
Global Report

운송 네트워크에서 전염병 확산 모델링_리뷰

1. 개요
2. 전염병 확산모델_고전적수학적 모델
3. 제시된 모델링 과제가 도시이동성 행동에 따른 COVID-19 확산에 미치는 영향
4. 연구동향 및 전망
5. 결론

1. 개요

지난 10년 동안 전 세계적으로 새로운 전염병의 출현은 주목할 만한 심각한 문제가 되고 있고, 전염병의 예측과 통제는 글로벌 공중보건시스템에서 매우 중요한 과제이다. SARS, H1N1 인플루엔자, 에볼라 바이러스(Ebola virus) 및 지카 바이러스(Zika virus)에 이어 새로운 코로나 바이러스(COVID-19) 전염병이 전 세계적으로 확산되고 있다. 2020년 10월 14일까지 전 세계 216개 국가 및 지역으로 확산되었으며, 총 3,836만 건의 진단건과 1,090,811명이 사망한 것으로 나타났다[1]. 이로 인해 대중의 관심이 다시 전염병의 위험에 집중되고 있으며, 전염병이 사회에 미치는 영향을 모니터링, 분석 및 예측하는 것은 전염병 확산의 예방, 통제 및 관리를 위한 효과적인 방법을 개발하는 데 있어 매우 중요하게 인식되고 있다. 이러한 모델 사용은 전염병의 확산을 분석하고, 추가 발병을 통제하고 예방하기 위한 의사결정을 설계하고, 전염병의 확산을 통제하기 위해 인구에 미치는 영향을 제한하는 데 중요한 수단으로 인식되고 있다[2][3]. 전염병은 인간 대 인간(human-to-human), 인간 대 동물(human-to-animal) 또는 동물 대 동물(animal-to-animal) 전염을 특징으로 한 다양한 병원체에 의한 질병이다. 병원균의 대부분은 미생물이나 기생충들이다. 일반적으로 질병은 공기, 물, 음식, 접촉 및 토양을 통해 전염될 수 있으며 감염된 개인의 체액 및 배설물을 직접 접촉하여 경구전염이 되는 경우가 있다.

19세기 후반에 현대 역학분석 및 모델링이론이 태동되었으며, 20세기 초 Snow(1855)는 1849년 런던에서 콜레라가 확산된 주 ~~우~~원인을 오염된 상수원에 의한 것으로 판단하고 세계지도에 콜레라 전염병 사례에 대한 특정 위치를 지적하였다. 최초로 홍역의 순환행동을 설명한 Arthur Ransome은 1906년에 콜레라 전염을 위한 개별 시간 전염병 모델을 개발한바 있다. 공간데이터와 역학을 결합한 초기연구 결과는 생물학 연구의 진보와 더불어 전염병의 확산에 중요한 발견을 기여하였다. 전염병에 대처하기 위한 백신 및 약물을 개발하는 것 외에도 전염병에 대한 연구는 전염병의 확산을 관리하고 통제하는 데 필요한 조치에 대한 의사결정 지원을 제공할 수 있다. 예를 들어, 질병의 동적/공간적 특성을 이해하면 사회에 미치는 피해를 완화하는 데 도움이 될 수 있다.

최초에는 대부분의 질병 모델은 인구가 균일하다는 가정 하에 수학적으로 모델링되었다. 고전적 수학 모델은 인구를 여러 다양한 단위로 나누었으며, 각 개인은 이웃과 상호작용하는 것으로 가정하였다. 이러한 모델 중 가장 간단한 모델은 폐쇄적인 인구밀도를 기반으로 1927년 Kermack과 Mckendrick이 제안한 SIR(Susceptible-Infected-Removed : 감염-제거에 취약한) 모델이다. 그러나 전염병 확산의 현저한 특성과 다른 지역사회에서 질병 발병의 효과는 공중보건에서 더 중요한 역할을 한다. 전통적인 수학적 모델은 인구균질성을 가정하고 비 공간의 전제에 전염병의 확산을 시뮬레이션 한다. 이 모델은 전염병에 의해 영향을 받은 인구규모를 추정하는 데에는 유용하지만, 전염병의 확산에 영향을 미치는 요인을 고려하지는 않고 있다.

다양한 유형의 전염병 확산 모델이 전염병 전염 특성 모델링에 사용되었다[4][5]. 이러한 모델링 시스템은 COVID-19의 발병뿐만 아니라 복구기간 동안 운송 산업의 역할에 의해 설명할 수 있다. 2020년 Peeri 등은 COVID-19가 세계화 증가로 인해 더 빠르게 확산되고 있다고 주장하였으며, Wu 등은 중국의 신정연휴 기간에 철도이용이 급속히 증가하면서 바이러스도 급속히 확산되었다고 주장하였다. 현대의 대중교통 시스템은 사람 간 밀 접촉을 피할 수 없게 되어 있어 특히 여행자들 사이의 근접성은 바이러스가 확산될 수 있는 기회를 제공하고 있다. 세계 각국은 COVID-19의 확산을 통제하기 위해 여러 운송 네트워크를 중단하기로 결정했으나, COVID-19 복구기간 도중 바이러스 확산의 근본적인 처방은 되지 못했다.

2. 전염병 확산모델_고전적수학적 모델

이 모델은 전염병이 실제 세계에 미치는 영향에 대한 직관적으로 이해하는 데 기반을 두고 있다. SIR(Susceptible-Infected-Removed) 모형은 각각 3개의 모형<감염된 사람과 접촉 후 감염자(S), 전염성이 있고 영향을 받기 쉬운 개인에게 바이러스를 전송할 수 있는 개인(I), 완치되었거나 사망하여 더

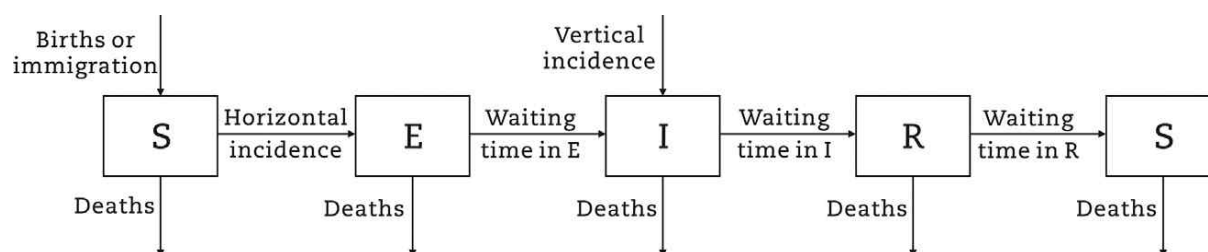
이상 감염과정에서 참여하지 않는 개인(R)>을 포함하고 있다. 분석기간 내에 영향을 받기 쉬운 개인 중 어떤 사람은 감염되고, 몇몇 감염된 개인은 이 변화가 연속하다는 것을 가정하여 복구한다. 전염병 확산 각 하위집단에 있는 동적 변화를 기술하기 위한 프로세스는 (식 1~3)과 같다.

$$dS/dt = \alpha SI/N \dots\dots\dots (식 1)$$

$$dI/dt = \alpha SI/N - gI \dots\dots\dots (식 2)$$

$$dR/dt = gI \dots\dots\dots (식 3)$$

여기서 S, I, 및 R은 각각 취약한 개인, 전염성 개인 및 회복된 개인의 수를 나타내며, N은 총 인구 (S+I+R)이며, 감염계수(g)는 감염된 사람의 건강회복 속도이며, dS/dt는 시간(S)의 변화율을 나타낸다. SIR 모델은 전염병의 확산을 나타내는 가장 기본적인 모델이다. 노출된(또는 잠복된) 구획(감염되었지만 아직 전염되지 않은 구획을 명시적으로 포함)을 고려한 모델을 SEIR(Susceptible-Exposed-Infected-Removed) 모델이라고 한다. 2020년 Kucharski 등은 SEIR 모델을 이용하여 COVID-19의 전염 및 제어 (동선파악 등)의 초기역학을 분석했으며, Prem 등은 제어 전략의 효과를 분석하여 중국 Wuhan에서 COVID-19 전염병의 결과에 대한 사회적 혼란을 감소시켰다. 회복 후 감수성이 돌아오는 경우 SIS(Susceptible-Infected-Susceptible : 감염에 취약한) 모델, 그밖에 SI(Susceptible-Infected : 감염되기 쉬운) 모델, SEI(Susceptible-Exposed-Infected : 감염에 취약하기 쉬운) 모델, SEIS(Susceptible Exposed-Infected-Susceptible : 감염에 취약한 감염하기 쉬운) 모델, SIRS(Susceptible-Infected Removed-Susceptible : 감염되기 쉬운 제거-감염하기 쉬운) 모델, SEIR(Susceptible-Exposed-Infected Removed : 감염에 감염된 제거) 모델, 및 SEIRS(Susceptible-Exposed-Infected-Removed Susceptible : 취약한 노출 감염-감염-제거된 감염) 모델로 구분하였다[6]. (그림 1 참조)



※ 출생, 사망 및 이주가 동시에 확산되는 것과 같은 추가변수를 고려하거나 여러 전염병의 확산을 동시에 모니터링 하는 이 초기모델은 2008년 Brauer에 의해 보다 복잡한 수학적 모델로 개발되었다.

* 자료 : Jian Li, Tao Xiang, Linghui He, "Modeling epidemic spread in transportation networks: A review", journal of traffic and transportation engineering (english edition) xxxx:xxx(xxx):xx x,p.4.

[그림 1] SEIRS 모델의 구조

이와 유사한 모델은 인구밀도가 같은 공간요인을 고려하지 않은 모델이 있다. 이러한 모델은 개별 감수성에 따른 변수를 배제하는 등 전염병 확산과정에서 국소적인 특성을 소홀히 하고 있어 현대 교통시스템과 관련된 인간의 상호작용에 의해 야기되는 복잡한 전염병 감염패턴을 잘 설명할 수 없다. 최근 몇 년 동안 많은 연구를 통해 수학적 모델링 성능을 개선하여 이러한 문제를 해결하였다[7][8]. 현대 교통시스템은 전염병과 같은 질병의 확산에 지대한 영향을 미치고 있으나, 전통적인 모델링 접근법은 감염병 확산에 따른 이동성의 영향을 분석하지 못하고 있다. 전통적인 모델링에서는 이 효력에 대한 이해부족으로 전염병 감염이 개별적인 여행특성의 복잡성에서 기인한다고 판단하고 있다.

3. 제시된 모델링 과제가 도시이동성 행동에 따른 COVID-19 확산에 미치는 영향

도시이동성 행동은 전염병의 확산을 주도 할 수 있다. 인간의 역학과 전염병 역학 사이의 피드백 루프는 상호작용에 대한 책임이 있기 때문이라고 2007년 Ferguson은 주장한바 있다. 대부분의 이전 전염

병 모델은 전염병 확산에 인간의 역학의 영향을 고려했듯이 COVID-19로 인한 인간 행동의 개념을 확장할 필요가 있다. 얼굴 마스크를 착용, 군중을 피하고, 개인위생을 개선하고, 항바이러스 약물을 복용하는 것과 같은 일반적인 행동들이 필요하다. 아직까지도 COVID-19는 예상치 못한 방법으로 확산되고 있어 콜드 체인 물류(cold chain logistics)를 통한 전염병 확산을 조사하기 위해 더 많은 주의를 기울여야 한다. 2020년 6월 11일, 베이징 당국은 56일 동안 베이징에서 새로운 확인된 사례가 보고되지 않은 이후 52세 된 확진자를 보고하였다. 이후 10일 안에 베이징에서 200건이 진단되었다. 이는 모든 농산물 도매시장에서 연어의 콜드 체인 물류에서 새로운 코로나바이러스가 발견되면서 상업 활동과 연관된 것으로 밝혀졌다. 예를 들어, 동결기술과 냉장기술은 신선제품의 물류공정(생산/저장/운송/판매/소비)의 모든 단계에 필수적으로 적용되어 제품이 저온환경에서 유지관리 되어 품질을 보장하고 손실을 줄인다(예: 콜드 체인 물류). 그러나 추운 환경에서는 바이러스 활동이 더욱 활발해지기 때문에 콜드 체인 물류에서 바이러스의 생존공간인 화물 체인을 통해 사람들을 감염시킬 수 있다. 이 가능성은 화물운송 시스템과 관련된 인간의 행동이 바이러스 확산을 중재하는 온상이 될 수 있음을 상기시켜 준다. 전염병 확산의 맥락에서 의료 및 생활물질의 분포 또한 교통이 전염병에 미치는 영향을 명확히 하기 위해 관심을 기울여야 한다.

4. 연구동향 및 전망

4.1. 연구동향

지난 수십 년 동안 역학모델 연구의 초점은 그룹 기반 모델링에서 개별 기반 모델링으로 전환되었다. 후자는 상대적으로 작은 공간이나 도시, 지역사회 또는 이동성 및 이질성이 낮은 지역의 인구수에 더 적합하다고 할 수 있다. 인구수에 기반을 둔 모델은 넓은 지역 내에서 일정 정도의 균질성을 가진 전염병의 확산을 시뮬레이션 하는 데 가장 적합하다고 할 수 있다. 전염병 확산에 대한 대부분의 수학적 모델은 개인 균일성의 가정에 따라 차등방정식이 적용된다. 각 개인에 기반을 둔 모델은 실제 인구조사 데이터, 가족구조 데이터, 인간 이동성 데이터 및 관계형 네트워크 데이터를 사용하여 전염병 전파의 이질적 특성의 영향력을 더 현실적으로 반영한다.

4.2. 연구의 전망

의사결정 지원 연구를 위한 각 개인에 기반을 둔 역학모델의 사용이 주류가 되었으며, 이를 위한 다양한 조치로는 여행 제한, 버스(대중교통) 운행시간 단축 등이 포함된다. 기술의 발전과 데이터 다각화와 함께 차별화된 관리 및 제어에 대한 수요가 점차 증가하고 있다. 따라서 관련 모델에 더 높은 요구사항이 나타나고 있다. COVID-19는 기존 모델시스템의 단점(더 나은 제어조치에 대한 계획, 질병 개입전략에 대한 평가, 최선의 공중보건 자원 결정 등)을 많이 노출시켰다. 따라서 향후에는 다음과 같은 세 가지 측면에서 연구가 필요하다. i) 첫째는 전염병이 도시이동성 행동에 미치는 영향이다. 인간은 전염병 감염에 대한 리스크를 최소화하기 위해 전염병 정보에 근거를 둔 자기보호 행동에 민감하게 된다. 그러나 대부분의 이전 전염병 모델은 전염병 확산에 인간역학의 충격을 고려하지 않았으며, 일부 모델은 전염병에 의해 유발된 간단한 행동만을 고려했을 뿐이다. 전염병의 심각성에 대한 인식이 증가함에 따라 개별 반응은 점점 다양해지고 복잡해지고 있다. 모델은 전염병이 개별 행동에 미치는 영향을 더 잘 나타낼 필요가 있다. 이를 통해 인간과 전염병 간 상호작용에 새로운 통찰력을 제공할 수 있다. ii) 두 번째는 전염병의 확산에 도시이동성 행동의 영향이다. 인간의 행동(대규모 이동 등)은 전염병의 확산을 촉발시킬 수 있다. 대부분의 이전 전염병 모델은 전염병 확산에 대한 인간의 역학적 영향을 고려했지만 COVID-19는 화물운송 시스템과 엄격한 통제 하에 여행수요를 포함한 인간의 행동개념을 확장해야 한다는 것을 보여주었다. iii) 셋째는 전염병 대응책의 제안과 평가이다. COVID-19의 발발은 너무 급속해서 정부는 의약품으로 대응할 시간이 없었다. 비상사태 발표로 대응한 것이 가장 효과적이었는지는 불

분명했고, 전염병은 그 같은 조치가 완화될 때 반등하는 경향이 있다. 따라서 모델은 전염병을 방지하고 대중여행을 적절히 중재하여 전염병 이후 신속하게 경제적 복구를 용이하게 할 수 있도록 운송시스템의 적절한 개입을 제안하고 평가해야 한다.

5. 결론

이 연구는 운송네트워크와 전염병 간의 상호작용에 대한 통찰력을 제공하기 위해 운송시스템 내의 전염병 모델에 대한 포괄적인 검토를 시행하였다. 이를 위해 세 가지 주요 유형의 모델(수학적 모델, 네트워크 기반 모델, 에이전트 기반 모델)이 도입하여 운송 네트워크에서 이러한 모델의 응용 프로그램에 대한 원칙, 응용 프로그램의 장점 및 제한사항에 대해 논의했다. 구체적으로, COVID-19 전염병에 의해 제기된 모델링 과제는 교통망과 전염병 확산을 통한 도시이동성 간의 상호작용 메커니즘 뿐만 아니라 개입 전략에 대한 평가방법을 포함하여 요약되었다. 아울러 교통 네트워크 내의 전염병 모델링에 대한 세 가지 향후 연구 방향을 제안하였다. 여기에는 전염병이 개인의 행동에 미치는 영향, 전염병 확산에 대한 개별 행동의 영향, 개입 조치의 제안 및 평가 등이 포함되었다. 향후에는 전염병 발병 시 여행행동과 바이러스 확산 사이의 메커니즘을 이해할 수 있는 미래 연구전망에 추가 작업이 필요하다. 또한 일반화된 에이전트 기반 테스트베드 모델링을 통해 위의 메커니즘을 비교하고 검증할 수 있는 연구가 필요하다. 결과적으로 COVID-19 전염병 동안 해외여행 제한 정책의 효과에 대한 분석 증거를 기반으로 결론을 도출하는 것이 필요하다.

운송 네트워크에서 새로운 전염병의 급속한 확산은 글로벌화의 동인이 되고 있다. 이에 운송시스템을 통한 전염병 확산에 대한 이동성 영향의 메커니즘을 이해함으로써 전염병 확산 위험요인의 모델을 확립하는 것이 필요하다. 이 연구에서는 수학적 모델, 통계모델, 네트워크 기반 모델 및 시뮬레이션 모델 등을 이용하여 다양한 전염병 확산모델의 기본 구조 및 적용을 검토한다. 이 연구결과는 국내 운송 네트워크(운송시스템)의 전염병 확산 방지를 위한 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- [1] Worldometer, 2020. COVID-19 Coronavirus Pandemic.
<<https://www.worldometers.info/coronavirus/?> (Accessed 14 October 2020)>
- [2] Day, T., Park, A., Madras, N., et al., 2006. When is quarantine a useful control strategy for emerging infectious diseases? *American Journal of Epidemiology* 163 (5), 479e485.
- [3] McKenzie, F.E., 2004. Smallpox models as policy tools. *Emerging Infectious Diseases* 10 (11), 2044e2047.
- [4] Duan, W., Fan, Z.C., Zhang, P., et al., 2015. Mathematical and computational approaches to epidemic modeling: a comprehensive review. *Frontiers of Computer Science* 9 (5), 806e826.
- [5] Grassly, N.C., Fraser, C., 2008. Mathematical models of infectious disease transmission. *Nature Reviews Microbiology* 6 (6), 477e487.
- [6] Lajmanovich, A., Yorke, J.A., 1976. A deterministic model for gonorrhea in a nonhomogeneous population. *Mathematical Biosciences* 28 (3e4), 221e236.
- [7] Jana, S., Haldar, P., Kar, T.K., 2016. Optimal control and stability analysis of an epidemic model with population dispersal. *Chaos, Solitons & Fractals* 83, 67e81.
- [8] Jiao, J., Cai, S., Li, L., 2016. Impulsive vaccination and dispersal on dynamics of an SIR epidemic model with restricting infected individuals boarding transports. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 449, 145e159.

<원문제목> Modeling epidemic spread in transportation networks: A review

<원문출처> journal of traffic and transportation engineering (english edition) xxxx:xxx(xxx):xx x