



네트워크 흐름의 속도에 따른 공간구조 변화

The Organization of Spatial Networks by the Velocity of Network Flows

한이철* · 이정재**† · 이성우***

Han, Yicheol · Lee, Jeongjae · Lee, Seong Woo

ABSTRACT

The nature of a network implies movement among vertices, and can be regarded as flows. Based on the flow concept which network follows the hydraulic fluid principle, we develop a spatial network model using Bernoulli equation. Then we explore the organization of spatial network and growth by the velocity of network flows. Results show that flow velocity determines network connections or influence of a vertex up to a point, and that the overall network structure is the result of pull force (pressure) and flow velocity. We demonstrate how one vertex can monopolize connections within a network.

Keywords: Complex networks; network flow; spatial structure; network velocity

1. 서 론

농촌개발계획을 수립하는데 있어 상위 차원인 국토공간구조의 형성과정과 변화방향을 분석하는 일은 매우 중요하다. 국토공간구조는 다양한 요인들이 작용하며 현상을 유도하는 대표적인 복잡계 네트워크 중의 하나이다. 따라서 복잡계 네트워크 구조의 형성과정과 내부적인 원리에 대한 연구는 보다 효과적인 농촌개발계획 수립을 위해 필요하다.

네트워크 구조는 기본적으로 한 절점이 연결될 다른 절점을 결정하는 연계방법에 따라 결정된다. 기존의 연계방법 연구들은 크게 점과 선 차원으로 나누어지는데, 점 차원에서는 연결선 수 (Barabási and Albert, 1999)나 유인력 (Bianconi and Barabási, 2001a)에 따른 선호적 연계로, 선 차원에서는 최단 이동거리, 이동비용 (Gastner and Newman 2006), 직선거리 (Liu and Zhao, 2006; Boccaletti et al., 2006), 또는 이동시간 (Masucci and Rodger, 2008)에 따른 최적노선으로 절점

들은 연계된다고 밝히고 있다. 네트워크의 본질은 전류, 교통량, 소문, 돈, 정보 그리고 사람 등과 같은 요소 간 흐름의 양 (Newman, 2005; Borgatti and Everett, 2006; González et al., 2008; Goetz et al., 2010)이기 때문에, 많은 연구자들은 네트워크를 하나의 흐름으로서 이해한다 (Freeman et al., 1991; Borgatti, 2005; Barthélemy and Flammini, 2006; Patuelli et al., 2007; Tutzauer, 2007). 절점 간 연계량인 네트워크 흐름은 유체로 이해될 수 있고, 유체의 흐름 공식을 이용하여 네트워크를 모델링 할 수 있을 것이다. 그러나 현재까지 흐름이 가지는 점성, 압축, 속도 등 물리적 속성에 따라 네트워크를 모의하고, 실제 자료를 이용하여 적용한 연구는 진행되지 않고 있다.

베르누이 방정식은 압력, 속도, 위치, 그리고 손실 (마찰)수두를 이용하여 유체의 흐름을 설명하는, 가장 잘 알려진 수리방정식 중의 하나이다. 만약 네트워크 흐름이 비압축, 비점성, 정상상태이면, 각 수두는 네트워크 요소 중 유인력, 네트워크 속도, 연결선 수, 그리고 이동시간 (비용)으로 각각 대응될 수 있다. 따라서 베르누이 방정식을 응용하면 네트워크 내 흐름의 방향과 크기를 모델링 할 수 있고, 네트워크 환경과 흐름 속성 변화에 따라 유발되는 연계의 재 조직화, 네트워크 구조의 변화를 모의 할 수 있을 것이다.

사람의 이동은 농촌개발계획의 수립에 있어 가장 중요한 요소 중 하나이다. 그런데 특정 지역으로 인구의 유입은 타 지역에서 인구의 유출을 의미하므로, 농촌개발계획은 인구라는 닫힌 시스템에 기반한, 공간 네트워크의 변화를 고려해야 한다.

* 서울대학교 대학원

** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부, 서울대학교 농업생명과학연구원

*** 서울대학교 농업생명과학대학 농경제사사회학부, 서울대학교 농업생명과학연구원

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4589

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: lj@snua.ac.kr

2010년 9월 30일 투고

2010년 10월 26일 심사완료

2010년 11월 3일 게재확정

본 연구에서 제안한 네트워크의 환경 요인과 절점의 유인력에 의해 형성되는 공간구조를 이용하면 도시화, 탈 농촌과정, 불균일한 지역정책 등 농촌개발계획의 결과를 모의할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 베르누이 공간 네트워크 모델과 우리나라의 지역 간 통근자료를 이용하여, 지역간 통근 흐름의 속도를 밝히고, 속도의 증가에 따른 통근 네트워크의 변화를 모의하여 네트워크 구조를 이용한 공간구조 형성 모델의 적용가능성을 분석하고자 한다.

II. 베르누이 공간 네트워크 모델

움직이는 모든 물체는 에너지를 가지고 있다. 에너지 보존법에 의하면 정상상태인 이상유체의 경우, 임의의 절점에서 압력, 운동, 위치, 그리고 마찰 에너지의 합은 항상 일정하다. 에너지를 수두로 변환하여 베르누이 공식은 절점 i 에서 j 로 이동하는 흐름을 eq. 1과 같이 설명한다.

$$\frac{1}{\gamma}p_i + \frac{v_i^2}{2g} + z_i = \frac{1}{\gamma}p_j + \frac{v_j^2}{2g} + z_j + \lambda(d_{ij})^{-\alpha} \quad (1)$$

여기에서 p_i , v_i , 그리고 z_i 는 각각 절점 i 에서 압력, 속도, 위치 수두이고, d_{ij} 는 절점 i 와 j 간의 직선거리이다. 상수 γ 는 비중, g 는 중력가속도, 그리고 λ 는 단위 길이당 수두 손실량, α 는 거리에 따른 손실량의 체감률이다. 이를 변형하면, 임의의 두 절점 i 와 j 간 위치수두의 차 z_{ij} 는 eq. 2와 같이 유도된다.

$$z_{ij} = -\frac{1}{\gamma}p_{ij} - \frac{v_j^2 - v_i^2}{2g} - \lambda(d_{ij})^{-\alpha} \quad (2)$$

여기에서 $z_{ij} = z_j - z_i$ 이고, $p_{ij} = p_j - p_i$ 이다. 만약 네트워크의 모든 절점이 공간상에 고정되어 있다면, 네트워크 내 위치수두 차는 압력과 속도의 변화에 따라 결정된다 (Fig. 1). 변화가 일어나기 전을 t 라 하고, 변화가 일어난 이후를 $t+1$ 이라 하면, eq. 2으로부터 압력만 변한 경우 eq. 3과 속도만 변한 경우 eq. 4를 얻을 수 있다.

$$\hat{z}_{ij}^p(t+1) = -\frac{1}{\gamma}p_{ij}(t+1) - \frac{v_j(t)^2 - v_i(t)^2}{2g} - \lambda(d_{ij})^{-\alpha} \quad (3)$$

$$\hat{z}_{ij}^v(t+1) = -\frac{1}{\gamma}p_{ij}(t) - \frac{v_j(t+1)^2 - v_i(t+1)^2}{2g} - \lambda(d_{ij})^{-\alpha} \quad (4)$$

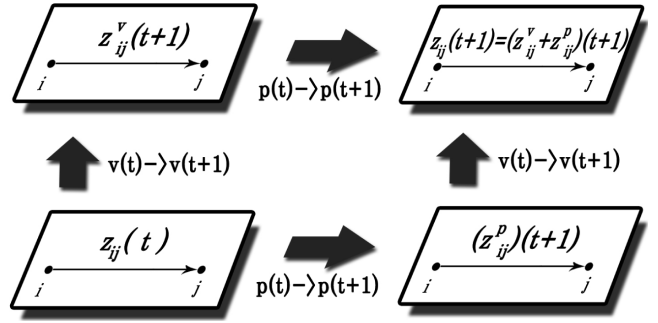


Fig. 1 The network changes by time step. The network rewires when pressure of vertex and/or velocity of flow is/are changed

만약 압력과 속도가 동시에 변한다면, 위치수두 차 z_{ij} 는 eq. 3과 eq. 4의 결합으로써 얻을 수 있다.

$$\hat{z}_{ij}(t+1) = (\hat{z}_{ij}^p + \hat{z}_{ij}^v)(t+1) \quad (5)$$

$$= z_{ij}(t) - \frac{1}{\gamma}p_{ij}(t+1) - \frac{v_j(t+1)^2 - v_i(t+1)^2}{2g} - \lambda(d_{ij})^{-\alpha}$$

eq. 5의 결과는 i 와 j 간 흐름의 방향성이 고려되지 않은 대칭행렬을 의미한다. 따라서 이를 방향성을 가진 흐름으로 바꾸어주기 위해 eq. 5에서의 압력항을 $p_j(t+1)/\gamma$ 로 바꾸어 주었다.

시간 t 에서 절점 i 가 절점 j 를 선택할 확률 Π 는 절점의 중요도에 비례한다 (Barabási and Albert, 1999). 절점 i 에서 외부로 향하는 연결선의 수를 m_i 라고 하고 네트워크 내 절점의 수를 n 이라 하면, 절점 i 에서 j 로 향하는 연결선의 수 z_{ij} 는 eq. 6으로 구해지고, Table 1과 같이 OD표로 정리된다. 이 식을 이용하면 네트워크 내 절점 간 연결선의 수를 모의할 수 있고, 이로 인해 만들어지는 네트워크 구조를 분석할 수 있을 것이다.

$$z_{ij}(t) = m_i \prod_{i \rightarrow j}(t) = m_i \frac{\hat{z}_{ij}(t)}{\sum_{l=1}^n \hat{z}_{il}(t)} \quad (6)$$

Table 1 OD table of network flows

Destination \ Origin	...	i	j	...
:				
i		z_{ii}	z_{ij}	
j		z_{ji}	z_{jj}	
:				

III. 네트워크 기반 공간 유동량 모사

본 연구에서는 네트워크를 도시라는 지표 상 고정된 절점들 사이에 발생하는 사람, 상품, 서비스 등의 교류 등으로 상정하고, 네트워크 내 흐름을 분석하였다. 이러한 네트워크에서 절점의 압력은 도시의 유인력을 의미하는데 압력이 높을수록 많은 흐름을 유발시켜 연결선 수인 위치수두를 높인다. 본 연구에서는 모든 절점들은 공간상에 고정되어 있고 연결선들을 따라 이동하는 흐름들은 동일한 속도를 갖는다고 보았다. 실제로 한 국가 내에서 사람들은 비슷한 교통수단, 도로환경, 그리고 동일한 도로규범을 갖기 때문에, 이들의 속도는 네트워크 내 모든 절점과 연결선에서 동일하다고 보아도 합리적이라 판단된다. 이에 따라 eq. 1에서 양 변의 속도항이 같은 값을 가지기 때문에 모두 삭제하였다. 도시 내 사람의 이동량은 절대적 거리보다 시간거리에 더욱 큰 영향을 받기 때문에 (Masucci and Rodger, 2008), 손실수두는 속도에 반비례하는 시간에 따른 손실로 간주하였다 ($\lambda = \beta/v$). 여기에서 β 는 단위 이동 시간 당 손실수두계수이고 v 는 이동속도이다. 따라서 거리가 멀어질수록 시간거리가 커져, 절점의 영향력은 감소된다.

제안된 베르누이 공간 네트워크 모델을 적용하기 위해, 본 연구에서는 100×100 정사각형 공간에 50개 절점을 무작위로 선정하였고, 이로써 절점 간 직선거리 d_{ij} 를 계산하였다. 압력 역시 0부터 20 사이에서 무작위로 선정하였다. 그리고 모델의 상수값을 비중 $\gamma = -10.0$, 단위 시간당 손실수두계수 $\beta = 0.01$, 그리고 외부 연결선 수 $m = 10$, 거리에 따른 손실량의 체감률 $\alpha = 1$ 로 초기화하였다. 초기 절점들 간 연결선 수 $z(0)$ 는 동일한 값 1을 갖게 하였다.

이제 eq. (6)을 이용하여 세 가지 기본적인 속성 (압력, 속도, 그리고 시간)에 따라 네트워크를 생성시키고, 그 변화를 분석하였다. 이때 자기 자신에게 연결되는 자기연결 혹은 루프

역시 가능하다고 하였다. 이론적으로 자기 연결이 가능하기 때문에, 외부로 향하는 연계가 없을 수도 있다. 반대로 매우 큰 압력과 빠른 속도가 주어진다면 한 절점이 모든 연계를 독식할 수도 있을 것이다. 본 연구에서는 각 절점의 압력을 고정하였을 때 속도에 변화와 시간에 따른 네트워크의 성장과 구조 변화를 분석하였다.

Fig. (2)는 이러한 방식으로 모의한 결과이다. 네트워크 구조는 속도가 증가할수록 보다 광역화 되는 경향을 보이고 있다. 속도가 낮을 때, 각 절점은 외부로 연결선을 확장하지 못하고, 자기 자신 혹은 주위의 절점들과 소규모 연결을 맺는다 (Fig. 2 (a)). 소수의 매우 높은 압력과 적절한 위치를 가진 절점들만이 외부로부터 연결선을 받는다. 인류의 문명 초창기 낮은 이동속도와 인구, 도시의 유인력으로 인하여 고대 그리스와 같이 이 시대 문명은 도시국가 수준에서 머물렀을 것이다. 반대로 흐름의 속도가 높은 네트워크의 경우, 먼 거리로 연계를 확장한다. 이것은 미국 뉴욕이나 런던 같은 대도시가 오늘날 메가시티의 중심으로 성장하고, 세계 전 지역과 협업하는 현상과 유사한 경향을 보인다.

네트워크에서 절점들은 주위환경의 변화에 대응하여 그들의 연결선을 바꾼다. 이를 복잡계 시스템에서는 재 조직화 과정이라 한다. 유체 관점에서 절점들의 압력이 변할 경우, 에너지 평형을 위해 유체는 파동치면서 에너지를 확산시킨다. Fig. (2)가 보여주는 속도에 따른 연결 구조변화는 이러한 네트워크 내 에너지 확산의 과정으로 이해될 수 있다. 속도가 낮을 경우 단위 거리당 에너지 손실이 크므로 한 절점의 변화는 주변지역에만 영향을 미치지만, 속도가 빠른 경우는 네트워크 전체로 영향이 확산된다. 압력과 속도에 따른 네트워크 구조 변화를 보다 자세히 분석하기 위해, 보다 많은 절점 ($n = 10,000$, $m = 10$)으로 네트워크의 재조직 과정을 진행하였다. 절점의 위치와 압력은 무작위로 선정하였다.

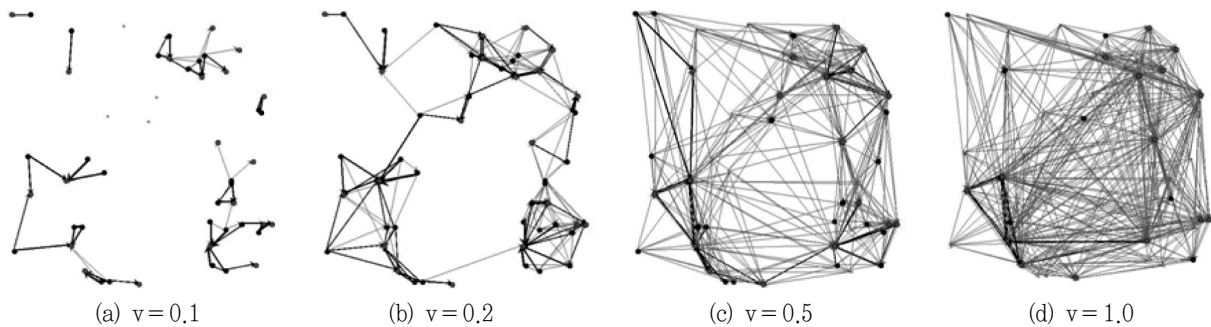


Fig. 2 Results of the simulated Bernoulli spatial network model as velocity of flow changes: (a) $v=0.1$, (b) $v=0.2$, (c) $v=0.5$, and (d) $v=1.0$. Initial connections are set to 1 uniformly and generated time step is 10. When the velocity of flow is increased, the network structure become globalize and exhibits topological features

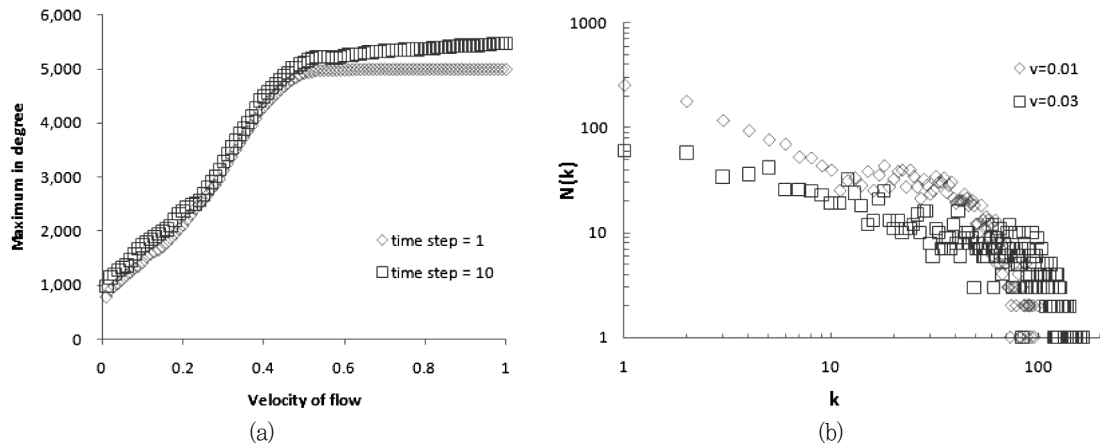


Fig. 3 Simulation results. (a) the maximum in-degree according to velocity of flow and generate time steps and (b) the degree distribution by velocity at time step 10

Fig. 3 (a)는 속도가 0부터 1까지 증가할 때 모의 시간에 따라 절점의 최대 연결선 수를 나타낸 그림이다. 흐름의 속도 변화는 연결선 수 변화에 드러난 바와 같이 네트워크 구조를 변화시킨다. 최대 연결선 수는 속도가 0.5 이하일 때는 속도에 비례하여 증가한다. 이후 특정 속도보다 빨라지면 연결선 수 변화율은 1 % 미만으로 떨어진다. 다른 조건들이 모두 동일한 상태에서 속도의 증가와 같은 소프트웨어의 개선은 초기 일정한 성과를 갖지만, 어느 정도 성숙되면 별다른 효과를 갖지 못하며, 네트워크 구조를 변화시키는데 한계를 가짐을 알 수 있다. 모의 시간은 초기 단계 (< 4)에서는 절점들의 연계에 영향을 주지만, 일정한 시간이 경과 (> 7)하면 더 이상 연계에 영향을 주지 못한다. 따라서 모델의 모의 시간이 10 이상이면 네트워크는 안정된 상태에 도달했다고 보았다. 본 연구에서 제안된 모델에서 속도가 증가하면 절점의 영향력은 커지고, 보다 많은 절점들과 연결하고 연결된다. 속도의 증가와 함께 소수의 압력이 큰 절점들은 영향력을 확대하며 허브로 성장해 가고, 중간 수준의 절점들은 그들의 중심성을 잃어버린다 (Fig. 3 (b)). 따라서 극단적으로 흐름의 속도가 빠르고, 한 절점의 압력값이 큰 네트워크의 경우, Bianconi and Barabási (2001b)가 지적한 바와 같이 하나의 절점이 모든 연결들을 독식하는 네트워크 구조가 형성될 수 있다.

IV. 적 용

지역 간 통근은 대표적인 공간 네트워크이다. 매일 수많은 사람들이 이동하며 상품, 서비스, 정보를 주거지와 직장지역 사이에서 실어 나른다 (Goetz et al., 2010). 시간에 따른 도시의 성장과 사람들의 이동성 향상은 보다 광역화되고 복잡해진 통

근 네트워크 구조를 만들어 가고 있다 (Fig. 4). 많은 연구자들이 도시의 성장과 관련하여 도시의 유인요인들에 대해 연구하였으나, 통근속도와 도시 성장 간에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

본 연구에서 사용한 통근 자료는 2000년과 2005년 시군구 간 통근자 수를 이용하였다. 통근은 개인적인 행위이므로 개개인들은 비점성 상태이고, 사람단위이기 때문에 비압축성이다. 그리고 일상적인 반복행태 이므로 정상상태라고 할 수 있다. 따라서 통근 흐름은 정상상태인 이상유체라고 할 수 있고, 베르누이 공식을 적용하는데 문제가 없다. 통근자료는 2 % 인구 총 조사 자료를 시군구 단위로 변환시켜 구축하였다. 제주도를 제외한 241개 시군구 사이를 이동하는 통근자 수는 2000년 325,093명에서 2005년 363,071명으로 11.7 % 증가하였다. 이 숫자는 2 % 표본자료를 이용하였기 때문에, 통계적으로 50 배의 통근자들이 이동하고 있다고 유추할 수 있다. 통근 자료 중 시군구 위치를 절점좌표로 변환시키기 위해 시군구의 중심점을 절점의 TM좌표를 사용하였고, 시군구 간 통근자 수를 연결선의 크기로 사용하였다. 따라서 z_{ij} 는 지역 i 에서 거주하면서 j 에서 일하는 사람의 숫자를 의미하고, 이는 지역 j 가 i 지역에 제공하는 일자리의 숫자와 동일한 의미를 가지며, i 지역에서 j 지역으로의 흐름 크기를 나타낸다 (Fig. 4). Fig. 4에서 서울, 부산, 대구 등 대도시를 중심으로 밀집되고 강도 높은 연결망을 볼 수 있다. 이 연결망들은 시간에 따라 연결대상 지역과 이동자 수를 증가시키고 있으며, 서울, 인천, 수원, 성남 시 등 인접한 대도시들은 마치 하나의 권역처럼 나타나고 있다. 통근 네트워크는 주요 고속도로와 철도망을 따라 뻗어 나가고 있으며, 대도시를 중심으로 구성된 권역은 독립적인 수개의 권역으로 구분될 수 있음을 나타내고 있다.

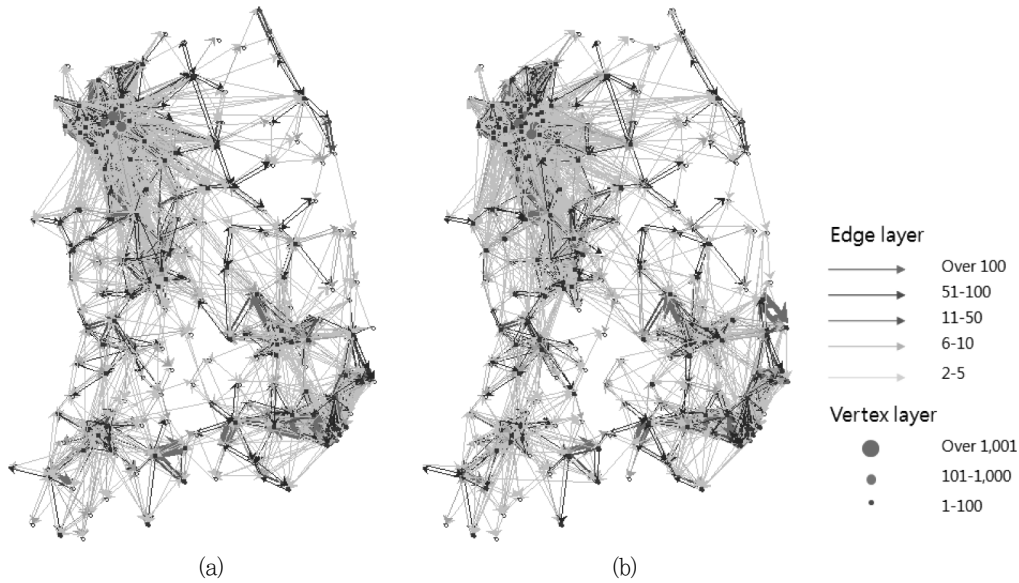


Fig. 4 The Korean commuting network (a) in 2000 and (b) in 2005

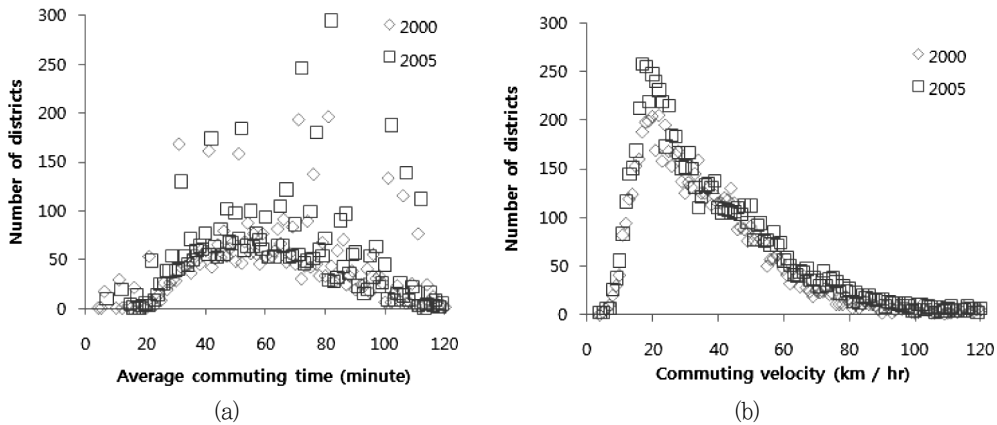


Fig. 5 Degree distribution of commuting time (a) and commuting velocity (b) over time. The average commuting time is 66.00 minutes in 2000 and 67.55 minutes in 2005. The average commuting velocity is 36.10 (km/hr) in 2000 and 37.19 (km/hr) in 2005

우리나라의 평균 통근시간은 2000년 66.00분에서 2005년 67.55분으로 2.35 %으로 길어진 반면, 통근속도는 2000년 36.10 km/hr에서 2005년 37.19 km/hr로 3.02 % 빨라졌다 (Fig. 5). 길어진 통근시간과 빨라진 통근속도는 통근거리의 증가 (5.44 %)와 상위 중심지의 영향범위 확대를 의미한다. 따라서 Fig. 3 (b)에 제시된 바와 같이 보다 상위 중심지들은 더욱 많은 지역들로부터 더욱 많은 통근자들을 받아들이며 영향력을 넓히며 공간 구조상의 중심지로 성장하며, 중하위 지역들은 중심성을 잃고 주거지역으로써의 기능이 확대되어 갈 것이다.

직장과 주거는 지역을 기반으로 한 사람의 활동 중 가장 대

표적인 요소들이다. 그런데 한 지역이 사람들의 직업 수요와 주거 욕구를 충분히 만족시키지 못하는 경우 사람들은 출퇴근하며 그들의 욕구를 만족시킨다. 이 직주분리 현상은 교통 발달과 소득 증가에 따라 심화되는 경향을 보이는데, 우리나라 역시 2000-2005년 사이에 심화되었고, 집중되는 일자리와 분산된 주거지역은 우리나라의 공간구조를 만들어 내고 있다.

연결선 수 지표는 절점의 중심성을 판단하는 가장 기본적인 지표이다. 통근 네트워크에서 연결선 수는 통근 유입자의 수를 의미하는데, 우리나라 지역별 통근 유입자 수를 비교하면, 새로이 중심성을 키워가는 지역들은 주로 서울과 대전축에 위치한 지역들이었다. 지역별 통근 유입자 수를 비교하면 (Table

Table 2 Comparison the number of in-commuters

Rank	2000		2005	
	Region	in-commuters	Region	in-commuters
1	Gwannam-gu Seoul	11,686	Gwannam-gu Seoul	11,667
2	Jung-gu Seoul	6,486	Jung-gu Seoul	6,750
3	Yengdeungpo-gu Seoul	6,218	Seocho-gu Seoul	6,162
4	Jongno-gu Seoul	5,435	Yengdeungpo-gu Seoul	5,625
5	Seocho-gu Seoul	5,031	Jongno-gu Seoul	5,345
6	Dongdaemun-gu Seoul	5,021	Songpa-gu Seoul	4,545
7	Songpa-gu Seoul	4,134	Yongin-si Gyeonggi	4,263
8	Seodaemun-gu Seoul	3,364	Ansan-si Gyeonggi	3,794
9	Ansan-si Gyeonggi	3,303	Hwaseong-si Gyeonggi	3,732
10	Yongin-si Gyeonggi	3,297	Dongdaemun-gu Seoul	3,716
11	Busanjin-gu Busan	3,269	Suwon-si Gwongsun-gu Gyeonggi	3,627
12	Seongbuk-gu Seoul	3,258	Nowon-gu Souel	3,607
13	Mapo-gu Seoul	3,133	Guro-gu Seoul	3,471
14	Yongsan-gu Seoul	3,115	Seongbuk-gu Seoul	3,408
15	Guro-gu Seoul	3,095	Cheonan-si Gyeonggi	3,324
16	Gwangseo-gu Seoul	3,028	Bundan-gu Seongnam-si Gyeonggi	3,315
17	Nowon-gu Seoul	2,950	Seodaenum-gu Seoul	3,286
18	Changwon-si Gyeongnam	2,798	Mapo-gu Seoul	3,263
19	Gwanak-gu Seoul	2,794	Namdong-gu Incheon	3,244
20	Cheonan-si Chungnam	2,756	Dalseo-gu Daegu	3,065

2)경기도 화성시, 수원시, 성남시, 충남 천안시 등의 통근 유입량이 큰 폭으로 증가하였고, 서울권역과 대전 권역 간의 이동량이 타 지역에 비해 큰 폭으로 증가하였다. 이는 우리나라 통근 네트워크 구조가 서울 - 대전 축을 중심으로 성장하고 있음을 의미한다. 이는 지역의 발전과 함께 KTX, 고속도로 등 교통 인프라의 확충이 유발하는 사회속도 증가의 결과라 판단된다.

통근자 수는 지역의 총 일자리와 가장 큰 상관도가 있기 때문에, 압력수두 (p/γ)를 지역의 총 일자리 수로, 단위 거리당 직업 감소율을 손실수두계수 λ (직업 수/거리 = (직업수/단위 시간)/(거리/단위시간)로 사용하였다. 이 자료를 eq. 6에 대입하여 분석하면 우리나라 2005년 통근통학 네트워크의 시간당 손실수두계수 (λ)는 0.1이었고, 시간 감수지수 (α)는 0.6이었다. 따라서 우리나라는 통근시간이 10분 늘어날 때마다 통근 시간으로 인해 줄어드는 잠재적인 통근자의 수가 평균적으로 15.2 %임을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구는 네트워크를 파이프 망으로 간주하고, 파이프 내를

흐르는 유체의 관점에서, 압력, 속도 등의 변화에 따른 네트워크 구조 변화를 연구하였다. 흐름은 절점의 압력에 따라 증가하고, 절점 간 거리 혹은 이동시간에 따라 양이 감소하는 속성을 가지고 있다. 모의 결과 만약 절점의 위치와 압력이 주어진다면, 흐름의 속도는 네트워크 연계와 구조를 결정짓는 요인이 드러났다. 이 속도의 영향을 검증하기 위해 본 연구에서는 네트워크 흐름을 유체라고 간주하고, 베르누이 공간 네트워크 모델을 제안하였다.

임의로 설정된 네트워크에 적용하여 본 결과 흐름의 속도는 네트워크의 지리적 그리고 위상적속성과 강한 연관이 있음이 드러났다. 그리고 절점의 최대 연결선 수는 속도와 강한 양의 상관관계가 있었다. 제안된 모델을 우리나라의 시군구 간 통근 자료에 적용하여본 결과 시간에 따라 통근 속도의 증가와 중심도시의 광역화 현상이 드러났다. 기존의 도시 중심성 뿐만 아니라 사회 속도 역시 공간 구조를 변화시키는 요인 중 하나이며, 이는 우리나라 통근 네트워크의 구조를 도시의 성장과 함께 복잡하게 만드는 주요 요인으로 판단된다.

사람의 이동은 농촌개발계획을 수립하는데 있어 가장 기본적으로 고려해야 할 사안이다. 따라서 농촌개발모델은 사람들이 어디에서 어디로 얼마나 이동하는지에 대한 답을 줄 수 있어

야 하는데, 이를 위해서는 대도시 - 중소도시 - 농촌으로 이어지는 계층구조와 광역 도시권으로 이야기되는 도시권역에 대한 분석이 수반되어야 한다. 본 연구에서 제안한 공간 네트워크 모델은 국토의 공간구조와 지역개발정책의 결과 형성되는 공간구조에 의해 예상되는 사람의 흐름을 추정할 수 있기 때문에, 향후 지역개발계획의 수립에 활용할 경우 매우 유용할 것으로 판단된다.

본 연구는 몇 가지 한계를 가지고 있다. 우선 모든 연결선은 무한한 용량을 가진 것으로 가정되었다. 하지만 실제 네트워크에서는 도로의 용량 교통량 등 제한이 있을 수밖에 없다. 따라서 향후 선의 혼잡도 요인을 포함하여 보다 사실적인 연구를 수행할 예정이다. 그리고 모든 연결선과 절점에서 유체의 속도는 동일하다고 가정하였다. 하지만 KTX, 고속도로, 간선도로 등 실제 국토공간에서 지역간 이동속도는 동일하지 않다. 따라서 향후 연결선/절점에서의 속도차를 도입할 수 있는 방안에 대해 연구할 예정이다. 마지막으로 현재의 연결선은 단순히 통근자의 숫자를 의미하기 때문에, 사람의 이동구조만을 보이고 있다. 이를 통근자의 직종, 연령 등 속성을 부여하여 여러 계층의 네트워크를 만들 수 있다면, 보다 세부적이고 의미 있는 공간구조를 도출할 수 있을 것이다.

이 논문은 2010년 농어촌 연구원에서 시행한 '30년 후의 바람직한 농어촌지역개발 모형 연구' 결과의 일부임.

REFERENCES

1. Albert, R. and A. -L. Barabási, 2000. Topology of Evolving Networks: Local Events and University. *Physical Review Letters* 85(24): 5234-5237.
2. Barabási, A. -L. and R. Albert, 1999. Emergence of Scaling in Random Networks. *Science* 285: 509-512.
3. Barthélemy, M. and A. Flammini, 2006. Optimal traffic networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* L07002.
4. Bianconi, G. and A. -L. Barabási, 2001a. Competition and multiscaling in evolving networks. *Europhysics Letters* 54: 436-442.
5. Bianconi, G. and A. -L. Barabási, 2001b. Bose-Einstein Condensation in Complex Networks. *Physical Review Letters* 86(24): 5632-5635.
6. Boccaletti, S., V. Latora, Y. Moreno, M. Chavez and D. -U. Hwang, 2006. Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports* 424: 175-308.
7. Borgatti, S. P. and M. G. Everett, 2006. A Graph-theoretic perspective on centrality. *Social Networks* 28: 466-484.
8. Borgatti, S. P., 2005. Centrality and network flow. *Social Networks* 27: 55-71.
9. Freeman, L. C., S. P. Borgatti and D. R. White, 1991. Centrality in valued graphs: a measure of betweenness based on network flow. *Social Networks* 13: 141-154.
10. Gastner, M. T. and M. E. J. Newman, 2006. The spatial structure of networks. *The European Physical Journal B* 49: 247-252.
11. Goetz, S. J., Y. Han, J. L. Findeis and K. J. Brasier, 2010. US Commuting Networks and Economic Growth: Measurement and Implications for Spatial Policy. *Growth and Change* 41(2): 276-302.
12. González, M., C. A. Hidalgo and A. -L. Barabási, 2008. Understanding individual human mobility patterns. *Nature* 453: 779-782.
13. Liu, F. and Q. Zhao, 2006. An efficient organization mechanism for spatial networks. *Physica A* 366: 608-618.
14. Masucci, A. P. and G. J. Rodgers, 2008. The network of commuters in London. *Physica A* 387: 3781-3788.
15. Newman, M. E. J., 2005. A measure of betweenness centrality based on random walks. *Social Networks* 27: 39-54.
16. Patuelli, R., A. Reggiani, S. P. Gorman, P. Nijkamp and F. -J. Bade, 2007. Network Analysis of Commuting Flows: A Comparative Static Approach to German Data. *Network Spatial Economics* 7: 315-331.
17. Tutzauer, F., 2007. Entropy as a measure of centrality in networks characterized by path-transfer flow. *Social Networks* 29: 249-265.