시스템 사고를 활용한 수분 매개자와 도시 생태계의 구조적 분석†

최호준*, 문태현, 전진형*****
*고려대학교 일반대학원 환경생태공학과 석박사통합과정, **고려대학교 일반대학원 환경생태공학과 석사, ***고려대학교 환경생태공학부 교수

1. 서론

생태계 회복력은 종 구성 및 군집 구조와 같은 생물 다양성의 특징을 보이며 정상적인 생태계 기능을 유지할 수 있는 조건을 말한다(Clewell et al., 2004). 도시 생태계의 회복력을 향상하기 위한 건강성 요소 중 생물종의 다양성과 생물의 서식 환경은 매우 중요한 요소이다. 수분 매개자란 식물의 꽃가루를 꽃의 수술에서 암술로 옮겨서 생식에 이르게 하는 수분 과정을 이뤄내는 생물체를 말하며 대표적으로 벌, 나비, 파리, 딱정벌레 등이 있다.

그중에서도 전 세계 식물 20만 종 가운데 17여 만종의 식물이 꿀벌의 도움을 받아 수분을 하며 100대 농작물의 71%의 작물이 꿀벌에 의존하고 있다고 조사되었다(FAO, 2004). 따라서 도시 경관에 존재하는 꿀벌의 풍부함과 다양성은 도시의 생물 다양성 보존에 영향을 미치고, 이는 꿀벌이 도시에 제공하는 생물학적 가치와 생태학적 중요성을 입증한다(Hall et al., 2017). 꿀벌은 도시 내 작물과 야생 식물에 수분 서비스를 제공해주며(Harrison et al., 2015), 꿀벌의 식물 수분 활동은 토지이용변화 문제로 인한 도시지역의 녹지 건강성을 향상시키는 것에 효과적이다(Rebacca et al., 2011). 이렇게 수분 매개자 중 가장 중요한 역할을 수행하는 꿀벌은 도시 생태계 회복력에 중대한 영향을 미치고 있으나 최근 지속적으로 발생하는 기후변화의 적응성 취약, 개발로 인한 도시 내 동식물 서식공간의 감소 및 오염, 그리고 생물종의 감소로 인해 꿀벌의 개체 수가 점차 감소하고 있다(Harrison et al., 2015). 꿀벌의 개체 수 감소는 식물 다양성을 감소시킬 뿐 아니라(Breeze et al., 2011), 특정 서식지 및 먹이를 필요로 하는 생물종의 생존에도 영향을 미쳐 생태계의 생물다양성 감소로까지 이어진다(Potts et al., 2010). 또한 꿀벌의 밀도에 따라 식량의 생산량도 변화하기 때문에(정철의, 2022), 꿀벌의 개체 수 감소는 식량 생산량의 감소로도 나타난다. 이렇게 꿀벌은 인간-동물-환경의 복잡한 구조를 가진 도시 생태계에 다양한 영향을 미치며 중요성이 점차 강조되고 있다. 그럼에도 불구하고 도시 규모에서의 생태 시스템과 개체 규모에서의 꿀벌의 생태 시스템의 관계를 구조적으로 분석하고, 각 규모별 상관관계를 파악하는 연구는 상대적으로 미비한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 시스템 사고를 활용하여 꿀벌의 생태 시스템이 도시 생태 시스템에 확장되는 구조를 분석하는 것이다. 이러한 구조적인 분석을 바탕으로 한 본 연구의 결과는 도시 생태계의 회복력을 향상시키기 위한 전략에 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구방법

본 연구에서는 도시 지역을 대상으로 꿀벌의 생태 시스템과 도시의 사회생태 시스템의 순환구조를 분석했다. 도시의 식생은 농촌 지역보다 더 다양하고, 농약과 천적의 위험이 적으며(김윤호 등, 2016), 농촌 및 자연지역 대비 평균기온이 높아 꿀벌의 생존에 효과적인 이점을 보인다(Vollet-Neto et al., 2011). 또한 도시 내 존재하는 공원 및 옥상 정원과 같은 녹지 공간은 인간에 의한 지속적인 식생 관리가 이루어져 꿀벌을 위한 서식지와 먹이를 공급해줄 수 있는 장점이 있다. 이에 따라 오늘날 도시는 꿀벌의 개체 수 증가를 위한 새로운 서식 환경으로 제안되기 때문에(Rebacca et al., 2011) 연구의 대상지를 도시로 선정하였다. 하지만 도시는 인간, 동물, 환경이 복잡하게 얽혀 다양한 상호 관계를 지니고 있다는 특징이 있기 때문에 꿀벌의 생태 시스템이 도시의 사회생태 시스템으로 확장되는 구조를 보기 위해서는 각 시스템 내의 인과순환적인 구조뿐 아니라, 개체 단위의 시스템부터 도시 단위의 시스템까지 순환하는 통합적인 관점에서의 이해가 필요하다. 인과순환 지도는 변수들 간의 인과관계 및 시스템의 구조적인 해석을 바탕으로 시스템 내부의 작은 변화를 통해 큰 변화를 일으킬 수 있는 전략을 제시할 수 있다는 점에서(최윤의 외, 2015), 본 연구의 대상인 수분 매개자의 생태 시스템과 도시 사회생태계의 영향에 대한 구조적인 분석을 효과적으로 수행할 수 있다. 피드백을 갖는 시스템을 표현하는 인과순환 지도는 변수, 화살표 및 +/- 증감표시로 표현되며, 인과순환 지도 내의 강화 루프(reinforce loop)는 시스템이 동일한 방향으로 전개되는 피드백 구조를 나타내며, 균형 루프(balance loop)는 시스템이 안정 상태로 전개되는 구조를 나타낸다. 인과순환 지도 작성을 위해 도시 생태계를 구성하는 인간, 동식물, 수분매개자의 생태 시스템을 중심으로 선행연구를 고찰 및 수집하여 주요 변수를 도출하고 각 시스템의 구조와 관계를 분석하였다.

3. 연구결과 및 고찰

본 연구에서는 인과순환지도를 활용하여 도시 생태계와 꿀벌의 구조를 분석하였다. 연구의 결과로는 첫째, 꿀벌의 생태 시스템은 R1루프를 통해 나타난다. R1루프는 꿀벌의 개체 수와 식물 개화량의 관계를 나타내고 있으며 한 변수의 변화에 따라 지속적으로 증가하거나 감소하는 강화 루프의 형태를 보인다. R1루프로 인한 꿀벌의 개체 수 감소는 식생의 다양성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단하였다.

†본 논문은 고려대학교 OJER (OJEong Resilience Institute) 연구비에 의하여 수행되었음.

둘째, 동식물의 생태 시스템은 B1, B2, B3의 루프를 통해 나타난다. B1루프는 식생의 다양성 증가로 인한 곤충의 먹이와 서식지가 증가가 곤충의 다양성 증가로 이어지만 곤충 다양성 증가는 곤충의 식엽 행위를 통한 식생의 훼손을 증가시키게 되며 식생의 생육과 활력도를 저하시켜 결국 고사하여 식생 다양성이 감소되는 균형 루프의 형태를 보인다. B1루프는 식생의 다양성 증가로 인한 곤충의 먹이 및 서식지 다양성의 증가가 곤충의 다양성 증가로 이어지고, 곤충의 식엽 행위 증가로 인한 식생의 훼손은 식생의 생육과 활력도를 저하시켜 식생의 다양성이 감소하게 되는 균형 루프의 형태를 보인다. B2루프는 식생의 다양성 증가로 인한 곤충 다양성의 증가까지는 B1루프와 동일하지만, 열섬현상이라는 외부요인을 만나 해충 대발생 위험도가 증가하고 병해충 발생률이 증가한다. 병해충 발생률의 증가는 식생의 생육과 활력도를 저하시키며 이는 곧 식생의 고사로 이어져 식생 다양성이 감소되는 균형 루프의 형태를 보인다. B3루프는 식생 다양성 증가로 인한 식생의 고사량 증가까지는 앞서 언급된 B2루프와 동일하지만, 식생의 고사량 증가로 인한 꿀벌의 먹이 및 서식지 다양성 감소가 꿀벌의 개체 수 감소로 영향을 미치는 균형루프의 형태를 보이며 동식물의 생태 시스템으로 인해 꿀벌의 생태 시스템이 영향을 받는 구조가 나타났다.

셋째, 도시의 사회생태 시스템은 다음 R2루프를 통해 나타난다. R2루프는 기후 조절 능력, 질병 발생량, 환경의 오염과 같은 문제로 인해 도시의 사회생태 시스템에 영향을 미치게 된다. 식생의 생육 및 활력도 감소로 인한 기후 조절 능력 감소는 도시 내 열 쾌적성을 감소시켜 인간의 신체 건강과 정신 건강을 지속적으로 악화시킨다. 또한 인수공통전염병 가능성의 증가는 질병 발생량을 증가시켜 신체의 건강과 정신 건강의 악화로 연결되며, 환경의 오염 역시 정신적 스트레스를 증가시켜 인간의 신체 건강과 정신 건강을 악화시키는 루프를 나타냈다. 결론적으로 R2루프는 동식물의 생태 시스템으로 인해 도시의 사회생태 시스템에 영향을 미치는 구조가 나타났다.

4. 결론

본 연구는 꿀벌의 생태 시스템이 도시 생태계에 확장되는 시스템적 구조를 인과순환 지도를 활용하여 분석하였다. 연구의 결과로는 첫째, 생태 시스템의 측면에서 꿀벌의 개체 수와 식물 개화량은 상호 증감하는 강화루프를 나타내며 꿀벌의 개체 수 감소는 식생의 다양성에 큰 영향을 미치는 구조를 보였다. 둘째, 동식물의 생태 시스템에서는 식생 및 곤충의 다양성 증가는 꿀벌의 개체수를 감소시키는 구조를 보였다. 셋째, 도시의 사회생태 시스템에서는 기후 조절 능력, 질병 발생량, 환경의 오염과 같은 문제가 인간의 정신과 육체적 건강의 감소로 이어지는 구조를 보였으며, 결론적으로 동식물의 생태 시스템이 도시의 사회생태 시스템에 영향을 미치는 구조가 나타났다. 본 연구의 결과는 시스템적인 분석과 이해를 바탕으로 꿀벌과 도시 생태계 시스템의 다중 규모적 관계를 구조적으로 파악하였다는 점에서 선행연구와 차별점이 존재한다. 이에 추후 연구에서는 구축된 인과순환구조를 바탕으로 꿀벌이 도시 생태계의 회복력을 향상시킬 수 있는 전략 도출에 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

참고문헌

1. 김윤호, 조용현, 배양섭, 김다윤(2020) Maxent 모델을 이용한 양봉꿀벌의 서울시 수분 잠재환경 분석. 한국환경복원기술학회지 23(4): 85-96.
2. 정철의(2022) 환경친화적 식량생산을 위한 꿀벌의 다원적 가치. 식품과학과 산업. 55(2): 166-175.
3. 최윤의, 유수진, 강성용, 최병구, 전진형(2015) 인과순환구조 분석을 통한 큰고니 서식환경 유지방안. 한국환경생태학회지 29(3): 353-367.
4. Breeze, T. D., A. P. Bailey, K. G. Balcombe and S. G. Potts(2011) Pollination services in the UK: How important are honeybees?. Agriculture, Ecosystems & Environment: 142(3-4): 137-143.
6. Clewell, A., J. Aronson and K. Winterhalder(2004) The SER International Primer On Ecological Restoration.
7. Dianat, H., S. Wilkinson, P. Williams and H. Khatibi(2021) Planning the resilient city: Investigations into using "causal loop diagram" in combination with "UNISDR scorecard" for making cities more resilient. International Journal of Disaster Risk Reduction 65: 102561.
8. FAO(2004) Conservation and Management of Pollinators for Sustainable Agriculture, through an Ecosystem Approach 7(2): 1-4.
9. Hall, D. M., G. R. Camilo, R. K. Tonietto, J. Ollerton, K. Ahrné, M. Arduser, J. S. Ascher, C. R. K., Baldock, R., Fowler, G. Frankie, D. Goulson, B. Gunnarsson, M. E. Hanley, J. I. Jackson, G. Langellotto, D. Lowenstein, E. M. Minor, S. M., Philpott, S. G. Potts, M. H. Sirohi, E. M. Spevak, G. N. Stone and C. G. Threlfall(2017) The city as a refuge for insect pollinators. Conservation Biology 31(1): 24-29.
10. Harrison, T. and R. Winfree(2015) Urban drivers of plant-pollinator interactions. Functional Ecology 29(7): 879-888.
11. Potts, S. G., J. C. Biesmeijer, C. Kremen, P. Neumann, O. Schweiger and E. W. Kunin(2010) Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. Trends in Ecology & Evolution. 25(6): 345-353.
12. Tonietto, R., J. Fant, J. Ascher, K. Ellis and L. Daniel(2011) A comparison of bee communities of Chicago green roofs, parks and prairies. Landscape and Urban Planning 103(1): 102-108.
13. Su, M., B. D. Fath and Y. Zhifeng(2010) Urban ecosystem health assessment: A review. Science of the Total Environment 408(12): 2425-2434.
14. Vollet-Neto, A., C. Menezes and V. L. Imperatriz-Fonseca(2011) Brood production increases when artificial heating is provided to colonies of stingless bees. Journal of Apicultural Research 50(3): 242-247.