공동연구 네트워크 분석을 위한 중심성 지수에 대한 비교 연구*

A Comparative Study on the Centrality Measures for Analyzing Research Collaboration Networks

이재윤 (Jae Yun Lee)**

초 록

이 연구의 목적은 공동연구 네트워크에서 연구자의 영향력과 입지를 분석하는데 사용되는 중심성 지수들의 특징에 대해서 고찰하는 것이다. 전통적인 이진 네트워크 중심성 지수로는 연결정도중심성, 매개중심성, 근접중심성, 페이지랭크를 다루었고, 공동연구 네트워크에서의 중심성을 측정하기 위해서 개발되었거나 사용된 가중 네트워크 중심성 지수로는 삼각매개중심성, 평균연관성, 가중페이지랭크, 공동연구 h-지수와 공동연구 hs-지수, 복합연결정도중심성, c-지수에 대해서 살펴보았으며, 새로운 지수로 제곱근합 지수 SSR을 제안하였다. 이들 12종의 중심성 지수를 건축학, 문헌정보학, 마케팅 분야의 세 가지 공동연구 네트워크에 적용해본 결과 각 지수들의 특성과 지수 간 관계를 파악할 수 있었다. 분석 결과 공동연구 네트워크에서 공동연구 범위와 공동연구 강도를 모두 고려하기 위해서는 가중 네트워크 중심성 지수를 사용해야 하는 것으로 나타났다. 특히 공동연구 범위와 강도를 모두 고려하는 전역중심성을 측정하기 위해서는 삼각매개중심성 지수를 사용하고, 지역중심성을 측정하기 위해서는 SSR 지수를 사용하는 것이 바람직하다고 제안하였다.

ABSTRACT

This study explores the characteristics of centrality measures for analyzing researchers' impact and structural positions in research collaboration networks. We investigate four binary network centrality measures (degree centrality, closeness centrality, betweenness centrality, and PageRank), and seven existing weighted network centrality measures (triangle betweenness centrality, mean association, weighted PageRank, collaboration h-index, collaboration hs-index, complex degree centrality, and c-index) for research collaboration networks. And we propose SSR, which is a new weighted centrality measure for collaboration networks. Using research collaboration data from three different research domains including architecture, library and information science, and marketing, the above twelve centrality measures are calculated and compared each other. Results indicate that the weighted network centrality measures are needed to consider collaboration strength as well as collaboration range in research collaboration networks. We also recommend that when considering both collaboration strength and range, it is appropriate to apply triangle betweenness centrality and SSR to investigate global centrality and local centrality in collaboration networks.

키워드: 공동연구 네트워크, 공저 네트워크, 중심성 지수, 가중 네트워크
research collaboration networks, co-authorship networks, centrality measures, weighted networks

* 이 논문은 2013년도 명지대학교 교내연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.
이 논문의 일부 내용은 제20회 한국정보관리학회 학술대회에서 발표된 바 있음.

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

■ 논문접수일자 : 2014년 8월 19일 ■ 최초심사일자 : 2014년 8월 28일 ■ 게재확정일자 : 2014년 9월 5일
■ 정보관리학회지, 31(3), 153-179, 2014. [http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2014.31.3.153]

1. 서 론

현대 과학 연구에서 공동연구는 지속적으로 증가하고 있으며 인문사회과학 분야의 연구에서도 점차 확산되고 있다. 융복합 연구가 강조되면서 이러한 경향은 더욱 가속화되고 있으며, 공동연구 자체에 대한 학문적인 접근도 활발해지고 있다. 21세기 초반 10년 간 계량정보학 분야의 연구동향을 분석한 연구(Lee & Choi, 2011)에서는 키워드 'collaboration'의 성장지수(0에서 1 사이 값이며 0.5보다 크면 증가 추세, 작으면 감소 추세; 이재윤, 김판준, 강대신, 김희정, 유소영, 이우형, 2011)가 0.743으로 나타나 공동연구에 대한 계량정보학적 연구가 최근에도 뚜렷하게 증가 추세인 것으로 보고한 바 있다. 공저는 공동연구의 대표적인 지표로 사용되고 있으며(Shrum, Genuth, & Chompalov, 2007, p. 7), 학술논문에서 공동연구 네트워크는 공저 네트워크를 의미하는 경우가 대부분이다. 공동연구 네트워크에 대한 연구는 네트워크 전체에 대한 구조적 특성을 밝히고자 하는 관점(김용학, 윤정로, 조혜선, 김영진, 2007)과, 개별 연구자(혹은 저자)의 입지를 살펴보고자 하는 관점(Yan & Ding, 2009)으로 나눌 수 있다. 물론 이 두 가지 관점이 하나의 연구에서 동시에 다루어지는 경우(이수상, 2011)도 적지 않으며 시간 흐름에 따른 변화를 살펴보는 연구도 흔히 수행된다(Yoshikane & Kageura, 2004). 공동연구 네트워크 분석을 통해 학제성을 분석하는 연구(Chung, 2011), 국가 단위의 공동연구 네트워크 분석(김원진, 정영미, 2010) 등도 다양하게 시도되었다.

공동연구 네트워크는 공동연구자와의 공동연구 횟수가 링크 강도로 해석될 수 있기 때문에 본질적으로 가중 네트워크이다. 그러나 공동연구 네트워크에서 각 연구자의 영향력, 또는 중요도를 분석하려는 시도는 연결 여부만을 고려하는 이진 네트워크 중심성을 측정하는 것이 대부분이었으며, 가중 네트워크 중심성 지수를 활용하여 공동연구 네트워크를 분석한 연구는 비교적 최근에 시작되었다. 가중 네트워크의 관점에서 공동연구 네트워크를 접근하는 연구는 범용 중심성 지수를 이용하는 연구(김원진, 정영미, 2010; Newman, 2001; Yan & Ding, 2009)와 공동연구 네트워크를 위한 별도의 중심성 지수를 고안하여 분석하는 연구(Kretschmer & Kretschmer, 2006; Lee & Choi, 2013; Yan, Zhai, & Fan, 2013)로 나눌 수 있다. 이런 일부의 시도에도 불구하고 최근 몇 년 간 국내에서 다양한 학문분야마다 시도되고 있는 많은 수의 공동연구 네트워크 분석 연구들은 거의 모두가 이진 네트워크 중심성 지수를 적용하고 있다. 공동연구 네트워크와 유사한 계량서지적 네트워크인 저자동시인용 네트워크, 저자서지결합 네트워크, 문헌동시인용 네트워크, 단어동시출현 네트워크, 저널동시인용 네트워크, 저자프로파일 네트워크 등에 대해서는 범용 가중 네트워크 중심성 지수를 적용하는 연구가 여러 차례 이루어졌다. 반면에 공동연구 네트워크를 위한 별도의 가중 네트워크 중심성 지수가 여러 건 제안된 것에 비하면 이를 적용하는 연구는 매우 미진하다. 물론 공동연구 네트워크는 일반적으로 동시인용이나 서지결합 네트워크에 비하면 밀도가 높지 않은 경우가 많으므로 두 연구자 사이의 링크 존재 여부가 링크의 강도에 비해서 훨씬 중

요하기 때문에 굳이 가중 네트워크 중심성 지수를 적용할 필요가 없다는 가정도 가능하다. 그러나 여타 계량서지적 네트워크와 달리 공동연구 네트워크를 위한 전용 가중 네트워크 중심성 지수까지 여러 종류가 제안된 점을 감안하면 그렇지 않다는 인식도 분명히 존재한다. 따라서 공동연구 네트워크에서 이진 네트워크 중심성을 측정하는 경우와 가중 네트워크 중심성을 측정하는 경우의 차이점에 대해서 면밀하게 살펴볼 필요가 있다. 또한 공동연구 네트워크 전용 중심성 지수를 비롯한 여러 가중 네트워크 중심성 지수들을 비교할 필요도 있다.

이 연구의 연구 문제는 다음과 같다. 첫째, 공동연구 네트워크에서 측정한 이진 네트워크 중심성 지수들의 관계는 어떠한가? 둘째, 공동연구 네트워크에서 측정한 가중 네트워크 중심성 지수들의 관계는 어떠한가? 셋째, 공동연구 네트워크에서 이진 네트워크 중심성 지수와 가중 네트워크 중심성 지수의 차이는 어떠한가?

이와 같은 연구 문제를 탐구하기 위해서 전통적인 이진 네트워크 중심성 지수인 연결정도중심성, 매개중심성, 근접중심성, 페이지랭크와 함께 가중 네트워크 중심성 지수인 삼각매개중심성과 평균연관성(이재윤, 2006a), 그리고 공동연구 네트워크에서의 중심성을 측정하기 위해서 개발되었거나 사용된 지수인 가중페이지랭크(Yan & Ding, 2009), 공동연구 h-지수와 공동연구 hs-지수(Lee & Choi, 2013), 복합연결정도중심성 지수(Kretschmer & Kretschmer, 2006), c-지수(Yan, Zhai, & Fan, 2013)에 대해서 살펴보고 새로운 지수로 제곱근합 지수 SSR을 제안한 다음, 다양한 실제 공동연구 네트워크에 여러 중심성 지수를 적용한 결과를 비교 분석해보았다.

2. 공동연구 네트워크 분석을 위한 중심성 지수

이 장에서는 공동연구 네트워크 분석을 위한 중심성 지수의 정의와 개념, 그리고 특성을 실제 계산 과정과 함께 살펴보기로 한다. 3장 이후의 분석에서 다루어진 중심성 지수 중에서 일반적인 네트워크를 위해 개발된 범용 지수인 삼각매개중심성과 평균연관성(이재윤, 2006a)은 설명하지 않고 공동연구 네트워크를 고려하여 개발된 지수만을 살펴보되, 범용 지수이긴 하지만 공동연구 네트워크에 적용하기 위해서는 데이터의 변환이 필요한 페이지랭크와 가중 페이지랭크도 함께 설명하였다.

2.1 페이지랭크

페이지랭크 공식(Brin & Page, 1998)은 Google의 핵심 기술로 제안된 이후 다양한 분야에 응용되고 있다. 공동연구 네트워크에 페이지랭크를 적용할 때에는 공동연구를 활발하게 수행하는 연구자와의 공동연구를, 그렇지 못한 연구자와의 공동연구보다 더 중요한 것으로 판정하는 방식이 된다. 웹페이지에 대해서 적용하기 위해서 제안된 원래의 페이지랭크 공식을 공동연구 네트워크에 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PR_i = \frac{(1-d)}{N} + d \cdot \sum_{j=1}^{N} \frac{PR_j}{CO_j}$$

이 공식에서 각 항의 의미는 다음과 같다.

PR_i - 연구자 i의 페이지랭크
d - 상수, 보통은 0.85
CO_j - 연구자 j가 공동연구를 수행한 연구자의 수
N - 전체 연구자 수

원래 페이지랭크 공식은 영향력을 보내는 노드와 받는 노드가 구분되는 방향성 네트워크를 고려하여 개발된 것인데 공동연구(공저) 관계는 쌍방이 동등하므로 공동연구 네트워크는 비방향성 네트워크이다. Liu, Bollen, Nelson, Van de Sompel(2005)은 비방향성 네트워크인 공동연구 네트워크에서 페이지랭크를 산출하기 위해 비방향성인 공저 관계 한 건을, 주고 받는 두 개의 관계로 변환하는 방법을 사용하였다. 이를테면 저자 A와 B가 공저한 관계일 경우에 저자 A로부터 저자 B로 향하는 링크와 저자 B로부터 저자 A로 향하는 링크를 설정함으로써 공동연구 네트워크를 방향성 네트워크로 변환하였다.

페이지랭크 공식은 두 계산값을 더하는 것으로 되어 있는데, 앞 부분은 각 연구자에게 기본값을 동일하게 1/N씩 나누어주기 위한 것이고, 뒷 부분은 다른 연구자로부터 받은 가중치를 합산하는 부분이다. 웹페이지를 대상으로 고안된 원래의 페이지랭크 공식에서는 다른 웹페이지로 내보내는 링크를 가지고 있지 않은 웹페이지(dangling node라고 함)가 있으면 이들이 받은 가중치는 별도로 합산하여 전체 웹페이지들에게 1/N의 비율로 고르게 배분한다. 그러나 공동연구 네트워크는 웹페이지와 달리 비방향성 네트워크이기 때문에 공동연구를 수행하지 않으면 애초에 중요도를 받을 수가 없으므로 이런 경우를 고려할 필요가 없다.

2.2 가중 페이지랭크

페이지랭크 공식은 웹을 대상으로 개발되었기 때문에 링크의 가중치를 고려하지 않고 연결 여부만을 반영한다. 그러나 네트워크에서 링크 가중치를 무시하고 이진 관계로 처리하는 것은 정보의 손실을 가져온다(이재윤, 2006a; 2013; Liu et al., 2005).

페이지랭크 공식을 수정하여 링크 가중치를 고려하도록 개선된 가중 페이지랭크는 동일한 이름으로 여러 공식이 제안되어 있다. 페이지랭크 공식의 앞 부분을 수정하는 변형과 뒷 부분을 수정하는 변형 공식이 각각 제안되었다. 페이지랭크 공식의 앞 부분은 각 노드에 균등하게 기본값을 배분하는 역할을 하는데, 이를 각 노드의 가중치 비중에 비례하여 배분하도록 수정하는 방안이 Ding, Yan, Frazho, Caverlee (2009)에 의해 제안된 바 있다. 이들은 저자 동시인용 네트워크에서 저자의 논문 수와 인용빈도를 기본값 배분 비율로 반영하도록 수정하였는데, 이는 공동연구 관계와는 관련이 없는 항이므로 이 연구에서는 다루지 않기로 한다. 페이지랭크 공식의 뒷 부분을 수정한 가중 페이지랭크 공식은 Xing과 Ghorbani(2004)가 제안하였고, Bollen, Rodriguez, Van de Sompel (2006)이 저널 인용 네트워크에 적용하였으며 동일한 방식이 Scopus 데이터를 대상으로 한 SJR 지수와 Web of Science 데이터를 대상으로 한 EigenFactor 지수에 사용되었다. 공동연

구 네트워크를 대상으로 Liu 등(2005)이 제안한 AuthorRank 공식도 N으로 나누는 부분이 없을 뿐 가중 페이지랭크 공식과 같으며 결과값을 N으로 나누면 가중 페이지랭크와 같은 값이 된다. 가중 페이지랭크 공식을 공동연구 네트워크에 적용하는 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$WPR_i = \frac{1-d}{N} + d \cdot \sum_{j=1}^{N} WPR_j \frac{CO_{ji}}{C_j}$$

이 공식에서 각 항의 의미는 다음과 같다.

WPR_i - 연구자 i의 가중 페이지랭크
CO_{ji} - 연구자 j와 연구자 i의 공저 횟수
C_j - 연구자 j가 다른 연구자와 공저한 개별 횟수의 합계
d - 상수, 보통은 0.85
N - 전체 연구자 수

2.3 복합연결정도중심성 CDC

Kretschmer와 Kretschmer(2006)는 가중 네트워크에서 지역 중심성을 측정할 수 있는 지표인 복합연결정도중심성 CDC(Complex Degree Centrality)를 제안하였다. 이들이 제안한 CDC는 공동연구 네트워크와 같은 계량서지적 자료나 웹계량학(Webometrics) 자료에 적용하는 것을 고려하여 개발한 것이다. CDC는 다음과 같은 원칙을 준수하도록 고안되었다.

첫째, 공동 연구자 수가 동일하다면, 공동연구 강도가 더 높은 연구자가 더 큰 CDC를 가진다. 이를테면, 2명의 연구자와 각각 1번씩 공동연구를 수행한 연구자보다 2명의 연구자와 각각 2번씩 공동연구를 수행한 연구자의 CDC가 더 높다.

둘째, 모든 연구자 사이의 공동연구 횟수가 동일하다면 공동 연구자 수가 더 많은 연구자가 더 큰 CDC를 가진다. 이를테면 2명의 연구자와 각각 2번씩 공동연구를 수행한 연구자보다 3명의 연구자와 각각 2번씩 공동연구를 수행한 연구자의 CDC가 더 높다.

셋째, 공동 연구자의 수가 동일하고 공동연구 강도의 합도 동일할 경우에는 각 공동 연구자와의 공동연구 강도가 균일할수록 더 큰 CDC를 가진다. 이를테면 2명의 연구자와 각각 1회, 3회 공동연구를 수행한 연구자보다 2명의 연구자와 각각 2회씩 공동연구를 수행한 연구자가 더 높은 CDC를 가진다.

어떤 연구자 A의 CDC는 다음 공식으로 산출한다.

$$CDC_A = \sqrt{A\text{의 공동 연구자 ''수''} \times A\text{의 공동연구 관계 강도 합계}} = \sqrt{''DC_A'' \times TR_A}$$

이 공식에서 앞 부분인 "DC_A"는 A의 공동연구자 수를 반영하는 항이고 TR_A는 공동연구 횟수(total number of co-authorship relations)를 반영하는 항이다. 공동 연구자의 수, 즉 네트워크에서 연결된 다른 노드의 수인 연결정도(degree)를 그대로 사용하지 않는 이유는 각 공동 연구자와의 공저 횟수(연결 강도)가 균일한 경우에 더 높은 CDC가 되도록 고려했기 때문이다. CDC를 제안한 Kretschmer와 Kretschmer(2006)는 일반적인 연결정도중심성 DC(Degree Centrality)와 구분하기 위해서 이 항을 큰 따

옴표를 붙인 "DC"로 표기하였는데, 큰 따옴표가 없는 DC와 구분이 제대로 되지 않아서 다소 혼동의 소지가 있다. 이들이 제안한 방식에 따르면 특정 연구자와의 공동연구에 집중한 연구자보다는 여러 연구자와 고르게 공동연구를 수행한 연구자에게 높은 중요도가 부여된다.

공동 연구자와의 공동연구 횟수가 균일한 정도는 엔트로피 공식을 활용하여 측정한다. 연구자 A와 공동 연구자 i 사이의 연결 강도를 K_i라고 할 때, 엔트로피 H(A)는 다음과 같이 측정된다.

$$H(A) = -\sum_{i=1}^{z}\left\{\frac{K_i}{TR_A}\times\log_2\frac{K_i}{TR_A}\right\}$$

연구자 A의 공동 연구자 "수(number)"인 "DC_A"는 엔트로피를 2의 지수로 적용하여 측정하며, 엔트로피 공식이 밑수를 2로 하는 로그로 구성되어 있으므로 지수와 로그가 다음과 같이 상쇄되어 전개된다.

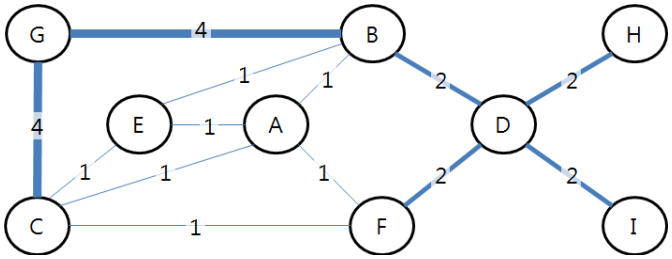
$$\begin{aligned}"DC_A" &= 2^{H(A)} = \frac{1}{2^{-H(A)}} \\ &= \frac{1}{2^{\sum_{i=1}^{z}\{\log_2 p(K_i)^{p(K_i)}\}}} \\ &= \frac{1}{\prod_{i=1}^{z} p(K_i)^{p(K_i)}} \\ &= \prod_{i=1}^{z} p(K_i)^{-p(K_i)} \\ &= \prod_{i=1}^{z} \frac{K_i}{TR_A^{-\frac{K_i}{TR_A}}} \\ &= \prod_{i=1}^{z}\left\{\left(\frac{K_i}{TR_A}\right)^{-\frac{K_i}{TR_A}}\right\}\end{aligned}$$

최종적으로 연구자 A의 복합연결정도중심성 CDC_A를 산출하는 공식을 Kretschmer와 Kretschmer(2006)가 제안한 내용에 기반하여 상세히 전개한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}CDC_A &= \sqrt{2^{H(A)}\times TR_A} \\ &= \sqrt{\prod_{i=1}^{z}\left\{\left(\frac{K_i}{TR_A}\right)^{-\frac{K_i}{TR_A}}\right\}\times TR_A}\end{aligned}$$

〈그림 1〉과 같은 연구자 9명 사이의 가상 공동연구 네트워크에서 연구자 3명과 공동연구를 수행한 연구자 F의 예로 CDC 계산 과정을 살펴보면 다음과 같다. 연구자 F는 공동 연구자가 D, A, C의 3명이고 각 연구자와 2회, 1회, 1회의 공동연구를 수행하였으므로 연결정도는 3이고 공동연구 횟수 합계 TR은 4가 된다. 이때 연구자 F의 공동 연구자 "수"인 "DC_F"는 엔트로피인 $-(2/4\times\log_2(2/4) + 1/4\times\log_2(1/4) + 1/4\times\log_2(1/4)) = 1.585$를 2의 지수로 취한 값인 2.828이 된다. 최종적으로 연구자 F의 복합연결정도중심성 CDC_F는 공동연구 횟수합계인 4와 공동 연구자 "수"인 2.828의 기하 평균인 3.364가 된다.

이런 방식으로 각 연구자의 공동연구 중심성을 측정한 결과는 〈표 1〉과 같다. 앞에서 언급한 Kretschmer와 Kretschmer(2006)의 세 가지 원칙 중에서 첫 번째 원칙에 해당하는 비교 사례로는 연구자 B와 C를 들 수 있다. 연구자 B와 C는 공동 연구자 수가 각각 4명으로 동일하지만 연구자 B의 공동연구 강도가 더 높으므로(8〉7) 더 큰 CDC를 가진다(5.187〉4.711). 두 번째에 해당하는 비교 사례는 연구자 A와 연구자 E이다. 연구자 A와 E는 각각 공동 연구자와 똑같이 1회씩의 공동연구를 수행했으나



〈그림 1〉 가상 공동연구 네트워크(선 위의 숫자는 공동연구 횟수)

〈표 1〉 가상 공동연구 네트워크에서 산출한 각 연구자의 CDC

연구자	A	B	C	D	E	F	G	H	I
공동 연구자 수 (DC)	4	4	4	4	3	3	2	1	1
공동연구 횟수 합계 (TR)	4	8	7	8	3	4	8	2	2
공동 연구자 "수" ("DC")	4.000	3.364	3.170	4.000	3.000	2.828	2.000	1.000	1.000
복합연결정도중심성 (CDC)	4.000	5.187	4.711	5.657	3.000	3.364	4.000	1.414	1.414

A의 공동 연구자 수가 E의 공동 연구자 수보다 더 크므로(4>3) CDC 값도 A가 더 높다(4.000>3.000). 세 번째 원칙에 해당하는 비교 사례로는 연구자 B와 D를 들 수 있다. 연구자 B와 D는 공동 연구자의 수가 각각 4명으로 동일하고 공동연구 강도의 합도 각각 8로 동일하지만, 연구자 B는 각 공동 연구자와의 공동연구 강도가 불균일한 반면(4회, 2회, 1회, 1회) 연구자 D는 각 공동 연구자와의 공동연구 강도가 모두 2회로 균일하므로 연구자 D가 더 큰 CDC를 가진다(5.657>5.187).

2.4 c-지수

c-지수(c-index)는 복합연결정도중심성 CDC에서 고려된 요인인 연구자의 공동 연구자 수와 공동연구 횟수 이외에 추가로 공동 연구자의 협동 능력까지 고려할 수 있도록 최근 제안된 지표이다(Yan, Zhai, & Fan, 2013). c-지수의 c는 협동 능력(collaboration competence)을 의미하므로 c-지수는 협동 능력 지수라고 해석할 수 있다. c-지수는 h-지수(Hirsch, 2005)의 개념을 응용하고 있으므로 정의도 h-지수처럼 다음과 같은 문장으로 제안되었다.

> 노드(연구자) x의 협동 능력 지수 c(x)는 노드 x와 연결된 이웃 노드의 중요도와 연결된 링크의 강도를 곱한 값이 c보다 크거나 같은 가장 큰 정수 c이다.

이때 어떤 연구자의 중요도는 공동 연구자와의 공동연구 횟수 합계, 즉 연결된 링크 가중치의 합계로 나타낸다. c-지수를 h-지수에 비유해서 설명하자면, 한 연구자에 대해서 연결된 이웃 연구자의 중요도와 해당 이웃 연구자와의 링크 강도를 곱한 값을 큰 값부터 정렬한 후 h-

〈표 2〉 가상 공동연구 네트워크에서 산출한 각 연구자의 c-지수

연구자		A	B	C	D	E	F	G	H	I
중요도(공동연구 횟수 합계)		4	8	7	8	3	4	8	2	2
공동 연구자의 중요도와 협력횟수의 곱	1위	8 (8×1)	32 (8×4)	32 (8×4)	16 (8×2)	8 (8×1)	16 (8×2)	32 (8×4)	16 (8×2)	16 (8×2)
	2위	7 (7×1)	16 (8×2)	4 (4×1)	8 (4×2)	7 (7×1)	7 (7×1)	28 (7×4)		
	3위	4 (4×1)	4 (4×1)	4 (4×1)	4 (2×2)	4 (4×1)	4 (4×1)			
	4위	3 (3×1)	3 (3×1)	3 (3×1)	4 (2×2)					
c-지수		3	3	3	4	3	3	2	1	1

지수처럼 값이 순위보다 크거나 같은 마지막 순위를 산출한 것이 c-지수에 해당한다. 연구자 x가 d명의 연구자와 공동연구를 수행했을 때, 각 공동 연구자마다 중요도와 공동연구 횟수를 곱한 값들이 모두 d보다 크다면 연구자 x의 c-지수는 연결정도와 같은 d가 된다. 따라서 어떤 연구자의 c-지수 상한값은 해당 연구자의 공동 연구자 수와 같다. 예를 들어 공동연구를 1명하고만 수행한 연구자는 함께 100회 공동연구를 수행하였더라도 c-지수는 1이 된다.

앞의 〈그림 1〉의 가상 공동연구 네트워크를 대상으로 각 연구자의 c-지수를 산출해본 결과는 〈표 2〉와 같다. 이 네트워크에서 각 연구자의 중요도는 타 연구자와의 공동연구 횟수 합계가 된다. 연구자 A의 경우에 1회씩 협력한 연구자가 B, C, E, F이고 이들의 중요도가 각각 8, 7, 3, 4이므로 중요도와 협력횟수를 곱한 값을 내림차순으로 정렬하면 8, 7, 4, 3이 된다. 3번째 값이 4이고 4번째 값이 3이므로 값이 순위보다 큰 마지막 순위인 3이 연구자 A의 c-지수이다.

2.5 공동연구 h-지수와 공동연구 hs-지수

공동연구 h-지수(collaboration h-index)는 Hirsh(2005)의 h-지수를 공동연구 네트워크에 응용한 것으로서(이재윤, 2010; Lee & Choi, 2013) 다음과 같이 정의할 수 있다.

> 특정 연구자가 공동 연구자와 수행한 개별 공동연구 건수를 내림차순으로 정렬한 후 공동연구 건수보다 작거나 같은 마지막 순위가 해당 연구자의 공동연구 h(col-h)이다.

공동연구 hs-지수(collaboration hs-index)는 h-지수의 낮은 변별력을 보완한 이재윤(2006b)의 hs-지수를 공동연구 네트워크에 응용한 것으로서, 공동연구 h-지수로 산출한 col-h위 이내의 공동연구 건수를 각각 제곱근을 취해서 합산한 값이 공동연구 hs(col-hs)이다(이재윤, 2010; Lee & Choi, 2013). 공동연구 h-지수와 공동연구 hs-지수는 여러 연구자와 다수의 공동연구를 수행하는 연구자가 높게 나타나며,

〈표 3〉 가상 공동연구 네트워크에서 산출한 각 연구자의 col-h-지수와 col-hs-지수

연구자		A	B	C	D	E	F	G	H	I
공동 연구자와의 협력횟수	1위	1	4	4	2	1	2	4	2	2
	2위	1	2	1	2	1	1	4		
	3위	1	1	1	2	1	1			
	4위	1	1	1	2					
col-h-지수		1	2	1	2	1	1	2	1	1
col-hs-지수		1.000	3.414	2.000	2.828	1.000	1.414	4.000	1.414	1.414

공동연구의 상대가 특정 연구자로만 국한되거나 여러 연구자와 한 두 차례씩만 공동 연구를 수행한 경우에는 낮게 측정된다. 〈그림 1〉의 가상 공동연구 네트워크에 대해서 각 연구자의 공동연구 h-지수와 공동연구 hs-지수를 측정해보면 〈표 3〉과 같다.

2.6 제곱근합 지수 SSR

이 연구에서는 공동연구 네트워크에서 연구자의 중심성을 측정하기 위한 새로운 척도로 제곱근합 지수 SSR(Sum of Square Roots)을 제안한다. 이는 공동연구 횟수가 연구활동이 활발할수록 빈익빈부익부 현상을 보인다는 것을 전제로 하여 공동연구 횟수를 그대로 지수에 반영하지 않고 루트 변환에 해당하는 제곱근을 취한 값으로 지수에 반영하는 방식이다. 연구자 i의 제곱근합 지수 SSR은 다음과 같이 각 공동연구자와의 협력 건수 CO_{ij}의 제곱근을 모두 합하는 것으로 산출한다.

$$SSR_i = \sum \sqrt{CO_{ij}}$$

앞에서 제시된 〈그림 1〉의 가상 공동연구 네트워크에 속한 연구자 9명에 대해서 SSR을 산출해보면 〈표 4〉와 같다. 예를 들어 연구자 B의 경우에는 4명의 연구자와 각각 4회, 2회, 1회, 1회의 공동연구를 수행하였으므로 네 수치의 제곱근을 합하면 5.414가 된다.

〈표 4〉 가상 공동연구 네트워크-3에서 산출한 각 연구자의 SSR 지수

연구자	SSR 계산식	SSR
A	$\sqrt{1}+\sqrt{1}+\sqrt{1}+\sqrt{1}$	4.000
B	$\sqrt{4}+\sqrt{2}+\sqrt{1}+\sqrt{1}$	5.414
C	$\sqrt{4}+\sqrt{1}+\sqrt{1}+\sqrt{1}$	5.000
D	$\sqrt{2}+\sqrt{2}+\sqrt{2}+\sqrt{2}$	5.657
E	$\sqrt{1}+\sqrt{1}+\sqrt{1}$	3.000
F	$\sqrt{2}+\sqrt{1}+\sqrt{1}$	3.414
G	$\sqrt{4}+\sqrt{4}$	4.000
H	$\sqrt{2}$	1.414
I	$\sqrt{2}$	1.414

제곱근합 지수 SSR은 복합연결정도중심성 CDC가 준수하는 세 가지 원칙을 다음과 같이 동일하게 지킨다. 〈그림 1〉에서 연구자 B와 C는 공동 연구자 수가 각각 4명으로 동일하지만 공동연구 강도의 합이 더 큰 연구자 B의 SSR이 연구자 C의 SSR보다 크다(5.414〉5.000). 연구자 A와 E는 각각 공동 연구자와 똑같이 1회씩의 공동연구를 수행했으나 〈표 4〉를 보면 공동 연구자 수가 더 많은 A의 SSR이 E의

SSR보다 크다(4>3). 연구자 B와 D는 공동 연구자의 수가 각각 4명으로 동일하고 공동연구 강도의 합도 각각 8로 동일하지만, 각 공동 연구자와의 공동연구 강도가 균일한 연구자 D의 SSR이 연구자 B의 SSR보다 더 크다(5.657>5.414). SSR은 각 공동연구 횟수의 제곱근을 합산한 것이므로 공동연구 횟수의 합계가 동일할 경우에는 각 공동연구 횟수의 차이가 적을수록, 즉 균일할수록 더 높은 값이 된다.

개별 공동 연구자와의 공동연구 횟수가 모두 동일한 연구자의 경우에는 복합연결정도중심성 CDC와 SSR은 같은 값이 된다. 예를 들어 연구자 A가 n명의 공동연구자와 모두 x회씩 공동연구를 수행했다면 엔트로피 H(A)는 $\log_2 n$이 되고 이를 2의 지수로 취한 "DC_A"는 n이 된다. 또한 n명과 x회씩 공동연구를 수행하였으므로 공동연구 강도 TR은 nx가 된다. 결국 "DC_A"=n에 TR=nx를 곱하여 제곱근을 취한 복합연결정도중심성 CDC는 n에 x의 제곱근을 곱한 값이 된다. 그런데 n명과 x회씩 공동연구를 수행한 경우에 SSR은 x의 제곱근을 n개 합산한 값이므로 CDC와 SSR은 같은 값이 된다. 이처럼 SSR은 CDC에 비해 간단한 방식으로 CDC의 원칙을 준수하면서 유사한 값을 산출할 수 있다.

3. 공동연구 네트워크 데이터와 중심성 측정 방법

이 연구에서는 중심성 지수 사이의 관계와 각 지수의 특징을 살펴보기 위해서 <표 7>과 같이 다양한 성격의 네트워크 데이터 3종을 준비하였다. 첫 번째 데이터는 건축학(구조) 분야의 대표적인 학술지인『대한건축학회 논문집 - 구조계』에 2000년부터 2004년까지 5년 동안 발표된 논문의 저자들 사이의 공동연구 네트워크이다(김영주, 2006). 이 데이터는 학술지 1종을 대상으로 공동연구를 분석하는 사례에 해당한다. 두 번째 데이터는 2002년부터 2011년까지 10년동안 국내 문헌정보학 학술지 5종(『정보관리연구』,『정보관리학회지』,『한국도서관·정보학회지』,『한국문헌정보학회지』,『한국비블리아학회지』)에 게재된 논문의 저자들 사이의 공동연구 데이터이다. 한국연구재단의 인용데이터베이스인 KCI에서 학술지 사이의 인용빈도를 살펴본 결과 문헌정보학 분야에서는 이들 5종 학술지가 서로를 항상 5위 이내에서 인용을 주고 받는 것으로 나타났으므로 국내 문헌정보학 분야의 대표 학술지로 선택하였다. 이 데이터는 한 학문분야의 공동연구를 분석하는 사례에 해당한다. 세 번째 데이터는 마케팅 분야의 국제 학술지 35종에 1973년부터 2009년까지 27년 동안 발표된 논문의 저자들 사이의 공동연구 데이터이다(Goldenberg, Libai, Muller, & Stremersch, 2010). 이 데이터는 장기간에 걸친 국제적인 공동연구를 분석하는 사례에 해당한다.

중심성 분석을 위해서 각 공동연구 데이터에서 주요 연구자를 선정하고 이들 주요 연구자 사이의 네트워크 중에서 최대 컴포넌트(분리되지 않은 네트워크)를 추출하였다. 주요 연구자의 선정 기준은 발표한 논문 수로 정했다. 데이터의 규모와 분야의 특성을 감안하여 건축학과 문헌정보학은 5편 이상, 마케팅 분야는 20편 이상의 논문을 발표한 연구자를 주요 연구자로 선정하였다. 주요 연구자로 구성된 세 공동연

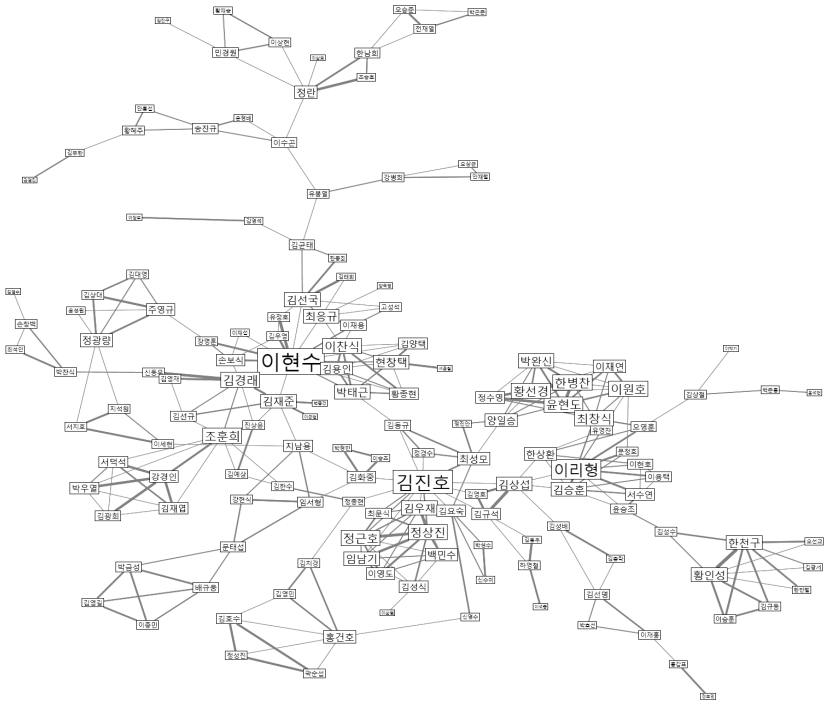
구 네트워크에서 최대 컴포넌트를 선택하여 관계를 그려보면 각각 〈그림 2〉, 〈그림 3〉, 〈그림 4〉와 같다. 이후의 분석은 Yan과 Ding(2009)의 연구와 마찬가지로 모두 최대 컴포넌트를 대상으로 진행하였다. 세 네트워크의 특징을 측정해보면 〈표 5〉와 같다.

3개 네트워크를 비교해보면 전체적으로 건축학 분야 공동연구 네트워크가 가장 작고 마케팅 분야 공동연구 네트워크가 가장 크다. 이런 차이는 자료 수집 기간과 학술지 종수의 차이에 기인했을 가능성이 높다. 규모를 나타내는 수치인 학술지 종수, 저자 수, 공저관계 수, 저자별 공저자 수 평균(평균 이웃 수) 등은 모두 마케팅이 가장 크고, 문헌정보학, 건축학의 순으로 나타난다. 반면에 네트워크 밀도나 평균 군집화 계수와 같이 저자들 사이가 잘 연결되어 있음을 나타내는 수치는 건축학이 가장 높고 마케팅 분야 네트워크가 가장 낮게 나타난다. 특이한 것은 최대 경로거리와 평균 경로거리는 밀도가 높으면서 저자의 수가 가장 적은 건축학 분야 네트워크가 가장 높게 나타났고, 밀도가 낮으면서 저자의 수가 가장 많은 마케팅 분야 네트워크가 가장 낮게 나타난 점이다. 평균 경로거리는 '네트워크의 지름'(Barabási, 2001)이라는 별칭으로 불릴 만큼 네트워크의 크기를 반영하는 지표로 알려져 있다. 일반적으로 네트워크의 지름, 즉 평균 경로거리는 네트워크에 포함된 노드의 수에 비례하는 것으로 알려져 있는데 이 연구에서 분석한 세 네트워크는 노드의 수와 평균 경로거리가 비례하지 않았다. 이는 건축학 분야 네트워크가 긴 리본 형태로 구성되어 좌우의 밀집되어 있는 두 저자군이 가운데의 소수의 링크를 통해 가늘게 연결되어 있기 때문이라고 판단된다. 반면에 마케팅 분야 공동연구 네트워크는 둥글게 뭉친 형태로 연결되어 있다.

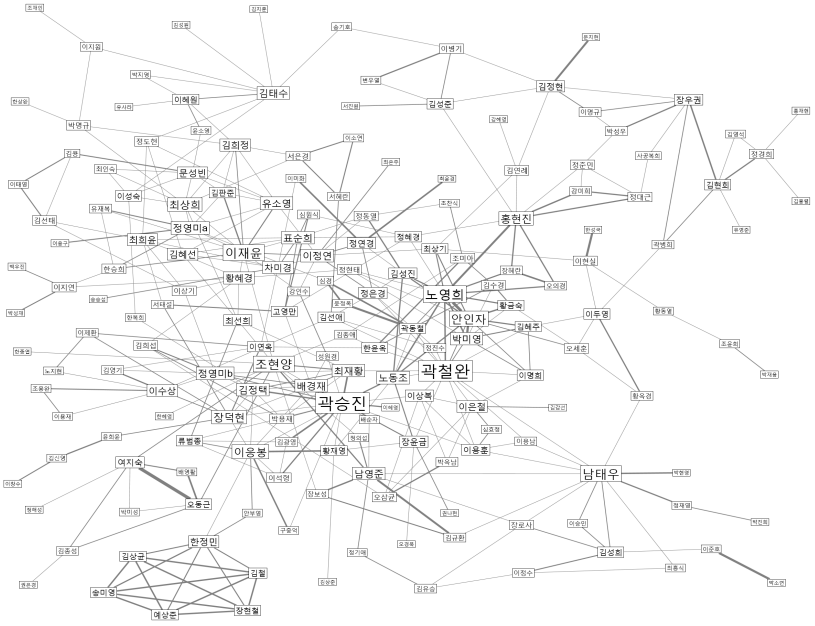
3개 네트워크에 속한 각 연구자에 대해서 각 연구자의 중심성을 측정해보았다. 이진 네트워크 중심성 지수로는 연결정도중심성(Cd), 매개중심성(Cb), 근접중심성(Cc), 페이지랭크(PR)의 4종을 사용하였다. 가중 네트워크 중심성 지수로는 범용 지수 중에서 삼각매개중심성(Ctb),

〈표 5〉 3개 네트워크 비교

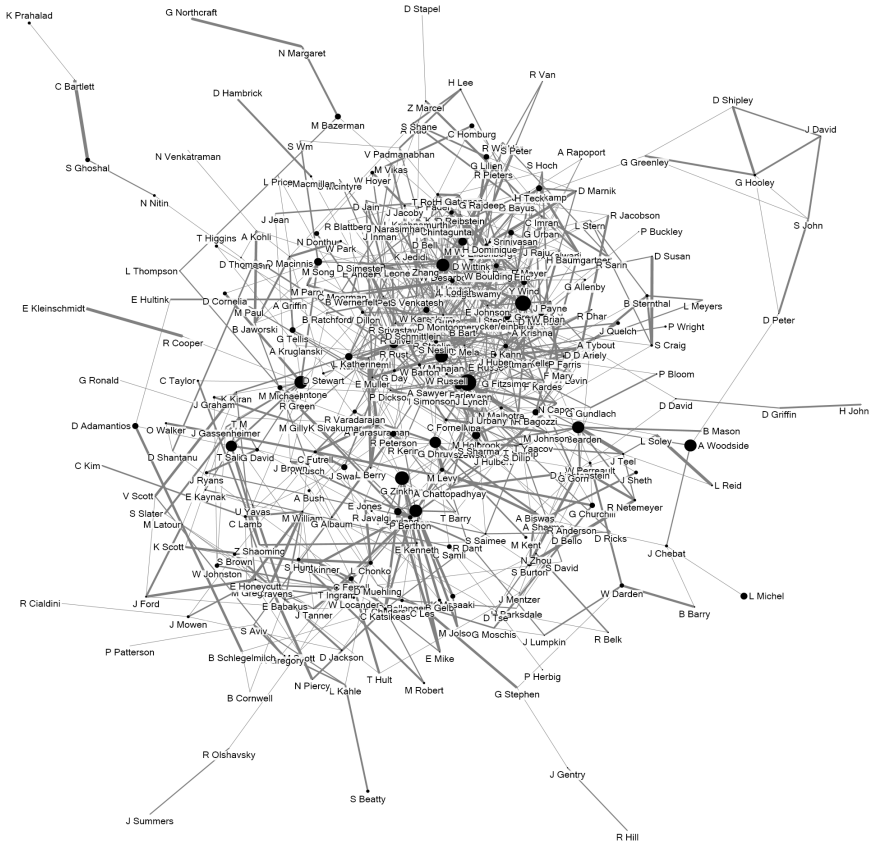
	건축학(국내)	문헌정보학(국내)	마케팅(국제)
학술지 종수	1종	5종	35종
기간	5년(2000-2004)	10년(2002-2011)	27년(1973-2009) 이상
저자 선정기준	5편 이상	5편 이상	20편 이상
노드 (저자) 수	153	182	311
링크 (공저관계) 수	306	375	912
최대 경로거리	17	12	11
평균 경로거리	6.64	4.64	4.00
네트워크 밀도	0.026	0.023	0.019
평균 군집화 계수	0.55	0.33	0.19
최대 이웃 수	16	18	32
평균 이웃 수	4.00	4.12	5.86



〈그림 2〉 건축학 분야 공동연구 네트워크(노드 크기는 링크 수에 비례)



〈그림 3〉 문헌정보학 분야 공동연구 네트워크(노드 크기는 링크 수에 비례)



〈그림 4〉 마케팅 분야 공동연구 네트워크(노드 크기는 링크 수에 비례)

평균연관성(Cm), 가중 페이지랭크(WPR)를 사용하였고, 공동연구 네트워크용 지수로는 공동연구 h-지수(col-h), 공동연구 hs-지수(col-hs), 복합연결정도중심성(CDC), 제곱근합 지수(SSR), c-지수의 8종을 적용해보았다. 이진 네트워크 중심성 지수는 NodeXL을 이용하여 측정하였고 가중 네트워크 중심성 지수 중 삼각매개중심성과 평균연관성은 WNET(이재윤, 2013)을 사용하여 측정하였으며, 가중 페이지랭크는 파이썬 언어로 측정 프로그램을 직접 작성하였다. 공동연구 h-지수를 비롯한 공동연구 네트워크용 중심성 지수는 Excel에서 함수와 수식으로 계산하였다.

개별 중심성 지수의 특징을 분석할 때에는 공동연구 범위(collaboration range)와 공동연구 강도(collaboration strength)를 기준으로 살펴보았다. 여러 공동연구 네트워크 중심성 지수에서 고려하고 있듯이 가급적 많은 수의 상대와 공동연구를 수행하고 공동연구 횟수도 많은 연구자가 공동연구 네트워크에서 중요도가 높다고 가정했기 때문이다. Zheng, Zhao, Zhang, Chen, Huang(2014)는 공동연구를 함께 수행한 상대방 숫자라는 의미로 공동연구 범위를 사용한 바 있다. 본 연구에서는 공동연구를 수

행한 연구자의 수에 해당하는 기존 지수인 연결정도중심성으로 한 연구자의 공동연구 범위를 측정하였다. 한편 공동연구 강도는 Newman (2001)에서와 같이 공동연구 수행 횟수라는 의미로 흔히 사용되고 있다. 본 연구에서는 타 연구자와의 공동연구 수행 횟수 평균에 해당하는 기존 지수인 평균연관성으로 한 연구자의 공동연구 강도를 측정하였다.

4. 네트워크 중심성 분석 결과

4.1 이진 네트워크 중심성 분석 측정 결과

3개 네트워크에서 각 연구자의 이진 네트워크 중심성 4종을 측정해본 결과 각 지수별 상위 10위 이내의 연구자는 〈표 6〉, 〈표 7〉, 〈표 8〉과 같다. 각 표에서 동률인 연구자는 칸을 나누지 않고 쉼표로 구분하였다. 각 지수별 1위 연구자를 보면 건축학 분야 네트워크와 문헌정보학 분야 네트워크에서는 두 명의 연구자가 지수별 1위를 양분하는 양상으로 나타났다. 그러나 규모가 더 크고 평균 군집화 계수가 낮은 마케팅 분야에서는 연구자 1명(D Lehmann)이 각 지수별 1위를 독점하였다.

각 지수별로 산출된 연구자의 순위가 얼마나 비슷한가를 알아보기 위해서 스피어맨 순위상관계수를 〈표 9〉와 같이 산출하였다. 순위 상관계수를 보면 세 네트워크에서 모두 연결정도중심성과 페이지랭크가 0.9 전후의 상관관계를 보여서 가장 유사한 순위를 산출한 것으로 나타났다. 이진 네트워크는 노드 사이 링크의 연결 여부를 살펴보는 네트워크이므로 연결정도중심성을 기준으로 다른 지수의 특징을 살펴보는 것이 각 지수를 이해하는데 도움이 된다. 페이지랭크가 연결정도중심성과 가장 상관관계가 높게 나타났을 뿐만 아니라 세 네트워크 모두에서 페이지랭크 1위 연구자는 연결정도중심성도 1위이므로, 페이지랭크가 매개중심성이나 근접중심성에 비해서 공동 연구자의 수에 더 크게 좌우되는 지수임을 알 수 있다. 공동연구 네트워크가 아닌 저자동시인용네트워크에 대한 Yan과 Ding(2009)의 분석에서도 페이지랭

〈표 6〉 건축학 분야 이진 네트워크 중심성 상위 10위

순위	Cd	Cb	Cc	PR
1	이현수	김진호	김진호	이현수
2	김진호	이현수	김동규	김진호
3	이리형	김상섭	이현수	이리형
4	김경래, 조훈희, 윤현도, 정상진, 정근호, 한병찬, 이원호 외 3명	김선국	박태근	정란
5		김동규	김화중, 지남용	김경래
6		박태근		한천구, 황인성
7		김균태	최성모	
8		유붕열	김재준	김재준
9		이수곤	김상섭	김선국
10		지남용	정경수	조훈희

〈표 7〉 문헌정보학 분야 이진 네트워크 중심성 상위 10위

순위	Cd	Cb	Cc	PR
1	곽승진, 곽철완	곽철완	곽철완	곽승진
2		조현양	최재황	곽철완
3	노영희	남태우	곽승진, 노영희	남태우
4	남태우	곽승진		조현양
5	이재윤	이재윤	안인자	노영희
6	조현양	노영희	노동조, 이재윤	이재윤
7	안인자	홍현진		김태수
8	이응봉	최재황	조현양	안인자
9	홍현진, 장덕현 외 1명	최상기	이정연	홍현진
10		이정연	최선희	남영준

〈표 8〉 마케팅 분야 이진 네트워크 중심성 상위 10위

순위	Cd	Cb	Cc	PR
1	D Lehmann	D Lehmann	D Lehmann	D Lehmann
2	W Desarbo, R Rust	G Dhruv	R Rust	R Rust
3		D Alan	A Sawyer	W Desarbo
4	B Kahn	R Calantone	G Dhruv, J Huber	B Kahn
5	J Huber	A Parasuraman		R Calantone
6	R Staelin, C Mela	R Rust	A Parasuraman, R Staelin	J Huber
7		G Zinkhan		G Dhruv
8	S Gupta	W Desarbo	C Mela	D Alan
9	V Mahajan, W Kamakura 외 1명	A Sawyer	W Russell, S Gupta	C Mela
10		R Bagozzi		R Staelin

〈표 9〉 이진 네트워크 중심성 간 순위 상관계수

건축학 분야				문헌정보학 분야				마케팅 분야			
	Cd	Cb	Cc		Cd	Cb	Cc		Cd	Cb	Cc
Cb	.619			Cb	.816			Cb	.750		
Cc	.515	.412		Cc	.704	.624		Cc	.859	.613	
PR	.869	.738	.280	PR	.956	.869	.567	PR	.930	.861	.681

크와 연결정도중심성의 순위상관계수가 0.950으로 높게 나타났으므로, 이진 네트워크 중심성 지수 간의 관계는 공동연구 네트워크나 저자동시인용 네트워크에서 큰 차이가 없는 것으로 추정된다. 이수상(2013)도 국내 기록관리학 분야에 대해서 공동연구 네트워크, 저자동시인용 네트워크, 저자서지결합 네트워크(이재윤, 2008)를 구축하여 비교해본 결과 이진 네트워크 중심성 지

수 간의 관계는 세 네트워크에서 모두 유사하다는 결과를 얻은 바 있다.

다만 근접 중심성의 경우, 지름이 작은 마케팅 분야 네트워크에서는 연결정도중심성과 상관성이 0.859로 높은 반면에 지름이 큰 건축학 분야 네트워크에서는 0.515로 상관성이 다소 낮게 나타났다. 지름이 작은 경우에는 네트워크 안에서 어디에 자리했는가라는 구조적인 입지보다는 연결선이 몇 개인가에 따라서 다른 연구자와의 거리가 결정되는 반면에, 지름이 큰 경우에는 네트워크 안에서 자리한 위치에 따라 다른 연구자와의 거리가 크게 좌우되기 때문이다. 따라서 근접중심성은 지름이 작은 네트워크에서는 독자적인 의미를 가지지 못한다고 볼 수 있다.

4.2 가중 네트워크 중심성 측정 결과

3개 네트워크에 속한 각 연구자의 가중 네트워크 중심성 지수를 측정해본 결과 각 지수별 상위 10위 이내의 연구자는 〈표 10〉, 〈표 11〉, 〈표 12〉와 같다. 공동연구 h-지수(col-h)는 동률 순위가 지나치게 흔해서 공동 1위인 연구자가 5명(건축학 분야)에서 11명(마케팅 분야)까지 나타날 정도로 변별력이 매우 낮았다. 공동연구 h-지수를 제외한 나머지 7개 지수별 1위 연구자를 보면 건축학 분야 네트워크와 문헌정보학 분야 네트워크에서는 세 명의 연구자가 각 지수별 1위를 삼분하는 양상으로 나타났다. 그러나 규모가 더 크고 평균 군집화 계수가 낮은 마케팅 분야에서는 공동연구 hs-지수(col-hs)를 제외한 6개 지수의 1위를 연구자 1명(D Lehmann)이 독점하였다. 이는 이진 네트워크 중심성 측정 결과와 유사한 현상이다. 공동연구 h-지수 이외에 c-지수가 세 네트워크에서 모두 동률 순위가 나타났으므로 이 두 지수는 변별력이 상대적으로 낮다고 판단된다.

가중 네트워크 지수별로 산출된 연구자의 순위가 얼마나 비슷한가를 알아보기 위해서 스피어맨 순위상관계수를 측정해본 결과는 〈표 13〉, 〈표 14〉, 〈표 15〉와 같다. 순위 상관계수를 보면 세 네트워크에서 모두 복합연결정도중심성(CDC)과 제곱근합 지수(SSR)가 1에 가까운

〈표 10〉 건축학 분야 가중 네트워크 중심성 상위 10위

	col-h	col-hs	Ctb	Cm	WPR	CDC	SSR	c-지수
1	이리형, 정상진, 윤현도, 한천구, 강경인	정상진	이현수	정상진	이현수	이현수	이현수	이현수
2		강경인	김진호	윤현도	이리형	이리형	이리형	김진호
3		윤현도	이리형	이현수	정상진	정상진	정상진	이리형
4		한천구	정상진	이리형	한천구	윤현도	윤현도	정상진, 윤현도, 한병찬, 정근호, 이찬식, 최창식, 황선경
5		이리형	김경래	한천구	강경인	김진호	김진호	
6	이현수, 한병찬	한병찬	윤현도	강경인	김경래	한천구	한천구	
7		이현수	조훈희	한병찬	정란	한병찬	한병찬	
8	김경래, 이찬식, 정근호 외 17명	황인성	김재준	황인성	윤현도	강경인	강경인	
9		김경래	한천구, 이찬식	김경래	김선국	정근호	김경래	
10		정근호		정근호	김재준	김경래	정근호	

〈표 11〉 문헌정보학 분야 가중 네트워크 중심성 상위 10위

	col-h	col-hs	Ctb	Cm	WPR	CDC	SSR	c-지수
1	곽승진, 노영희, 안인자, 홍현진, 김성진, 송미영, 김상균, 김 철, 예상준, 장현철	안인자	곽승진	노영희	곽승진	곽승진	곽승진	곽승진
2		노영희	곽철완	안인자	노영희	노영희	노영희	노영희
3		곽승진	노영희	곽승진	안인자	안인자	안인자	안인자
4		홍현진	조현양	오동근	오동근	곽철완	곽철완	이재윤, 곽철완
5		송미영, 김상균, 김 철, 예상준, 장현철	남태우	홍현진	남태우	남태우	남태우, 홍현진	
6			이재윤	여지숙	남영준	홍현진		이응봉, 장덕현, 노동조, 정영미a
7			안인자	남영준, 박미영, 송미영	여지숙	이재윤	이재윤	
8			이응봉		이재윤	조현양	조현양	
9			홍현진, 장덕현 외 1명		홍현진	이응봉	이응봉	
10		김성진		곽철완 외 4명	김현희	박미영	남영준	남태우 외 8명

〈표 12〉 마케팅 분야 가중 네트워크 중심성 상위 10위

	col-h	col-hs	Ctb	Cm	WPR	CDC	SSR	c-지수
1	D Lehmann, W Desarbo, D Alan, W Bearden, M Wedel, A Parasuraman, P Leyland, Y Wind, P Berthon, V Zeithaml 외 1명	P Leyland	D Lehmann	D Lehmann	D Lehmann	D Lehmann	D Lehmann	D Lehmann
2		P Berthon	R Rust	W Desarbo	W Desarbo	W Desarbo	W Desarbo	W Desarbo, R Rust
3		A Parasuraman	W Desarbo	P Leyland	D Alan	R Rust	R Rust	
4		M Wedel	B Kahn	P Berthon	A Parasuraman	B Kahn	B Kahn	B Kahn, S Gupta
5		W Desarbo	J Huber	V Mahajan	V Mahajan	V Mahajan	V Mahajan	
6		W Bearden	R Staelin	A Parasuraman	W Bearden	J Huber	J Huber	C Mela
7		D Alan	C Mela	W Bearden	P Leyland	C Mela	D Alan	V Mahajan, J Huber, B Eric
8		V Zeithaml	S Gupta	D Alan	M Wedel	D Alan	C Mela	
9		D Lehmann	B Eric	M Wedel	G Dhruv	S Gupta	A Parasuraman	
10		Y Wind	V Mahajan	R Rust 외 1명	P Berthon	B Eric	W Kamakura	R Staelin 외 4명

상관계수를 보여서 두 지수의 순위가 매우 유사한 것을 알 수 있다. 두 지수별 순위에서 각각 최상위 10위에 포함된 연구자를 보더라도 1명을 제외하고 순위까지 거의 동일하게 나타났다. 이외에 세 네트워크 모두에서 0.9 이상의 상관관계를 보이는 지수 쌍은 평균연관성(Cm)과 복합연결정도중심성, 평균연관성과 제곱근합 지수, c-지수와 복합연결정도중심성, c-지수와 제곱근합 지수의 네 쌍이다.

공동연구 강도를 의미하는 평균연관성을 기준으로 가중 네트워크 중심성 지수들의 특징을 살펴보는 것이 각 지수의 특징을 이해하는데 도움이 된다. 평균연관성과의 상관관계는 제곱근합 지수와 복합연결정도중심성 이외에 공동연구 hs-지수가 0.9 전후의 값을 보여서 높게 나타났다. 삼각매개중심성(Ctb)은 세 네트워크 모두에서 평균연관성과의 상관관계가 가장 낮은 것으로 나타났다. 다른 지수들은 평균연관성과의 상관관계가 세 네트워크에서 유사하게 나타났지만 가중 페이지랭크(WPR)는 큰 편차를 보였다. 평균연관성과의 상관관계를 살펴보면 지름이 가장 큰 건축학 분야 네트워크에서는 7개

〈표 13〉 가중 네트워크 중심성 간 순위 상관계수 - 건축학 분야

	Cm	col-h	col-hs	Ctb	WPR	CDC	SSR
col-h	.780						
col-hs	.933	.903					
Ctb	.627	.554	.508				
WPR	.761	.664	.756	.630			
CDC	.951	.801	.862	.765	.722		
SSR	.957	.783	.859	.761	.719	.998	
c-지수	.827	.675	.688	.829	.592	.941	.942

〈표 14〉 가중 네트워크 중심성 간 순위 상관계수 - 문헌정보학 분야

	Cm	col-h	col-hs	Ctb	WPR	CDC	SSR
col-h	.728						
col-hs	.861	.878					
Ctb	.646	.400	.360				
WPR	.923	.638	.763	.735			
CDC	.935	.690	.707	.811	.891		
SSR	.941	.680	.713	.809	.897	.999	
c-지수	.777	.551	.499	.847	.739	.929	.925

〈표 15〉 가중 네트워크 중심성 간 순위 상관계수 - 마케팅 분야

	Cm	col-h	col-hs	Ctb	WPR	CDC	SSR
col-h	.785						
col-hs	.900	.904					
Ctb	.771	.631	.554				
WPR	.952	.749	.870	.729			
CDC	.919	.757	.745	.945	.861		
SSR	.930	.757	.758	.940	.872	.999	
c-지수	.787	.650	.576	.973	.715	.953	.949

지수 중에서 6위에 그쳤으며(0.761), 지름이 중간인 문헌정보학 분야 네트워크에서는 3위로 중간 순위였고(0.923), 지름이 가장 작은 마케팅 분야 네트워크에서는 7개 지수 중에서 평균 연관성과 가장 높은 상관관계(0.952)를 가진 지수로 나타났다. 따라서 가중 페이지랭크는 다른 가중 네트워크 지수에 비해서 개별 네트워크의 상황, 특히 네트워크 지름에 많이 좌우되는 것으로 추정된다.

4.3 이진 네트워크 중심성 지수와 가중 네트워크 중심성 지수의 비교

3종의 공동연구 네트워크에서 이진 네트워크

중심성 지수 4종과 가중 네트워크 중심성 8종 사이의 스피어맨 순위상관계수를 측정해본 결과는 〈표 16〉과 같다.

이진 네트워크 중심성의 기본 지수인 연결정도중심성과 가장 관련이 깊게 나타난 가중 네트워크 중심성 지수는 c-지수로서 0.98 내외의 높은 상관성을 보인다. c-지수는 공동연구자의 수가 상한값이어서 연결정도중심성보다 커질 수가 없으므로 이런 현상이 나타난 것으로 이해된다. 실제로 건축학 분야의 경우 153명의 연구자 중에서 87%에 달하는 133명이 공동연구자 수(연결정도중심성)와 동일한 c-지수를 가지는 것으로 나타났다. c-지수 다음으로 연결정도중심성과의 상관성이 높은 지수는 복합연결정도중심성과 제곱근합 지수 그리고 삼각매개중심성(Ctb)이었다. 반면에 공동연구 h-지수와 공동연구 hs-지수는 연결정도중심성과의 상관성이 상대적으로 낮게 나타났다.

분석에 포함된 지수 12종의 특성을 종합적으로 비교해보기 위해서 3장에서 밝혔듯이 공동연구 범위를 알려주는 연결정도중심성과 공동연구 강도를 알려주는 평균연관성을 기준으로 분석을 시도해보았다. 공동연구 네트워크에서 연결정도중심성과 상관성이 높다는 것은 공동연구자가 많을수록 높은 값이 산출되는 지수임을 의미한다. 이와 달리 공동연구 네트워크에서 평균연관성과 상관성이 높다는 것은 공동연구 횟수가 많을수록 높은 값이 산출되는 지수임을 의미한다. 결국 연결정도중심성과의 상관성은 해당 지수가 공동연구 관계의 범위를 반영하는 정도를 알려주고, 평균연관성과의 상관성은 해당 지수가 공동연구 관계의 강도를 반영하는 정도를 알려준다.

12종의 지수에 대해서 연결정도중심성 및 평균연관성과의 순위상관계수를 각각 가로축과 세로축에 나타내면 〈그림 5〉, 〈그림 6〉, 〈그림 7〉과 같다. 세 그림에서 가로축과 세로축의 교차점에서 우상향 45도로 가상의 선을 그렸을 때 왼쪽 위에 위치하는 지수는 연결정도중심성보다 평균연관성, 즉 공동연구 강도를 더 반영하는 지수임을 의미한다. 반면에 선의 오른쪽 아래에 위치하는 지수는 평균연관성보다 연결정도중심성, 즉 공동연구 범위를 더 반영하는 지수임을 의미한다. 연결정도중심성과 평균연관성의 순위상관계수는 세 네트워크에서 0.8 전후의 값을 보이므로 연결정도중심성은 가로축

〈표 16〉 이진 네트워크 중심성과 가중 네트워크 중심성 간 순위 상관계수

건축학 분야					문헌정보학 분야					마케팅 분야				
	Cd	Cb	Cc	PR		Cd	Cb	Cc	PR		Cd	Cb	Cc	PR
col-h	0.659	0.312	0.251	0.590	col-h	0.525	0.308	0.276	0.482	col-h	0.633	0.452	0.487	0.594
col-hs	0.667	0.267	0.305	0.563	col-hs	0.482	0.278	0.237	0.456	col-hs	0.559	0.404	0.392	0.553
Ctb	0.855	0.835	0.454	0.862	Ctb	0.907	0.924	0.674	0.919	Ctb	0.989	0.784	0.849	0.934
Cm	0.813	0.368	0.432	0.666	Cm	0.789	0.554	0.484	0.749	Cm	0.780	0.582	0.607	0.767
WPR	0.604	0.486	0.151	0.766	WPR	0.795	0.659	0.403	0.835	WPR	0.722	0.636	0.482	0.793
CDC	0.938	0.499	0.474	0.798	CDC	0.947	0.710	0.623	0.895	CDC	0.956	0.711	0.792	0.908
SSR	0.940	0.497	0.481	0.794	SSR	0.944	0.710	0.620	0.895	SSR	0.951	0.708	0.786	0.905
c-지수	0.991	0.598	0.534	0.838	c-지수	0.969	0.751	0.730	0.891	c-지수	0.987	0.724	0.861	0.904

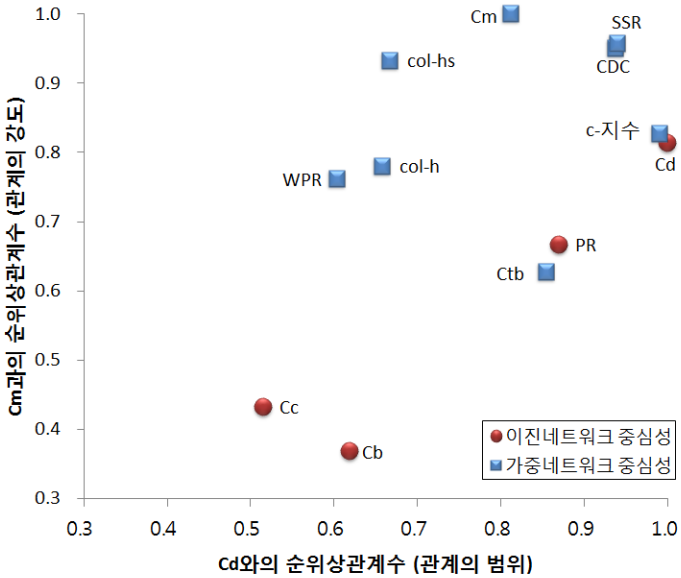
으로 1.0, 세로축으로는 0.8 부근에 위치하고, 평균연관성은 세로축으로 1.0, 가로축으로 0.8 부근에 위치한다.

세 공동연구 네트워크에서 측정된 순위 상관계수 값을 보면 이진 네트워크 중심성 지수인 페이지랭크, 근접중심성, 매개중심성은 모두 평균연관성보다는 연결정도중심성과의 상관성이 더 높게 나타난다. 상대적으로 근접중심성이나 매개중심성보다는 페이지랭크가 평균연관성과의 상관성이 더 높게 나타났다.

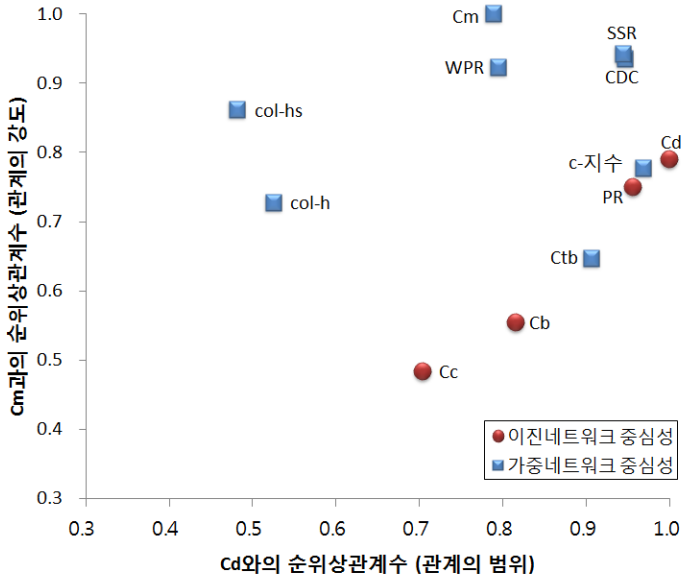
가중네트워크 중심성 지수 중에서 공동연구 h-지수, 공동연구 hs-지수, 가중페이지랭크의 3종은 평균연관성과의 순위상관계수가 뚜렷하게 더 높게 나타났으므로 공동연구 범위보다 강도를 더 반영하는 지표임을 알 수 있다. 반면에 삼각매개중심성과 c-지수는 연결정도중심성과의 순위상관계수가 더 높게 나타났으므로 공동연구 강도보다 범위를 더 반영하는 지표임이 드러났다. 특히 c-지수는 연결정도중심성과의 순위상관계수가 0.95 내외로 매우 높게 나타났는데, 이는 c-지수가 공동연구자의 수와 같거나 그에 가까운 값이 산출되는 성향 때문이다.

가중네트워크 중심성 지수 중에서 복합연결정도중심성과 제곱근합 지수는 평균연관성 및 연결정도중심성과의 순위상관계수가 모두 0.9 이상으로 높게 나타나서 공동연구의 강도와 범위를 모두 잘 반영하는 지수인 것으로 나타났다. 그 결과 이 두 지수만이 〈그림 5〉, 〈그림 6〉, 〈그림 7〉에서 오른쪽 최상단에 위치하였다.

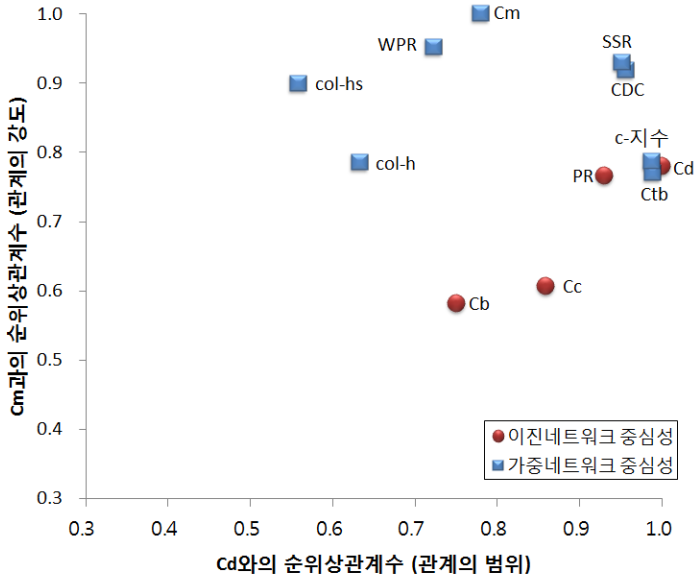
전체적으로 살펴보면 공동연구의 강도를 상대적으로 더 반영하는 지표로는 평균연관성을 비롯하여 가중페이지랭크, 공동연구 h-지수, 공동



〈그림 5〉 지수별 Cd(공동연구 범위) 및 Cm(공동연구 강도)과의 순위상관계수 - 건축학



〈그림 6〉 지수별 Cd(공동연구 범위) 및 Cm(공동연구 강도)과의 순위상관계수 - 문헌정보학



〈그림 7〉 지수별 Cd(공동연구 범위) 및 Cm(공동연구 강도)과의 순위상관계수 - 마케팅

〈표 17〉 공동연구 네트워크에서 파악된 각 중심성 지수의 특징

구분	지수	특징 (공동연구의 범위와 강도, 기타 요인 반영 정도)
이진 네트워크 중심성	연결정도중심성(Cd)	공동연구 범위를 나타냄.
	매개중심성(Cb)	공동연구 범위를 다소 더 반영함. 구조적인 입지를 크게 반영함.
	근접중심성(Cc)	공동연구 범위를 다소 더 반영함. 구조적인 입지를 크게 반영함.
	페이지랭크(PR)	공동연구 범위를 많이 반영함.
가중 네트워크 중심성	평균연관성(Cm)	공동연구 강도를 나타냄.
	공동연구 h-지수(col-h)	공동연구 강도를 다소 더 반영함. 변별력이 낮음. 구조적인 입지를 약간 반영함.
	공동연구 hs-지수(col-hs)	공동연구 강도를 많이 반영함. 구조적인 입지를 약간 반영함.
	삼각매개중심성(Ctb)	공동연구 범위를 더 반영함. 구조적인 입지를 약간 반영함.
	가중페이지랭크(WPR)	공동연구 강도를 더 반영함. 구조적인 입지를 약간 반영함.
	복합연결정도중심성(CDC)	공동연구 범위 및 강도를 모두 고르게 크게 반영함. 제곱근합 지수와 유사함.
	제곱근합 지수(SSR)	공동연구 범위 및 강도의 반영 수준이 모두 매우 높음. 복합연결정도중심성과 유사하고 간단하게 산출 가능함.
	c-지수	공동연구 범위를 주로 반영함. 연결정도중심성과 같은 값을 보이는 경우가 흔하고 변별력이 낮음.

연구 hs-지수가 있고 이들은 모두 가중네트워크 중심성 지수이다. 공동연구의 범위를 강도보다 더 반영하는 지표로는 연결정도중심성을 비롯하여 근접중심성, 매개중심성, 페이지랭크 등의 이진네트워크 중심성 지수와 함께 c-지수, 삼각매개중심성 등의 가중네트워크 중심성 지수가 포함된다. 복합연결정도중심성과 제곱근합 지수는 공동연구의 강도와 범위를 모두 강하게 반영하는 복합 지표인 것으로 확인되었다. 이상의 분석을 통해 파악된 각 지수의 특징을 간단히 정리해보면 〈표 17〉과 같다.

5. 결 론

주제 분야와 규모가 다른 세 가지 공동연구 네트워크에 대해서 4종의 이진 네트워크 중심성 지수와 8종의 가중 네트워크 중심성 지수를 측정해보았다. 조사 대상 중심성 지수 중에서 이진 네트워크 중심성 지수인 연결정도중심성 지수는 얼마나 많은 연구자와 공동연구를 수행했는가를 측정한 결과이므로 공동연구 범위를 나타내는 기준 지표로 삼았다. 또한 가중 네트워크 중심성 지수인 평균연관성은 수행된 타 연구자와의 공동연구 횟수(0 포함)의 평균을 산출한 것이므로 공동연구 강도를 나타내는 기준 지표로 삼았다. 서론에서 제시한 세 가지 연구 문제의 탐구 결과를 공동연구 범위와 강도를 의미하는 두 기준 지표를 사용하여 정리해보면 다음과 같다.

첫째, 이진 네트워크 중심성 지수 4종 중에서는 연결정도중심성과 페이지랭크가 0.9 전후의 순위 상관관계를 보여서 관련이 깊었다. 전역 중심성인 매개중심성과 근접중심성은 연결정도중심성과의 상관관계가 페이지랭크보다 낮았고 두 전역 중심성 지수 사이의 관계도 높지 않았다. 지역 중심성을 측정하는 연결정도중심성 지수는 연구자의 직접적인 공동연구 범위를 측정

하는 것인데 페이지랭크도 측정 범위 면에서 이웃의 영향력까지만 고려하므로 연구자 주변만 고려한다는 점에서 유사한 결과가 나온 것으로 해석된다. 반면에 전역 중심성 지수는 연구자의 직접적인 공동연구 범위보다는 네트워크 전체의 구조를 고려하는 지수이기 때문에 구조적인 입지를 반영하는 것으로 볼 수 있다.

둘째, 가중 네트워크 중심성 지수 8종 중에서는 복합연결정도중심성과 제곱근합 지수가 거의 동일한 결과를 나타내는 지수인 것으로 나타났으며, 이들 두 지수와 순위 상관계수가 0.9 이상으로 가까운 다른 지수로 평균연관성과 c-지수가 있었다. 공동연구 강도를 나타내는 평균연관성과의 상관관계를 기준으로 보면 세 네트워크에서 공통적으로 제곱근합 지수와 복합연결정도중심성이 공동연구의 강도를 높게 반영하였고, 공동연구 hs-지수가 그 다음이었으며, 공동연구 h-지수와 삼각매개중심성이 상대적으로 공동연구 강도를 낮게 반영하는 성향을 보였다. 세 네트워크에서 일관된 결과를 보인 다른 가중 네트워크 지수와 달리 가중 페이지랭크는 네트워크의 지름에 따라서 공동연구 강도와의 상관성이 뚜렷하게 반비례하는 경향을 보였다.

셋째, 이진 네트워크 중심성 지수와 가중 네트워크 중심성 지수 간의 상관관계를 살펴본 결과, 이진 네트워크 중심성 지수인 연결정도중심성과는 가중 네트워크 중심성 지수인 c-지수가 세 네트워크 모두에서 0.96 이상으로 매우 유사하게 나타났고, 이진 네트워크 중심성 지수인 매개중심성과는 가중 네트워크 중심성 지수 중에서 삼각매개중심성이 가장 유사하였으며, 페이지랭크와도 삼각매개중심성이 가장 유사하게 나타났다. 이진 네트워크 중심성 지수는 모두 공동연구 강도보다는 공동연구 범위를 더 많이 반영한 반면, 가중 네트워크 중심성 지수는 공동연구 범위를 더 반영하는 정도가 지수에 따라 다르게 나타났다. 가중 네트워크 중심성 지수 중에서 c-지수는 공동연구 범위에 좌우되었고, 가중 페이지랭크, 공동연구 h-지수, 공동연구 hs-지수는 모두 공동연구 강도를 더 많이 반영하였다.

결론적으로 이진 네트워크 중심성 지수는 공동연구 네트워크에서 공동연구 범위만 반영할 뿐이고 공동연구 강도를 반영하지 못하였기에, 가중 네트워크 중심성 지수를 사용하여야만 공동연구 범위까지 함께 고려하는 측정 결과를 얻을 수 있었다. 가중 네트워크 중심성 지수 중에서 삼각매개중심성은 공동연구 강도보다는 공동연구 범위를 반영하는 경향이 더 강하고 매개중심성과의 상관성이 높은 것으로 볼 때 네트워크의 구조 또한 반영하는 성질을 가지고 있다. 따라서 공동연구 네트워크에서 네트워크 전체를 고려하는 전역 중심성을 측정하는 지표로 삼각매개중심성을 활용하는 것이 바람직하다. 가중 네트워크 중심성 지수 중에서 이 연구에서 제안한 제곱근합 지수는 복합연결정도중심성 지수와 함께 공동연구의 강도와 범위를 모두 강하게 반영하면서도 간단하게 계산할 수 있으므로, 공동연구 네트워크에서 연구자 중심의 직접적인 공동연구 관계를 고려하는 지역 중심성을 측정하는 지표로 활용하는 것이 바람직하다. 공동연구 네트워크가 가중 네트워크의 한 유형이므로 제곱근합 지수를 다른 유형의 가중 네트워크에 대해서 지역 중심성을 측정하는 범용 중심성 지표로 사용하는 것도 고려해볼 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

김영주 (2006). 국내 건축학 분야 연구자들의 지적 구조에 관한 연구. 석사학위논문, 경기대학교 대학원, 문헌정보학과.

김용학, 윤정로, 조혜선, 김영진 (2007). 과학기술 공동연구의 연결망 구조: 좁은 세상과 위치 효과. 한국사회학, 41(4), 68-103.

김원진, 정영미 (2010). 과학기술분야 국제협력 증진을 위한 아시아 국가 간 공동연구 현황 분석. 정보관리학회지, 27(3), 103-123. http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2010.27.3.103

이수상 (2011). 공저빈도에 따른 공저 네트워크의 속성 연구: 문헌정보학 분야 4개 학술지를 중심으로. 한국도서관·정보학회지, 42(2), 105-125.

이수상 (2013). 연구자 네트워크의 중심성과 연구성과의 연관성 분석: 국내 기록관리학 분야 학술논문을 중심으로. 한국도서관·정보학회지, 44(3), 405-428.

이재윤 (2006a). 계량서지적 네트워크 분석을 위한 중심성 척도에 관한 연구. 한국문헌정보학회지, 40(3), 191-214.

이재윤 (2006b). 연구성과 평가를 위한 h-지수의 개량에 관한 연구. 정보관리학회지, 23(3), 167-186. http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2006.23.3.167

이재윤 (2008). 서지적 저자결합 분석: 연구동향 분석을 위한 새로운 접근. 정보관리학회지, 25(1), 173-190. http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2008.25.1.173

이재윤 (2010). 계량분석 기법을 활용한 연구 동향 분석: LED 분야. 산업기술진흥원.

이재윤 (2013). tnet과 WNET의 가중 네트워크 중심성 지수 비교 연구. 정보관리학회지, 30(4), 241-264. http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2013.30.4.241

이재윤, 김판준, 강대신, 김희정, 유소영, 이우형 (2011). 계량서지적 기법을 활용한 LED 핵심 주제영역의 연구 동향 분석. 정보관리연구, 42(3), 1-26.

Barabási, A. L. (2002). Linked: The new science of networks. Cambridge, Mass.: Perseus Pub.

Bollen, J., Rodriguez, M. A., & Van de Sompel, H. (2006). Journal status. Scientometrics, 69(3), 669-687. http://dx.doi.org/10.1007/s11192-006-0176-z

Brin, S., & Page, L. (1998). The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine. Computer Networks and ISDN Systems, 30(1-7), 101-117.

Chung, EunKyung (2011). Interdisciplinary collaborations in the domain of digital libraries. Journal of the Korean Society for Information Management, 28(2), 37-51. http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2011.28.2.037

Ding, Y., Yan, E., Frazho, A., & Caverlee, J. (2009). PageRank for ranking authors in co-citation

networks. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 60(11), 2229-2243.

Goldenberg, J., Libai, B., Muller, E., & Stremersch, S. (2010). Database submission: The evolving social network of marketing scholars. Marketing Science, 29(3), 561-567. http://dx.doi.org/10.1287/mksc.1090.0539

Hirsch, J. E. (2005). An index to quantify an individual's scientific research output. Proceedings of the National Academy of Sciences of America, 102(46), 16569-16572.

Kretschmer, H., & Kretschmer, T. (2006, May). A new centrality measure for social network analysis applicable to bibliometric and webometric data. Paper presented at the Second International Workshop on Webometrics, Informetrics and Scientometrics & 7th COLLNET Meeting, Nancy, France. Retrieved from http://eprints.rclis.org/7606/2/Kretschmer18aps.pdf

Lee, Jae Yun, & Choi, Sanghee (2011). Intellectual structure and infrastructure of informetrics: Domain analysis from 2001 to 2010. Journal of the Korean Society for Information Management, 28(2), 11-36. http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2011.28.2.011

Lee, Jae Yun, & Choi, Sanghee (2013). Collaboration networks and document networks in informetrics research from 2001 to 2011. Journal of the Korean Society for Information Management, 30(1), 179-191. http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2013.30.1.179

Liu, X., Bollen, J., Nelson, M. L., & Van de Sompel, H. (2005). Co-authorship networks in the digital library research community. Information Processing and Management, 41(6), 1462-1480. http://dx.doi.org/10.1016/j.ipm.2005.03.012

Newman, M. E. J. (2001). Scientific collaboration networks: II. Shortest paths, weighted networks, and centrality. Physical Review E, 64, 016132.

Shrum, W., Genuth, J., & Chompalov, I. (2007). Structures of scientific collaboration. Cambridge, Mass.: MIT Press.

Xing, W., & Ghorbani, A. (2004). Weighted pagerank algorithm. Proceedings of the Second Annual Conference on Communication Networks and Services Research (CNSR'04), 305-314.

Yan, E., & Ding, Y. (2009). Applying centrality measures to impact analysis: A coauthorship network analysis. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 60(10), 2107-2118.

Yan, X., Zhai, L., & Fan, W. (2013). C-index: A weighted network node centrality measure for collaboration competence. Journal of Informetrics, 7(1), 223-239. http://dx.doi.org/10.1016/j.joi.2012.11.004

Yoshikane, F., & Kageura, K. (2004). Comparative analysis of coauthorship networks of different

domains: The growth and change of networks. Scientometrics, 60(3), 435-446.

Zheng, J., Zhao, Z., Zhang, X., Chen, D., & Huang, M. (2014). International collaboration development in nanotechnology: A perspective of patent network analysis. Scientometrics, 98(1), 683-702. http://dx.doi.org/10.1007/s11192-013-1081-x

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

Kim, Won-Jin, & Chung, Young-Mee (2010). A study on research collaboration among Asian countries in science and technology. Journal of the Korean Society for Information Management, 27(3), 103-123. http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2010.27.3.103

Kim, Yong Hak, Yoon, Jung Ro, Cho, Haesun, & Kim Yung Jin (2007). Structure of collaboration network among Korean scientists: 'Small World' and position effect. Korean Journal of Sociology, 41(4), 68-103.

Kim, Young Joo (2005). A study on the intellectual structure of the field of architecture research in Korea. Unpublished master's thesis, Kyonggi University, Suwon, Korea.

Lee, Jae Yun (2006a). Centrality measures for bibliometric network analysis. Journal of the Korean Society for Library and Information Science, 40(3), 191-214. http://dx.doi.org/10.4275/KSLIS.2006.40.3.191

Lee, Jae Yun (2006b). Some improvements on h-index: Measuring research outputs by citations. Journal of the Korean Society for Information Management, 23(3), 167-186. http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2006.23.3.167

Lee, Jae Yun (2008). Bibliographic author coupling analysis: A new methodological approach for identifying research trends. Journal of the Korean Society for Information Management, 25(1), 173-190. http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2008.25.1.173

Lee, Jae Yun (2010). A bibliometric analysis on LED research trends. Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT). (in Korean).

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. http://dx.doi.org/10.3743/KOSIM.2013.30.4.241

Lee, Jae Yun, Kim, Pan-Jun, Kang, Dae-Shin, Kim, Hee-Jung, Yu, So-Young, & Lee, Woo-Hyoung (2011). A bibliometric analysis on LED research. Journal of Information Management, 42(3), 1-26.

Lee, Soo-Sang (2011). A analytical study on the properties of coauthorship network based on the co-author frequency. Korean Library And Information Science Society, Journal of Korean Library and Information Science Society, 42(2), 105-125.

Lee, Soo-Sang (2013). Analytical study on the relationship between centralities of research networks and research performances. Journal of Korean Library and Information Science Society, 44(3), 405-428.