흐름 관계는 비대칭적인 경우가 상대적으로 더 자주 보이므로 흐름 네트워크에서 방향성을 고려하는 것이 더 중요한 문제라고 할 수 있다.

두 노드 사이의 흐름 강도를 반영한 가중 방향성 흐름 네트워크에서 측정하는 삼각매개중심성을 삼각매개중심성-F(Triangle Betweenness Centrality-F)라고 부르고 TBC-F로 약칭하기로 한다. 노드 i 의 TBC-F는 자신을 제외한 임의의 노드 j 에서 k 로 이동하는 흐름의 강도 $w(j;k)$ 보다 j 에서 i 를 거쳐 k 로 이동하는 경로의 흐름 강도 $w(j;i)$ 와 $w(i;k)$ 가 모두 더 큰 경우의 수로 측정한다(〈그림 3〉 참조). 이는 노드 j 에서 k 로 바로 이동하는 경로보다 j 에서 i 를 거쳐 k 로 이동하는 경로가 더 효율적일 때 노드 i 가 j 와 k 사이를 매개해 줄 수 있다고 보는 것이다. 실제 측정할 때에는 j 와 k 사이의 흐름이 양방향이므로 〈그림 4〉와 같이 j 에서 k 로 이동하는 경우인 $w(j;k)$ 만 아니라 k 에서 j 로 이동하는 경우인 $w(k;j)$ 도 별도로 고려하게 된다. TBC-F의 가능한 최댓값은 전체 노드의 수가 n 개일 경우 $(n-1)(n-2)$ 가 되며, 이 최댓값으로 TBC-F를 나누어서 0에서 1 사이의 값으로 정규화한 상대적 삼각매개중심성-F($rTBC-F$)를 산출한다.



〈그림 3〉 가중 방향성 흐름 네트워크 상황에서의 삼각매개중심성 TBC-F 산출 공식



〈그림 4〉 흐름 네트워크에서 쌍방향 매개 여부 점검 개념도

결과적으로 TBC-T를 측정할 때에는 노드로 들어오는 링크의 강도 위주로 산출하게 되고 TBC-F를 측정할 때에는 들어오는 링크와 나가는 링크의 강도를 모두 고려하여 산출하게 된다.

4. 실험 데이터 및 측정 지수

링크의 가중치와 방향을 모두 고려하도록 제안된 TBC-T와 TBC-F를 다른 가중 방향성 중심성 지수와 비교해보기 위해서 상호대차 네트워크에 적용하는 실험을 준비하였다. 상호대차 네트워크는 문헌정보학 분야의 가중 방향성 네트워크 중에서 노드 사이의 상호 관계가 비교적 대칭적이지 않은 네트워크이고, 여러 선행 연구(박영애, 이재윤, 2010; 유종덕, 2013)에서 방향성을 고려한 중심성 분석이 이루어지지 못했던 네트워크이므로 이를 실험 대상으로 선택하였다.

상호대차 네트워크는 한 도서관에서 다른 도서관으로 도서가 대출되는 것이므로 일종의 흐름 네트워크에 해당하지만, 상호대차로 대출된

도서는 다시 되돌아기 마련이어서 여러 단계로 이동이 이루어지는 완전한 흐름 네트워크와는 차이가 있다. 상호대차를 신청하는 도서관이 도서를 대출해주는 상대방 도서관에 의존하는 의존관계이므로 어떤 면에서는 도서관 사이의 장서 의존 네트워크라고 할 수 있으며 이는 기관 사이에 형성되는 일종의 신뢰관계로 생각해볼 수도 있다. 보통 상호대차 네트워크를 분석할 때에는 요청한 도서관에서 요청받은 도서관으로 링크가 향하는 것으로 간주하므로 의미상으로는 상호대차 요청 네트워크라고 할 수 있다. 따라서 상호대차 네트워크에 TBC-F와 TBC-T를 모두 적용해보는 실험을 통해 지수의 특성을 확인하는 것이 의미가 있다.

실험 데이터로는 유종덕(2013)의 경기도 지역간 상호대차 네트워크 데이터와 박영애, 이재윤(2010)의 A시 17개 도서관간 상호대차 네트워크 데이터를 사용하였다. 두 네트워크 데이터의 특징은 〈표 1〉과 같다. 선행 연구 중에서 유종덕(2013)은 요청한 도서관의 신청건수(요청받은 도서관의 제공건수)를 그대로 링크의 강도로 사용했고, 박영애와 이재윤(2010)은 신청하는 도서관과 신청받는 도서관의 상호대

〈표 1〉 실험 데이터의 특징

변수	경기도 상호대차 네트워크	A시 도서관 상호대차 네트워크
노드 수	31	17
링크 수(0이 아닌)	876	272
네트워크 밀도	0.942	1.000
상호대차 건수	28,004	186,520
데이터 생성 시기	2006년~2012년 10월	2009년
링크 강도	상호대차 건수	상호대차 의존도
쌍방 링크의 Pearson 상관계수	0.288	0.807
쌍방 링크의 Spearman 순위 상관계수	0.502	0.623

차 신청 규모를 반영할 수 있도록 코사인계수와 유사하게 정규화한 상호대차 의존도를 사용하였다. 이 연구에서는 선행연구에 사용한 링크 강도값을 그대로 적용하였다.

실험대상 두 가지 네트워크 데이터의 특성을 살펴보면 〈표 1〉과 같이 다소 차이가 있다. 노드 수는 경기도 데이터가 2배 가까이 많지만 상호대차 건수는 A시 데이터가 6.7배 정도 더 많다. 경기도 데이터는 상호대차가 없는 노드 쌍도 일부 있어서 밀도가 0.942로 나타나지만 A시 데이터는 모든 도서관이 상호대차를 주고받아서 네트워크 밀도가 1.0이다. 두 도서관 사이에 보내는 링크 강도와 받는 링크 강도 사이의 상관관계는 경기도 데이터가 더 낮고 A시 데이터가 더 높은 편이다. 즉 A시 상호대차 네트워크에서는 상호대차를 요청한 측이 상대방으로부터 상호대차를 비슷한 규모로 요청받는 정도가 많고, 경기도 상호대차 네트워크에서는 요청하는 정도와 받는 정도가 꽤 다르다는 것을 의미한다. 따라서 A시 데이터보다 경기도 데이터에서 링크의 방향 정보가 중심성 분석 결과에 더 큰 영향을 끼칠 것으로 예상할 수 있다.

상호대차 네트워크에서 제안된 TBC-T 및 TBC-F 지수를 산출한 후, 이와 비교하기 위한

측정 지표로는 상호대차 요청/제공 규모(요청 수준, 제공수준, 요청+제공수준)와 함께 앞에서 언급했던 가중 방향성 전역 중심성 지수 3가지(가중 매개중심성 C_{wb} , 가중 근접중심성 C_{wc} , 가중 페이지랭크 WPR), 그리고 가중 방향성 지역 중심성 지수 1가지로 이웃중심성(NC)을 채택하였다. 그 결과 총 7가지 지수와 제안된 두 개 지수를 더한 9가지 지수를 실험 네트워크 두 가지에서 측정하여 비교 분석하였다.

가중 매개중심성, 가중 근접중심성, 이웃중심성은 모두 가중치를 반영하는 파라미터 α 값을 지정해야 한다. 가중 매개중심성은 네트워크의 밀도가 높고 링크 가중치 차이가 크지 않을 경우에 제대로 측정되지 못하며 파라미터 α 가 1보다 낮으면 변별력도 저하된다. 그 이유는 클리크에 가깝게 밀도가 높은 네트워크에서는 노드 간 링크 가중치의 차이가 크지 않다면 직접 연결된 경로가 가장 가까운 경로가 되어 매개중심성을 획득하는 노드가 드물어지기 때문이다. 따라서 여기서는 가중 매개중심성과 가중 근접중심성의 파라미터 α 를 1.0으로 설정했다. 이웃중심성의 경우는 원 논문(이재운, 2015)의 제안에 따라서 파라미터 α 를 2.0으로 설정하였다.

5. 가중 방향성 네트워크 중심성 지수 특성 비교 분석

5.1 중심성 측정 결과

도서관 상호대차 네트워크에서 TBC-F는 지역 이용자의 요구 수준을 반영하는 것이고, TBC-T는 지역 도서관의 기여도를 반영하는 것이라고 해석할 수 있다. TBC-F가 높은 지역은 많은 상호대차 요청을 받고 또한 많은 상호대차 요청을 하는 지역이라고 할 수 있다. 따라서 지역주민의 높은 장서 요구가 반영되어 개발된 소장도서가 다른 지역에 제공되는 기여를 하는 동시에, 충족되지 못한 나머지 요구가 타 지역에 상호대차 요청으로 반영된다고 할 수 있다. TBC-T가 높은 도서관은 폭넓은 다른 도서관으로부터 상호대차 신청의 우선순위로 고려되는 정도를 반영한 것이므로 이웃 중심성과

도 비슷한 의미로 해석할 수 있다.

경기도 31개 지역 간 상호대차 네트워크와 A시 17개 도서관 간 상호대차 네트워크에서 측정된 9가지 지표값은 각각 <표 2>, <표 3>과 같다. TBC-T와 TBC-F를 상대적인 값으로 정규화한 rTBC-T와 rTBC-F도 참고로 함께 제시하였다. 두 표에서 지역과 도서관의 정렬 순서는 네트워크에 참여한 정도를 의미하는 값의 내림차순으로 하였다. 즉 <표 2>에서는 상호대차 요청건수에 제공건수를 합한 값의 내림차순으로 지역을 정렬하였고, <표 3>에서는 요청하는 상호대차 의존도와 요청받는 상호대차 의존도의 합계 내림차순으로 도서관을 정렬하였다.

상호대차 참여도 내림차순으로 정렬한 결과를 보면 <표 3>의 A시 상호대차 네트워크에서는 참여도(요청 의존도+제공 의존도) 1위인 C도서관이 모든 지표에서 1위로 나타났다. 반면에 <표 2>의 경기도 상호대차 네트워크에서는

<표 2> 경기도 상호대차 네트워크에서 측정된 지표

지역	요청건수	제공건수	요청+제공건수	Cwb, α=1.0	Cwc, α=1.0	WPR	NC, α=2.0	TBC-T	rTBC-T	TBC-F	rTBC-F
수원	4037	1249	5286	510	0.0607	1.50	1.91	136	0.313	613	0.705
용인	1206	3661	4867	419	0.0432	3.02	14.99	297	0.683	625	0.718
성남	3096	694	3790	16	0.0568	0.82	0.20	74	0.170	426	0.490
화성	1455	1924	3379	45	0.0426	1.83	3.60	188	0.432	448	0.515
안양	1671	1540	3211	64	0.0446	1.65	3.07	193	0.444	559	0.643
남양주	937	1992	2929	121	0.0338	2.09	6.68	233	0.536	492	0.566
광명	1018	1643	2661	7	0.0327	1.73	1.86	211	0.485	492	0.566
안산	1095	1061	2156	29	0.0352	1.29	1.04	129	0.297	393	0.452
고양	1649	476	2125	3	0.0427	0.62	0.22	18	0.041	266	0.306
시흥	306	1688	1994	0	0.0200	1.71	4.27	180	0.414	163	0.187
평택	1135	747	1882	0	0.0365	0.81	0.45	63	0.145	282	0.324
김포	704	1171	1875	0	0.0362	1.19	1.40	143	0.329	301	0.346
구리	839	957	1796	0	0.0305	1.18	1.54	77	0.177	255	0.293
의정부	234	1295	1529	0	0.0201	1.33	3.49	174	0.400	158	0.182

지역	요청건수	제공건수	요청+ 제공건수	Cwb, α=1.0	Cwc, α=1.0	WPR	NC, α=2.0	TBC-T	rTBC-T	TBC-F	rTBC-F
부천	371	1149	1520	0	0.0201	1.37	1.53	106	0.244	174	0.200
이천	1182	331	1513	0	0.0408	0.47	0.09	19	0.044	157	0.180
파주	1026	358	1384	0	0.0353	0.50	0.12	11	0.025	174	0.200
광주	566	768	1334	0	0.0278	0.83	0.31	60	0.138	232	0.267
오산	587	638	1225	0	0.0307	0.70	0.16	32	0.074	114	0.131
하남	251	912	1163	0	0.0197	0.95	0.61	72	0.166	109	0.125
의왕	704	433	1137	0	0.0315	0.57	0.15	19	0.044	150	0.172
양주	351	751	1102	0	0.0187	0.95	0.82	82	0.189	174	0.200
동두천	361	650	1011	26	0.0201	0.87	1.35	73	0.168	161	0.185
군포	329	567	896	0	0.0248	0.65	0.13	45	0.103	120	0.138
가평	631	197	828	0	0.0358	0.37	0.06	5	0.011	85	0.098
과천	587	201	788	0	0.0270	0.34	0.05	6	0.014	66	0.076
포천	418	363	781	0	0.0266	0.61	0.16	23	0.053	143	0.164
여주	553	76	629	0	0.0376	0.20	0.02	0	0.000	8	0.009
양평	333	177	510	0	0.0215	0.28	0.05	10	0.023	61	0.070
연천	172	184	356	0	0.0118	0.34	0.07	9	0.021	39	0.045
안성	108	59	167	0	0.0136	0.22	0.02	0	0.000	1	0.001

〈표 3〉 A시 상호대차 네트워크에서 측정된 지표

도서관	의존도합 (요청)	의존도합 (제공)	의존도합 (요청+ 제공)	Cwb, α=1.0	Cwc, α=1.0	WPR	NC, α=2.0	TBC-T	rTBC-T	TBC-F	rTBC-F
C	1.30	2.07	3.376	156	0.1032	2.68	10.42	111	0.925	215	0.896
A	1.46	1.89	3.350	104	0.1010	2.29	6.65	91	0.758	199	0.829
B	1.33	1.73	3.061	69	0.1020	2.11	4.76	86	0.717	191	0.796
J	0.95	0.46	1.404	0	0.0825	0.69	0.27	5	0.042	72	0.300
K	0.89	0.49	1.386	0	0.0822	0.76	0.29	5	0.042	53	0.221
I	0.93	0.38	1.303	0	0.0825	0.61	0.35	0	0.000	27	0.113
P	0.74	0.54	1.277	0	0.0801	0.77	0.34	6	0.050	48	0.200
Q	0.66	0.57	1.236	0	0.0779	0.86	0.42	11	0.092	57	0.238
H	0.61	0.56	1.169	0	0.0745	0.77	0.50	6	0.050	44	0.183
O	0.47	0.51	0.972	0	0.0619	0.76	0.28	7	0.058	41	0.171
G	0.45	0.50	0.948	0	0.0608	0.76	0.59	27	0.225	74	0.308
D	0.58	0.34	0.923	0	0.0678	0.59	0.25	14	0.117	71	0.296
N	0.41	0.43	0.833	0	0.0605	0.65	0.29	11	0.092	43	0.179
F	0.47	0.36	0.831	0	0.0652	0.62	0.23	7	0.058	47	0.196
L	0.35	0.45	0.795	0	0.0591	0.69	0.27	13	0.108	33	0.138
M	0.30	0.49	0.789	0	0.0566	0.76	0.41	21	0.175	27	0.113
E	0.26	0.38	0.638	0	0.0581	0.64	0.61	4	0.033	8	0.033

지표별로 1위 지역이 참여도(요청+제공건수) 1위 지역과 일치하지 않는 경우가 보인다. 요청+제공건수 1위인 지역은 수원이며 가중 매개 중심성과 가중 근접중심성 기준으로도 수원이 1위로 측정되었다. 하지만 가중 페이지랭크, 이웃중심성, TBC-T, TBC-F 기준으로는 모두 용인이 1위였다.

각 노드마다 측정된 지표값이 일부 노드에 편중되는 경향을 보이는지 아니면 비교적 고르게 분포하는지를 알아보기 위해서 지표별 변동계수를 산출해보았다. 변동계수는 각 변수의 표준편차를 평균값으로 나눈 후 100을 곱하여 산출하므로 100을 넘으면 노드별 차이가 심한 편이고 100보다 작으면 노드별 차이도 약한 편이라고 판단할 수 있다. <표 4>를 보면 가중 매개중심성의 편차가 평균 대비 2배에서 3배 정도 수

준이어서 가장 컸고, 이웃중심성의 편차가 평균 대비 1.8배로 두 번째로 큰 것으로 나타났다. 제안된 두 지수 중에서 TBC-F의 변동계수는 상호대차 요청 수준이나 제공 수준과 비슷하게 100 미만으로 나타났고, TBC-T의 변동계수는 이보다 약간 높게 100 전후 수준을 보였다. 가중 근접중심성의 변동계수가 30 전후로 매우 낮아서 노드별 차이가 가장 적었다. 한편 가중 페이지랭크의 편차는 60대 수준으로 낮은 편이었는데, 이는 페이지랭크 계산 공식에서 감쇠인자(damping factor)를 통상적으로 0.85로 설정함으로써 각 노드마다 고르게 15%의 기본값을 부여하는 것이 영향을 끼친 것으로 짐작된다.

개별 지표 사이의 상관관계를 구체적으로 살펴보기 위해서 스피어맨 순위 상관계수를 산출해본 결과는 <표 5>, <표 6>과 같다. <표 5>에서

<표 4> 측정 지표별 변동계수

데이터셋	요청 수준	제공 수준	요청+제공 수준	Cwb	Cwc	WPR	NC	TBC-T	TBC-F
경기도	93.2	83.5	69.4	291.8	36.6	64.4	180.4	93.5	74.7
A시	52.3	79.9	63.4	236.6	21.1	66.0	183.3	139.2	86.5

<표 5> 경기도 상호대차 네트워크에서 측정한 지표 간 스피어맨 순위상관계수

	제공건수	요청건수	제공+요청건수	Cwb	Cwc	WPR	NC	TBC-T	TBC-F
제공건수	-	0.338	0.823***	0.576***	0.236	0.992***	0.975***	0.977***	0.811***
요청건수	0.338	-	0.759***	0.651***	0.930***	0.336	0.309	0.333	0.753***
제공+요청건수	0.823***	0.759***	-	0.729***	0.663***	0.813***	0.791***	0.803***	0.934***
Cwb	0.576***	0.651***	0.729***	-	0.566***	0.619***	0.590***	0.610***	0.755***
Cwc	0.236	0.930***	0.663***	0.566***	-	0.207	0.195	0.224	0.617***
WPR	0.992***	0.336	0.813***	0.619***	0.217	-	0.977***	0.979***	0.813***
NC	0.975***	0.309	0.791***	0.590***	0.195	0.977***	-	0.960***	0.793***
TBC-T	0.977***	0.333	0.803***	0.610***	0.224	0.979***	0.960***	-	0.819***
TBC-F	0.811***	0.753***	0.934***	0.755***	0.617***	0.813***	0.793***	0.819***	-

*** $p < 0.001$

〈표 6〉 A시 상호대차 네트워크에서 측정된 지표 간 스피어맨 순위상관계수

	의존도합 (제공)	의존도합 (요청)	의존도합 (제공+요청)	Cwb	Cwc	WPR	NC	TBC-T	TBC-F
의존도합(제공)	—	0.539*	0.657**	0.665**	0.534*	0.978***	0.701**	0.485*	0.578*
의존도합(요청)	0.539*	—	0.963***	0.654**	0.988***	0.505*	0.319	0.151	0.712**
의존도합 (제공+요청)	0.657**	0.963***	—	0.665**	0.966***	0.603*	0.407	0.179	0.728***
Cwb	0.665**	0.654**	0.665**	—	0.661**	0.665**	0.665**	0.667**	0.666**
Cwc	0.534*	0.988***	0.966***	0.661**	—	0.493*	0.333	0.129	0.714**
WPR	0.978***	0.505*	0.603*	0.665**	0.493*	—	0.669**	0.510*	0.533*
NC	0.701**	0.319	0.407	0.665**	0.333	0.669**	—	0.393	0.335
TBC-T	0.485*	0.151	0.179	0.667**	0.129	0.510*	0.393	—	0.594*
TBC-F	0.578*	0.712**	0.728***	0.666**	0.714**	0.533*	0.335	0.594*	—

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

경기도 지역 상호대차의 지역별 총 요청건수와 총 제공건수는 상관계수가 0.338로 통계적인 상관성이 유의하지 않게 나타났다. 반면에 〈표 6〉의 A시 데이터에서는 도서관별 요청 방향의 상호대차 의존도 합계와 제공 방향의 상호대차 의존도 합계 사이의 상관계수가 0.539로 95% 유의수준에서 유의하게 나타났다. 즉 경기도에서 타 지역에 상호대차를 많이 요청하는 지역이 반드시 타 지역에 상호대차를 많이 제공하는 것은 아님에 반해서, A시에서는 상호대차를 많이 요청하는 도서관이 역시 상호대차를 많이 제공하기도 하는 경향이 있음을 의미한다.

5.2 상호대차 참여수준과 가중 방향성 삼각매개중심성의 관계

제안된 두 지수는 상호대차 제공수준과는 상관관계가 모두 통계적으로 유의하지만 요청수준과의 상관관계는 TBC-T가 유의하지 않은 것으로 나타났다. 〈표 5〉의 경기도 네트워크 분석 결과에서는 신뢰 네트워크를 가정한 TBC-T

지수가 상호대차 제공건수와 0.977의 매우 높은 상관관계를 보이지만 상호대차 요청건수와 의 상관계수는 0.333으로 유의하지 않게 나타났다. 반면에 흐름 네트워크를 가정한 TBC-F 지수는 제공건수 및 요청건수와 모두 99.9% 수준에서 통계적으로 상관관계가 유의하게 나타났다. 이런 경향은 〈표 6〉의 A시 네트워크 분석 결과에서도 동일하였다. 역시 제공하는 상호대차 의존도는 TBC-T 지수와 TBC-F 지수 모두와 상관관계가 통계적으로 유의하였지만, 요청하는 상호대차 의존도는 TBC-F 지수하고만 상관관계가 유의하게 나타났다.

이런 결과는 TBC-T 지수가 내향 링크의 가중치만 반영하는 반면에 TBC-F 지수가 내향 링크와 외향 링크의 가중치를 모두 반영함을 의미한다. 앞에서 언급했듯이 신뢰 네트워크를 가정하여 측정하는 TBC-T 지수는 노드로 들어오는 링크의 가중치만을 고려하는데 반해서, 흐름 네트워크를 가정한 TBC-F 지수는 양방향 링크의 가중치를 모두 고려하도록 고안된 것이 의도대로 작동한다는 것을 실험 결과에서

확인할 수 있다. 결국 관찰 대상이 받는 가중치가 중요한 신뢰 네트워크일 경우에는 TBC-T 지수를 적용하고, 관찰 대상이 네트워크의 전체 흐름에 기여하는 바가 중요한 흐름 네트워크일 경우에는 TBC-F 지수를 적용하는 것이 노드의 입지를 파악하기에 적절한 선택이다. 도서관 상호대차 네트워크에서 장서개발 수준이 높은 지역은 타 지역으로부터 상호대차 요청(내향 링크)을 활발하게 받게 되므로 장서 서비스면에서 타 지역으로부터 높은 신뢰를 받는 입장이라는 것이 TBC-T 지수로 측정될 수 있다. 한편 해당 지역 도서관의 장서개발 수준이 높아서 상호대차 요청을 많이 받음과 동시에 이용자의 장서 요구 수준도 매우 높아서 지역 장서로 충족되지 않는 부분이 타 지역에 상호대차를 요청하는 것(외향 링크)으로 나타나는 지역은 양쪽 링크를 모두 고려하는 TBC-F 지수 측정 결과가 높게 나타나게 된다.

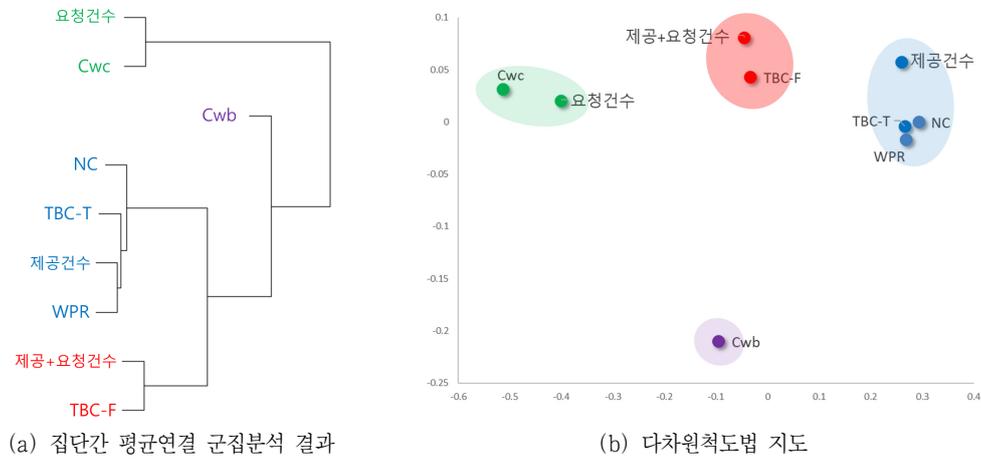
5.3 다른 중심성 지수와 가중 방향성 삼각 매개중심성의 관계

〈표 5〉와 〈표 6〉에서 제안된 두 지수가 기존의 네 가지 가중 방향성 중심성 지수와 어떤 관계인가를 살펴보면 두 데이터의 측정 결과가 약간 다르게 나타났다. 경기도 네트워크에서 TBC-T는 가중 페이지랭크, 이웃중심성, 가중 매개중심성, 가중 근접중심성의 순으로 상관성이 높게 나타났다. A시 네트워크에서는 TBC-T가 가중 매개중심성, 가중 페이지랭크, 이웃중심성, 가중 근접중심성의 순으로 상관성이 높게 나타났다. TBC-T가 가중 근접중심성과 두 네트워크에서 모두 통계적인 상관성이 유의하

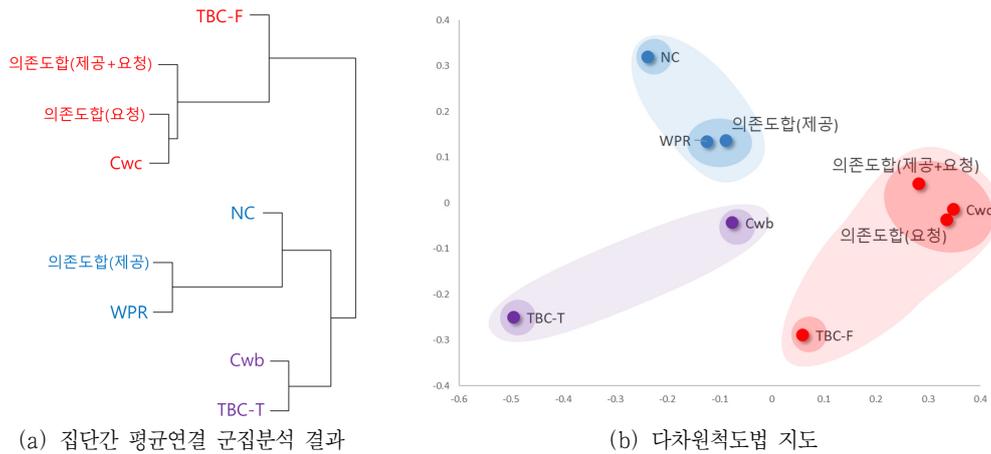
지 않게 나타난 것은, 내향 링크의 가중치만 반영하기 때문으로 보인다. 이는 동일하게 내향 링크의 가중치만 반영하는 이웃중심성과 가중 근접중심성과의 상관성이 통계적으로 유의하지 않으며, 외향 링크의 가중치도 반영하는 TBC-F의 경우는 가중 근접중심성과도 통계적으로 상관성이 유의하게 나타난 것에서 알 수 있다.

TBC-F의 경우 경기도 네트워크에서 가중 페이지랭크, 이웃중심성, 가중 매개중심성, 가중 근접중심성의 순으로 상관성이 높게 나타났고, A시 네트워크에서는 가중 근접중심성, 가중 매개중심성, 가중 페이지랭크, 이웃중심성의 순으로 상관성이 높게 나타났다. TBC-F는 이웃중심성을 제외한 나머지 지수 모두와 통계적으로 상관성이 유의하게 나타났다. 이는 TBC-F가 내향 링크와 외향 링크의 가중치를 모두 고려하기 때문이라고 생각된다.

전반적인 지표간의 관계를 살펴보기 위해서 측정된 9가지 지표 사이의 순위상관계수를 입력데이터로 하여 집단간 평균연결 근접분석을 수행하고 고전적 다차원척도법으로 2차원 지도를 생성해보았다. 〈그림 5〉와 〈그림 6〉에서 일관되게 나타난 점은 두 가지이다. 첫째로 가중 페이지랭크와 이웃중심성의 두 지수는 내향 링크 가중치(제공건수, 제공 의존도) 합계와 항상 같은 군집에 속하게 나타났다. 이들 지수가 내향 링크만을 고려하기 때문이다. 둘째로 가중 근접중심성은 항상 외향 링크 가중치(요청건수, 요청 의존도) 합계와 같은 군집에 속하였다. 가중 근접중심성은 다른 지수에 비해서 상대적으로 외향 링크와 관련이 깊음을 의미한다.



<그림 5> 경기도 상호대차 네트워크에서 측정된 9개 지표 간 스피어맨 순위상관계수로 도출한 집단 간 평균연결 군집화 과정과 다차원척도법 지도



<그림 6> A시 도서관 상호대차 네트워크에서 측정된 9개 지표 간 스피어맨 순위상관계수로 도출한 집단 간 평균연결 군집화 과정과 다차원척도법 지도

TBC-F는 두 네트워크 모두에서 내향 가중치와 외향 가중치를 합산한 값과 같은 군집에 속하는 것으로 나타났다. 반면에 TBC-T는 경기도 네트워크 분석 결과에서는 내향 링크 가중치 합계가 속한 군집에 포함되었고, A시 네트워크 분석 결과에서는 이와 떨어져서 가중 매개중심성과 약간 가까운 편인 것으로 나타났다. 내

향 링크 가중치와 외향 링크 가중치 사이의 상관관계가 약한 경기도 네트워크에서는 TBC-T가 내향 링크 가중치만 반영한다는 특징이 크게 작용하고, 양방향 링크 가중치가 상대적으로 비슷한 수준인 A시 네트워크에서는 TBC-T가 여타 지표와 다르게 다소 독자적인 측정 결과를 보여준다.

마지막으로 가중 네트워크에서의 지역 중심성 지수인 이웃중심성과의 관계를 살펴보면 내향 링크 가중치만을 고려하는 TBC-T가 양방향 링크 가중치를 모두 고려하는 TBC-F보다 이웃중심성과 약간 더 상관성이 높게 나타났다. 하지만 양방향 링크 가중치 사이의 관계가 강한 A시 네트워크에서는 두 지수 모두 이웃중심성과 통계적인 상관성이 없는 것으로 나타났다.

이상의 분석 결과에서 알 수 있듯이 방향성을 고려하도록 변형된 TBC-T와 TBC-F는 분석 대상 네트워크의 특성에 따라서 가중 페이지랭크나 이웃중심성과의 상관성이 크게 달라지는 반면에 가중 매개중심성이나 가중 근접중심성과의 상관성은 크게 달라지지 않았다. 특히 경기도 상호대차 네트워크에서와 같이 쌍방 링크 가중치의 상관성이 약한 경우에는 TBC-T, 이웃중심성, 가중 페이지랭크는 모두 내향 링크 가중치를 주로 고려하기 때문에 유사한 결과를 보였고 TBC-F만 이들과 다른 결과를 보였다. 따라서 가중 방향성 네트워크에서 노드의 입지를 입체적으로 교차분석하기 위해서는 지역 중심성 지수인 이웃중심성과 전역 중심성 지수인 TBC-F를 함께 활용하는 것이 바람직할 것이다.

6. 결론

비방향성 가중네트워크 분석을 위한 삼각매개중심성 지수를 변형하여 가중 방향성 네트워크를 위한 새로운 전역중심성 지수로 TBC-T와 TBC-F를 제안하였다. 개발 과정에서 TBC-T는 신뢰관계로 구성된 신뢰 네트워크를 전제로

하였고, TBC-F는 사물이나 개념이 전달되는 흐름 네트워크를 전제로 하였다. 경기도 상호대차 네트워크와 A시 상호대차 네트워크에 적용하는 실험을 통해서 확인된 새로운 지수의 특성은 다음과 같다.

첫째, 제안된 두 지수는 모두 내향 링크 가중치와는 상관관계가 통계적으로 유의하지만 외향 링크 가중치와의 상관관계는 TBC-F만 유의하고 TBC-T는 유의하지 않은 것으로 나타났다. 내향 링크와 외향 링크의 차이가 큰 네트워크에서 이런 경향이 더 뚜렷하게 나타나는데, TBC-T 지수가 내향 링크의 가중치만 반영하는 반면에 TBC-F 지수가 내향 링크와 외향 링크의 가중치를 모두 반영하기 때문이다.

둘째, 기존의 네 가지 가중 방향성 중심성 지수와 비교해보았을 때 TBC-T는 가중 매개중심성 및 가중 페이지랭크와 두 네트워크에서 모두 통계적으로 상관성이 있는 것으로 나타났다. TBC-F는 가중 매개중심성, 가중 페이지랭크, 가중 근접중심성의 세 가지 지수와 통계적인 상관성이 항상 유의하게 나타났다. 전반적으로 TBC-T와 TBC-F는 분석 대상 네트워크가 내향 가중치와 외향 가중치의 차이가 큰 경우에는 가중 페이지랭크나 이웃중심성과 상관성이 높았고, 그렇지 않으면 상관성이 낮아지는 특성을 보였다. 반면에 가중 매개중심성이나 가중 근접중심성과의 상관성은 네트워크의 특성에 크게 좌우되지 않았다. 즉 TBC-F는 가중 매개중심성 및 가중 근접중심성과 통계적 상관성이 유의하였고 TBC-T는 가중 매개중심성하고만 상관성이 유의하였다. 이 역시 TBC-T가 내향 링크 가중치만 고려하는 것이 주된 원인이라고 생각된다.

셋째, 실험 데이터에서 산출된 결과값을 근거로 지표들을 군집분석하였을 때 이웃중심성과 가중 페이지랭크는 내향 링크 가중치와 함께 군집을 이루었고, TBC-T도 이들과 비교적 가까운 것으로 나타났다. 따라서 이들은 모두 내향 링크 가중치 위주의 지표라고 할 수 있다. 반면에 TBC-F는 내향 링크 가중치와 외향 링크 가중치를 합산한 값과 같은 군집에 소속되었다. TBC-F가 양방향 링크 가중치를 모두 고려하도록 고안되었기 때문이라고 해석할 수 있다.

이상과 같이 이 연구에서 제안한 TBC-T 지수와 TBC-F 지수는 가중 방향성 네트워크에서 전역 중심성을 측정할 수 있는 지표로 활용될 수 있음을 확인하였다. 네트워크에서 개별 노드의 입지를 파악할 때에는 전역 중심성과 지역 중심성을 함께 적용하는 것이 유용한 것으로 알려져 있다(이재윤, 2006a). 가중 방향성 네트워크에서 지역 중심성을 측정할 수 있는 이웃중심성 지수를 제안된 두 전역 중심성 지수와 함께 사용한다면 개별 노드의 입지에 대해서 전역적인 관점과 지역적인 관점을 조합하여 더욱 입체적인 분석이 가능할 것으로 기대된다. 특히 TBC-F는 내향 링크 가중치와 외향 링크 가중치를 모두 고려하므로 다양한 상황에서 활용할 수 있을 것이다.

제안된 두 지표는 가능한 관계를 모두 고려하는 방식으로 계산이 이루어지므로 계산복잡도가 매우 높은 것이 약점이다. 수 만개 이상의 노드를 포함하는 대규모 네트워크에서는 측정 시간이 오래 걸릴 수 있다. 비슷한 방식으로 가중 링크를 다루는 패스파인더 네트워크와 같은 알고리즘에서도 계산 속도를 빠르게 개선할 수 있는 방식에 대한 연구(이재윤, 2006b; Quirin

et al., 2008)가 다수 발표될만큼 계산복잡도는 가중 네트워크 분석에서 문제가 되는 측면이다. 다만 tnet(Opsahl, 2010)의 가중 매개중심성이나 가중 근접중심성에 비하면 TBC-T나 TBC-F의 계산 속도가 조금 더 빠를 수 있다. tnet에서는 두 노드를 이어줄 수 있는 경로에 포함된 모든 링크의 가중치들을 고려해야 하지만, TBC-T나 TBC-F는 두 노드가 직접 연결된 개별 링크의 가중치만을 고려하므로 계산 시간이 덜 걸리게 된다. 또한 네트워크의 규모가 커지면 일반적으로 밀도는 낮아지기 마련이어서 링크가 형성되지 않은 관계(가중치가 0인 링크)의 비중이 높아지므로 이론적으로 우려되는 것보다는 실제 계산 시간이 줄어들 가능성이 있다.

이 연구에서는 가중 방향성 네트워크 중에서 보내는 링크 가중치와 받는 링크 가중치 사이에 상관성이 낮은 편인 도서관 상호대차 네트워크를 대상으로 제안한 지표를 적용하였다. 향후에는 가중 방향성 네트워크인 물류/운송 네트워크(Qi & Kwon, 2021)나 학술지 상호 인용 네트워크(Zhang et al., 2009)에 대해서 새로 개발한 중심성 지수를 적용해서 비방향성 중심성 지수를 적용했을 때와의 차이점을 확인해보고자 한다. 특히 계량서지적 데이터 중에서 문헌 간 인용의 경우는 방향성을 고려한 네트워크 지수가 별도로 연구되어 왔지만(정준민, 2010; 이재윤, 2011a), 가중 네트워크인 학술지 간 인용의 경우는 가중 페이지랭크 이외에는 방향성을 고려한 분석이 본격적으로 이루어진 경우가 드물었다. 따라서 제안된 가중 방향성 중심성 지수를 활용한다면 학술지 인용 네트워크에서 각 학술지의 입지를 입체적으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 박영애, 이재운 (2010). 지역단위 도서관 시스템에서의 이용중심적 장서평가 연구. 한국문헌정보학회지, 44(4), 457-477. <http://doi.org/10.4275/KSLIS.2010.44.4.457>
- 박치성, 오재록, 남주현 (2011). 정부조직개편의 효과 실증분석: 노무현·이명박 정부의 중앙부처 간 업무관계 네트워크의 변화를 중심으로. 행정논총, 49(4), 51-82.
- 손유미, 김화영 (2023). 코로나 팬데믹에 따른 향만물류 네트워크 변화 분석 연구. 한국향만경제학회지, 39(4), 205-222. <http://doi.org/10.15735/kls.2014.22.4.001>
- 오현정, 이찬구 (2021). 한국 과학기술정책학의 학제적 구조 탐색: 연구자의 모(母)학문을 중심으로. 기술혁신학회지, 24(1), 41-74. <http://doi.org/10.35978/jktis.2021.2.24.1.41>
- 유소영, 이재운 (2008). 학제적 분야의 정보서비스를 위한 학술지 인용 분석에 관한 연구: Y대학교 생명공학과를 중심으로. 정보관리학회지, 25(4), 283-308. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2008.25.4.283>
- 유종덕 (2013). 경기도 공공도서관 상호대차 네트워크 분석. 정보관리학회지, 30(2), 83-99. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2013.30.2.083>
- 육지혜, 이고은, 박지홍 (2015). 협업지수를 응용한 대학도서관 상호대차 협력 관계 분석: S대학교 도서관을 중심으로. 한국도서관·정보학회지, 46(4), 493-510. <http://doi.org/10.16981/kliss.46.4.201512.493>
- 이재운 (2006a). 계량서지적 네트워크 분석을 위한 중심성 척도에 관한 연구. 한국문헌정보학회지, 40(3), 191-214. <http://doi.org/10.4275/KSLIS.2006.40.3.191>
- 이재운 (2006b). 지적 구조의 규명을 위한 네트워크 형성 방식에 관한 연구. 한국문헌정보학회지, 40(2), 333-355. <http://doi.org/10.4275/KSLIS.2006.40.2.333>
- 이재운 (2011a). 인용 네트워크 분석에 근거한 문헌 인용 지수 연구. 한국문헌정보학회지, 45(2), 119-143. <http://doi.org/10.4275/KSLIS.2011.45.2.119>
- 이재운 (2011b). 국내 인용 데이터베이스에서 저널 페이지랭크 측정 방안. 한국비블리아학회지, 22(4), 361-379.
- 이재운 (2013). tnet과 WNET의 가중 네트워크 중심성 지수 비교 연구. 정보관리학회지, 30(4), 241-264. <https://doi.org/10.3743/KOSIM.2013.30.4.241>
- 이재운 (2014). 공동연구 네트워크 분석을 위한 중심성 지수에 대한 비교 연구. 정보관리학회지, 31(3), 153-179. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2014.31.3.153>
- 이재운 (2015). 가중 네트워크를 위한 일반화된 지역중심성 지수. 정보관리학회지, 32(2), 7-23. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2015.32.2.007>

- 이재윤, 정은경 (2022). 지적구조 규명을 위한 키워드서지결합분석 기법에 관한 연구. *정보관리학회지*, 39(1), 309-330. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2022.39.1.309>
- 이혜경, 이용구 (2023). 동시출현단어 분석을 이용한 오픈 데이터 분야의 지적 구조 분석. *정보관리학회지*, 40(4), 429-450. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2023.40.4.429>
- 임병학 (2011). 컨테이너항만 네트워크가 항만 생산성에 미치는 영향에 대한 연구: 사회 네트워크 분석을 중심으로. *로지스틱스연구*, 19(3), 19-35. <http://doi.org/10.15735/cls.2011.19.3.002>
- 정은경 (2021). 네트워크 분석 논문의 고찰: 계량서지적 분석과 내용분석을 중심으로. *정보관리학회지*, 38(1), 169-190. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2021.38.1.169>
- 정준민 (2010). 인용문헌 분석을 통한 학술 논문의 수명 및 계보에 관한 연구. *한국문헌정보학회지*, 44(2), 357-379. <http://doi.org/10.4275/KSLIS.2010.44.2.357>
- 조장식 (2012). 사회 연결망 분석을 이용한 복수전공 유입 및 유출 분석. *한국데이터정보과학회지*, 23(4), 693-701. <http://doi.org/10.7465/jkdi.2012.23.4.693>
- 최상희 (2023). 동시출현단어분석을 활용한 디지털 큐레이션 연구 주제 분석. *인문과학연구논총*, 44(1), 149-175. <http://doi.org/10.22947/ihmj.2023.44.1.006>
- 최승배, 강창완, 최형준, 강병욱 (2011). 사회네트워크분석을 통한 축구경기 분석. *한국데이터정보과학회지*, 22(6), 1053-1063.
- 최예진, 김초해, 이지연 (2023). 해외 대학도서관 발전계획 동향 분석. *정보관리학회지*, 40(3), 163-196. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2023.40.3.163>
- 최원실, 정은경 (2019). 대학도서관 상호대차 장서 프로파일 분석 연구. *정보관리학회지*, 36(3), 109-129. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2019.36.3.109>
- 한지혜, 김갑성, 정해영 (2016). 한국 수도권 서비스업과 한·중·일 20개 도시지역 내 10개 산업부문의 산업 간 네트워크 분석. *지역연구*, 32(4), 51-73.
- Ahuja, R. K. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Chung, H. M., Kwon, O. K., Han, O. S., & Kim, H. (2020). Evolving network characteristics of the Asian international aviation market: a weighted network approach. *Transport Policy*, 99, 299-313. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.09.002>
- Klavans, R. & Boyack, K. W. (2006). Identifying a better measure of relatedness for mapping science. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 57(2), 149-295. https://doi.org/10.1002/asi.20274open_in_new
- Lee, J. Y. & Choi, S. (2013). Collaboration networks and document networks in informetrics research from 2001 to 2011: finding influential nations, institutions, documents. *Journal of the Korean Society for Information Management*, 30(1), 179-191.

<http://doi.org/10.3743/KOSIM.2013.30.1.179>

- Opsahl, T. (2010). Node centrality in weighted networks: generalizing degree and shortest paths. *Social Networks*, 32(3), 245-251. <https://doi.org/10.1016/j.socnet.2010.03.006>
- Park, E. (2022). The changing intellectual structures of HRD in South Korea: author profiling analysis. *Asia Pacific Education Review*, 23(1), 169-183. <http://doi.org/10.1007/s12564-021-09720-x>
- Qi, Q. & Kwon, O. K. (2021). Exploring the characteristics of high-speed rail and air transportation networks in China: a weighted network approach. *Journal of International Logistics and Trade*, 19(2), 96-114. <http://doi.org/10.24006/jilt.2021.19.2.096>
- Quirin, A., Cordón, O., Guerrero-Bote, V. P., Vargas-Quesada, B., & Moya-Anegón, F. (2008). A quick MST-based algorithm to obtain Pathfinder networks ($\infty, n - 1$). *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 59(12), 1912-1924. <https://doi.org/10.1002/asi.20904>
- Xing, W. & Ghorbani, A. (2004). Weighted pagerank algorithm. *Proceedings of the Second Annual Conference on Communication Networks and Services Research (CNSR'04)*, 305-314. <https://doi.org/10.1109/DNSR.2004.1344743>
- Yuan, W., Guan, D., Lee, Y. K., & Lee, S. (2011). The small-world trust network. *Applied Intelligence*, 35(5), 399-410. <https://doi.org/10.1007/s10489-010-0230-7>
- Zhang, G. Q. & He, Y. Q. (2013). Trust-based recommender algorithm using the properties of trust network. *Proceedings of the International Conference on Education Reform and Management Innovation (ERMI 2012)*, 5, 104-110.
- Zhang, L., Glänzel, W., & Liang, L. (2009). Tracing the role of individual journals in a cross-citation network based on different indicators. *Scientometrics*, 81(3), 821-838. <https://doi.org/10.1007/s11192-008-2245-y>

• 국문 참고문헌에 대한 영문 표기
(English translation of references written in Korean)

- Cho, Jang Sik (2012). Inflow and outflow analysis of double majors using social network analysis. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, 23(4), 693-701. <http://doi.org/10.7465/jkdi.2012.23.4.693>
- Choi, Sanghee (2023). An analysis on topics of digital curation researches using the co-word analysis. *The Journal of Humanities*, 44(1), 149-175.

<http://doi.org/10.22947/ihmju.2023.44.1.006>

- Choi, Seungbae, Kang, Changwan, Choi, Hyongjun, & Kang, Byungyuk (2011). Social network analysis for a soccer game. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, 22(6), 1053-1063.
- Choi, Wonsil & Chung, Eunkyung (2019). An analysis on collection profiles of western monographs with ILL data for academic libraries. *Journal of the Korean Society for Information Management*, 36(3), 109-129. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2019.36.3.109>
- Choi, Ye Jin, Kim, Chohae, & Lee, Jee Yeon (2023). Trend analysis of foreign academic libraries' development plan. *Journal of the Korean Society for Information Management*, 40(3), 163-196. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2023.40.3.163>
- Chung, EunKyung (2021). An investigation on the network analysis papers by content analysis and bibliometric analysis. *Journal of the Korean Society for Information Management*, 38(1), 169-190. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2021.38.1.169>
- Chung, Jun-Min (2010). The study on the genealogy and impact factor of papers by citation analysis. *Journal of the Korean Library and Information Science Society*, 44(2), 357-379. <http://doi.org/10.4275/KSLIS.2010.44.2.357>
- Han, Jihye, Kim, Kabsung, & Jung, Hayoung (2016). Analysis on the inter-industry network between the service industry in the Korean capital region and 10 industrial sectors in 20 city-regions of China-Japan-Korea. *Journal of the Korean Regional Science Association*, 32(4), 51-73.
- Lee, HyeKyung & Lee, Yong-Gu (2023). Intellectual structure analysis on the field of open data using co-word analysis. *Journal of the Korean Society for Information Management*, 40(4), 429-450. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2023.40.4.429>
- Lee, Jae Yun & Chung, Eunkyung (2022). Introducing keyword bibliographic coupling analysis (KBCA) for identifying the intellectual structure. *Journal of the Korean Society for Information Management*, 39(1), 309-330. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2022.39.1.309>
- Lee, Jae Yun (2006a). Centrality measures for bibliometric network analysis. *Journal of the Korean Library and Information Science Society*, 40(3), 191-214. <http://doi.org/10.4275/KSLIS.2006.40.3.191>
- Lee, Jae Yun (2006b). A study on the network generation methods for examining the intellectual structure of knowledge domains. *Journal of the Korean Library and Information Science Society*, 40(2), 333-355. <http://doi.org/10.4275/KSLIS.2006.40.2.333>
- Lee, Jae Yun (2011a). A study on document citation indicators based on citation network analysis.

- Journal of the Korean Library and Information Science Society, 45(2), 119-143.
<http://doi.org/10.4275/KSLIS.2011.45.2.119>
- Lee, Jae Yun (2011b). Journal PageRank calculation in the Korean Science Citation Database. Journal of the Korean Biblia Society for Library and Information Science, 22(4), 361-379.
- Lee, Jae Yun (2013). A comparison study on the weighted network centrality measures of tnet and WNET. Journal of the Korean Society for Information Management, 30(4), 241-264.
<https://doi.org/10.3743/KOSIM.2013.30.4.241>
- Lee, Jae Yun (2014). A comparative study on the centrality measures for analyzing research collaboration networks. Journal of the Korean Society for Information Management, 31(3), 153-179. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2014.31.3.153>
- Lee, Jae Yun (2015). A generalized measure for local centralities in weighted networks. Journal of the Korean Society for Information Management, 32(2), 7-23.
<http://doi.org/10.3743/KOSIM.2015.32.2.007>
- Leem, Byung-Hak (2011). Impacts of container port network on productivity: based on social network analysis perspective. Korean Journal of Logistics, 19(3), 19-35.
<http://doi.org/10.15735/kls.2011.19.3.002>
- Oh, HyounJeong & Yi, Chan-Goo (2021). The structure of interdisciplinarity in the science and technology policy studies in Korea from the perspective of respective researcher's disciplinary background. Journal of Korea Technology Innovation Society, 24(1), 41-74.
<http://doi.org/10.35978/jktis.2021.2.24.1.41>
- Park, Chisung, Oh, Jae Rok, & Nam, Ju Hyun (2011). An empirical study of national government reorganization: A focus on changes in the network structures of formal document exchanges between the roh and lee administrations. Journal of Public Administration, 49(4), 51-82.
- Park, Young Ae & Lee, Jae Yun (2010). A study on user-oriented evaluation of book collections under a regional library system. Journal of the Korean Library and Information Science Society, 44(4), 457-477. <http://doi.org/10.4275/KSLIS.2010.44.4.457>
- Ryoo, Jong-duk (2013). An analysis on interlibrary loan network of public libraries in Gyeonggi Province. Journal of the Korean Society for Information Management, 30(2), 83-99.
<http://doi.org/10.3743/KOSIM.2013.30.2.083>
- Son, Yoo-Mi & Kim, Hwa Young (2023). A study on the analysis of effect on port logistics network due to COVID-19 pandemic. Journal of Korean Port Economic Association, 39(4), 205-222. <http://doi.org/10.15735/kls.2014.22.4.001>
- Yook, Ji-Hye, Lee, Go-Eun, & Park, Ji-Hong (2015). An investigation of the cooperative relationships

in the ILL services of academic libraries by applying the collaboration index: focusing on the S University Library in Korea. *Journal of Korean Library and Information Science Society*, 46(4), 493-510. <http://doi.org/10.16981/kliss.46.4.201512.493>

Yu, So-Young & Lee, Jae Yun (2008). Journal citation analysis for library services on interdisciplinary domains: a case study of department of biotechnology, Y University. *Journal of the Korean Society for Information Management*, 25(4), 283-308. <http://doi.org/10.3743/KOSIM.2008.25.4.283>