

도시와 회로의 유사성을 이용한 회로망모델링 디지털 트윈

이도언^{3†} 민기담¹ 김여준² 이승환^{1*}

¹ 김천고등학교 바야흐로 KE 에너지부

² 김천고등학교 바야흐로 KE 기계부

³ 김천고등학교 바야흐로 KE 정보부

(경상북도 김천시 송설로 90)

ABSTRACT: 본 보고서는 도시의 송전망, 배전망과 컴퓨터 메인보드의 구조적 유사성을 바탕으로, 회로망 모델을 활용한 디지털 트윈 구현 가능성을 탐구하였다. 메인보드의 전력 흐름과 제어 구조가 실제 전력망과 동일한 원리로 작동함을 확인하였으며, Python 기반 회로 해석을 통해 교통망과 에너지망의 흐름을 정량적으로 시뮬레이션하였다. 이를 통해 도시 인프라의 효율적 운영과 스마트시티 구축을 위한 기초 모델로서의 활용 가능성을 제시하였다.

서론 (Introduction)

요즘 도시 인프라의 복잡함이 빠르게 늘어나고 있어서, 실제 공간에서 도시 구조를 실험하는 것은 비용이 많이 들고 위험하다. 그래서 가상 환경에서 실제 도시를 복사하고, 모사하며, 실시간 데이터를 통해 상태를 분석하고 예측하는 디지털 트윈 기술이 주목받고 있다. 이런 기술은 도시 안송배전망, 교통망, 통신망 같은 복잡한 시스템을 잘 운영할 수 있게 해준다. 이 보고서에서는 디지털 트윈의 개념과 특징을 설명하고, 회로기판 기반의 도시 시뮬레이션에 맨해튼 라우팅을 적용하는 이론적 배경을 분석한다. 이를 시뮬레이션하여 향후 스마트시티 구현을 위한 기초적 토대를 마련하고자 한다. 또 다양한 자연재해가 발생했을 때 전과 같은 피해를 최소화하기 위해 추후 유사한 자연재해가 발생하더라도 원만히 대응할 수 있게 하고자 한다.

연구 배경 (Background of study)

디지털 트윈

물리적인 사물과 컴퓨터에 동일하게 표현되는 가상 모델이며, 제너럴 일렉트릭에서 만든 개념이다. 실제 물리적인 자산 대신 소프트웨어로 가상화한 자산의 디지털 트윈을 만들어 시뮬레이션함으로써 실제 자산의 특성에 대한 정확한 정보를 얻을 수 있다. 이는 에너지, 항공, 헬스케어, 자동차, 국방 등 여러 산업 분야에서 디지털 트윈을 이용하여 자산 최적화, 돌발 사고 최소화, 생산성 증가 등 설계부터 제조, 서비스에 이르는 모든 과정의 효율성을 향상시킬 수 있다. 디지털 트윈의 주요 특징은 실시간성, 예측가능성, 통합적 최적화로 구분된다. 실시간성은 사물인터넷 센서와 데이터 스트림을 통해 실제 환경의 변화를 즉각 반영할 수 있는 능력을 의미하며, 예측가능성은 축적된 이력 데이터를 바탕으로 미래의 상태를 사전에 분석할 수 있는 기능을 뜻한다. 또, 통합적 최적화는 시나리오 기반의 가상 실험을 통해 자원 배분, 에너지 관리, 유지보수 전략 등을 합리적으로 도출할 수 있도록 한다. 그러나 디지털 트윈의 도입에는 기술적/경제적 한계 또한 존재한다. 거대한 연산 체계와 고성능 센서 네트워크 구축에 따른 초기비용이 막대하고, 데이터 보안과 개인정보 보호 문제가 계속해서 언급되고 있다. 실제 사례로는 싱가포르 정부가 추진한 'Virtual Singapore' 프로젝트가 있다. 해당 프로젝트는 도시 내 교통, 환경, 인구 데이터를 실시간으로 통합하여 도시계획 및 에너지 효율성을 검증하는 데 활용되고 있다. 또한 독일 지멘스는 생산설비의 디지털 트윈 모델로 공정 이상을 사전에 감지하고, 설비의 가동률을 향상시킨 사례가 존재한다. 이러한 사례는 디지털 트윈이 도시 및 산업 구조의 운영 효율을 제고하는 핵심 기술로 기능하고 있음을 시사한다.

* bayahro91@gmail.com

송배전망 최적화는 전력의 생산지에서 소비지까지의 흐름을 효율적으로 제어하여 손실을 최소화하고 안정적인 전력 공급을 보장하기 위한 기술적, 운영적 접근을 의미한다. 전력망은 발전소, 변전소, 배전선로, 부하 지점 등 다수의 구성 요소가 상호 연결된 복합 네트워크 구조로, 각 지점의 부하 변동과 송전 손실을 정밀하게 관리한다. 전통적인 송배전망은 고정된 운전 계획과 경험적 제어에 의존하였으나, 도시의 에너지 수요가 복잡하고, 비선형적으로 변화함에 따라 실시간 데이터를 기반으로 한 최적화 체계의 필요성이 대두되었다.

송배전망 최적화의 이론적 기반은 주로 전력 흐름 해석과 최적 전력 조류 모델에 있다. 전력 흐름 해석은 각 노드 간 전압, 전류, 위상각 등의 관계를 수학적으로 분석하여 네트워크 내 전력 분포를 계산하는 기초 이론이며, 최적전력조류는 이를 확장하여 비용, 손실, 안정도 등의 목적함수를 최소화하는 최적 운전 상태를 탐색하는 기법이다. 최근에는 인공지능 및 머신러닝 알고리즘을 활용한 데이터 기반 최적화 기법이 활발히 연구되고 있다.

디지털 트윈 기술의 도입은 송배전망 운영 방식에 커다란 전환점을 만들어내고 있다. 과거에는 일정한 주기로 데이터를 수집해 예측 모델을 갱신하는 수준에 머물렀으나, 이제는 IoT 센서와 실시간 시뮬레이션이 결합되어 현실 전력망의 상태를 가상 공간에서 거의 동시에 재현할 수 있게 되었다. 이 덕분에 변전소 간 부하 분배나 전력 수요의 변동 예측, 그리고 고장 진단까지도 실시간으로 수행할 수 있으며, 시뮬레이션 결과를 토대로 한 자동 제어 신호가 실제 설비에 곧바로 반영된다. 또 송전선의 온도, 전압강하, 부하율 등 다양한 지표를 함께 분석함으로써 에너지 손실을 줄이고, 재생에너지의 불규칙한 공급으로 인한 전력 불안정 문제를 미리 완화할 수 있다.

디지털 트윈은 단순한 모니터링 기술이 아니라, 전력망의 '가상 운전실'이라 부를 만큼 통합적 제어가 가능하다는 점에서 의미가 크다. 현실과 가상을 잇는 이 기술은 결국 송배전망 운영의 효율성과 안정성을 동시에 끌어올리는 핵심 도구로 자리 잡고 있다. 이와 같은 송배전망 최적화 체계는 도시 단위의 스마트 에너지 관리로 확장될 수 있으며, 탄소중립 사회로의 전환을 위한 반석이 된다. 송배전망 최적화는 전력 효율 향상에 그치지 않고, 국가 에너지 안보, 산업 경쟁력, 환경 지속가능성을 동시에 충족시키기 위한 종합적 기술 전략으로 기능하고 있다.

토의 및 연구(Discussion & Research)

<본론 1>

우리는 컴퓨터 메인보드가 도시의 송전망, 배전망과 구조, 기능적으로 유사하다는 아이디어를 바탕으로, 이를 조그만 디지털 트윈 모델이라 간주하고 그것이 타당한 이유를 밝힐 것이다.

메인보드는 전원의 공급, 분배, 제어, 보호, 냉각 등에서 전력망과 유사한 작동 조구를 가진다. 또한 전압, 전류, 온도 부하와 같은 전기적인 변수에 대한 반응 또한 도시 전력망과 유사한 매커니즘으로 작동한다. 그러므로 메인보드의 전기적 변화 데이터를 퍼유닛, %와 같은 비율단위로 환산하면, 실제 전력망의 부하 변화 및 기상 이변이 발생했을때 그에 따른 반응을 어느 정도 예측 가능하다.

본 연구는 메인보드가 대규모 전력망의 축소 모델로 활용될 수 있음을 보일 것이며, 이것이 디지털 트윈과 같은 전력망의 가상 모델이 될 가능성을 보이려 한다.

<이론적 배경>

전력망의 구조

도시의 송·배전망은 발전소에서 생산된 전기를 변전소를 통해 단계적으로 전압을 변환하며, 송전선과 배전선을 통해 부하(가정·산업체 등...)에 공급한다. 이 과정에서 전압, 전류, 온도 등의 다양한 변수의 안정적 제어가 필요하다. 전력망의 핵심 구성요소는 발전소, 변전소, 송전선, 부하, 보호 장치, 감시장치로 구성된다.

디지털 트윈

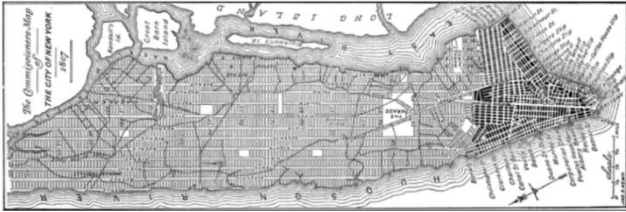
디지털 트윈은 물리적 대상의 가상 복제본으로, 센서 데이터를 통해 실시간으로 상태를 반영하며 예측·제어를 수행하는 시스템이다. 전력망 분야에서는 기상 조건, 부하의 변화, 고장 상황을 미리 시뮬레이션하여 안정성을 확보하는 데 활용된다.

메인보드의 구조

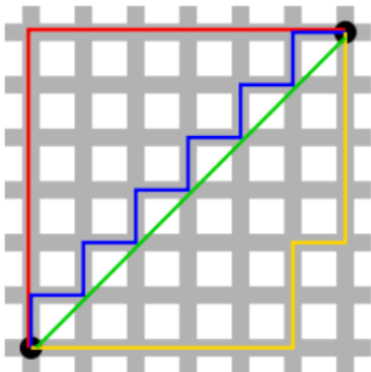
메인보드는 전원공급장치(PSU)로부터 전기를 받아 전선을 통해 CPU, GPU, 메모리 등으로 분배한다. 퓨즈와 보호 회로는 이상 전류를 차단하며, 온도 센서와 냉각팬은 발열을 제어한다. 결국 메인보드는 전력의 흐름과 제어가 동시에 이루어지는 축소판 전기 네트워크라 할 수 있다.

맨해튼 라우팅

메인보드가 도시의 송전망, 배전망과 구조적 유사성을 가지는 첫 번째 이유는 맨해튼 라우팅(Manhattan Routing)이다. 맨해튼 라우팅은 회로 배선을 x 축과 y 축 방향(직각)으로만 배치하는 설계 방식이다. 이를 설명하기 위해선 맨해튼이라는 지역이 어떤 특성을 지니는지부터 알아보아야 한다. 맨해튼은 미국 뉴욕주 뉴욕시에 위치한 자치구이다. 이는 인류 최초의 마천루가 위치하게 된 도시이며, 매우 철저한 도시 계획에 의거하여 만들어진 곳이다. 맨해튼은 1811 년에 아래 그림과 같은 최종안으로 기획되었다.



이를 보고 알 수 있는 점은 도시의 도로와 건물들이 격자형 구조를 이루도록 계획되었다는 것이다. 컴퓨터 메인보드 설계에 이것이 적용되는 이유는 맨해튼 도로를 따라 이동 시에는 거리가 직각으로, 즉 x 축, y 축으로 이동할 때 가장 짧기 때문이다. 이는 소위 택시 기하학(Taxicab geometry)이라는 기하학의 한 갈래를 바탕으로 한다. 아래 그림 처럼 격자 구조에서 좌하단과 우상단 사이에서 녹색 선이 최단 거리가 된다. 그러나 맨해튼 도로와 같이 도로만 따라서 이동한다면 맨해튼 거리는 도로가 서로 직교될 때 가질 수 있는 가장 짧은 경로가 되는 것이다. 이는 도심 지역의 도로·전선 배치처럼, 각 선로가 수평·수직으로 격자형 구조를 이루며 상호 간의 간섭을 최소화한다.



기능대응관계

메인보드 구성요소	도시 전력망 대응요소	기능적 역할
전원공급장치(PSU)	발전소	전력 공급의 시작
전선	송전선, 배전선	전력 전달 통로
CPU, GPU, 메모리	주택·공장 부하	전력 소비 및 변동 부하
퓨즈, 보호 회로	차단기, 계전기	과부하·단락 보호
냉각팬, 방열판	변전소 냉각 시스템	열 제어 및 안정 유지
센서, 모니터링 칩	SCADA, EMS	실시간 감시 및 제어

두 시스템 모두 전력의 흐름이 순환하며, 각 구성요소가 상호 보완적으로 작동한다. 전원의 공급, 분배, 소비, 보호, 제어의 단계가 동일하게 존재한다는 점에서 두 시스템은 유사성을 가짐을 보인다.

부하 증가 시 전압 강하

CPU 의 부하가 증가하면 전류가 급격히 증가하면서 전압이 하락한다.

이는 여름철 전력 피크 시간대에 전압이 낮아지는 도시 전력망의 현상과 동일하다.

온도 상승에 따른 제어 시스템

CPU 의 온도가 높아질 경우 자동적으로 냉각 시스템이 작동하거나 클럭의 속도를 낮춤으로써 전력 소비를 조절한다. 이는 변전소에서의 자동제어시스템이 과열 시 부하를 조절하는 것과 같은 원리이다.

보호 장치

퓨즈 혹은 보호 회로는 갑자기 전류가 증가했을 때 즉각적으로 전류를 차단해버린다. 이와 같은 회로 보호 매커니즘은 도시 전력망의 차단기, 계전기와 동일한 구조로 작동한다. 이처럼 전기적 자극 변수에 대한 반응 방식이 규모와는 상관없이 유사하게 작동하기 때문에, 컴퓨터의 메인보드를 전력망의 디지털 트윈으로 보는 것은 적합하다고 볼 수 있다.

<타당성 검증>

전기 법칙

전기 시스템은 옴의 법칙 ($V=IR$)과 전력 손실 공식 ($P=I^2R$)을 기반으로 작동하게 된다.

시스템의 규모가 다를지라도 전류-전압-저항 사이 관계는 동일하기에, 회로에서 관찰된 변화 패턴 또한 도시 전력망에서 유효하다.

데이터 비교의 가능성

전기적 데이터의 값은 절대값보다 변화율이 더 중요하다. 예를 들어 전압이 5% 하락했다면, 이는 12V 에서 11.4V 가 되거나 220kV 에서 209kV 가 되는 전압이 5% 하락했다는 사실은 동일하므로 같은 의미를 갖게 된다. 이와 같이 비율 단위로 데이터를 환산하면 메인보드에서의 값과 도시 전력망 데이터를 비교하기 유용해진다.

제어 및 보호 매커니즘의 유사성

두 시스템은 모두 상태 유지가 매우 중요하다. 온도가 상승했을 때는 부하를 줄이고, 전압이 낮아지면 전압 안정화 회로를 가동하는 피드백 구조를 통해 상태를 유지한다. 이는 제어 루프 시스템의 구조를 나타내며, 규모가 다르더라도 유사한 매커니즘으로 확인할 수 있다.

이러한 유사성이 존재하기 때문에, 메인보드에서 얻은 전압-전류-온도 데이터는 디지털 트윈 으로서 활용되어 폭염, 낙뢰, 지진 등 여러 변수에서의 전력망 변화를 예측할 때 유용할 것이다. 이는 간편하게 전력망 안정성을 검사할 수 있는 효과적인 시뮬레이션 모델이 될 수 있다.

<결론>

본론 1 에서는 컴퓨터 메인보드가 도시 송·배전망의 구조적, 기능적으로 공통점이 있으며, 이를 간단한 디지털 트윈으로 활용 가능함을 이론적으로 증명할 수 있었다. 메인보드는 전기 공급, 부하 제어, 보호 등에서 송배전망과 근본적으로 매우 유사한 전력 구조를 가진다. 그리고 메인보드, 송배전망 모두 전기적 변화에 대한 반응이 그 규모와는 상관없이 유사한 방식으로 작동함을 알 수 있었다. 그러므로 메인보드에서 관찰되는 전기적 데이터 변화를 통해 도시 전력망이 기상 이변이나 부하 급증에 어떻게 반응할지를 예측할 수 있는 디지털 트윈의 가능성을 볼 수 있다.

도시의 복잡한 교통망이나 에너지망을 전기 회로망에 대응하여 분석하면, 전기 흐름 분포를 키르히호프 법칙과 옴의 법칙으로 설명할 수 있다. 예를 들어 도로 교통망에서 교차로를 회로의 노드, 도로 구간을 저항 요소로 가정하고, 출발지-도착지 사이에 전압을 가하면 전체 도로망에 걸쳐 전류가 흐르도록 모델링한다. 이때 각 도로의 저항 값은 통행 시간이나 혼잡도에 비례하도록 설정하는데, 길고 혼잡한 도로일수록 저항이 크고 짧고 원활한 도로일수록 저항이 낮다고 본다.

이 방식으로 설정하였을 시 각 회로에서 전류가 저항이 낮은 경로에 더 많이 흐르고 저항이 높은 경로에는 약하게 흐르는 특성이 나타나는데, 이는 실제 교통망에서 빠른 경로로 차량이 분산되고 병목 구간에는 상대적으로 흐름이 적어지는 현상과 대응된다. 결국 전류의 흐름 패턴을 해석함으로써 교통망에서의 주요 경로, 부하 집중 및 병목 현상을 이해하고 파악할 수 있게 된다.

또한 이러한 분석을 통해 노드당 유입=유출이라는 키르히호프의 법칙은 교차로에서의 차량 보존 법칙과 같고, 옴의 법칙은 구간의 속도-흐름 관계를 단순화해주는 역할을 한다.

프로그래밍 언어 Python 에서는 선형대수 라이브러리를 사용하여 이러한 회로망의 전압, 전류를 계산하는 코드 작성이 가능하다. 예를 들어, 두 개의 루프를 가진 DC 회로에 키르히호프 법칙을 적용하면 다음과 같은 연립방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} R1I1 + R3I3 = E1 \\ R2I2 + R3I3 = E2 \\ I1 - I2 - I3 = 0 \end{cases}$$

이를 행렬 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} R1 & 0 & R3 \\ 0 & R2 & R3 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E1 \\ E2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Python 의 NumPy 라이브러리를 사용하면 위 행렬 방정식을 직접 계산할 수 있다. 아래 코드는 각 저항값과 전원전압을 입력받아 전류 I1, I2, I3 를 구하는 예시이다.

```
import numpy as np

R1, R2, R3 = 2, 2, 1
E1, E2 = 6, 6

R = np.array([[R1, 0, R3],
              [0, R2, R3],
              [1, -1, -1]])
E = np.array([E1], [E2], [0])

I = np.linalg.inv(R) @ E
print("I1=", I[0][0], "I2=", I[1][0], "I3=", I[2][0])
```

실행 결과는

I1 = 1.5 A, I2 = 1.5 A, I3 = 3.0 A

로 출력되며, 이는 I3 = I1 + I2 관계를 만족함을 보여준다.

이처럼 Python 을 사용하면 임의의 회로망을 행렬 방정식으로 작성하고 간단히 해석하여 전류 및 전압의 분포를 이해할 수 있다.

실제 교통망에 적용할 때는 도로를 저항으로, 교차로를 노드로 간주하여 그래프의 라플라시안 행렬(G)을 구성하고, GV = I 형태의 방정식을 풀어 각 교차로의 에너지(혼잡도)를 계산한 뒤 간선별 전류(교통량)를 구하는 방식으로 분석할 수 있다.

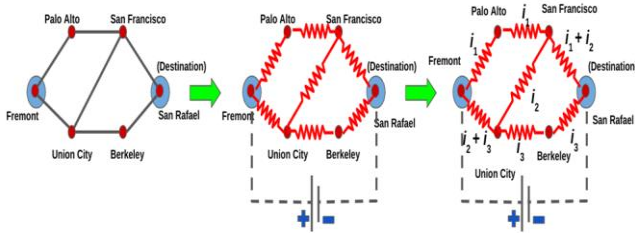
전기 회로망 모델을 활용하면 교통 흐름의 분배와 병목 현상을 분석하는 새로운 접근이 가능하다. 회로 해석 결과로 얻은 각 도로의 전류값은 해당 도로를 거치는 교통량에 대응하므로, 전류가 많이 흐르는 경로는 교통량이 많은 것이기 때문에 주요 경로로 해석한다. 예를 들어 Google 연구팀은 도로망의 여러 병렬 경로에 전류가 어떻게 분산되는지를 계산하여, 출발지에서 목적지까지의 다양한 대체 경로를 추출하였다. 저항이 낮은 도로로 전류가 집중되어 주 경로를 형성하고, 저항이 큰 구간에는 전류가 거의 흐르지 않아 우회 경로가 되는 원리이다.

미국 Bay Area 일부 도로망을 회로로 모델링한 예를 보면, Fremont 를 출발지로, San Rafael 을 목적지로 설정했을 때 도시의 복잡한 구조를 전기 회로망으로 추상화하여 교통이나 에너지 흐름을 체계적으로 분석할 수 있음을 보여준다.

즉, 전압-전류-저항의 삼원 관계를 도시 내 교통량-흐름-인프라 용량과 연결하는 것이다. 전압 차이가 큰 두 지역 사이에 낮은 저항의 도로가 존재하면 큰 전류가 흐르듯, 혼잡도가 높은 지역과 낮은 지역을 잇는 원활한 경로로 차량이 집중된다. 반면 특정 구간의 용량이 작아 저항이 커지면 큰 전압 강하가 그 구간에 발생하고 전류가 제한되는데, 이는 해당 도로가 병목으로 작용하여 교통 흐름을 막는 것과 같다. 또한 회로에서의 전력 손실(P·R)은

도시 교통에서의 혼잡으로 인한 연료와 시간 낭비에 대응된다.

결국 도시를 회로망으로 본떠 복제한 디지털 트윈 모델을 구축하면, 복잡한 도시 현상을 전기 회로에서 전기의 움직임으로 치환하여 도시 흐름, 병목, 과부하 등의 문제를 직관적으로 파악할 수 있다. 실제로 도로망을 저항망으로 변환하고 배터리를 연결해 전류를 흘린 후 계산된 전류 $i_1 i_2 i_3$ 가 세 가지 대체 경로에 대응함을 확인할 수 있다:



Fremont 에서 San Rafael 까지의 도로망을 등가 전기회로로 모델링한 사례. 교차로를 노드로, 도로를 저항으로 본다. 배터리를 연결해 전류 i 를 흘리면 (왼쪽 그림) $i_1 i_2 i_3$ 로 표시된 전류들의 경로 각각이 원래 도로망의 대체 경로에 대응되며, 저항이 작은 경로일수록 더 큰 전류가 흐른다.

병목 노드는 전체 네트워크의 흐름을 지탱하는 교량이나 터널처럼, 연결 구조상 핵심적인 지점을 의미한다. 이런 노드들은 회로 해석 과정에서 Y- Δ 변환 같은 회로망 단순화 기법을 활용하면 계산 효율을 크게 높일 수 있다는 연구 결과도 있다. 이는 실제 도로망에서도 병목 구간에 해당하는 교차로나 특정 도로를 중심으로 전류 분포를 단순화함으로써, 대규모 네트워크를 보다 빠르고 정확하게 분석할 수 있음을 시사한다.

요약하자면, 전기 회로망 해석 기반의 교통 시뮬레이션은 노드 보존 법칙과 저항 특성을 이용해 교통 흐름의 평형 상태를 구하고, 이를 통해 혼잡 구간 탐지나 병목 파악, 그리고 우회 경로 제안과 같은 응용 분석을 가능하게 한다.

특히 회로망 모델의 강점은 구성 요소를 자유롭게 조정하여 다양한 시나리오를 디지털 트윈 환경에서 실험할 수 있다는 점이다. 예를 들어 실제 도시에서 도로 용량이 줄거나 제한 속도가 변경되는 상황, 혹은 전력망에서 특정 라인이 차단되거나 부하가 급증하는 상황은, 회로망 모델에서는 단순히 저항이나 전류원 값을 바꾸는 것으로 구현된다.

또한 오픈소스 도구인 PyPSA 를 활용하면 송배전망의 여러 조건 아래에서 선형화된 전력 흐름 방정식을 풀어, 각 노드의 전압이나 선로의 전력 조류를 계산할 수 있다. 이를 통해 재생에너지 출력 변화나 부하 분포의 조정이 전력망에 미치는 영향을 미리 시뮬레이션할 수 있으며, 잠재적인 과부하 구간도 예측이 가능하다.

결과적으로 사용자는 도시 회로망 모델의 파라미터를 조정하면서 조건별 흐름 분포를 비교분석하고, 정책 시행 전 효과 예측이나 인프라 변화로 인한 영향을 정량적으로 평가할 수 있게 된다. 이는 단순한 모의실험을 넘어, 도시 시스템의 복잡한 상호작용을 이해하고 미래 시나리오를 설계하는 하나의 실질적 도구로 기능한다.

결국 회로망 모델링 기법은 도시 시스템의 시뮬레이션을 더 효율적이고, 단순화하여 수행할 수 있게 해주는 도구이다. 더불어 Python 등과 같은 오픈소스 및 상용 해석 도구를 이용하면, 고등학생 수준의 연구에서도 손쉽게 구현 가능한 코드와 시각화 기법을 통해 쉽게 도시 분석을 전개할 수 있다.

결론 및 제언(Conclusion & Recommendation)

본 연구는 도시의 복잡한 인프라 구조를 전기 회로망과 비교함으로써, 물리적 도시 시스템을 디지털 트윈 환경에서 효율적으로 모델링할 수 있음을 제시하였다. 특히 컴퓨터 메인보드의 전력 흐름 구조가 도시의 송배전망과 기능적 측면에서 높은 유사성을 가진다는 점을 이론적으로 입증하였다. 이를 통해 소규모 전자 회로를 활용한 도시 에너지망의 축소형 실험 모델을 제안할 수 있었으며, 실제 도시 인프라의 거동을 안전하게 예측·분석할 가능성을 확인하였다.

또한 키르히호프 법칙과 옴의 법칙을 적용한 회로망 해석을 통해, 도시 교통망과 에너지망의 흐름을 시뮬레이션하는 방법을 제시하였다. Python 기반의 계산 실험을 통해 도로 혼잡도, 전력 부하, 병목 현상 등을 회로의 저항·전류 개념으로 치환하여 분석할 수 있음을 보였다. 이러한 접근은 향후 스마트시티 계획, 에너지 효율화 등 다양한 분야에서 활용될 수 있다.

이상의 연구 결과를 바탕으로 다음과 같은 제언을 하고자 한다.

첫째, 향후 연구에서는 메인보드 센서 데이터를 실제 도시 전력망 데이터와 비교·분석함으로써 모델의 예측 정확도를 검증할 필요가 있다.

둘째, IoT 센서와 클라우드 기반 연산을 결합하여 회로망 시뮬레이터를 실시간 디지털 트윈 환경으로 확장할 수 있을 것이다.

셋째, 본 연구가 전력망과 교통망을 중심으로 다루었으나, 향후에는 통신망·수자원망 등 다른 도시 인프라와의 상호작용을 통합적으로 분석하는 모델이 요구된다.

마지막으로 도시를 회로망으로 바라보는 디지털 트윈 모델은 복잡한 도시 문제를 단순한 구조로 환원시켜 이해할 수 있는 도구이다. 본 연구가 이러한 새로운 접근의 출발점이 되어, 향후 도시 공학과 데이터 과학을 융합하는 연구의 초석이 되길 기대한다.

REFERENCES

1. 국토연구원. (2023). 스마트시티 구현을 위한 디지털 트윈 기술의 활용 방안 연구. 세종: 국토연구원.
2. 산업통상자원부. (2024). 디지털 트윈 기반 에너지 관리 고도화 추진 전략. 서울: 산업통상자원부.
3. IEEE Spectrum. (2023, August). How Digital Twins Are Powering the Cities of the Future. IEEE.
4. Grieves, M. (2022). Virtually Perfect: Driving Innovation and Lean Products Through Digital Twins. Springer.
5. Siemens AG. (2024). Digital Twin in Smart Infrastructure: Integrating Power, Mobility, and Data. Munich: Siemens White Paper.
6. Deflection Routing 방식을 이용한 Manhattan Street Network 의 성능분석(한국정보과학회 학술발표논문집, 1994.10)
7. World Scientific Connect(2018) A Path-Counter Method for Fault-Tolerant Minimal Routing Algorithms in 2D Mesh
8. Alexander V. Tolmachev, Evgeny V. Sinitsyn, Dmitrii A. Brusyanin.(2019). Transport system modelling based on analogies between road networks and electrical circuits
9. Google Research Team. (2021). *Robust Routing Using Electrical Flows*. Google Research Blog / ACM SIGSPATIAL Best Paper.