

시스템과 부품 관점에서 본 에너지 인프라 문제와 개선 방안

시지훈^{1†} 이승환¹ 원예성¹ 장우진¹ 오세룡² 김도영² 김시우² 박우준² 정재현² 배효민³
조성재³ 정재욱³ 남재형³ 배현경⁴ 안건우⁵ 윤하연⁵

¹ 김천고등학교 바야흐로 KE 에너지부

² 김천고등학교 바야흐로 KE 화학부

³ 김천고등학교 바야흐로 KE 기계부

⁴ 김천고등학교 바야흐로 KE 정보부

⁵ 김천고등학교 벡터

(경상북도 김천시 송철로 90)

Key Words: Electricity network, Hydrogen Fitting

ABSTRACT: 현대 문명은 방대한 양의 에너지를 사용하고 그 수요는 점차 증가하고 있다. 다만 현재의 전력 공급망은 고효율의 관점에서 불완전하고 이를 기술적으로 개선해 나가야 하는 것은 자명한 사실이다. 본 연구는 이러한 취약성을 파악하고, 해결 방안을 제시하기 위해 위 주제를 선정하였다. 거시적 그리고 미시적 관점에서 두 가지 사례 연구를 진행하였다. 거시적 관점의 문제점은 전력망 시스템 자체의 효율 문제였으며 본 탐구조는 이를 네트워크 과학을 기반으로 분석하였다. 미시적 관점으로는 차세대 전력망의 필수 요소인 수소 운송 시스템의 핵심 부품, 고압 배관 피팅의 취약점에 대한 분석이다. 통합적 결론을 위해 두 사례 분석 결과를 종합하여 구조적 병목 현상과 물리적 한계점이라는 두 가지 취약성 유형을 탐구하고, 각각에 대한 해결 방안을 통합함으로써 미래 에너지 인프라의 회복탄력성을 확보하기 위한 통합적인 리스크 관리 전략을 제시했다.

서론 (Introduction)

현대 사회에서 에너지 인프라는 국가와 국민을 지탱하는 근본적인 기반 시설이다. 산업 기술의 발전과 더불어 전기는 우리 삶의 필수적인 요소로 자리 잡았으며, 2021년도 대한민국 1인당 전력 사용량은 세계 3위를 기록했고, 전체 전기 사용량은 533,430 GWh에 달했다. 이를 통해 국가 경쟁력에 안정적인 전력공급이 미치는 영향을 알 수 있다. 그러나 이러한 전력공급을 뒷받침하는 인프라는 다양한 유형의 취약성을 내포하고 있다. 본 보고서의 핵심 명제는 근본적으로 다른 두 가지 문제가 에너지 인프라의 취약성을 유발하는 핵심 원인이라는 것이다. 첫째는 거시적관점의 시스템 단위 취약성이다. 이는 인프라 전체의 구조, 연결망의 형태, 그리고 구성 요소 간의 상호 의존성에서 비롯된다. 특정 지점에 과도한

부하가 집중되거나, 대체 경로가 부재한 병목 구간이 존재하는 등 네트워크의 위상학적 결함이 시스템 전체를 마비시킬 수 있다. 둘째는 미시적관점의 부품 단위 취약성이다. 이는 인프라를 구성하는 개별 부품의 물리적, 재료적 한계에서 비롯되는데, 극한의 운영 환경 속에서 부품이 겪는 응력 집중, 재료의 열화, 미세 균열 등이 누적되어 결국 파손으로 이어지는 경우이다. 본 탐구에서는 이 두 취약성을 해결할 방안을 탐구하고 통합적인 에너지 전략을 제시할 것이다.

본론 (Main part)

1. 시스템적 취약성

산업과 사회 시스템 유지에 전기 에너지의 중요성이 점점 더 부각되어 가는 지금, 전력망은 현대 사회에서 가장 필수적인 인프라이다. 하지만 전력망이 단일 노드나 경로에 집중된 경우, 해당 지점에서 오류가 발생할 시 광범위한 정전 사태로 이어질 수 있는 구조적 취약성을 지니고 있다. 특히 섬 지역 전력망은 지리적, 물리적 제약으로 인해 외부 전력원에 대한 의존도가 높고, 전력망의 구성 범위가 제한적이어서 특정 노드의 중요도가 상대적으로 커지는 경향이 있다. 제주도의 경우, 자체 발전 설비와 함께 해저 케이블을 통한 본토 연계 HVDC 설비를 통해 전력을 공급받고 있으며, 최대 전력 수요의 약 40% 이상을 외부에 의존한다. 이러한 구조는 일부 변전소나 연계 지점에 전력 흐름이 집중되는 원인이 될 수 있으며, 장애 발생 시 전력망 전체의 안정성에 심각한 영향을 미친다. 따라서 제주도와 같이 한정된 범위의 전력망에서 핵심 노드의 역할과 취약성을 분석하는 것은, 전력망의 구조적 안정성을 평가하고 효율적인 개선 방안을 모색하는 데 중요한 기초 자료가 된다. 이번 연구에서는 네트워크 과학의 중심성 분석과 커뮤니티 탐지 기법을 활용하

[†] jhsi0703@gmail.com

여 제주도 전력망의 구조적 특성을 분석하였다. 이를 위해 networkx 라이브러리와 Louvain 커뮤니티 탐지 알고리즘을 적용하여 각 노드의 사이중심성을 계산하고, 네트워크 내 커뮤니티 구조를 파악하였다.

1.1 제주도 지역별 신재생에너지 발전 현황과 미래 발전량 분석

제주도에서 발전이 활발한 지역은 제주도 북부지역, 서귀포시(남부지역), 한경면

(서부지역), 구좌읍, 성산읍(동부지역), 중산간 지역(조천읍) 등이 있다.

1.1.1 우선 제주시 북부(한림, 애월, 조천)에서는 육상 중심 풍력발전이 주된 발전 방식이다. 이 지역은 제주도 내에서도 풍속이 안정적이고 강한 편에 속한다. 풍력발전은 로터 블레이드가 바람을 받아 회전하면서 회전력이 발전기로 전달되고 이로 인해 전기가 생산되는 방식이다. 주요 기술은 유도형 발전기와 영구자석형 발전기가 있으며 중산간 고지대에 다수 설치되어 있다. 태양광 발전은 가정, 공공시설, 농촌 주택에 분산형 설비가 다수 설치되어 있다. 주로 고정식 단결정 태양전지(PERC)가 사용되며 발전효율은 18%~20%이다. 풍력 및 태양광 출력의 간헐성을 보완하기 위해 리튬 이온 기반 에너지 저장장치가 연계되어 운영되고 있다. 발전량은 1년을 기준으로 하였을 때 풍력 발전은 약 250GWh이고 태양광 발전은 200GWh로 총 추정 발전량은 450GWh 이상이다.

1.1.2 서부지역(한경면, 대정읍)의 주요 발전 방식은 해상풍력 발전이다. 국내 최초의 상업용 해상풍력 단지로 수심 약 10m 내외에 수중 기초를 설치하고 풍력 터빈을 해상에 배치한 방식이다. 해상풍력은 풍속 평균 7.0m/s 이상에서 효율이 극대화되며 부유식이 아닌 고정식 구조물로 설치되어 있다. 육상 풍력 발전은 대규모로 하고 있으며 풍황이 우수산 평탄 지형에 풍력 이용률이 25% 내외의 터빈이 운영되고 있으며 풍속-출력 곡선이 잘 맞는 지역으로 알려져 있다. 발전량을 추정하면 해상풍력 발전량이 약 90GWh이고 육상 풍력발전이 약 150GWh이며 총 추정 발전량은 240GWh이다.

1.1.3 동부지역은 육상풍력과 태양광 혼합 발전을 사용한다. 김녕 풍력단지는 이 지역의 대표적 풍력 설비로 풍속 6.5~7.0m/s 구간에서 운전된다. 태양광은 농지형 고정식 태양광과 ESS 연계 분산형 설비가 병행 운영된다. 발전량은 풍력발전은 약 50GWh이고 태양광 발전은 약 80GWh이며 총 추정 발전량

은 130GWh이다.

1.1.4 남부지역(서귀포시, 표선면)의 주요 발전 방식은 태양광 중심 발전 방식으로 일조량이 가장 풍부한 지역 중 하나로 고정형 및 추적형 태양광 시스템이 도입되어 있다. 특히 농촌 태양광 보급 사업이 활발히 이루어져 있으며 일부 지역은 ESS 및 VPP(가상 발전소) 실증이 진행 중이다. 안덕면 일대에는 지하 1000m 이상에서 추출한 고온수를 활용하는 지열 발전 실험 설비가 설치되어 있으며 Binary Cycle 방식으로 증기 없이도 저온에서도 발전이 가능하다. 발전량은 태양광 발전은 약 200GWh이고 지열 발전량은 약 0.5GWh이다.

1.1.5 마지막으로 중산간 고지대(조천읍, 애월읍)의 주요 발전 방식은 고효율 육상 풍력과 스마트 그리드 실증이다. 이 지역은 제주도 풍력 시범 지구로 지정되어 있으며 고고도 풍력 자원 테스트베드가 운영된다. 또한 전력 계통 안정화를 위한 스마트 그리드 통합 운영시스템이 구축되어 있다. 풍력과 태양광을 결합한 복합 출력을 실시간 예측하여 출력 제한 없이 안정적으로 계통 공급이 가능하다. 발전량은 풍력 발전량 약 100GWh이고 태양광 발전량 약 50GWh이다. 결론적으로 제주도는 지역 특성에 맞춘 다양한 발전방식을 도입해 총 연간 약 1,170GWh 이상의 신재생 에너지를 생산하고 있다. 북부는 풍력, 태양광의 균형을 이루고 있고 서부는 해상 풍력 및 대규모 풍력 발전을 중심으로 운영된다. 동부는 ESS연계 하이브리드 모델을 사용하고 남부는 태양광 중심과 지열 실증을 중심으로 운영한다. 마지막으로 중산간은 스마트 그리드 통합 테스트베드를 이용하고 있다. 제주의 이러한 다변화된 발전 전략은 향후 에너지 자립성 모델로서 국내외 사례로 확장될 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

1.2 미래의 지역별 발전량

1.2.1 북부지역

이 지역은 육상 중심 풍력발전이 가장 활발하게 운영되고 있기에 중산간 지대를 중심으로 유도형 및 영구자석형 발전기를 활용한 고효율 풍력 시스템이 구축되어 있을 것으로 예상된다. 북부 지역은 고정식 단결정 태양광 설비를 통한 발전과 리튬 이온 기반 ESS 연계를 통해 출력 간헐성 문제를 보완하고 있다. 2030년까지 북부지역의 풍력설비는 추가확충될 예정이며 태양광은 주택 및 공공기관의 중심의 설치확대가 될 것으로 총 650GWh 이상의 발전이 가능할 것으로 보인다.

1.2.2 서부지역

서부는 국내 최초의 상업용 해상 풍력 단지가 위치한 곳으로 수심 10m 내외 해역에 고정식 구조물 방식으로 고정되어 있다. 2035년까지 2단계 해상풍력 단지가 확장되면 해상풍력과 육상풍력이 300GWh 까지 확장될 가능성이 있으며 풍 500GWh를 목표로 하고 있다.

1.2.3 동부지역

동부는 풍력과 태양광의 하이브리드 발전이 핵심으로 길령 풍력 단지를 중심으로 연간 풍력발전이 활발한 도시이다. 농지형 고정식 태양광과 ESS 연계 분산형 설비가 복합적으로 운영되어 에너지 자립도 향상에 기여하고 있다. 태양광 고도화 기술은 예를 들어 양면형 모듈, 태양광 추적 시스템과 ESS확충이 병행되면 2030년까지 총 300GWh 수준까지 발전량이 증가할 수 있다.

1.2.4 남부지역

남부는 일조량이 풍부하여 태양광 발전이 중심이 되며 고정형 및 추적형 시스템이 병행 도입되고 있다. 현재 태양광 발전은 50GWh 지열 발전 실험설비는 0.5GWh 풍력 발전은 100GWh의 수준이다. 가상발전소 및 스마트그리드 실증도 활발히 진행 중이며 안덕면에서는 Binary Cycle 방식의 지열 발전 실증 설비가 운영되고 있다. 지열 발전이 실증단계를 지나 상용화되면 약 50GWh까지 확대 가능하며 태양광 농가 및 스마트팜 중심 확산을 통해 총 320GWh 이상의 잠재 발전이 예상된다.

1.2.5 중산간 지역

이 지역은 제주도 스마트 그리드 실증단지로서 풍력 중심의 고지대 육상 발전과 함께 통합 전력 계통 안정화 시스템이 실시간으로 운영되고 있다. 중산간 고지 풍력 터빈 밀도 증가 및 스마트 계통 고도화를 통해 현재 약 150GWh 수준에서 2035년까지 250GWh 이상으로 발전량 증가가 가능할 것으로 예상된다

1.3 탐구 대상 지역 선정 배경과 전력망 모델링 방법

탐구 대상 지역으로 제주도를 선택한 이유는 다음과 같다. 첫째, 제주도는 지리적으로 본토와 떨어진 섬 지역으로서 전력 공급망이 비교적 제한된 범위 안에 구성되어 있기 때문에 복잡한 전국 규모의 전력망에 비해 노드와 연결 구조를 명확히 파악하기에 용이하고, 고등학생 수준의 모형화에도 적합하다
9. 둘째, 제주도 전력망은 자체 발전 설비뿐 아니라

해저 케이블을 통한 본토와의 연결로 전력 공급을 받고 있어, 외부로부터 전력을 상당 부분 의존하는 특성이 있다. 실제로 제주도의 최대 전력 수요는 약 944MW 규모로 그 중 40% 이상을 본토로부터의 HVDC 연계로 공급받고 있어, 특정 연계 지점이나 변전소에 전력 흐름이 집중되는 구조를 가지고 있다.

본 연구에서 정의한 전력망의 노드들은 제주도 내 주요 전력 시설 및 수요 지점을 나타낸다. 제주도에 위치한 주요 발전소 두 곳(발전소 A, 발전소B)을 노드로 설정하였고, 전력을 지역 곳곳으로 분배하는 핵심 변전소들을 몇 개 선정하여 노드로 포함시켰다. 그리고 전력 수요가 집중된 주요 도시들을 노드로 추가하였다. 각 노드는 실제 해당 지역의 전력 거점 위치를 반영하며, 에지는 이러한 노드들 사이의 전력 송전선로를 의미하도록 정의하고 제주도 지도를 참고하여, 각 발전소에서 인근 변전소로 연결되는 선로, 변전소들 상호 간의 주요 송전선, 변전소에서 도시로 향하는 배전선 등을 도식화하였다. 이때 노드와 에지의 구성은 한국전력공사가 공개한 제주 전력 설비 현황 자료와 지리 정보를 참고하되, 복잡한 세부 설비는 생략하고 주요 거점들 간의 연결 구조를 단순화하여 모델을 구성하였다. 또한 탐구 범위를 제주도의 주요 전력 거점 간 연결망으로 한정하고, 불필요한 세부사항을 배제하여 중심성 분석에 집중할 수 있도록 하였다. 교류 전력망에서는 전력 흐름의 방향이 고정되지 않고 발전량과 부하에 따라 달라질 수 있지만, 본 연구에서는 모델 단순화를 위해 주된 전력 흐름 방향을 단방향으로 가정하고 기본으로 그래프를 구성하였다. 또한 제주도 전력망 중에서도 핵심적인 노드들만 선별하여 모델을 구성하였다. 실제로는 제주도에 크고 작은 변전소가 10여 곳 이상 있고, 재생에너지 발전 설비나 산업단지 등 다양한 노드가 존재하지만, 본 탐구에서는 주요 발전소 두 곳, 핵심 변전소 몇 곳, 그리고 대표 소비지 두 곳만을 노드로 삼았다. 이렇게 노드 수를 제한함으로써 분석 난이도를 낮췄다. 그리고 각 노드의 전력 생산량이나 소비량과 같은 속성 데이터도 포함하지 않았는데 이는 중심성 등의 구조 지표만을 활용하기 위함이다. 그러나 현실 전력망 분석에서는 부하 크기나 발전 용량도 중요한 요소라는 점이 본 모형의 한계라고 생각한다.

1.4 파이썬코드를 통한 사이중심성 및 모듈도 분석

본 연구에서는 networkx 라이브러리와 루뱅 커뮤니티 탐지법을 이용한 선행 연구(1. 세계를 보는 눈 네트워크 과학의 appendix 1)의 파이썬 코드를 참조해서 설계한 발전 네트워크의



사이중심성 분석을 통해 취약한 부분을 조사하였다. 아래는 기존의 프로그램이 어떤 방식으로 작용하는지 설명을 기입하였다.

사이중심성 계산을 위한 networkx 라이브러리를 호출하고, 루뱅 방식으로 커뮤니티를 밀집도를 계산하기 위해 community.community_louvain 라이브러리를 호출한다.

```
import networkx as nx
import community.community_louvain as community
```

방향성 있는 그래프를 생성하는 코드이다. 이를 이용해서 분석을 시작한다

```
# 그래프 생성
G = nx.DiGraph()
```

설계한 노드들을 정의해준다. 단방향성 같은 경우는 (시작점, 끝점, 가중치) 형태로 정의하였다.

```
# 노드 목록
nodes = ["발전소A", "발전소B", "발전소C", "변전소A", "변전소B", "변전소C", "도시A", "도시B", "도시C"]
G.add_nodes_from(nodes)
```

설계한 노드들을 연결해주는 에지(단방향성, 양방향성)를 정의해주는 과정이다.

```
[SEP]
# 에지 목록
directed_edges = [
    ("발전소A", "변전소A", 1), ("발전소B", "변전소B", 1), ("발전소B", "변전소C", 1),
    ("변전소A", "도시A", 1), ("변전소C", "도시A", 1), ("변전소B", "도시A", 1),
    ("변전소C", "도시C", 1), ("발전소C", "변전소D", 1),
    ("변전소D", "도시B", 1), ("변전소D", "도시C", 1), ("변전소A", "도시B", 1)
]
undirected_edges = [
    ("변전소A", "변전소C", 1), ("변전소C", "변전소A", 1),
    ("변전소C", "변전소B", 1), ("변전소B", "변전소C", 1)
]
```

양방향성 같은 경우는 A,B B,A 로 두번 정의해주는 과정으로 설계했고 가중치 같은 경우는 기본적으로 모두 같다고 설계하였다.

```
for u, v, w in directed_edges:
    G.add_edge(u, v, weight=w, direction='directed')
G.add_edges_from([(u, v, {"weight": w}) for u, v, w in undirected_edges])
```

앞서 설계한 단방향성 에지를 그래프에 추가하는 과정이다. 또한 이 과정에서 정의한 가중치와 방향성 속성을 부여한다. 또한 양방향 에지 같은 경우는 추가 활용 가능성을 염두하여 리스트로 변환해서 일괄적으로 추가해주었다.

```
# 방향성 없는 그래프 생성
G_undirected = nx.Graph()
for u, v, data in G.edges(data=True):
    weight = data["weight"]
    if G_undirected.has_edge(u, v):
        G_undirected[u][v]['weight'] += weight
    else:
        G_undirected.add_edge(u, v, weight=weight)
```

방향성이 없는(양방향향성) 에지 그래프를 생성하는 과정이다. 앞서 추가한 양방향성 리스트를 기반으로 노드와 가중치를 계산한다. +=weight 과정은 가중치가 정의되어있지 않는 경우에 이제 가중치를 추가해서 합산한 것이다.

```
betweenness_centrality = nx.betweenness_centrality(G)
```

사이중심성을 계산하는 코드이다. networkx 라이브러리의 사이중심성 계산 함수를 사용했다.

```
# 커뮤니티 탐지
partition = community.best_partition(G_undirected, weight='weight')

modularity = community.modularity(partition, G_undirected, weight='weight')
# 커뮤니티 출력
print("각 노드가 속한 커뮤니티:")
for node, comm in partition.items():
    print(f"Node {node}는 커뮤니티 {comm}에 속한다.")

# 사이 중심성 출력
print("Betweenness Centrality:")
for node, centrality in betweenness_centrality.items():
    print(f"Node {node}: {centrality}")

print("\nModularity:", modularity)
```

커뮤니티를 탐지하여 각 노드가 어떤 커뮤니티에 속해있는지 분석하는 과정이다. [SEP]커뮤니티 탐지는 community,community_louvain 라이브러리의 best_partition 함수를 사용하여 탐지하였고, 모듈도 같은 경우는 modularity 함수를 사용했다.

이렇게 분석한 커뮤니티를 print 함수로 "Node {노드 이름(ex 발전소 A)}는 커뮤니티{커뮤니티 이름(숫자)에 속한다}"라는 구조로 출력한다.

또한 사이중심성은 "Node {노드이름} : 사이중심성" 이런 형태로 출력한다.

마지막으로 한줄 띄우고 모듈도를 출력한다.

이를 실행하여 결과를 출력한다.

아래는 기존 전력망 네트워크를 분석한 결과이다.

```

각 노드가 속한 커뮤니티:
Node 발전소A는 커뮤니티 1에 속한다.
Node 변전소A는 커뮤니티 1에 속한다.
Node 발전소B는 커뮤니티 0에 속한다.
Node 변전소B는 커뮤니티 0에 속한다.
Node 변전소C는 커뮤니티 0에 속한다.
Node 발전소C는 커뮤니티 2에 속한다.
Node 변전소D는 커뮤니티 2에 속한다.
Node 도시A는 커뮤니티 0에 속한다.
Node 도시B는 커뮤니티 2에 속한다.
Node 도시C는 커뮤니티 2에 속한다.
Betweenness Centrality:
Node 발전소A: 0.0
Node 발전소B: 0.0
Node 발전소C: 0.0
Node 변전소A: 0.1111111111111111
Node 변전소B: 0.006944444444444444
Node 변전소C: 0.1458333333333333
Node 변전소D: 0.02777777777777777
Node 도시A: 0.0
Node 도시B: 0.0
Node 도시C: 0.0
Modularity: 0.27111111111111114

```

```

각 노드가 속한 커뮤니티:
Node 발전소A는 커뮤니티 0에 속한다.
Node 변전소A는 커뮤니티 0에 속한다.
Node 발전소B는 커뮤니티 1에 속한다.
Node 변전소B는 커뮤니티 1에 속한다.
Node 변전소C는 커뮤니티 1에 속한다.
Node 도시A는 커뮤니티 0에 속한다.
Node 도시B는 커뮤니티 1에 속한다.
Node 도시C는 커뮤니티 1에 속한다.
Betweenness Centrality:
Node 발전소A: 0.0
Node 발전소B: 0.0
Node 변전소A: 0.11904761904761904
Node 변전소B: 0.011904761904761904
Node 변전소C: 0.2976190476190476
Node 도시A: 0.0
Node 도시B: 0.0
Node 도시C: 0.0
Modularity: 0.11111111111111113

```

기존 전력망 네트워크 같은 경우 변전소 C의 사이중심성이 가장 높다는 것을 확인할 수 있다. 이는 변전소 C가 가장 취약한 노드임을 알 수 있는 부분이다. 이를 개선하기 위해 변전소 C와 도시 B의 전력망을 변전소 A와 도시 B의

전력망으로 교체하고, 추가로 서부에 발전기 D와 변전소 D를 설치한 후 변전소 D를 도시 B와 C에 연결해두어 개선하였다.

아래는 개선한 전력망 네트워크를 분석한 결과이다

기존 전력망과 비교하였을 때 여전히 변전소 C의 비중은 크지만, 기존보다 수치가 0.1 가량 급감한 것을 확인 할 수 있다. 그리고 변전소 D 같은 경우 사이중심도에 따른 취약성이 크지 않아 효과적인 개선방안임을 확인 할 수 있는 결과이다.

2. 물리적 취약성

2.1 피팅에 대하여

친환경 에너지 시대를 이끌어갈 에너지 자원으로 주목받고 있는 수소는 높은 에너지 독립성을 보여 준다. 석유, 코크스, 나프타를 사용하여 화학 공정, 천연가스와 물을 통해 추출, 신에너지와 물을 통해 생산된 수소는 파이프라인, 선박, 트럭, 철도 등을 통해 수소 소비자에게 전달된다. 그런데 수소를 활용하는 시장의 규모가 커짐에 따라 사용 과정에서의 안정성 또한 주목받고 있다. 입자의 크기가 매우 작고 눈에 보이지 않는 수소는 통제가 어려워 이송 과정에서의 지속적인 유출이 일어날 경우 대형 사고로 이어진다.

따라서 지속적인 수소의 상용화를 위해서는 수소 누출 문제의 해결은 필수적이다. 여기서 수소 운송의 안정성을 더하기 위해 주로 사용되는 방식은 바로 피팅이다. 피팅이란 배관 시스템에서 배관 사이를 연결하거나 방향을 조정하는 부품인데 수송 배관의 연결을 담당하는 부분인만큼 누출 가능성이 높아서 정밀한 설계와 지속적인 유지보수가 필요하다. 수동 오버라이드, 체크 밸브, 필터, 열 활성 압력 완화 장치, 초과 유량 밸브, 자동 솔레노이드 밸브, 압력 변환기 및 온도 센서 등 다양한 안전장치가 존재하는 수소 저장 탱크에서 수소는 튜브, 피팅, 밸브 순으로 이동하며 이 과정에서 수소가 누출되지 않게 돕는 피팅은 시스템 내에서 상당히 중요한 역할을 맡는다. 피팅은 배관의 압력, 동작 온도, 온도 주기 실험 결과 등 다양한 요소를 고려해 가장 적절한 종류를 선택해야 하는데 이때 선택할 수 있는 피팅의 종류로는 대표적으로 이중 패룰 피팅-계장용 피팅, ORFS 피팅, Metal Touch 피팅, Cone and Thread 피팅, Medium Pressure 피팅이 있다.

이중 패룰 피팅은 현재까지 가장 보편적이지 성능이 뛰어난 피팅이다. 압력이 높지 않은 수소 배관에

도 사용할 수 있으며, 튜브를 절단한 후 외부 면에 나사를 만들 필요 없고, 렌치 두 개를 사용하여 간단한 조립으로 배관이 가능하다. ORFS 피팅은 플라스틱 O-ring을 이용하며, 이중 폐물 피팅이 비해 더욱 높은 압력에 알맞다. 그러나 이중 폐물 피팅과는 달리 튜브의 끝면을 확관해서 사용해야하는 단점이 있다. Metal Touch 피팅은 고온, 고압에서도 높은 안정성이 기대되며, Cone and Thread 피팅은 중압 및 고압의 사용 조건에서 안정성이 높다. 마지막으로 Medium Pressure 피팅은 렌치와 같은 수동 공구 또는 유압식 툴을 사용하여 Nut을 회전하면, 내부의 프론트 폐물과 백 폐물이 튜브를 고정하여 수소의 누출을 방지한다.

2.2 이중 폐물 피팅 약점 심화 탐구

피팅에서는 물리적, 화학적, 환경적 요인이 복합적으로 작용하며 수소 누출이 일어나는 경우가 많다. 대표적으로 진동, 압력 변화, 열 팽창 및 수축, 재료 열화 및 손상, 설치 및 유지 보수에 결함이 있다. 고압 수소 운송에 사용되는 이중 폐물 피팅은 튜브와 피팅 바디 사이 전방과 후방 두 개의 폐물이 결합된 구조다. 수소는 분자의 크기가 매우 작고 운송 압력이 매우 높아 미세한 틈에도 쉽게 누설될 수 있다. 또한, 금속 재료가 수소와의 접촉에 취성을 나타내는 현상 역시 무시할 수 없다. 수소 취성이란 고압 환경에서 수소가 금속과 접촉할 때 수소 분자가 수소 원자로 쪼개어져 금속 격자의 빈 공간 속으로 들어가 미세 균열을 더 크게 만드는 것을 말한다. 이러한 특성들 때문에, 배관 피팅에 쓰일 소재는 다양한 측면에서 신중히 검토해야 한다.

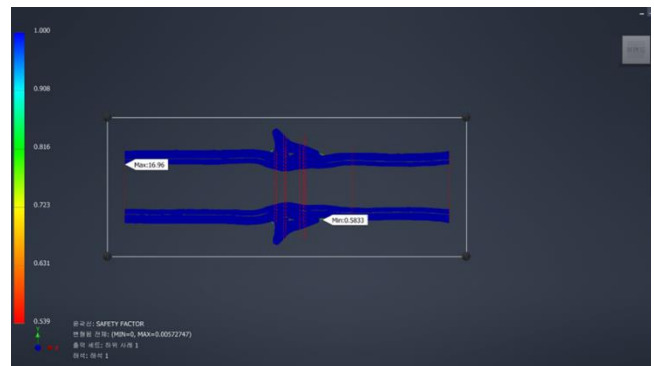
먼저 수소의 취성을 고려하자면 수소는 대부분의 금속에 침투해 구조적 약화를 유발할 수 있으며, 특히 고경도 강종의 파괴 인성을 크게 저하하는 경향이 있다. 반면 오스테나이트계 스테인리스강은 수소 확산에 대한 저항력이 상대적으로 높고, 고농도의 수소와의 접촉에서도 기계적 특성의 저하가 쉽게 나타나지 않는다. 니켈 함량이 높은 316계 스테인리스강은 수소 취성 저항성 측면에서 더욱 안정적인 선택이다. 다음으로 고려할 요소는 고압에서도 버틸 수 있는 기계적 강도다. 냉간 가공된 316L 튜브나 열처리된 폐물은 인장강도와 피로 강도가 우수하며, 실제로 여러 고압 수소 시스템에서는 이러한 소재가 사용되고 있다. 주요 제조업체들 역시 이 재질을 바탕으로 고압 인증을 받은 제품들을 선보이고 있다.

한편 수소 배관 시스템은 장기적인 부식 환경에도 노출되므로, 내식성 또한 중요하다. 크롬, 니켈, 몰리브덴 등의 함량이 높은 316계 스테인리스강은 부

식에 강할 뿐만 아니라 수소 취성에도 보다 저항성을 보인다. 특히 니켈과 크롬의 비율이 높아지면 저항성은 더욱 강해진다. 기밀성 역시 빼놓을 수 없다. 수소는 그 어떤 유체보다도 누설에 민감하기에 배관 피팅이 완벽한 밀봉 상태를 유지해야 한다. 이중 폐물 구조는 튜브와 바디 양쪽에 밀착되어 이중의 밀봉 효과를 제공한다. 앞쪽 폐물은 밀봉 기능을 직접 담당하고, 뒤쪽 폐물은 이를 지지하면서 탄성 복원력을 발휘한다. 이들의 성능을 유지하려면 정밀한 열처리 기술과 적절한 소재 선택이 뒷받침되어야 한다. 특히 일부 제조사는 Supercase 경화 공정을 통해 경도, 피로강도, 내식성을 모두 향상시킨 소재를 사용하고 있다. 반면, 17-4PH와 같은 고경도 재료는 수소 환경에서 파괴 인성이 급격히 저하되어 적합하지 않다.

그리고 뒤 폐물의 경우에는 비경화된 316L 스테인리스강이 적합하다. 이 부품은 주로 앞 폐물을 지지하는 역할을 하며, 일정 수준의 탄성을 유지해야 하기 때문이다. 필요시에는 동일한 경화 처리를 적용해 피로 강도를 높이기도 한다. 튜브(파이프)의 경우, 냉간 인발 처리된 316 혹은 316L 스테인리스강이 일반적으로 사용된다. 이 재료는 높은 강도와 뛰어난 내식성을 동시에 제공하며, 수소 환경에서도 안정적인 성능을 보인다. 일반적으로 ASME 혹은 ASTM 규격에 부합하는 표준 튜브가 채택된다. 결론적으로, 이중 폐물 피팅의 모든 구성 요소에 316L 스테인리스강 계열의 소재가 중심적으로 사용되며, 앞 폐물에는 추가적인 경화 처리를 통해 성능을 더욱 강화한다.

2.3 이중 폐물 피팅의 유한 요소 해석



위 그림은 수소 운반에 이중 폐물 피팅 이용 시에 안전 계수가 1보다 작은 부분을 유한요소해석을 통해 나타난 것이다. 이를 통해 프론트 폐물의 전방부와 백 폐물의 후면부에 압력이 가해져 0.5833의 안전계수가 나타남을 알 수 있다. 이는 수소 파이프에

서 수소 운송이 지속되면 외부에서의 진동으로 인한 진동에너지가 패럴의 접합부에 축적되기 때문이다. 수소 운송의 극한 상황에서 이 현상을 유지할 시 안전계수가 낮은 부분부터 균열과 변형이 발생해 피팅 상태를 지속하지 못하고 수소의 누출이 발생할 가능성이 높다. 이에 본 탐구조는 안전계수를 높일 수 있는 방안에 대해 탐구하였다.

2.3.1 오링 활용한 피팅 (물리적 해결 방안)

이를 해결하기 위하여 오링을 이용한 파이프 피팅 방식을 고안하게 되었다. 오링은 단면이 원형인 고무 고리 형태의 씰로 부품 사이의 틈새를 막아 기체나 액체가 새지 않도록 밀봉하는 역할을 한다. 오링의 소재는 보통 탄성력이 있는 고무 소재를 이용한다. 이러한 오링의 특성을 수소 배관 피팅에 도입시키면 접합부에서 발생하는 응력을 완화시킬 수 있다. 수소 배관 피팅에서 수소가 누출되는 이유는 배관 접합부에 응력이 집중되면서 미세한 균열이 일어나 그 틈 사이로 수소가 누출된다는 점이다. 그러나 오링을 활용하면 접합부에 압력을 받았을 때 오링이 변형됨과 동시에 고무의 탄성으로 인해 팽창하며 압력을 고르게 분산시킨다. 이로 인해 응력이 한 곳에 집중되는 것을 예방할 수 있다.

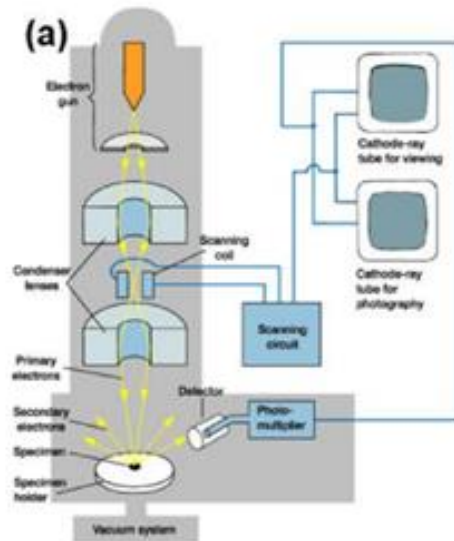
또 다른 문제점으로는 페룰 부분에 진동에너지가 지속적으로 가해져 미세 균열이 발생한다는 점이다. 하지만 오링을 활용할 경우 미세 진동 흡수 능력이 있어서 반복적인 진동이 페룰 부분에 쌓이는 것을 막고 일종의 완충제 역할을 하여 미세 균열의 발생으로 인한 수소의 유출을 방지할 수 있다. 그러나 수소의 경우 천연가스나 다른 연료의 수송과는 다르게 배관에 더욱 더 정교한 작업을 요구한다. 작고 가벼운 수소 분자의 경우에는 기존의 배관을 사용할 때 취성에 약하고 접합부에서의 수소 유출 또한 발생하게 된다. 기존의 방식을 따르게 되면 접합부를 보완하기 위한 오링 또한 문제가 된다. 고압가스법을 적용받는 수소 가스 배관의 경우 땅에 매설할 때 최소 1.5m에 배관을 매설해야한다. 이로 인해 잦은 유지와 보수가 어렵다. 또한 오링의 소재가 고무이기에 배관의 사용 기간이 늘어날수록 주기적인 교체가 필요하게 된다. 그러므로 본 탐구조는 물리적인 해결방안의 경우에는 잦은 유지와 보수가 필요하다는 결론에 도달했다.

2.3.2 질소 플라즈마 장치 (분자 영역의 해결방안)

본 탐구조는 오링과 가스켓 같은 물리적인 해결방안이 지닌 단점을 인식하고 분자의 영역에서 해결책을 제시하기로 했다. 그 방안으로 수소 분자의 플라즈마화와 자기장의 영향으로 영구적인 수소의 통

제를 고안했다. 플라즈마화된 수소 기체를 배관을 따라 흘러보내며 동시에 배관에 자기장을 걸어 서로의 척력을 이용해 배관과 수소의 접촉을 차단하는 것이다. 이와 같이 파이프를 설계하면 파이프에서 발생하는 수소 누출이 상당히 감소할 것으로 예측되었다. 그러나 앞서 제시한 방법은 과도한 전력 사용에 의한 수소 효율의 문제가 있다고 판단되었다. 파이프 전체에 플라즈마 상태를 유지시키는 것이 아닌 페룰 피팅 부분에만 수소를 플라즈마화해 에너지 사용량을 줄이고자 하였다.

아래 그림은 질소 플라즈마화 장치로, 이 장치에서는 마이크로파를 이용해 질소를 플라즈마화한다. 이처럼 마이크로파를 이용한 플라즈마화는 아크 방전 등의 방식과는 다르게 고온 또는 고전압 환경이 필요하지 않다는 점에서 현실성이 있다고 생각되었다. 그러나 마이크로파를 이용한 플라즈마화는 10Torr 정도의 저압 환경에서 반응이 잘 일어난다. 고압 환경에서는 전자 평균 자유행로가 감소하고, 입자 밀도가 높기에 전자가 가속되기 전에 충돌하며 이온화에 필요한 임계 에너지에 도달하기 어렵다는 문제점이 있다. 이러한 이유로 플라즈마화를 이용한 피팅부 부하 감소 방안은 아직 다양한 기술 개발과 아이디어 발전이 필요하다고 생각된다.



2.3.1 형성 기억 합금 (소재 교체 영역의 방법)

이에 본 탐구조는 보다 현실적인 해결 방법으로 형성기억합금 니티놀(Nitinol, Ni-Ti)을 페룰 소재로 활용해 수소 배관의 안정성을 높이고자 하였다. 형성기억 합금은 온도에 따라 결정구조가 변하는 상변

태 현상을 바탕으로 고온에서 단단하고 일정한 모양의 오스테나이트, 저온에서 부드럽고 변형이 쉬운 마텐자이트 두 상태를 오갈 수 있다. 형성 기억 합금을 원하는 모양으로 만들어 지지대로 고정시키고 고온에서 열처리를 하면 형성기억합금은 오스테나이트 상태를 기억하게 된다. 이를 이용해 형성 기억 합금에 알맞게 피팅된 상태를 기억시키면 수소 이동 중 발생하는 에너지나 외부 온도 변화를 통해 파이프에 변형이 생겨도 곧 자가 수복할 것이다. 또한 형성기억합금은 특정 온도 범위에서 높은 탄성을 보이는 초탄성 효과가 있는데 이를 통해 외부 응력에 맞게 재료 내부 결정 구조가 변형되어 에너지를 흡수해 공진 효과와 구조적 약화를 방지한다.

결론 (Conclusion)

본 연구에서 탐구조는 현대 사회의 에너지 인프라의 취약성을 인식하고 이를 시스템적인 면과 물리적인 면 두가지 차원에서 해석하고 해결 방안을 모색했다. 시스템적인 면에서 제주도 전력망의 구조적 병목 현상을 해결하기 위해 전력망의 병목 지점을 파악하고 노드를 지정해 가장 효율적인 전력망을 구성해냈고 물리적인 면에서는 수소 운송 파이프의 핵심 부품인 피팅이 응력과 수소 취성에 약하다는 약점을 강화 소재와 플라즈마 장치로 개선하는 방안을 제시했다. 탐구 결과 본 탐구조는 향후 현대 사회의 에너지 인프라 안정화를 위해서 두 가지 차원의 함께 고려할 수 있는 통합적 관리 전략이 있어야 함을 알 수 있었다.

REFERENCES

1. 김재훈, (2025.4.6), 제주도 "재생에너지로 4 시간 동안 전력 100% 충당"..그래도 LNG 발전소 건설 필요?, 제주투데이
2. Chuk Hayes, Four Qualities to Look for in Fittings for Hydrogen Fuel Cell Technology, Swagelok, <https://www.swagelok.com/ko/blog/anatomy-of-hydrogen-fitting>
3. Buddy Damm, FAQs: How to Prevent Hydrogen Embrittlement in Steel and Other Hydrogen Handling Issues, Swagelok, <https://www.swagelok.com/en/blog/avoid-hydrogen-embrittlement#buddydamm>
4. 고성은 & 허은녕 (2024) 광역시·도별 및 개별 업종에 따른 전력소비량과 경제성장 사이의 인과관계 분석 : A Disaggregated Study on Causal Relationship between Electricity and Economic Growth by Region and Industry Level. 서울대학교 대학원
5. Kore, A., Gaikwad, N., Manikjade, A. Bhave, N., Rathod, P., Sonawane, C. (2025) Static Structural Non-Linear Finite Element Analysis of Double Ferrule Fitting. BEGELL HOUSE INC
6. 김청균 (2006) Stress Behavior Analysis of O-rings and Packing for a LPG Filling Nozzle. 한국 트라이볼로지 학회.