

Global Report

탄력적인 교통정책을 위한 프레임워크

1. 개요
2. 제안한 프레임 워크
3. 결과 및 검토
4. 결론

1. 개요

운송(교통) 인프라 구축사업 추진 시 산사태나 지진과 같은 지리적 위험요인이 발생할 경우 이로 인해 대규모 피해(인명 및 재산 피해)를 초래하거나, 사업목표를 달성할 수 없는 상황이 될 수도 있다. 이때 상황판단을 잘못하여 교통 네트워크 일부를 재생하여 더 많은 교통트래픽을 처리하기 위해 노드를 재배치 혹은 추가하여 네트워크 토폴로지를 강화하는 경우 장기적으로는 더 위험한 결과를 초래할 수도 있다. 재해발생 후 완전한 복구는 불가능하겠지만 인프라 운영자의 탄력성 있는 효율적인 구호활동을 통해 어느 정도 운송기능을 수행하는 것은 가능할 것이다. 자연재해 발생 후 교체 또는 개선(복구) 작업을 통해 운송 인프라의 운영능력이 복구될 경우 시/공간 규모 및 이와 관련된 다양한 파라미터들을 고려하여 리소스 할당문제를 결정해야 한다. 따라서 운송 인프라의 탄력성과 복잡한 특성을 고려하여 적절한 의사결정을 도출할 수 있는 체계적인 평가가 필요하다.

2007년 L.A. Schintler 등은 주사선 기반(raster-based) GIS 및 그래프 이론을 이용하여 복잡한 운송 네트워크에서 평균 주행경로 거리 등을 분석할 수 있는 네트워크 이론(network theory)을 제안한바 있다. 이는 운송 인프라의 탄력성을 평가하기 위한 최적화 방법으로 평가받고 있다. 또 다른 확률적 복원 평가방법으로 N.Y. Aydin 등은 그래프 기반 매트릭스를 스트레스 테스트 방법론과 통합하여 교통 네트워크 토폴로지에 대한 복원력 평가방법을 제안하였고, Ayyub는 생태계, 사회과학, 자연재해 등의 차원에서 탄력성의 정의에 대한 자세한 개요와 사용가능한 지표를 제안한바 있다. 그러나 이러한 네트워크 이론과 관련된 평가방법은 구조적인 성능으로 인한 제한요인이 있고, 다른 전략들을 평가하기 위한 네트워크의 시변(time-variable) 복구성능에 대한 보고가 아직은 없는 상황이다.

산사태나 지진과 같은 자연재해로 인해 파괴된 도로를 복구하기 위한 최적화방법은 일반적으로 운영비용을 최소화하는 데 목표를 두고 있다. 더 복잡한 알고리즘은 건설장비의 복원시간 및 분포를 최소화하는 데 중점을 두고 있다. 이러한 목표의 복잡성을 덜기 위해 세부적으로 나누어 처리하기도 한다. 이러한 솔루션을 적용하기 위해서는 전문지식과 컴퓨팅 효율성이 필요하다. 많은 개발도상국의 경우 자연재해(지진, 홍수, 산사태 등) 발생 시 이를 복구하는 데 필요한 자원이나 전문 인력이 부족하여 신속하게 대응할 수 없어 이에 대한 솔루션이 필요하다.

이 연구에서는 교통 인프라의 탄력성과 관련하여 앞서 설명한 문제를 해결하기 위해 자연재해가 발생한 농촌 지역의 도로복구 작업에 도움이 될 프레임 워크를 제시한다. 이는 복구 프로세스의 불확실성을 고려하면서 복잡성을 줄이는 것을 목표로 하고 있다. 핵심전략은 평균 복구 시간을 줄일 수 있는 능력, 복구프로세스의 효율성 및 전체 교통 네트워크에 미치는 불확실성의 정도 등의 측면에서 조사되었다. 복구과정에서의 불확실성을 정량화하기 위해 몬테카를로 분석(Monte Carlo Analysis)을 적용하였다. 아울러 제안한 접근방법의 성공적인 이행을 입증하기 위해 네팔(Nepal)의 Sindhupalchok District 사례연구를 면밀히 검토하였다. 2015년에 발생한 7.8 및 7.3 규모의 지진과 이로 인한 후폭풍 때문에 그 지역의 농촌 교통 네트워크는 심각하게 손상되어 구호활동을 위한 접근성에 악영향을 주었다.

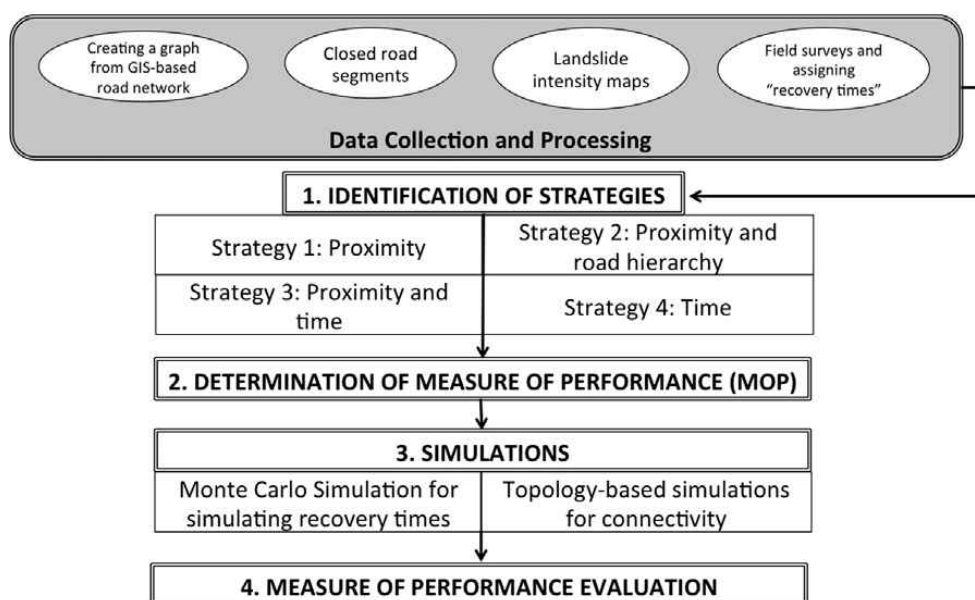
제시한 프레임 워크는 의사결정권자들이 도로복구 전략의 성능을 평가할 수 있는 새로운 제안으로서 높은 수준의 복원력 향상을 쉽게 확인할 수 있다. 분석 모델링을 통해 탄력성 향상 전략을 특성화할 수 있는 직관적인 의사결정 프로세스를 결합함으로써 도로복구 활동에 따른 운영탄력성을 개선할 수 있을 것이다. 또한 계산시간을 단축시키고, 의사결정권자의 선호도를 고려하여 이해관계자를 포함한 의사결정자가 쉽게 이해할 수 있도록 하였다. 아울러 주어진 교통 인프라에 대한 이론적인 복원력 기능이 특성화되어 있으며, 이를 통해 의사결정권자는 복원력 향상을 위한 효과적인 전략을 계획할 수 있도록 하였다.

2. 제안한 프레임 워크

2.1. 도로복구 전략의 검증단계

본 연구에서 제안하는 프레임 워크는 데이터 수집 및 처리 외에도 현실적인 도로복구 전략을 검증할 수 있도록 다음과 같은 단계로 구성되어 있다. (그림 1 참조)

- 그래프 기반 측정항목을 이용하여 도로 네트워크 연결성을 파악할 수 있는 MoP(Measure of Performance)의 결정
- 주어진 운송 네트워크 및 전략에 대한 토폴로지를 평가하기 위한 시뮬레이션 및 복구시간의 불확실성을 분석하기 위한 Monte Carlo 시뮬레이션(MoP(Measure of Performance)) 기법
- 도로복구시간 측면에서 표현된 시뮬레이션 결과를 바탕으로 수행된 탄력성 측면에서 전략을 비교한 MoP의 평가



< 그림1 프레임 워크의 구성>

전략 1은 주요 자원센터에 근접한 단일 변수를 사용하는 도로복구 전략과 관련된 물류 및 응급 관리 서비스를 가까운 대도시 지역의 농촌지역에 접근할 수 있다고 가정한 것이다. 주요

목적은 최단 루트로 목적지에 도달하는 것이다. 전략 2는 근접 및 도로의 계층구조로서 두 가지 변수를 기반으로 도로복구를 고려한 것이다. 중요한 점은 주요 도로의 세그먼트를 복원하는 것이 빠른 복구를 제공한다는 것이다. 전략 3은 복구시간에 따른 도로복구 전략으로서 각 세그먼트를 복원하는 데 필요한 시간은 도로에 산재한 장애물의 양에 의해 결정된다는 것이다.

2.2. 성능측정 방법의 결정

이 연구에서는 자연재해가 발생한 도로의 복구전략에 따라 교통 네트워크의 성능을 나타낼 수 있는 객관적인 비교 위해 공통 메트릭스가 필요하다는 전제를 기반으로 한다. 현재까지의 그래프 기반 메트릭스는 운송(교통) 네트워크의 토폴로지 속성을 평가하는 데 사용되었으며, 각 메트릭스는 특정 교통 네트워크 유형에 따른 의미가 있다. 예를 들어, 교통 네트워크에서 발생한 교통사고를 효과적으로 평가(분석)하기 위해서는 사고가 발생한 해당노드와 연결되는 링크 수를 먼저 파악하는 것이 중요하다. GCC(The Giant Connected Component)는 교통 네트워크에서 가장 큰 연결된 구성요소 크기를 의미한다. 이는 교통 네트워크의 탄력성 및 견고성을 평가하기 위한 가장 일반적인 그래프 기반 메트릭스 중 하나이며, 전체 교통 네트워크의 연결수준을 나타내는 척도이다. 재난관리 분야에서, 교통 네트워크의 견고성은 특정 시스템이 허용할 수 있는 운영범위 또는 중단 임계값으로 정의된다. D.S. Callaway 등은 GCC를 사용하여 교통 네트워크의 견고성과 무작위 그래프의 임계값을 설명한바 있다. 이 메트릭스는 **척도** 및 항공 화물운송에도 적용된다. 통신 네트워크의 견고성 및 복원력을 평가하기 위한 다중화 네트워크도 제안한바 있다.

3. 결과 및 검토

이 연구에서 제안한 프레임 워크의 구성요소별 전략을 평가하는 데 있어 네팔 중앙부의 Sindhupalchok District 농촌 도로 네트워크의 운영탄력성을 향상시키기 위한 도로복구 활동과 성능에 대한 이해를 높일 수 있었다. 이러한 비교는 최종 복구시간, 복구 프로세스 동안의 효율성 및 불확실성의 크기를 기반으로 도출된 것이다. 여기서, 평균 복구시간은 전략에 따라 크게 달라지는 것은 아니다. (표 1의 100%에서 p값 참조)

<표 1> 제안한 프레임 워크의 측정결과

복구율, 복구시간	전략 1	전략 2	전략 3	전략 4
25%, 100시간 이내	0	0	1	1
50%, 300시간 이내	0	1	1	1
75%, 500시간 이내	0	0.255	1	1
100%, 800시간 이내	0.327	0.333	0.329	0.330

도로복구율(**25%**, **50%**, **75%**)은 전체 복구시간 대비 복구 프로세스 성능을 나타내는 것이며,

모든 도로 세그먼트가 지원되지 않은 경우에 해당한다. 이 사례연구에서 도로복구 전략은 복구 활동에 대한 **다양한** 전략이 미치는 영향을 조사하기 위한 것이며, 이는 교통 네트워크의 운영 탄력성을 향상시키는 데 유용한 통찰력을 제공하고 있다.

4. 결론

중요한 교통 인프라 시스템의 복원력을 평가하기 위해서는 시스템 운영과 의사결정의 복잡성을 측정하고 이해하는 것이 우선적이다. 이를 통해 의사결정권자는 지리적 위험으로부터 전체 교통 인프라에 대해 허용되는 운영능력 수준을 결정할 수 있다. 따라서 다양한 이해관계자의 참여와 상호작용이 수용된 운영탄력성 전략을 설계할 필요가 있으며, 아울러 **자연재해가 발생**한 도로의 복구를 위한 의사결정의 분석과 평가를 고려해야 한다. 교통 네트워크와 같은 국가 기반 인프라는 위험요인이 영향을 미칠 수 있는 토지(도로, 대지, 주택단지 등)의 보호관점에서 구축되어야 한다. 이를 통해 재해복구 시 구호활동에 대한 접근성을 강화할 수 있다. 이 연구에서 제안한 방법론은 의사결정권자와 다양한 이해관계자들이 복구전략을 평가하고 교통 네트워크의 탄력성을 강화할 수 있는 새로운 도구를 제공하였다. 연구의 핵심은 의사결정권자의 설정을 통합할 수 있도록 프로세스를 단순화하여 의사결정권자의 설정능력을 향상시킬 뿐만 아니라 이론적인 도로복원 기능을 구체화하는 동시에 교통 네트워크의 복원력을 계획하고 개선하는 데 도움이 될 수 있을 것이다.

이 연구에서는 지진이나 산사태 등과 같이 위험에 매우 민감한 교통 네트워크의 고장악화 구조, 공급 및 기타 복구활동 등에 대한 진단을 통해 도로교통 안전성을 지원할 수 있는 방법론에 대해 설명하고 있다. 이 연구결과는 국내 대도시, 고속도로 및 자동차 전용도로 등에서 재난사고(자연재해 등) 발생 시 신속한 복구를 통해 피해를 최소화할 수 있는 관련 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.