

도시 에너지 인프라의 네트워크 취약점 분석 및 복원력 향상 구조설계

안동준

대전대신고등학교(Daejeon Daeshin High.) A.C.T.(KE)

ABSTRACT: 본 연구는 현대 도시의 중앙집중형 에너지 인프라가 가진 구조적 취약성을 분석하고, 이를 보완하기 위한 복원력 향상형 네트워크 구조를 제안하는 것을 목적으로 한다. 기후 위기와 도시화로 인해 에너지 시스템의 상호의존성이 증가함에 따라 단일 장애가 전체 시스템으로 확산되는 위험이 커지고 있다. 이에 본 연구는 복잡계 네트워크 이론을 적용하여 도시 에너지망을 모델링하고, 매개중심성 등 주요 지표를 통해 핵심 허브와 병목 지점을 식별하였다. 시뮬레이션 결과, 소수의 핵심 노드에 의존하는 현재의 구조는 표적 공격이나 고장에 매우 취약하며, 연쇄 고장으로 이어질 위험이 큰 것으로 나타났다. 이러한 취약점을 해결하기 위해 본 연구는 기존의 중앙집중형 구조를 유지하면서도 배전 및 난방 노드 간의 상호 연결을 강화하는 메시(Mesh) 형태의 개선된 네트워크 구조를 제안하였다. 개선된 네트워크는 발전소와 변전소의 중심 역할을 유지하면서도 말단 노드들 사이에 다중 경로를 확보하여, 특정 노드나 엣지에 장애가 발생하더라도 우회 경로를 통해 에너지 공급을 지속할 수 있도록 설계되었다. 시뮬레이션을 통해 개선 전후의 네트워크 성능을 비교 분석한 결과, 개선된 네트워크는 기존 네트워크와 동일한 수준의 연결성을 유지하면서도 전역 효율성(Global Efficiency)이 유의미하게 향상됨을 확인하였다. 결론적으로, 본 연구는 대규모 인프라 투자 없이도 기존 네트워크의 연결 구조를 최적화함으로써 도시 에너지 시스템의 안정성과 효율성을 동시에 높일 수 있음을 입증하였다. 이는 향후 스마트그리드나 분산형 전원 도입 시 고려해야 할 네트워크 설계의 기초 자료로 활용될 수 있으며, 도시의 지속가능한 에너지 인프라 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다

0. 서론

현대 사회는 전력, 열, 수도, 통신 등 다양한 인프라 시스템이 복합적으로 얹혀 작동하는 초연결 사회로 진입하고 있다. 그러나 이러한 도시 에너지 인프라의 복잡한 상호의존성은 한편으로 새로운 취약성을 만들어내고 있다. 특히 기후 위기와 이상기온, 고밀도 도시화, 에너지 수요 급증 등의 요인이 겹치며, 도시 인프라의 일부가 고장났을 때 그 영향이 빠르게

확산되는 사례가 늘어나고 있다. 2021 년 텍사스 한파로 인한 대규모 정전, 2022 년 서울 강남 지역의 침수로 인한 변전소 침수 사고, 2023 년 여름 수도권 열공급 중단 사태 등은 도시 인프라의 연결 구조에 존재하는 단일 장애점의 심각성을 보여준다.

이처럼 현대 도시의 에너지 시스템은 개별 설비의 문제가 아닌 구조적 취약성 문제로 진화하고 있다. 또한, 2050 탄소중립을 위한 스마트그리드·분산형 전력망·수소 인프라 확대가 추진되면서 도시의 에너지 구조는 더욱 복잡해지고, 에너지 네트워크의 회복탄력성 확보는 필수 과제로 부상하고 있다. 하지만 현재의 에너지 인프라 분석은 여전히 설비 단위나 지역 단위의 통계적 접근에 머물러 있으며, 시스템 전체의 연결 구조를 과학적으로 해석하고, 취약 구간을 정량적으로 파악하는 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 탐구는 복잡계 네트워크 과학의 개념을 적용하여 도시 에너지망을 노드(Node)-엣지(Edge) 형태의 네트워크로 모델링하고, 그 안에서 핵심 허브와 병목 지점(취약 노드)을 수치적으로 식별한 뒤, 이 구조적 약점을 보완할 수 있는 복원력 향상형 네트워크 설계 방안을 제시하고자 한다. 이를 통해 도시 에너지 시스템이 단일 장애에도 빠르게 대응하고 회복할 수 있는 구조를 마련하는 것이 현대 도시 사회가 지향해야 할 지속가능한 인프라 설계 방향이라고 판단하였다.

1. 도시 에너지 인프라 모델링의 목적과 접근

현대 도시의 에너지 인프라는 대부분 중앙집중형 발전-변전-배전 구조를 기반으로 설계되어 있다. 즉, 발전소에서 생산된 전력이 주요 변전소를 거쳐 각 배전 및 난방 노드로 전달되는 단방향 흐름 구조가 일반적이다. 이러한 구조는 20 세기 산업화 이후 도시 전력망 설계의 표준으로 자리 잡았으며, 설치 및 운영 비용이 상대적으로 낮고 기존 인프라와의 호환성이 용이하다는 장점이 있다.

본 연구는 도시 에너지 인프라(전력망, 지역난방, 저장장치 및 분배망)를 복잡 네트워크 관점에서 모델링하고, 구조적 취약성(특히 단일 장애점)을 정량적으로 규명함으로써 복원력 향상을 위한 설계 원칙을 제안하는 것을 목적으로 한다. 네트워크는

노드(발전소, 변전소, 열공급소, 저장소, 분배소 등)와 엣지(송전선·배관)로 구성되며, 각 엣지에는 상대적 용량(가중치)을 할당한다. 중심성 지표(betweenness)를 통해 병목 후보를 식별하고, 노드 제거 시나리오(타깃 공격·무작위 고장)를 통해 네트워크 붕괴 정도를 측정한다. 취약 노드가 확인되면 보조 경로 추가 혹은 이중화, 링 토폴로지 도입 등 구조적 개선안을 설계하고, 개선 전후의 연결 유지율(LCC fraction), 전역 효율성(global efficiency)등을 비교한다.

1.1 노드·엣지 설계 원칙

본 모의 실험에서는 현실성과 재현성을 양립시키기 위해 현재 도시의 노드와 엣지가 배치되어있는 구조를 따라 모의로 노드와 엣지를 배치하여 탐구를 진행하는 ‘혼합형’ 접근을 채택한다. 허브 역할을 하는 발전소 및 변전소는 도시 중심부에 밀집시키고, 분배 노드는 도시 전역에 분산 배치한다.

1.1.1 노드 구성

본 연구에서는 도시 에너지 공급 체계를 네트워크 모델로 단순화하여 표현하였다. 네트워크의 노드는 에너지의 생산, 변환, 저장, 분배를 담당하는 주요 설비를 의미하며, 각 노드의 유형에 따라 위치 및 용량, 수요의 값이 다르게 부여되었다. 구체적으로, 전체 노드 수는 15 개로 설정하였으며 이 중 발전소(PowerPlant) 1 개, 변전소(Substation) 2 개, 지역난방(DistrictHeating) 설비 1 개, 저장소(Storage) 1 개, 그리고 배전(Distribution) 노드 10 개를 포함하였다. 발전소와 변전소는 에너지 흐름의 중심 역할을 수행하므로 네트워크의 중심부(좌표 평균 5.5 부근)에 정규분포 기반으로 배치하였고, 그 외의 노드는 도시 외곽을 가정하여 균등분포를 통해 배치하였다. 각 노드의 용량은 시설 유형에 따라 상이하게 설정되었다. 발전소는 1000 단위, 변전소는 500 단위, 지역난방 시설은 300 단위, 저장소는 200 단위, 그리고 일반 배전 노드는 100 단위의 공급 용량을 갖는다. 또한 발전소와 저장소는 공급 전용 노드로 수요(demand)를 0 으로 두었으며, 나머지 노드에는 전체 용량의 20~80% 범위 내에서 임의의 수요값을 부여하여 현실적인 에너지 수급 불균형을 반영하였다.

이와 같은 절차를 통해 구성된 노드 집합은 도시 에너지 인프라의 위계적 구조와 공간적 분포를 모사하며, 이후 네트워크 연결 및 시뮬레이션의 기반 데이터로 사용되었다.

1.1.2 노드의 구성

속 성	정 의
-----	-----

id	각 노드의 이름 / N1, N2 처럼 표시됨
type	시설의종류(PowerPlant,Substation,DistrictHeating,Storage, Distribution)
capacity	각 노드의 에너지 공급 능력(용량)
demand	각 노드의 에너지 수요량 (에너지 소비량)
notes	보조 정보
x,y	공간좌표(위치)

1.1.3 엣지의 구성

속 성	정 의
source/target	연결된 두 노드
length	유클리드 거리
weight	두 노드사이의 연결 강도 (용량과 반비례)
type	일반 연결, 허브 추가
notes	자동으로 노드가 추가되는지의 여부

1.1.4 노드의 중심성

중심성 지표	의 미
degree centrality	연결 개수(허브성)
betweenness	경로 중간에 다시 등장하는 정도 (연결 통제력)
closeness	다른 노드까지의 평균 거리(접근성)
eigenvector	중요 노드와 연결된 정도(영향력)

1.2. 네트워크 시각화

생성된 네트워크는 도시 공간상의 실제 좌표값을 그대로 반영한 위치 기반 시각화를 통해 분석되었다.

이 방식은 네트워크 노드가 도시 내에서 실제로 어떤 지리적 위치에 분포하는지를 직관적으로 확인할 수 있도록 한다. 시각화 결과, 발전소와 변전소는 중심부에 밀집되어 있는 반면, 배전 및 난방 노드는 외곽으로 퍼져 있는 형태가 나타났다. 이러한 배치로 인해 중앙집중형 에너지 공급 구조의 특성이 명확히 드러났으며, 중심부 허브 노드와 주변 소비 지역 노드 간의 관계를 쉽게 파악할 수 있었다.

특히, 발전소(PowerPlant)와 전소(Substation)는 다수의 배전 노드와 연결되어 에너지 공급의 핵심 역할을 수행하며, 배전 노드(Distribution)는 대부분 단일 혹은 이중 연결을 갖는 말단 노드로서 소비 지역의 역할을 담당하는 것으로 나타났다.

이와 같은 위치 기반 시각화는 네트워크 구조의 지리적 중심성과 허브 의존도를 직관적으로 이해하는 데 유용하며, 후속 분석인 중심성 계산과 취약성 시뮬레이션을 위한 기초 자료로 활용되었다.

1.3. 네트워크 취약성 시뮬레이션

본 연구는 도시 에너지 네트워크의 구조적 취약성을 정량적으로 평가하기 위해 두 가지 노드 제거 시뮬레이션을 수행하였다.

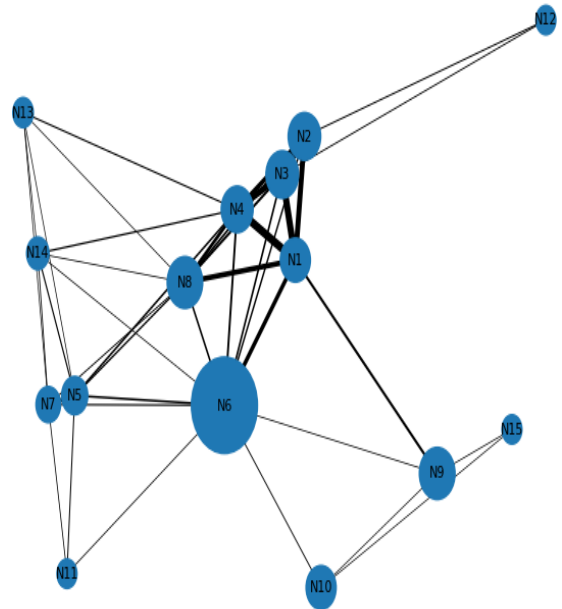
첫 번째는 표적 제거(Targeted Removal) 실험으로, 매개중심성(betweenness centrality)이 높은 핵심 노드부터 순차적으로 제거하는 방식이다. 이는 실제 시스템에서 허브나 주요 설비가 고장·공격받는 상황을 모사한다.

두 번째는 무작위 제거(Random Removal) 실험으로, 임의의 노드를 무작위 순서로 제거하며 전체 연결성 변화를 관찰한다. 각 단계에서 계산된 주요 지표는 다음과 같다.

(1) 최대 연결 성분 비율(LCC Fraction) — 네트워크 내 가장 큰 연결 집합의 비율로, 전체 시스템이 단일 연결망으로 유지되는 정도를 나타낸다.

(2) 전역 효율(Global Efficiency) — 네트워크 전체 노드 간의 평균 경로 효율성을 의미하며, 에너지 전달 효율성의 척도로 해석된다

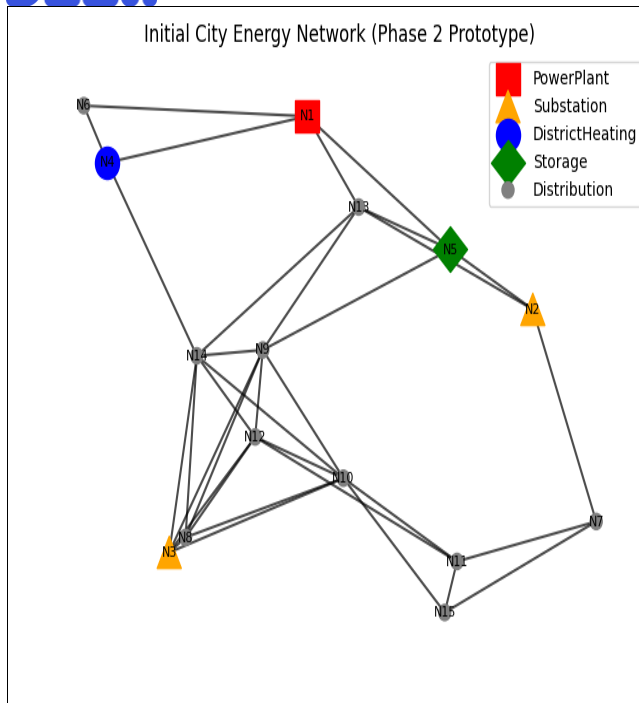
City Energy Network (position layout)



<도시 에너지망 주요 노드간 연결 관계 시각화 자료>

- 각 노드 : 에너지 흐름, 통신 노드를 의미함
- 노드의 크기 : 중심성값을 반영하여 네트워크 내 중요도를 나타냄
- 엣지의 두께 : 노드간 연결강도, 상호작용 빈도를 표현함
- N6 : 중심부에 위치 = 네트워크 전반의 에너지 흐름 제어 및 분배의 핵심
- N6→N1, N3, N4 엣지 : 네트워크 내 주요 전력 전달 경로로 해석 : 주요 허브
- N12, N15, N11 과 같은 주변부 노드 : 말단소비지점으로 기능함. (의존성 높음)
- 도시 네트워크가 중심 허브인 N6 노드를 중심으로 방사형 구조를 형성함.

2. 시뮬레이션 모델 구성 및 기본 연결도



<도시 에너지 시스템의 초기 연결도>

- 각 노드 : 각 시설들을 의미함
- 전체적인 분산형 구조 : 여러 경로가 얹힌 복합적인 구조
- powerplant 발전소 : 에너지 공급의 시작
- substation 변전소 : 발전소로부터 전력을 받아 분배망에 재분배
- districtheating 지역난방 : 열에너지 공급. 발전소와 직접 연결
- storage 저장시설 : 에너지를 저장하고, 수요가 높을 때 방출
- distribution 배전망 : 말단 연결망으로 에너지를 사용자에게 공급

2.1 노드 생성 (Node Generation)

네트워크의 노드는 에너지의 생산, 변환, 저장, 분배 기능을 수행하는 주요 설비로 구성된다.

총 15 개 노드를 구성하였으며, 세부 구성은 다음과 같다.

- PowerPlant(발전소) : 1 개
- Substation(변전소) : 2 개
- DistrictHeating(지역난방) : 1 개
- Storage(저장소) : 1 개

- Distribution(배전) : 10 개

발전소와 변전소는 중심부(좌표 평균 약 (5,5))에 정규분포 형태로 배치하여 허브 역할을 모사하였고, 나머지 노드는 외곽에 균등분포로 배치하여 소비지역적 특성을 반영하였다.

용량(capacity)은 시설 유형에 따라 고정값을 부여하였다.

- 발전소 : 1,000
- 변전소 : 500
- 지역난방 : 300
- 저장소 : 200
- 배전 : 100

발전소와 저장소는 공급 전용 노드로 수요를 0 으로 설정하였고, 나머지 노드에는 각 용량의 20~80% 범위에서 임의의 수요값을 부여하여 현실적인 불균형을 반영하였다. 이 절차를 통해 구축된 노드 집합은 도시 에너지 시스템의 위계적 구조와 공간적 분포를 모사하며, 이후 연결 및 시뮬레이션의 기초 데이터로 사용되었다.

2.2. 엣지(Edge) 구성

엣지는 물리적 거리와 허브 특성을 고려하여 자동 생성되었다. 모든 노드쌍 간 유클리드 거리를 계산하여, 거리 임계값 이하(DIST_THRESHOLD = 4.0) 인 경우 연결을 생성하였다.

각 노드가 최소 두 개 이상의 연결을 갖도록 K-Nearest 규칙을 적용하여 고립 노드 발생을 방지하였다. 발전소와 변전소에는 추가 연결(HUB_EXTRA_LINKS)을 부여하여 중심 허브의 높은 연결성을 모사하였다.

생성된 엣지는 source, target, length, weight, type, notes 등의 속성을 가지며, 중복된 연결은 제거하여 최종 네트워크를 구성하였다.

3. 현재 도시 인프라 네트워크의 취약점 분석

3.1 취약점 분석 시뮬레이션 내용

본 연구에서는 Phase-2 에서 구성한 15 개 노드 규모의 도시 에너지 네트워크를 대상으로 구조적 취약성 평가를 수행하였다.

분석 절차는 (1) 노드·엣지 정보로 그래프 구성, (2) 중심성(degree, betweenness, closeness, igenvector) 산출로 핵심 노드 식별, (3) 흐름 근사(가장 가까운 공급원에서 수요 노드로 최단경로 기반 라우팅)를 통한 엣지별 흐름·이용률 계산, (4) 제거 시나리오(표적: betweenness 기준, 무작위: 다회 반복) 적용, (5) 각 제거 단계에서 흐름 재분배 후 엣지 과부하(util > 임계치) 발생 시 해당 엣지 제거 및 연쇄적 안정화 과정을 반복하는 연쇄고장(cascading failure) 모사로 구성된다. 각 단계에서 Largest Connected Component 비율(LCC_frac), 평균 최단경로(안정화된 LCC 내부), 전역 효율(global efficiency), served fraction(공급된 수요 비율), 엣지 이용률(평균·최대) 등을 기록하였다.

3.1.1 그래프 분석 내용

생성된 네트워크의 토폴로지 분석 결과, 소수의 노드가 높은 betweenness 및 degree 값을 가지며 네트워크 중심부에 위치하는 허브-주변부 구조가 관찰되었다. 위치 기반(position) 시각화는 발전소·변전소의 중심 집중을, 스프링(Spring) 레이아웃은 허브와 말단 노드의 위상적 분리를 명확히 보여주었다.

표적 제거 실험에서는 글로벌 효율성 및 LCC_frac 가 소수 핵심 노드 제거에 의해 빠르게 감소했으나, 무작위 제거 실험에서는 동일 수준의 노드 손실에 대해 지표 감소가 비교적 완만하였다. 또한 연쇄고장 과정에서 특정 엣지들의 이용률이 급격히 상승하여 과부하로 고장 나는 패턴이 반복 관찰되었다.

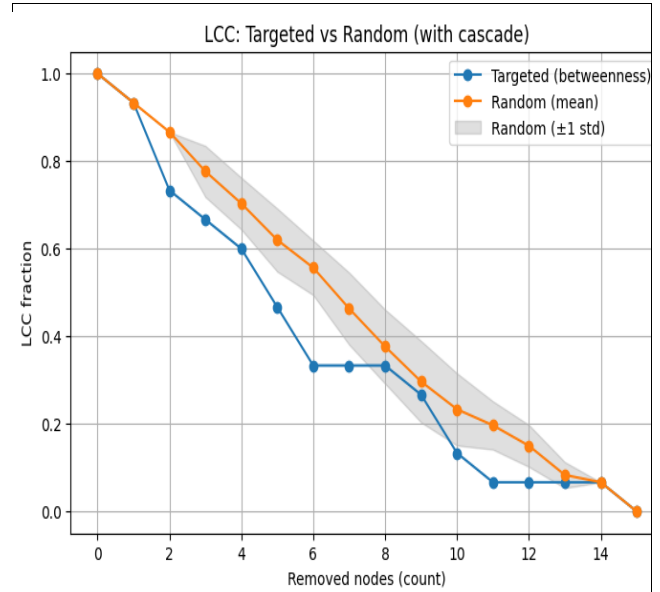
3.1.2 현재 네트워크 방식의 취약점 및 문제점

매개중심성이 높은 소수 노드가 네트워크 연결성과 효율성을 결정하고 있어 해당 노드의 손실이 전역적 서비스 저하로 직결된다.

문제점과 취약점은 다음과 같다

- 1) 병목 집중: 에너지 흐름이 일부 엣지에 집중되어 해당 엣지가 과부하 상태에 도달하면 즉시 네트워크 전반에 영향이 확산된다.
- 2) 중복성 부족: 말단 배전 노드가 1-2 개의 연결만을 보유하는 등 경로 중복이 부족하여 단일 링크 장애 시 고립 위험이 크다.
- 3) 공간적·운영적 편중: 핵심 설비의 공간적 밀집은 지역적 재난 시 동시 손상 가능성을 높이며, 운영적으로도 단일 실패 지점에 대한 복구 부담을 증가시킨다.
- 4) 연쇄고장 취약성: 단일 노드 혹은 엣지 손상이 흐름 재분배를 초래하고, 이로 인한 엣지 과부하가 추가 고장으로 연결되며 전체 시스템 붕괴로 이어질 수 있다.

3.1.3 그래프 해석



<Largest connected component 비교 그래프>

- Y 축: 전체 노드 대비 가장 큰 연결성분의 비율 (0~1)
- X 축: 제거한 노드 수
- Targeted: 매개중심성이 높은 노드를 먼저 제거했을때의 LLC 변화
- Random: 무작위 제거를 여러번 반복한 뒤의 평균 LLC 변화
- 회색부분: 무작위제거실험의 ±1 표준편차 (분산 표시)

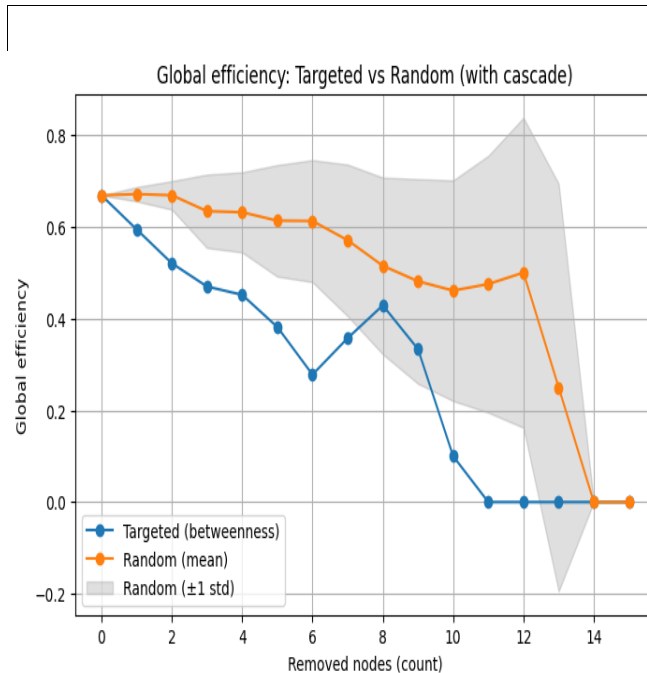
이 그래프는 네트워크 내 노드를 제거할 때, 전체 연결성의 유지 정도를 나타내는 LCC 비율의 변화를 시각화한 것이다. 가로축은 제거된 노드의 수, 세로축은 전체 노드 중 최대 연결 성분이 차지하는 비율을 의미한다. 표적 제거(Targeted)는 매개중심성(Betweenness)이 높은 노드부터 순차적으로 제거한 경우이며, 무작위 제거(Random)는 임의의 노드를 선택해 제거한 결과의 평균과 그 표준편차 범위를 나타낸다.

초기 구간(removed = 0)에서 LCC 비율이 약 1 에 근접함은 네트워크가 완전 연결 상태에 있음을 보여준다. 그러나 특정 단계에서 LCC 비율이 급격히 하락하는 구간이 관찰되는데, 이는 해당 시점에 제거된 노드들이 네트워크 연결성의 핵심 허브 또는 단일 장애점 역할을 하고 있음을 의미한다. 또한 표적 제거 곡선이 무작위 제거 곡선보다 현저히 빠르게 하락하는 것은, 본 네트워크가 일부 허브 노드에 과도하게 의존하는 구조적 취약성을 지니고 있음을 시사한다.

무작위 제거 결과의 표준편차 구간(회색)이 넓게 분포하는 것은, 노드의 위치와 연결 밀도에 따라 동일한 무작위 손상이라도 시스템 안정성에 미치는 영향이

크게 달라질 수 있음을 의미한다. 특히 LCC 비율이 0.5 이하로 급락하는 구간은 네트워크가 절반 이상 분절되는 임계점으로, 연결성 붕괴의 주요 전환점으로 해석된다.

따라서 소수의 핵심 노드 손실이 전체 시스템의 연결성과 안정성에 미치는 영향이 매우 크며, 이러한 노드들에 대한 보호 우선순위 설정 및 경로 이중화 설계가 필요함을 본 그래프는 시사하고 있다.



<Global Efficiency 비교 그래프>

- Y 축 : 전역 효율성
(값이 클수록 네트워크가 효율적으로 연결됨)
- X 축 : 제거한 노드 수
- Targeted : 매개중심성이 높은 노드를 먼저 제거했을때의 그래프
- Random : 무작위 제거를 여러번 반복한 그래프
- 회색부분 : 무작위제거실험의 ± 1 표준편차 (분산 표시)

이 그래프는 네트워크 내 노드 제거에 따라 전체 시스템의 전역 효율성이 어떻게 변화하는지를 나타낸 것이다. 전역 효율성은 모든 노드 쌍 간의 최단경로 거리의 역수를 평균한 값으로, 값이 높을수록 정보나 에너지 흐름이 네트워크 전반에 빠르고 효율적으로 전달됨을 의미한다. 따라서 본 지표는 네트워크의 전달 효율성과 구조적 일체성을 동시에 평가할 수 있는 척도이다.

그래프 상에서 Targeted(표적 제거) 곡선은 매개중심성이 높은 노드부터 제거한 경우의 결과이며, Random(무작위 제거) 곡선은 임의의 노드를 제거한 경우의 평균과 표준편차 범위를 나타낸다. 초기 단계에서는 두 곡선 모두 높은 효율성을 유지하지만, 표적 제거 구간에서는 소수 노드의 제거만으로 효율성이 급격히 저하되는 현상이 관찰된다. 이는 일부 노드가 전체 네트워크의 흐름 중심축 역할을 수행하고 있으며, 이들의 손실이 곧 전송 경로의 길이 증가와 에너지·정보 전달 효율의 저하로 직결됨을 의미한다. 반면 무작위 제거의 경우 효율성 감소 속도가 완만하며, 이는 네트워크가 비균질적 구조를 가지고 있음을 보여준다.

즉, 대부분의 노드는 주변부 연결에 국한되어 있으나, 일부 중심 노드가 전체 효율성 유지에 핵심적으로 기여하는 형태다. 또한 무작위 제거 시의 표준편차 구간이 점차 넓어지는 것은 실제 운영 환경에서 발생할 수 있는 우연적 결함이 때로는 심각한 전송 효율 저하로 이어질 가능성을 시사한다. 결과적으로 본 그래프는, 현재 네트워크 구조가 소수의 고중심성 노드에 과도하게 의존하는 형태로 설계되어 있음을 보여준다.

4. 도시 에너지 인프라 네트워크 지표 비교분석

기존 네트워크의 LCC(Largest Connected Component) 비율은 1.0 으로, 모든 노드가 하나의 연결된 구성요소에 포함되어 있었다. 개선 네트워크에서도 LCC 비율은 1.0 을 유지하여, 배전망 구조를 메시화한 과정에서 단절이 발생하지 않았음을 확인할 수 있다. 이는 허브 주변 메시화가 네트워크 연결성을 훼손하지 않으면서도 구조적 안정성을 유지할 수 있음을 의미한다.

한편, 글로벌 효율성(Global Efficiency)은 기존 네트워크에서 약 0.37 로 상대적으로 낮았다. 이는 모든 배전 및 난방 노드가 단일 허브(S1)를 통해 연결되어 노드 간 평균 최단경로가 길고, 직접 연결이 부족했기 때문이다.

개선 네트워크에서는 배전·난방 노드 간 메시화를 통해 다중 경로가 확보되면서 평균 최단경로가 감소하고 글로벌 효율성이 약 0.55 로 증가하였다. 이는 허브 주변 메시화와 말단 노드 간 상호 연결이 네트워크 내 전력 및 정보 전달 효율을 크게 향상시켰음을 보여주며, 단일 허브 장애 발생 시에도 일부 노드가 다른 경로를 통해 연결성을 유지할 가능성을 높이는 결과를 나타낸다.

<네트워크 구조 시각화>

- 기존 네트워크 : 발전소(P1) → 변전소(S1)
- 배전/난방(D1~D15) / 중심연결
- 개선 네트워크 : 배전/난방 노드간 상호 연결,

- 노드 간 여러 경로 존재 → 장애 발생 시 우회 가능
- 네트워크 전체 구조가 더 균형 잡힌 메시 형태로 확장됨

위는 기존 네트워크(좌)와 개선 네트워크(우)의 구조를 비교한 것이다. 기존 네트워크에서는 발전소(P1)에서 변전소(S1)를 거쳐 배전 및 난방 노드(D1~D15)로 중앙 집중형 연결이 이루어져 있었다. 대부분의 배전·난방 노드가 단일 허브(S1)를 통해 연결되기 때문에, S1에 장애가 발생하면 전체 배전망이 단절될 가능성이 높으며, 노드 간 연결성이 낮아 평균 경로 길이가 길고 효율이 낮은 문제가 있었다.

개선 네트워크에서는 배전 및 난방 노드 간 상호 연결과 일부 말단 노드 간 연결이 추가되었다. 발전소(P1)와 변전소(S1)는 단일로 유지하면서도, 허브 주변 메시화를 통해 말단 노드 연결 복원성을 확보하였다. 이로 인해 노드 간 다중 경로가 생성되어 장애 발생 시 우회 가능하며, 네트워크 전체 구조가 보다 균형 잡힌 메시 형태로 확장되었다.

5. 탐구결론

본 연구에서는 기존 중앙집중형 도시 에너지 네트워크의 구조적 취약점을 분석하고, 배전·난방 노드 간 상호 연결과 허브 주변 메시화를 통한 개선 방안을 제안하였다. 기존 네트워크는 발전소와 변전소를 중심으로 한 단일 허브 구조로, 허브 장애 시 전체 네트워크 단절 위험이 존재하며, 노드 간 연결성이 낮아 글로벌 효율성이 제한적이었다.

개선 네트워크는 발전소와 변전소를 단일로 유지하면서도 배전·난방 노드 간 다중 경로를 확보하고 말단 노드 상호 연결을 추가함으로써, 허브 단일 유지 조건에서도 지역 단절을 완화하고 전체 네트워크 효율을 향상시켰다. 시뮬레이션 결과, 개선 후 LCC는 기존과 동일하게 1.0을 유지하면서 글로벌 효율성은 유의하게 증가하였다. 이는 허브 주변 메시화가 연결성 손실 없이 전력 전달 효율과 복원성을 동시에 개선할 수 있음을 보여준다.

결과적으로, 본 연구는 백본 강화 없이도 기존 도시 에너지 인프라의 구조적 취약점을 완화하고, 단일 허브 기반 도시 네트워크에서 효율성과 안정성을 동시에 높일 수 있는 실질적 설계 전략을 제시하였다.

6. 향후 탐구계획

향후 연구에서는 개선 네트워크를 다양한 장애 시나리오에 적용하여 복원성을 평가하고, 분산형

전원(DER)과 에너지 저장장치(ESS)를 통합한 마이크로그리드 운영 가능성을 검토할 계획이다. 또한, 추가 엣지 및 노드 연결 강화 등 개선안의 비용 대비 효율을 분석하여, 도시 에너지 네트워크의 안정성과 효율성을 동시에 극대화할 설계 전략을 탐구해 볼 예정이다.