

수소연료전지(PEMFC)와 배터리(LTO)를 혼용한
하이브리드 무가선 트램 및 다목적 모빌리티 충전 거점의
서울 상용화 모델 제안

Commercialization Model for Seoul: PEMFC-LTO Hybrid
Catenary-Free Trams and Integrated Multi-purpose Mobility
Charging Infrastructure



Team H2E

팀장: 배문영(휴먼기계바이오공학부, 2370025)
팀원: 윤채린(휴먼기계바이오공학부, 2370045)
팀원: 한채원(휴먼기계바이오공학부, 2270091)
팀원: 임수정(전자전기공학과, 2272045)

목차

I. 서론

- i. 탐사 및 연구 주제
- ii. 연구 배경
- iii. 연구 필요성
- iv. 연구 방법 및 절차

II. 본론

- a. 선행 연구 분석
 - i. 기존 논의 요약
 - ii. 기존 연구의 한계점
 - iii. 연구의 기여 및 차별성
- b. 탐사 필요성 및 기대효과
 - i. 해외 현지 조사 필요성
 - ii. 기관별 탐사 기대효과
- c. 탐사 과정 및 인터뷰 정리
 - i. 국내 탐사 내용 정리
 - ii. 국내 전문가 인터뷰 내용 정리
 - iii. 해외 탐사 내용 정리
 - iv. 해외 전문가 인터뷰 내용 정리
- d. 연구 결과 및 시사점
 - i. 최종 모델 제안
 - ii. 탐사의 의의
 - iii. 정책적 제언
 - iv. 연구의 한계점

III. 결론

- i. 탐사 및 연구 요약
- ii. 연구의 의의
- iii. 후속 연구 방향

IV. 참고문헌

[부록] 인터뷰(면담) 사진 및 인터뷰 내용 전문

I. 서론

i. 탐사 및 연구 주제

본 탐사의 주제는 수소연료전지(PEMFC)와 배터리(LTO)를 혼용한 하이브리드 무가선 트램 및 다목적 모빌리티 충전 거점의 서울 상용화 모델 제안이다. 이러한 접근은 기존 전기 트램이 전차선 인프라에 의존함으로써 도시 경관 훼손과 높은 구축 비용, 복잡한 유지·보수 문제를 야기해 왔다는 점에 착안한 것이다. 특히 국내 대도시와 같이 고밀도·복합 교통 환경에서는 전차선 설치 자체가 물리적·사회적 제약으로 작용해 왔으며, 이로 인해 전기 트램의 도입과 설치 상용화 단계에 이르지 못한 채 그 한계가 지속적으로 지적되어 왔다.

이에 따라 본 연구팀은 전차선 의존도를 최소화하면서도 친환경성과 주행 안정성을 동시에 확보할 수 있는 대안으로, 수소 연료전지와 전기 구동을 병행하는 하이브리드 트램 시스템에 주목하였다. 선행 연구에 따르면 수소 연료전지는 무가선 주행을 가능하게 하며, 배터리 시스템과 결합될 경우 가속·제동 구간에서의 출력 응답성과 에너지 효율을 효과적으로 보완할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 본 탐사는 이러한 기술적 대안을 단순한 개념 제시에 그치지 않고, 서울이라는 고밀도 도시 환경에 실제로 적용 가능한 도입 모델로 구체화하는 것을 목표로 한다.

ii. 연구 배경

기후 위기 대응과 탄소중립 실현을 위한 국제적 흐름 속에서, 교통 부문은 온실가스 감축을 위한 핵심 영역으로 인식되고 있다. 특히 대중교통 시스템은 도시 내 이동 수요를 집약적으로 처리한다는 점에서, 친환경 전환이 가져올 수 있는 환경적·사회적 파급 효과가 크다. 유럽 주요 도시에서는 이러한 인식 하에 트램을 중심으로 한 친환경 도시 교통 체계를 구축해 왔으며, 최근에는 전차선 설치의 한계를 보완하기 위한 무가선 트램과 수소 기반 철도 시스템에 대한 연구와 실증이 확대되고 있다.

본 탐사가 서울을 연구 대상으로 선택한 이유는, 서울이 친환경 교통 기술의 필요성과 적용 난이도가 동시에 높은 도시라는 점에 있다. 서울은 세계적으로도 인구 밀도가 높은 대도시 중 하나로, 한정된 도로 공간을 대중교통, 개인 교통, 보행이 함께 공유하는 구조를 갖고 있다. 이러한 환경에서 새로운 교통수단을 도입하기 위해서는 단순한 기술적 우수성뿐만 아니라, 도시 공간과의 조화, 교통 흐름에 미치는 영향, 그리고 시민들의 인식과 수용성이 함께 고려되어야 한다.

특히 서울의 경우, 기존 철도·지하철 중심의 교통 체계가 이미 촘촘하게 구축되어 있어, 새로운 노면 교통수단의 도입은 기존 교통 흐름과의 충돌 가능성을 내포하고 있다. 과거 트램 도입 논의 과정에서도 전차선 설치로 인한 도시 경관 훼손, 도로 점유에 따른 교통 혼잡 심화, 안전성에 대한 우려가 반복적으로 제기되었으며, 이는 기술적 문제라기보다는 도시 환경과 사회적 맥락에 대한 고려 부족에서 기인한 경우가 많았다. 이러한 특성은 서울이 단순히 기술

적용의 용이성만으로 평가될 수 있는 도시가 아니라, 기술의 실효성과 사회적 타당성이 동시에 검증되어야 하는 도시임을 보여준다.

또한, 서울은 대중교통 이용률이 매우 높은 도시로, 시민들의 이동 패턴이 지하철·버스 등 기존 대중교통 수단에 강하게 의존하고 있다. 이는 친환경 교통수단이 성공적으로 정착할 경우 환경적 효과가 크다는 장점이 되는 동시에, 새로운 시스템에 대한 신뢰가 확보되지 않을 경우 사회적 반발 역시 크게 나타날 수 있음을 의미한다. 실제로 선행 연구와 정책 보고서에서는 서울과 같은 고밀도 대도시에서의 교통 정책은 기술 도입 자체보다 시민 인식과 신뢰 형성 과정이 성패를 좌우한다고 지적해 왔다.

이러한 맥락에서, 전차선 의존도를 낮춘 무가선 트램과 수소-전기 하이브리드 트램 시스템은 서울의 도시적 제약을 완화할 수 있는 잠재적 대안으로 주목된다. 수소 연료전지 기반 시스템은 무가선 주행을 가능하게 하여 도시 경관 훼손을 최소화할 수 있으며, 배터리와 결합된 하이브리드 구조는 빈번한 정차와 가감속이 반복되는 서울 도심 주행 환경에서도 안정적인 출력 응답과 에너지 효율을 기대할 수 있다. 이는 기존 전기 트램이 지니는 인프라 의존성과 도시 적용상의 한계를 보완할 수 있는 기술적 가능성을 제공한다.

그러나 서울이라는 도시 환경은 이러한 기술적 가능성이 실제로 구현되기까지 다양한 추가 검증을 요구한다. 수소 에너지의 도심 적용에 대한 안전성 인식, 복잡한 교통 환경 속에서의 운영 안정성, 기존 교통수단과의 역할 분담 문제 등은 이론적 성능 분석만으로는 충분히 설명되기 어렵다. 특히 시민들은 친환경성이라는 추상적 가치보다, 일상적인 안전과 이동의 편의성에 더 민감하게 반응하는 경향을 보인다. 따라서 서울에서의 트램 도입 논의는 기술 개발 중심의 접근을 넘어, 도시 특성에 기반한 종합적 검토가 필수적이다.

결과적으로 서울은 수소-전기 하이브리드 트램 시스템의 기술적 성능과 사회적 수용성을 동시에 검증할 수 있는 대표적인 사례라 할 수 있다. 본 탐사는 이러한 서울의 도시적 특성과 교통 환경을 고려하여, 해외 선진 사례와의 비교 분석을 통해 서울형 트램 도입의 현실적인 가능성과 한계를 도출하고자 한다. 이는 단순히 특정 도시의 사례 분석을 넘어, 향후 국내 다른 대도시로 확장 가능한 친환경 교통 모델을 모색하는 데에도 중요한 기초 자료가 될 것이다.

iii. 연구 필요성

서울은 고밀도 도시 구조와 복합적인 교통 체계를 동시에 지닌 도시로서, 친환경 교통 기술의 필요성과 적용 난이도가 모두 높은 환경에 해당한다. 이러한 도시에서 수소-전기 하이브리드 트램과 같은 새로운 교통 시스템을 도입하기 위해서는 단순한 기술적 가능성 검토를 넘어, 실제 도시 환경과 시민 생활에 미치는 영향을 종합적으로 검토할 필요가 있다. 따라서 본 탐사는 기술, 운영, 사회적 수용성 측면을 아우르는 다층적인 논의가 요구된다는 문제의식에서 출발한다.

본 연구팀은 사전 조사 단계에서 서울 및 수도권 거주자·통근자를 대상으로 시민 인식조사를

수행하였으며, 그 결과 트램 도입에 대한 초기 인식은 낮거나 중립적인 응답이 다수를 차지하였다. 이는 트램이 국내에서 여전히 생소한 교통수단이며, 기존 교통 체계에 대한 의존도가 높은 서울의 특성이 반영된 결과로 해석할 수 있다. 특히 전차선 설치에 따른 도시 경관 훼손, 교통 혼잡 심화, 안전성에 대한 우려는 시민들이 트램 도입을 주저하는 주요 요인으로 나타났다.

그러나 시민 인식조사에서 수소-전기 하이브리드 트램과 같은 구체적인 기술적 대안과 운영 개념을 제시한 이후, 트램 도입에 대한 찬성 비율이 유의미하게 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 친환경성이라는 추상적 가치보다, 전차선 문제를 어떻게 해결할 수 있는지, 안전성은 어떻게 확보되는지에 대한 구체적인 설명과 기술적 근거가 시민 수용성 형성에 중요한 역할을 한다는 점을 시사한다. 다시 말해, 기술적 설계와 사회적 소통 방식이 결합될 때에만 새로운 교통 시스템의 도입 가능성이 현실적으로 논의될 수 있음을 보여준다.

그럼에도 불구하고 시민들은 수소 에너지의 도심 적용에 따른 안전성, 시스템 신뢰성, 장기적인 운영 안정성에 대해 지속적인 우려를 제기하였다. 이러한 우려는 설문조사나 이론적 분석만으로는 충분히 해소되기 어려우며, 실제로 해당 기술이 연구·개발되거나 실증된 사례에 대한 구체적인 정보와 설명이 뒷받침되어야 한다. 특히 서울과 같이 시민 참여와 여론의 영향력이 큰 도시에서는, 기술적 안정성에 대한 객관적 검증과 더불어 신뢰 형성을 위한 근거 제시가 필수적이다.

이러한 맥락에서 해외 선진 사례에 대한 직접적인 조사는 중요한 의미를 가진다. 유럽에서는 이미 수소 트램 및 무가선 트램 시스템이 연구·실증 단계에서 운영 단계로 확장되고 있으며, 해당 과정에서 축적된 기술적·운영적 경험은 서울형 트램 도입 논의에 중요한 참고 자료가 될 수 있다. 특히 연구기관과 교통 운영 주체의 관점에서 바라본 기술의 한계, 실제 운행 중 발생하는 문제, 그리고 이를 해결하기 위한 전략은 문헌만으로는 파악하기 어려운 부분이다.

따라서 본 탐사는 해외 연구기관과 대학, 산업체 및 교통 운영 기관을 직접 방문하여 전문가 인터뷰와 현장 탐사를 수행함으로써, 이론과 실제 간의 차이를 검증하고자 한다. 이를 통해 기존 문헌과 설문조사에서 드러난 한계를 보완하고, 서울이라는 도시 맥락에 적합한 수소-전기 하이브리드 트램 도입을 위한 실질적인 시사점을 도출하는 것이 본 논의의 핵심적인 필요성이라 할 수 있다.

iv. 연구 방법 및 절차

본 탐사는 연구 방법을 단계적으로 구분하여 진행할 계획이다. 이를 통해 사전 조사부터 현장 탐사, 그리고 종합 분석에 이르는 체계적인 연구 흐름을 구축하고자 한다.

첫째, 국내 사전 조사 및 전문가 면담 단계이다. 해외 탐사에 앞서, 본 연구팀은 수소 기반 교통 시스템의 국내 적용 가능성과 실효성을 검토하기 위해 한국전력공사, 한국철도기술연구원 등 국내 유관 기관을 대상으로 면담을 진행하였다. 이를 통해 국내 전력 및 철도 시스템의 구조적 특성, 수소-전기 기반 트램 도입 시 고려해야 할 기술적·제도적 제약 조건을 파악하고,

해외 사례와 비교 가능한 분석 기준을 설정하였다.

둘째, 해외 문헌 조사 및 사전 분석 단계이다. 이와 더불어, 본 연구팀은 유럽의 주요 연구기관 및 대학에서 수행한 수소 트램 및 수소-전기 하이브리드 트램 관련 학술 논문과 기술 보고서를 사전에 검토하였다. 이를 통해 각 기관이 중점적으로 다루고 있는 연구 주제, 적용된 모델링 및 실험 방법, 그리고 연구 결과에서 드러난 한계점을 체계적으로 정리하였다.

셋째, 문헌 분석을 기반으로 한 전문가 인터뷰 설계 단계이다. 사전 문헌 분석 결과를 바탕으로, 단순 정보 수집을 넘어선 문제 중심 인터뷰를 설계하였다. 이를 통해 논문에서 제시된 이론과 실제 현장 적용 간의 차이, 연구 과정에서 충분히 고려되지 않은 현실적 제약 조건, 그리고 향후 기술 발전 방향에 대해 심층적인 질의를 진행하고자 한다.

넷째, 해외 현장 탐사 및 전문가 인터뷰 단계이다. 유럽 현지 연구기관, 대학, 산업체 및 교통 운영 기관을 방문하여 전문가 인터뷰와 현장 탐사를 수행할 예정이다. 이를 통해 문헌과 인터뷰만으로는 파악하기 어려운 실제 운행 환경, 시스템 운영 방식, 유지·보수 관점의 문제점을 직접 확인하고자 한다.

다섯째, 종합 분석 및 시사점 도출 단계이다. 문헌 조사, 국내·외 전문가 인터뷰, 현장 탐사를 통해 수집된 정보를 종합적으로 분석하여, 서울형 수소-전기 하이브리드 트램 도입을 위한 기술적·운영적·사회적 시사점을 도출하고자 한다. 이를 통해 단순한 기술 검토를 넘어, 국내 도시 교통 환경에 적용 가능한 현실적인 방향성을 제시하는 것을 목표로 한다.

II. 본론

a. 선행 연구 분석

i. 기존 논의 요약

최근 도시 철도 및 트램 시스템 분야에서는 수소 연료전지와 배터리를 결합한 하이브리드 에너지 시스템이 무가선 운행(catenary-free operation)을 위한 핵심 기술 대안으로 주목받고 있다. 특히 전차선 설치에 따른 도시 경관 훼손과 인프라 구축 비용 문제를 해결하기 위해, 차량 탑재형 에너지 시스템을 활용한 자립 주행 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Lin Fu 등(2026)은 수소-전기 하이브리드 에너지 시스템에 배터리 에너지 저장 시스템(BES) 및 초전도 자기 에너지 저장 시스템(SMES)을 결합한 도시 철도 적용 모델을 제안하였다. 해당 연구는 재생에너지 기반 전력 공급과 회생제동 에너지의 저장·재활용을 통해, 철도 시스템의 에너지 변동성을 완화하고 운영 안정성을 향상시킬 수 있음을 보여준다. 이 연구는 하이브리드 저장 구조가 단일 에너지원 대비 출력 대응성과 에너지 효율 측면에서 유리하다는 점을 이론적 모델링을 통해 제시하였다.

배터리 측면에서는 무가선 트램을 위한 차량 탑재형 배터리 시스템에 대한 연구가 다수 수행되어 왔다. 「An On-Board Battery System for Catenary-Free Operation of a Tram」에서는 리튬이온 배터리를 기반으로 한 차량 탑재형 에너지 저장 시스템이 무가선 구간 주행을 가능하게 하며, 회생제동 에너지 저장을 통해 에너지 효율을 향상시킬 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 해당 연구는 배터리 용량 선정, 충·방전 특성, 주행 패턴과의 연계 설계가 트램 운행 성능에 중요한 요소임을 강조한다.

국내 연구 또한 수소 연료전지를 적용한 트램 시스템의 환경적 효과와 기술적 가능성을 분석해 왔다. 「수소 연료전지 시스템」 및 수소전기트램 관련 연구에 따르면, 수소 연료전지를 이용한 트램은 기존 디젤 및 CNG 기반 대중교통 수단 대비 온실가스 배출량을 최대 97% 이상 저감할 수 있는 잠재력을 지니는 것으로 나타났다. 이는 수소 트램이 도시 교통의 탈탄소화 전략에서 실질적인 대안이 될 수 있음을 보여주는 과학적 근거를 제공한다.

아울러 전력 변환 및 시스템 효율 측면에서는 「커플드 인덕터를 적용한 수소전기트램용 인터리브드 부스트 컨버터의 고밀도 설계에 관한 연구」와 같이, 수소 연료전지 기반 트램의 전력 변환 효율과 시스템 집적도를 향상시키기 위한 전력전자 기술 연구도 병행되고 있다. 이러한 연구들은 수소전기트램이 단순한 개념 제안 단계를 넘어, 실제 적용 가능한 기술 체계로 발전하고 있음을 시사한다.

이처럼 기존 문헌들은 수소 연료전지의 친환경성과 배터리 기반 에너지 저장 장치의 출력 보완 특성을 결합한 하이브리드 구조가 도시 철도 및 트램 시스템에서 에너지 효율, 주행 안정성, 무가선 운행 가능성을 동시에 확보할 수 있음을 공통적으로 제시하고 있다.

ii. 기존 연구의 한계점

그러나 기존 문헌에는 여전히 몇 가지 한계가 존재한다.

첫째, 수소-전기 하이브리드 에너지 시스템 관련 연구는 주로 지하철과 같은 대규모 철도 시스템이나 일반적인 철도 차량을 대상으로 한 에너지 모델링 및 시스템 구성 논의에 집중되어 있으며, 트램과 같은 경전철 시스템의 운행 특성을 충분히 반영하지 못하고 있다. 특히 정차 빈도가 높고 도심 교차로와 밀접하게 연계되는 서울형 트램 환경을 구체적으로 고려한 연구는 제한적인 상황이다. 이러한 한계로 인해, 문헌에서 제시된 이론적 성능이 실제 도심 트램 운행 조건에서도 동일하게 적용될 수 있는지에 대한 검증이 필요하다. 이에 본 연구팀은 실제 도심 철도 및 수소 시스템 연구 경험을 보유한 해외 연구기관을 방문하여, 연구 결과와 실제 적용 간의 차이를 확인하고자 하였다.

둘째, 배터리 및 에너지 저장장치 관련 연구는 대부분 저장 효율, 출력 특성, 시스템 구성과 같은 기술 성능 중심의 분석에 치우쳐 있다. 실제 도심 교통 운영 조건에서 반복적인 가감속, 잦은 정차, 장·단거리 혼합 주행이 배터리 수명에 미치는 영향, 그리고 이에 따른 운영 비용 문제에 대한 실증적 논의는 충분하지 않다. 이러한 한계는 배터리 기반 시스템이 장기간 운행되는 트램 환경에서 얼마나 안정적으로 유지될 수 있는지에 대한 의문으로 이어진다. 본 연구

팀은 이러한 부분을 보완하기 위해, 실제 연구자들과의 인터뷰를 통해 문헌에서 다루지 못한 운용상의 고려 요소를 확인하고자 하였다.

마지막으로, 대부분의 기존 문헌은 기술적 성능과 시스템 안전성을 중심으로 논의를 전개하고 있으며, 시민 인식, 안전에 대한 사회적 수용성, 도심 적용 시 발생할 수 있는 인식 격차와 같은 요소는 기술 모델과 분리된 문제로 취급되는 경향이 있다. 그러나 실제 트램 도입 과정에서는 기술적 타당성만큼이나 시민의 신뢰와 수용성이 중요한 변수로 작용한다. 이러한 사회적 요소는 문헌 분석만으로는 충분히 파악하기 어려운 한계를 지니므로, 본 연구팀은 해외 인터뷰를 통해 기술 개발자들이 인식하는 사회적 수용성 문제와 실제 적용 과정에서의 어려움을 직접 확인하고자 하였다.

iii. 연구의 기여 및 차별성

본 연구는 기존 문헌이 지닌 기술 중심적 접근의 한계를 보완하고, 수소-전기 하이브리드 트램의 도시 적용 가능성을 종합적으로 검토하는 데 기여하고자 한다.

첫째, 도시 철도망과는 차별화된 트램 시스템의 운영 특성(정차 빈도, 속도 변화, 무가선 운행 구간 구성)을 수소-전기 하이브리드 구조와 연계하여 분석함으로써, 수소 연료전지와 배터리의 역할 분담 및 에너지 관리 전략을 트램 관점에서 구체화하고자 한다. 이는 기존 대규모 철도 중심 연구와 차별화되는 접근이다.

둘째, 기존 문헌에서 제시된 기술적 성능 분석 결과를 바탕으로, 사전 시민인식조사 결과를 결합 분석함으로써 기술적 타당성과 사회적 수용성을 동시에 고려한 연구 프레임을 제시한다. 이를 통해 기술적으로 안전하고 효율적인 시스템이 시민들에게 어떻게 인식되는지, 그리고 수용성을 높이기 위한 설명과 설계 전략은 무엇인지에 대한 시사점을 도출할 수 있다.

셋째, 유럽의 연구기관과 기업에서 발표된 수소 및 배터리 기반 트램 관련 논문을 사전에 분석한 후, 현지 탐사 및 전문가 인터뷰를 수행함으로써 이론과 실제 운영 환경 간의 차이를 직접 검증하고자 한다. 이를 통해 문헌에서 충분히 다루지 못한 실제 운영 조건, 유지보수 관점, 제도적·운영적 제약 요소에 대한 실증적 인사이트를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

이러한 연구 접근은 기존 연구가 주로 기술적 가능성에 머물렀던 한계를 보완하고, 서울형 수소-전기 하이브리드 트램 도입을 위한 실용적이고 사회적으로 타당한 방향성을 제시하는 데 기여할 수 있을 것이다.

b. 탐사 필요성 및 기대효과

i. 해외 현지 조사 필요성

국내에서는 트램이 아직 본격적으로 상용화되지 않아, 실제 운용 중인 시스템을 대상으로 한

실증적 관찰과 분석에 한계가 있다. 일부 지역에서 시범 사업 또는 도입을 전제로 한 공사가 진행 중이나, 인구 과밀 대도시인 서울에 적용 가능한 수준의 운행 밀도, 에너지 부하, 유지·운영 조건을 직접 비교·검토하기에는 충분하지 않은 상황이다. 이에 따라 트램이 주요 대중교통 수단으로 정착된 해외 도시를 대상으로 한 현지 조사가 필수적으로 요구된다. 특히 독일과 스위스는 대도시 및 수도권 전반에 걸쳐 트램이 일상적인 교통수단으로 운영되고 있으며, 무가선 트램의 운행 시스템, 에너지 관리 방식, 유지보수 및 안전 관리 체계가 이미 안정적으로 구축되어 있다. 이러한 지역을 직접 탐사함으로써, 가선 트램의 실제 운용 방식과 함께 도시 교통망과 어떻게 통합·운영되는지를 현장에서 확인할 수 있다. 프랑스에는 수소 생산·운송·공급 전반을 사업 영역으로 하는 글로벌 대기업인 AirLiquide가 위치해 있으며, 수소 운송 및 인프라 구축에 대한 실증적 사업 경험을 축적해오고 있다. 이는 수소 기반 교통수단을 도시 인프라 차원에서 확장·운영하는 데 있어 기술적 타당성뿐 아니라 산업적·사업화 관점의 현실적인 조건을 함께 검토할 수 있는 중요한 사례로 볼 수 있다.

또한 수소·전기 하이브리드 배터리를 중심으로 한 수소 모빌리티 산업은 국내에서는 아직 초기 성장 단계에 머물러 있어, 실규모 실증과 장기 운용 경험을 기반으로 한 기술 검증 사례가 제한적이다. 반면, 해외 선도 연구기관과 실증 기관의 경우 수소 모빌리티를 직접 시험할 수 있는 다이내모 테스트 시설과 실험 인프라를 보유하고 있으며, 수소·전기 복합 모빌리티 시스템의 성능 검증과 안정성 평가를 체계적으로 수행하고 있다. 이러한 시설을 직접 견학하고 운영 방식을 확인하는 것은 서울형 하이브리드 트램 모델의 기술적 타당성과 실용적 기준을 설정하는 데 중요한 참고 자료가 된다.

아울러 국내 한국철도기술연구원으로부터 자문을 선행하여 진행한 결과, 현재 국내에서 수소 트램은 여전히 실증 사업 단계에 머물러 있으며, 본격적인 상용 도입 사례는 아직 제한적인 상황임을 확인할 수 있었다. 이로 인해 실제 장기 운용을 전제로 한 배터리 수명 특성, 열화 거동, 유지보수 이력과 같은 핵심 운용 데이터는 충분히 축적되지 않은 상태이며, 관련 정보의 확보에도 명확한 한계가 존재하였다. 특히 실증 단계에 있는 시스템의 특성상, 배터리 수명이나 성능 저하에 대한 정량적 데이터는 아직 존재하지 않거나 외부 공개가 어려운 경우가 많아, 문헌 조사나 국내 인터뷰만으로는 실질적인 운용 특성을 파악하는 데 제약이 있었다. 이러한 한계는 수소·배터리 하이브리드 트램의 현실적인 적용 가능성을 검토하기 위해 해외에서 이미 실증 및 상용 운용 경험을 축적한 사례를 직접 조사할 필요성을 더욱 분명히 보여주는 근거로 작용하였다.

따라서 현지 조사는 문헌이나 공개 자료를 통해서만 파악하기 어려운 실제 설계·운용상의 의사결정 배경과 기술적 한계를 이해하는 데에도 필수적이라고 판단했다. 특히 전문가 인터뷰를 통해 수소 저장 및 분사 시스템의 실제 적용 방식, 배터리 열화 및 상태 진단에 대한 현실적인 접근법, 그리고 수소 모빌리티를 둘러싼 산업계의 사업화 관점과 제약 요인에 대한 의견을 직접 확보할 수 있다. 이러한 정보는 일반적으로 기업이나 연구기관에서 공개되지 않는 영역으로, 현지 방문과 대면 인터뷰를 통해서만 확인 가능하다.

마지막으로, H2E가 제안하는 수소·전기·ESS 연계형 무가선 트램 모델은 개별 기술의 단순 결합이 아니라, 도시 전력 인프라, 교통 운영 체계, 정책·제도 환경이 유기적으로 통합된 시스

템을 전제로 한다. 국내에는 이러한 통합 모델의 실증 사례가 부족한 반면, 유럽 지역은 이미 기술 성능뿐 아니라 정책·산업 연계 방식까지 포함한 통합 운용 경험을 축적하고 있다. 따라서 해외 현지 조사와 전문가 인터뷰는 단순한 사례 견학을 넘어, 서울형 모델을 실증 수준으로 구체화하기 위한 실험적 학습 과정으로서 반드시 필요한 단계라고 할 수 있다. 수소·전기·ESS를 결합한 하이브리드 무가선 트램 모델을 검토하기 위해서는, 개별 기술 요소에 대한 이해뿐만 아니라 각 요소가 실제 시스템으로 구현될 때 고려해야 할 핵심 전제 조건을 단계적으로 검증할 필요가 있다. 이 과정에서 연료전지 자체는 국내외에서 이미 활발히 연구가 진행되고 있는 분야로, 문헌과 기존 연구를 통해 기본적인 기술 이해가 가능하였다. 반면, 수소를 실제로 활용하기 위해 필수적인 수소 저장 시스템, 특히 고압 수소 탱크는 안전성과 직결되는 핵심 요소임에도 불구하고, 국내에서는 관련 설계·운용 정보를 직접 확인할 수 있는 기회가 제한적이었다.

이에 따라 해외 탐사에서는 수소 저장 및 운송을 실제 사업으로 수행하고 있는 산업체인 Air Liquide를 방문하여, 수소 탱크 사업 관점에서의 설계 기준과 운용 조건을 파악하고자 하였다. 또한 고압 수소 탱크 충전 과정에서 발생하는 열·기계적 거동과 안전성 평가 방법론을 보다 학술적으로 검증하기 위해, 수소 탱크의 열관리 및 열전달 연구를 선도적으로 수행하고 있는 EMPA를 방문하여 관련 연구진과의 논의를 진행하였다. 이를 통해 수소 탱크 열관리 구조와 냉각 전략이 안전성 확보에 어떤 방식으로 기여하는지에 대한 이론적·실증적 이해를 심화할 수 있었다.

한편, 수소를 통해 생산된 에너지를 회생제동 에너지로 전환하거나, 배터리와 수소연료전지 간에 에너지를 저장·교환하는 하이브리드 운용 개념 자체는 국내외에서 이미 활발히 연구되고 있는 영역으로 판단하였다. 해당 주제에 대해서는 문헌 조사와 기존 연구 분석을 통해 기술적 가능성과 기본 개념을 충분히 학습할 수 있었으며, 해외 탐사에서는 이를 보완하는 데 초점을 두었다. 실제 트램을 장기간 운용하는 단계에서는 배터리와 수소연료전지의 수명 관리 전략이 시스템 신뢰성과 직결되는 핵심 요소로 작용한다. 이에 따라 해외 탐사에서는 배터리 열화 진단과 수명 예측을 중심으로 실험과 모델링 연구를 집중적으로 수행하고 있는 Technical University of Munich을 방문하여, 데이터 기반 수명 관리 접근법과 하이브리드 시스템에 적용 가능한 이론적 판단 기준에 대한 자문을 확보하였다. 이를 통해 제한된 운용 데이터 환경에서도 수명 관리 전략을 어떻게 설정할 수 있는지에 대한 학술적 근거를 보완할 수 있었다.

마지막으로, 트램이 실제로 대중교통의 핵심 수단으로 상용 운용되고 있는 유럽의 도시 교통 체계 자체에 대한 이해가 필수적이었다. 그러나 개별 교통 운영 기관을 통한 직접적인 정보 접근에는 현실적인 제약이 존재하였으며, 이에 대한 대안으로 유럽의 교통·모빌리티 전문가들이 집결하는 국제 컨퍼런스에 참여하였다. 해당 컨퍼런스를 통해 트램을 중심으로 한 도시 교통망 설계, 다른 교통수단과의 연계 구조, 우선 신호 체계 등 유럽 특유의 교통 인프라 운영 철학과 실제 적용 사례를 전문가 발표를 통해 종합적으로 파악할 수 있었다.

이와 같은 단계적 접근을 통해, 해외 탐사는 단순한 기술 견학이 아니라 국내에서 접근이 어려운 핵심 요소를 보완하고, 서울형 하이브리드 무가선 트램 모델을 보다 현실적이고 실행 가

능한 수준으로 구체화하기 위한 필수적인 검증 과정으로 기능한다.

ii. 기관별 탐사 기대효과

1) Air Liquide

글로벌 B2B 기업의 마케팅 담당자와의 면담을 통해 글로벌 수소 모빌리티 시장에서 수소 트램이 형성할 수 있는 틈새 시장 구조와 성장 가능성에 대한 실질적인 시장 인사이트를 확보하고, ‘서울형 수소 트램 모델’의 해외 수출 가능성과 유망 타깃 시장을 구체적으로 도출할 수 있다. 또한 하이브리드 에너지 허브에 대한 중장기 수요 전망과 각국의 정책·인센티브 동향을 파악함으로써 사업 환경에 대한 이해를 제고하고, 시민 수용성 및 이해관계자 관리 관점에서의 B2B 사업 구조와 수익 모델 설계에 대한 실무적 기준을 학습할 수 있다. 이를 바탕으로 글로벌 시장에서 활용 가능한 차별화 요소(USP)를 정립하고, 사업성 평가 및 마케팅 전략 수립을 위한 핵심 기준을 도출할 수 있다.

2) Empa

EMPA에서 발행한 「Flow patterns and heat transfer characterization during large aspect ratio hydrogen tank filling」, 「Thermal and heat transfer dynamics in high pressure, high aspect ratio hydrogen tank filling processes」, 「Heat transfer analysis of high pressure hydrogen tank fillings」 등 세 편의 논문을 탐사 이전에 사전 학습함으로써, 고압 수소 탱크 충전 과정에서 발생하는 열·유동·기계적 거동에 대한 이론적 배경을 정리하였다.

이를 바탕으로 현지 연구진과의 전문가 인터뷰에서는 해당 논문에서 제시된 열전달 메커니즘 해석, 실험 조건 설정에 대한 구체적인 질의가 가능하며, 연구진은 풍부한 이론적 연구 경험을 바탕으로 이에 대해 기술적인 학술적 설명을 제공할 수 있다. 이를 통해 수소 탱크의 열적 안전성 평가가 단순한 온도 상승 검토를 넘어, 유동 패턴, 국부 열전달, 구조적 응답을 함께 고려한 통합적 방법론으로 이루어져야 함을 이해할 수 있다. 또한 고압 수소 저장 시스템의 안전성 평가 방법론을 체계적으로 이해할 수 있으며, 수소 탱크 열관리 구조 설계 및 충전 과정에서의 냉각 전략 최적화에 관한 실증 기반의 설계 인사이트를 확보할 수 있다. 해당 인사이트는 향후 수소 기반 교통수단 적용 시 안전성과 신뢰성을 확보하기 위한 핵심 기술 요소로 활용될 수 있다.

3) TUM (Technical University of Munich)

TUM 에서 발행한 「Battery pack diagnostics for electric vehicles: Transfer of differential voltage and incremental capacity analysis from cell to vehicle level」 과 「Comparing experimental designs for parameterizing semi-empirical and deep learning-based lithium-ion battery aging models」 두 편의 논문을 탐사 이전에 사전 학

습함으로써, 데이터 기반 배터리 열화 진단(DVA) 및 수명 예측 기법의 이론적 배경을 정리하였다.

이를 바탕으로 현지 전문가 인터뷰를 통해, 해당 연구진이 제안한 방법론을 기준으로 우리 연구에서 설정한 가정과 모델링 접근이 이론적으로 타당한지에 대한 검증을 받을 수 있다. 특히 제한된 데이터 환경에서 열화 모델을 단순화하는 접근, 진단 기법의 적용 범위 설정, 그리고 하이브리드 배터리-연료전지 시스템에 대한 수명 관리 가정이 이론적으로 어느 수준까지 정당화될 수 있는지에 대해 심층적인 평가를 얻을 수 있다. 이러한 사전 학습과 전문가 인터뷰를 통해, 무가선 트램 및 도심 교통 환경에 적용 가능한 고신뢰성 배터리 운영·제어 전략에 대한 구체적인 설계 및 운영 인사이트를 도출하는 것을 목표로 한다.

4) MOBIL'IN PULSE 2026 (파리 컨퍼런스)

철도 및 모빌리티 분야의 산업기관과 연구기관이 집결하여 기술 제시와 사업적 교류가 동시에 이루어지는 국제 컨퍼런스에 참여함으로써, 최신 연구 성과와 실제 적용 사례를 종합적으로 학습할 수 있다. 특히 트램을 포함한 대중교통 시스템이 도시 교통의 핵심 축으로 운영되고 있는 유럽에서는 이러한 논의가 가장 활발히 이루어지고 있어, 현지 컨퍼런스 참여의 필요성이 더욱 크다.

본 컨퍼런스에서는 이러한 유럽 교통 체계의 특성이 반영된 발표들을 통해, 국내에서는 접하기 어려운 구체적인 인사이트를 확보할 수 있다. 첫 번째 학술 발표로, 대중교통 수단의 우선 신호 확보 전략과 이를 뒷받침하는 도시 교통망 체계 분석 방법론에 대한 논의가 이루어질 예정이며 교통수단의 정시성과 효율을 확보하기 위한 데이터 기반 접근이라는 점에서 트램 적용 가능성이 높은 시사점을 제공한다. 이는 향후 서울형 트램 도입 시 지능형 우선 신호 시스템(PTPS)과 교통 흐름 분석을 결합한 설계 전략으로 확장 가능하다.

두 번째 학술발표로, 트램과 기존 교통수단 간의 환승·연계 구조인 순환 구조 기반의 교통 체계 설계에 대한 발표를 통해, 단일 교통수단 중심이 아닌 도시 전체 이동 흐름을 고려한 통합 교통 설계 개념에 대한 인사이트를 얻을 수 있었다. 이는 트램을 기존 지하철, 버스, 광역 교통망과 어떻게 유기적으로 연결할 것인지, 그리고 시민의 실제 이동 행태를 반영한 환승 구조를 어떻게 설계할 것인지에 대한 중요한 참고 사례로 작용한다.

이와 같은 논의는 트램이 일상적인 교통수단으로 기능하는 유럽의 도시 교통 환경에서만 축적될 수 있는 경험과 접근 방식에 기반한 것으로, 국내 교통 체계만을 대상으로 한 문헌 조사나 사례 분석만으로는 도출하기 어려운 내용이다. 따라서 파리에서 개최된 본 컨퍼런스 참여는 단순한 정보 수집을 넘어, 유럽 도시들이 구축해온 교통 체계의 새로운 접근 방식을 직접 학습하고 이를 서울형 하이브리드 무가선 트램 모델에 적용하기 위한 전략적 탐사 과정으로서 중요한 의미를 가진다.

c. 탐사 과정 및 인터뷰 정리

i. 국내 탐사 내용 정리

1) 사전 공부

해외 사례 탐사에 앞서, 국내 여건에 적용 가능한 트램 구동 방식에 대한 사전 검토를 위해 관련 논문과 기술 자료를 중심으로 기초적인 이론 조사를 수행하였다. 이 과정에서 트램의 운행 구간을 도심 구간과 순환·간선 구간으로 구분하고, 각 구간에 상이한 구동 개념을 적용하는 접근이 합리적인지에 대해 정리하였다. 트램은 노선 유형에 따라 운행 패턴이 크게 달라지며, 이에 따라 요구되는 전력의 형태(순간 피크 전력 대비 지속 출력)와 에너지 규모 또한 상이하게 나타난다. 이러한 차이는 단일 구동 개념을 전 노선에 적용할 경우 비효율이 발생할 가능성을 시사하며, 구간 특성에 따른 구동 방식 분리 필요성에 대한 검토로 이어졌다.

먼저, 도심 구간은 정거장 간 간격이 짧아 정차와 가속이 빈번하게 반복되는 특성을 가진다. 관련 문헌을 검토한 결과, 이러한 구간에서는 정거장에서의 고속 충전을 통해 무가선 운행이 가능하며, 정거장 간 주행에 필요한 평균 에너지 요구량은 상대적으로 크지 않은 것으로 나타난다. 반면, 출발 및 재가속 과정에서는 수백 kW 수준의 순간적인 피크 전력이 반복적으로 요구되는 특징이 있다. 이러한 운행 조건에서는 장시간의 에너지 공급 능력보다는, 짧은 시간 동안 대전력을 안정적으로 처리할 수 있는 고출력 특성이 중요하게 작용한다. LTO기반 에너지저장장치는 높은 출력 밀도와 빠른 충·방전 응답 특성을 갖는 것으로 보고되고 있으며, 정거장 간 무가선 주행 구간에서 발생하는 피크 전력을 보조하고, 정차 시간 동안 초고속 충전을 통해 다음 구간 운행에 필요한 에너지를 반복적으로 보충하는 운용 방식에 적합한 후보 기술로 정리할 수 있다. 이 경우 배터리는 항속을 위한 주 에너지원이라기보다, 반복적인 가속·제동 과정에서 발생하는 전력 변동을 완충하는 전력·에너지 버퍼의 역할을 수행하는 개념으로 이해할 수 있다.

반면, 순환선 또는 간선급 노선과 같이 정거장 간 거리가 길고 운행 시간이 상대적으로 긴 구간에서는, 순간 피크 전력보다 지속적이고 안정적인 전력 공급 능력이 상대적으로 더 중요하게 나타난다. 문헌 검토 결과, 이러한 조건에서 배터리 단독 시스템은 요구 에너지 용량 증가에 따라 차량 중량, 설치 공간, 열관리 측면에서 제약 요인이 될 수 있음이 지적되고 있다.

수소 연료전지는 높은 에너지 밀도와 짧은 연료 보급 시간을 바탕으로 장시간 운행에 유리한 특성을 가지며, 평균 출력 영역에서 효율적으로 운전될 수 있는 에너지원으로 제시되고 있다. 이와 함께 에너지저장장치를 병행 적용할 경우, 가속 시 요구되는 피크 전력을 보조하고 제동 시 회생 에너지를 흡수함으로써, 연료전지를 급격한 부하 변동 없이 평균 출력 중심으로 운전하는 하이브리드 운용 개념이 가능하다는 점도 확인하였다.

이와 같은 사전 검토를 통해, 도심 구간에는 고출력·단주기 운행 특성에 적합한 배터리 기반 무가선 트램, 순환·간선 구간에는 지속 출력과 에너지 효율 측면에서 유리한 수소 연료전지 하

이브리드 트램을 적용하는 노선 특성에 따른 구동 방식 분리 전략이 하나의 검토 방향으로 정리되었다. 이러한 정리는 이후 해외 사례 탐사 시, 각국의 실제 적용 사례를 비교·분석하기 위한 기준 틀로 활용하고자 한다.

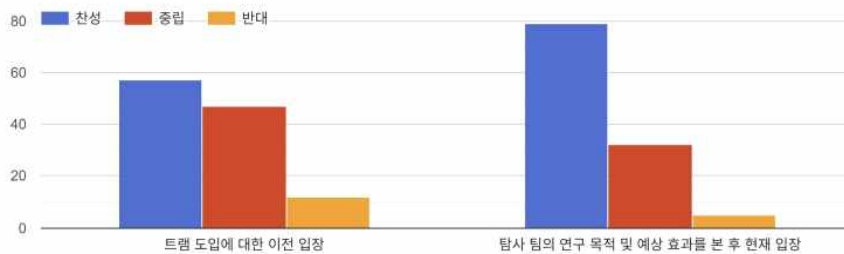
2) 설문조사

본 연구에서는 Google Form을 활용하여 「서울형 무가선 트램 시민 인식 조사」를 실시하였다. 설문은 서울 및 수도권 거주자 또는 통근·통학 경험자를 대상으로 진행되었으며, 총 116명의 응답을 확보하였다.

(1) 연구가치증명

설문 초기 단계에서는 트램에 대해 잘 알지 못하거나 생소하게 인식하는 응답자가 다수 존재하였다. 그러나 연구팀이 제안한 수소연료전지-LTO 배터리 기반 하이브리드 무가선 트램 모델을 설명한 이후, 트램 도입에 대한 시민들의 인식이 전반적으로 긍정적인 방향으로 변화한 것으로 나타났다.

연구 개요를 살펴본 후, 이러한 트램 모델이 실제 서울에 도입된다고 가정할 때 의견은 어떠신가요?



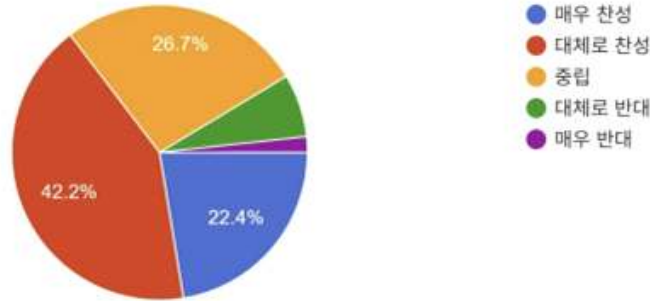
<표1> 제안서를 읽은 후 트램 도입에 대한 입장 비교

초기 조사에서 트램 도입에 대해 중립적이거나 회의적인 입장을 보였던 응답자 중 26.7%(31명)가 연구 내용을 접한 이후 ‘찬성’으로 의견을 변경하였다. 이는 단순한 교통수단 도입 제안보다, 에너지원 이원화(수소+배터리)와 같은 구체적인 기술적 대안이 시민들에게 실질적인 신뢰를 제공할 수 있음을 시사한다.

최종적으로 트램 도입에 대한 찬성률은 68.1%를 기록하였으며, 이는 연구팀이 제안한 서울형 하이브리드 무가선 트램 모델이 기존의 단순 트램 도입안보다 높은 정책적 수용성과 사회적 지지를 확보할 수 있음을 정량적으로 보여주는 결과로 해석할 수 있다.

트램 도입에 대해 전반적으로 어떻게 생각하시나요?

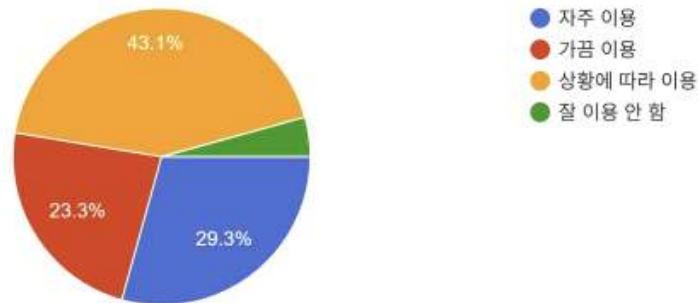
응답 116개



<표2> 트램 도입에 대한 입장

만약 서울에 트램이 도입된다면 사용할 의향이 있으신가요?

응답 116개



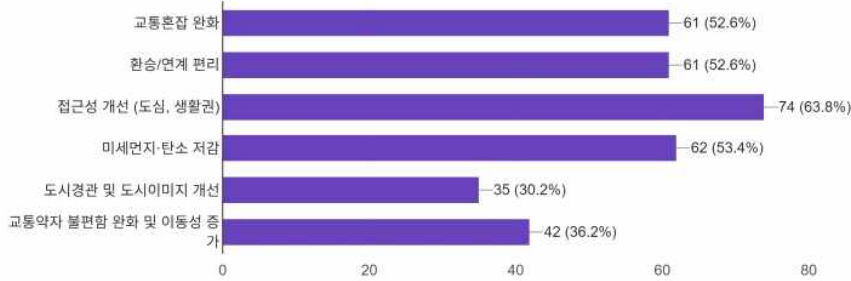
<표3> 트램 도입시 사용 여부에 대한 설문조사

(2) 시민 우려 사항 분석 및 연구팀의 기술적 보완책

설문 결과, 시민들은 트램 도입의 필요성에는 공감하면서도 실제 운영 단계에서의 안전성, 혼잡도, 교통 흐름 등에 대해 구체적인 우려를 제기하였다. 주관식 응답을 중심으로 주요 우려 사항과 이에 대한 연구팀의 기술적 보완 방향을 다음과 같이 정리하였다.

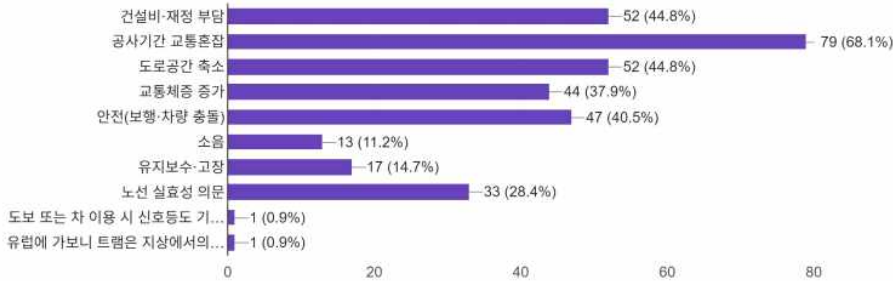
트램을 도입했을 때의 기대효과에 대해서 3가지 선택해주세요.

응답 116개



트램을 도입했을 때의 우려되는 점 3가지 선택해주세요.

응답 116개



<표4> 트램 도입시 기대효과와 우려사항에 대한 설문조사

① 안전성 및 배터리 신뢰성

주관식 응답에서는 배터리 화재, 충전 불량, 폭발 가능성 등 전기차 사고 사례와 유사한 안전 우려가 반복적으로 제기되었다. 이를 통해 시민들이 가장 크게 우려하는 요소는 배터리 안전 성임을 확인하였다. 이에 대해 연구팀은 열적 안정성이 매우 높은 LTO 배터리를 우선적으로 적용하는 전략을 채택하였다. LTO 배터리는 일반 리튬이온 배터리에 비해 화재 위험이 현저 히 낮은 특성을 가지므로, 보고서 후반부에서는 이러한 물리적·화학적 안정성을 시각 자료와 함께 제시하여 시민 신뢰를 강화할 필요가 있음을 도출하였다.

② 차량 혼잡 및 배차 간격 문제

일부 응답자는 트램 내부 공간이 지하철보다 협소할 경우 혼잡 시간대에 불편이 발생할 수 있다는 우려를 제기하였다. 정량 응답 분석 결과, 응답자의 69.8%는 정시성 확보를, 51.7%는 배차 간격 단축을 중요 요소로 인식하고 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 연구팀은 LTO 배 터리의 장점인 급속 충전 특성을 활용하여 차량 회전율을 높이고, 이를 기반으로 배차 간격을 단축할 수 있는 운행 전략을 병행 검토해야 함을 확인하였다.

③ 도로 점유에 따른 교통 체증 우려

트램 도입 시 교통 체증을 우려하는 응답은 68.1%로 가장 높은 비율을 차지하였다. 특히 교 차로에서 기존 신호 체계와 트램 신호가 중첩될 경우 이동 시간이 증가할 것이라는 우려가 다 수 제기되었다. 이에 대한 보완책으로 연구팀은 단순한 전용 차로 확보를 넘어, 현재 기술적으

로 실현 가능성이 높은 지능형 우선 신호 시스템(PTPS, Public Transport Priority System)의 도입을 검토 대상으로 추가하였다. 해당 시스템은 트램이 교차로에 접근할 경우 신호 우선권을 부여함으로써 정차 시간을 최소화하고 도로 정체를 완화하는 효과를 기대할 수 있다.

(3) 노선 특성에 따른 하이브리드 트램 배치 모델

연구팀은 시민 설문 결과와 서울의 도로·도시 구조 특성을 종합하여, 노선 유형에 따라 상이한 하이브리드 트램 배치 전략을 제안한다. 이는 짧은 구간에 적합한 LTO 배터리 단독 트램과, 장거리 운행에 적합한 수소연료전지-LTO 하이브리드 트램을 이원화하여 적용하는 개념이다.

① 간선·광역형 노선: 수소연료전지 + LTO 하이브리드 모델

연결이 시급한 지역에 대한 질문에서 응답자의 31.0%가 역사·터미널, 24.1%가 신도심 주거지를 선택하였다. 이는 시민들이 교통 거점과 외곽 주거지를 연결하는 광역 단위의 이동성을 핵심 요구사항으로 인식하고 있음을 의미한다. 이러한 광역 노선은 노선 길이가 길어 배터리 단독 운행 시 방전 위험이 존재하므로, 수소연료전지를 주 동력원으로 활용하여 주행거리를 확보하고, 출력 응답성이 우수한 LTO 배터리가 가감속을 보조하는 하이브리드 방식을 적용하는 것이 합리적인 대안으로 판단하였다.

② 도심·순환형 노선: LTO 배터리 단독 모델

정거장 간격 선호도 조사 결과, 응답자의 57.8%가 500~600m의 비교적 촘촘한 간격을 선호하는 것으로 나타났다. 이는 시민들이 트램을 지하철보다는 접근성이 높은 도심 밀착형 교통수단으로 인식하고 있음을 보여준다. 정거장 간격이 짧은 도심 구간에서는 에너지 밀도보다 충전 속도와 출력 특성이 중요하다고 판단하였다. 이에 따라 5분 내외의 초급속 충전이 가능한 LTO 배터리 단독 모델을 적용하고, 정거장 단위의 충전 허브를 활용함으로써 수소 인프라 구축 비용을 절감하면서도 운영 효율을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

ii. 국내 전문가 인터뷰 내용 정리

1) 한국철도기술연구원 추진시스템연구실

국내 사전 인터뷰 과정에서 면담자는 노면전차(트램)의 동력 구성 방식을 전력 공급 형태에 따라 유가선 방식과 무가선 방식으로 구분하여 제시하였다.

유가선 방식은 전차선으로부터 직접 전력을 공급받아 운행하는 구조로, 팬터그래프와 같은 집전장치와 변전소, 전차선 등 전철전력설비가 필요하다고 언급하였다. 해당 방식은 경관 측면에서 선호도가 낮은 경우도 있으나, 차량 구조가 비교적 단순하다는 특징을 가진 방식으로 정리되었다. 무가선 방식은 차량에 에너지원 또는 저장장치를 탑재하여 전차선 없이 운행하는 방식으로, 여러 세부 유형으로 분류할 수 있다고 제시되었다. 먼저, 배터리 방식은 차량에 대용량 배터리를 탑재하고 차량기지에서 충전하여 운행하는 형태로, 전차선 설치가 불필요하며 단거리 노선에 적합한 방식으로 언급되었다. 이 경우 차량에는 대용량 배터리가 요구되며, 차

량기지 내 배터리 충전 시설이 필요 요소로 제시되었다.

급속충전 방식은 정거장마다 짧은 정차 시간 동안 충전을 수행하여 다음 구간을 운행하는 구조로, 슈퍼커패시터와 배터리를 병행 적용하는 방식으로 정리되었다. 이에 따라 각 정거장마다 충전 설비 설치가 필요하다는 점이 함께 언급되었다. 또한, 무선급전 방식은 정차 중 또는 주행 중 무선으로 전력을 공급받는 방식으로, 운행 노선 특성에 적합한 무선 충전 구간 설계와 무선급전 장치 설치가 전제 조건으로 제시되었다. 이와 함께 수소 방식은 저장된 수소를 연료 전지에서 전기 에너지로 변환하여 차량을 구동하는 방식으로, 장시간 운행이 요구되는 구간에 적용 가능한 대안으로 언급되었다. 이 경우 가속 시 피크 전력 보조와 제동 시 회생에너지 저장을 위해 배터리를 병행 적용하는 것이 일반적이라는 점도 함께 공유되었으며, 수소 충전 시설 구축이 필요하다는 점이 고려 요소로 제시되었다.

면담자는 배터리 형식 및 구동 방식의 선택은 설치 공간, 운행 노선 특성, 운영 조건 등을 종합적으로 고려하여 결정되어야 하며, 특정 방식으로 일률적으로 한정되지는 않는다고 언급하였다. 또한, 도심 노면전차와 철도 본선을 연계해 운행할 수 있도록 설계된 Tram-Train 개념의 차량이 일부 국가에서 실제로 운행 중이라는 점도 함께 언급되었다.

노면전차 동력 구성 방식

동력 구성	특징	필요 장치	필요 설비
1. 유가선	전차선으로부터 전력을 공급받아 운행하는 방식으로 변전소, 전차선 등 급전을 위한 전철전력설비가 필요하고 미관상 선호하지 않으나 차량 구조는 가장 간단함.	집전장치(팬터그래프)	변전소, 전차선 등 전철전력설비
2. 무가선			
가. 배터리	차량에 탑재된 대용량 배터리를 차량 기지에서 충전하여 운행하는 방식으로 전차선이 필요 없고 단거리 운행에 적합	대용량 배터리	배터리 충전시설(기지)
나. 급속충전	역마다 단시간 충전으로 다음역까지 이동하는 방식으로 슈퍼커패시터와 배터리 함께 필요. 역마다 충전장치 설치 필요	슈퍼커패시터+배터리	역사마다 충전시설
다. 무선급전	주행 중 또는 정차 중에 무선으로 충전 및 운행하는 방식으로 운영노선에 적합한 무선 충전 구간 설계 필요	배터리	무선급전장치
라. 수소	저장된 수소를 동력원으로 연료전지에서 발전된 전력으로 운행하는 방식으로 회생에너지 저장과 출력이 많이 요구되는 구간을 위해 배터리 함께 필요	수소연료전지+배터리	수소충전시설

배터리 형식은 설치공간과 운행 노선, 운영 조건 등을 검토하여 선택하는 것으로 특정 형식만에 한정되지 않음

추가로 도심과 철도 본선을 운행할 수 있도록 설계된 Tram-Train 개념의 철도차량도 운행 중임

<표5> 노면전차 동력 구성 방식

2) 한국전력

한국 전력의 사전 인터뷰를 통해 트램 정류장 전력 인프라를 활용한 전기차 충전 및 회생전력 활용 가능성에 대해 기술적·제도적 관점에서 주요 쟁점을 확인하였다.

국내 사전 인터뷰를 통해 트램 정류장 전력 인프라를 활용한 전기차 충전 및 회생전력 활용 가능성에 대해 기술적·제도적 관점에서 주요 쟁점을 확인하였다.

먼저, 트램 정류장은 이미 비교적 용량이 큰 전력 설비가 인접해 있어 기본적인 전력 공급 자체는 가능하다는 점이 언급되었다. 다만, 국내 트램에 적용되는 DC 750V 급전망에 전기차

충전 부하를 직접 연계할 경우, 다수의 충전기가 동시에 운전되는 상황에서는 충전 부하가 급격히 증가하면서 전압 변동이나 계통 안정성 저하가 발생할 수 있다는 점이 지적되었다. 즉, 단일 전기차 충전기 수준에서는 문제가 크지 않을 수 있으나, 충전 수요가 집중되는 경우에는 급전 계통의 전압 특성과 안정성에 영향을 줄 가능성이 있다는 점이 핵심적인 유의 사항으로 제시되었다.

또한, 트램 회생전력을 정류장 내 ESS 또는 전기차 충전에 로컬로 흡수하는 구상과 관련하여, 한전 기술 기준상 회생전력은 역송전으로 취급될 수 있다는 점이 언급되었다. 이에 따라 회생전력을 활용하기 위해서는 기술적·제도적으로 역송전 관리 체계에 부합하는 설계가 필요하며, 전압 및 주파수 측면에서 적정한 전력 품질을 만족하는 것이 필수 조건으로 제시되었다. 이는 회생전력이 ESS나 EV 충전에 직접 연계되는 경우에도 동일하게 적용되며, 보호 및 안전 기준 충족 여부가 중요한 검토 요소로 작용한다는 점이 함께 강조되었다.

추가적인 질의응답을 통해, 재난 발생 시 트램 정류장을 비상 전력 허브로 확장하는 개념은 기술적으로 실현 가능성이 높다는 점도 확인하였다. 다만, 이를 위해서는 ESS, 그리드포밍 인버터, 통합 제어 시스템과 같은 핵심 인프라 구축이 전제되어야 하며, 계통 영향 분석 및 안정도 해석이 반드시 병행되어야 한다는 점이 언급되었다.

이러한 인터뷰 결과를 통해, 트램 정류장을 중심으로 한 전력 연계 및 통합 충전 거점 구상은 단순한 개념 제안에 그치지 않고, 계통 안정성 해석, 전력 품질 관리, 보호 및 안전 기준, ESS 연계 운용 전략 등 구체적인 기술적·제도적 조건을 종합적으로 고려해야 함을 인식하게 되었다. 이는 향후 「하이브리드 무가선 트램과 통합 충전 거점 모델」을 보다 현실적이고 실행 가능한 방향으로 구체화하는 데 있어 중요한 사전 검토 결과로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3) 한국철도기술연구원 트램 연구실

국내 트램 기술 및 상용화 여건에 대한 이해를 위해 한국철도기술연구원 관계자와의 인터뷰를 진행하였다. 인터뷰를 통해 수소연료전지-2차전지 하이브리드 동력 시스템의 국내 적용 현황, 한국형 트램 기술의 발전 방향, 그리고 신규 교통수단 상용화 과정에서 연구기관의 역할에 대해 확인할 수 있었다.

먼저, 수소연료전지 기반 트램과 관련하여 현재 국내에서는 실제 차량이 제작되어 시험 주행이 진행 중인 실증 단계임을 확인하였다. 해당 차량은 현대 로템에서 제작한 수소 트램으로, 울산 지역에서 실증 사업이 추진되고 있으며, 아직은 장기 운용 데이터를 기반으로 한 상용화 단계에는 이르지 않은 상황으로 정리되었다. 이에 따라 수명 특성, 유지보수 이력 등과 같은 핵심 운용 정보는 아직 제한적으로만 축적되고 있는 단계임을 확인할 수 있었다.

한국형 트램 기술의 발전 방향과 관련해서는, 국내 도입이 검토되고 있는 트램 대부분이 상부 가선이 없는 무가선 방식을 전제로 논의되고 있다는 점이 언급되었다. 이는 도시 미관과 유지관리 비용을 고려한 선택으로, 향후 국내 트램은 배터리, 슈퍼커패시터, 수소전기 방식 등

다양한 에너지원 중에서 노선 특성에 맞는 최적의 조합을 선택하는 방향으로 발전할 가능성이 높다는 점이 제시되었다. 즉, 단일 동력원보다는 노선 조건과 운행 패턴에 따른 복합·이원화 전략이 향후 기술 발전의 주요 흐름으로 인식되고 있음을 확인하였다.

신규 교통수단의 상용화 과정에서 연구원의 역할에 대해서는, 국내 철도 차량이 반드시 거쳐야 하는 형식승인 제도와 관련한 기술 검증 및 인증 기능이 핵심적인 역할로 제시되었다. 연구원은 형식승인 인증기관으로서 차량 및 시스템의 기술적 검증, 관련 기준 마련, 정책 및 제도 자문 등을 수행하며, 신규 교통수단의 제도적 정착을 지원하는 역할을 담당하고 있는 것으로 정리되었다.

한편, 인터뷰 과정에서 연구원의 답변은 실증 단계의 한계로 인해 구체적인 기술 세부 사항까지는 다루기 어려운 수준이었으나, 독일 VDE 관련 자료 등 본 연구 주제와 연관성이 높은 해외 참고 자료를 추가로 추천받을 수 있었다. 해당 자료를 통해 국제적 관점에서의 경제성 분석 사례를 확인할 수 있었으며, 이는 이후 해외 사례 조사 방향 설정에 참고 자료로 활용되었다.

반면, 수소 트램의 열관리 전략이나 새로운 열관리 시스템과 관련된 내용에 대해서는 국내에서 아직 충분한 정보가 축적되지 않았음을 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서는 국내 인터뷰 만으로는 파악이 어려운 열관리 및 안전성 관련 최신 연구 동향을 보완하기 위해, 해외 연구소 및 전문 랩실 방문을 통해 해당 정보를 추가적으로 확보하는 방향으로 탐사 범위를 확장하기로 결정하였다.

iii. 해외 탐사 내용 정리

1) Air Liquide

(1) 기관 설명

Air Liquide는 프랑스에 본사를 둔 글로벌 산업용 가스 및 에너지 기업으로, 수소를 포함한 특수가스의 생산·저장·운송·공급 인프라 전반을 담당하는 세계적인 선도 기관이다. 단순한 가스 공급 기업을 넘어, 수소 충전소 구축, 대규모 수소 물류 시스템 설계, 모빌리티·산업·에너지 부문에서의 시스템 통합을 핵심 사업 영역으로 삼고 있다.

(2) 면담 내용

본 면담을 통한 질의응답은 이러한 Air Liquide의 실무적 관점을 바탕으로, 수소 트램 및 하이브리드 에너지 시스템이 실제 도시 교통 환경에서 어떤 조건에서 성립 가능한지에 대한 통찰을 얻고자 마련되었다. 이에 대한 Air Liquide 측의 답변과 논의는 다음과 같이 정리할 수 있다.

① 수소 저장 탱크 기술의 상용화 단계와 표준 사양 선택

우선 수소 저장 탱크 기술에 대해 Air Liquide는 명확한 입장을 제시하였다. 현재 차량용 수소 저장 탱크 기술은 이미 상용화가 완료된 단계에 도달해 있으며, 더 이상 새로운 R&D의 대

상이라기보다는 검증된 상용 솔루션 중에서 어떤 사양을 선택할 것인가의 문제라는 것이다. 차량용 수소 저장 탱크는 구조와 재료에 따라 Type I부터 Type IV까지로 구분된다. Type I은 전량 금속으로 제작된 구조로 무게가 무거워 차량 적용에는 한계가 있으며, Type II는 금속 라이너에 일부 복합재를 적용한 형태로 경량화 효과가 제한적이다. Type III는 금속 라이너 위에 탄소섬유 복합재를 전면 적용해 고압 저장이 가능하지만, 여전히 금속 라이너로 인한 중량과 비용 부담이 존재한다. 반면 Type IV는 폴리머 라이너와 탄소섬유 복합재로 구성되어 가장 가볍고 중량 대비 저장 효율이 높아, 현재 차량용 수소 저장 시스템의 주류 기술로 활용되고 있다.

Type I부터 Type IV까지 저장 탱크 중, 트램과 같은 대중교통 수단에는 Type IV 탄소섬유 복합재 탱크가 사실상 글로벌 표준으로 자리 잡고 있다는 점이 강조되었다. Type IV 탱크는 폴리머 라이너 위에 탄소섬유를 감아 제작되며, 중량 대비 저장 효율이 가장 뛰어나고 이미 수소 버스, 트럭, 승용차 등 다양한 분야에서 대량 적용되고 있다. 특히 350 bar급 저장 압력은 비용, 안전성, 시스템 복잡성의 균형 측면에서 가장 합리적인 선택지로 평가되었는데, 이는 압력 증가에 따라 탱크 벽 두께와 중량, 제조 비용이 비선형적으로 증가하고, 밸브·레귤레이터·충전 설비 등 주변 시스템 전반이 고압 사양으로 복잡해지기 때문이다. 대형 교통수단의 경우 차량 길이와 탑재 공간이 충분하여 350 bar 조건에서도 요구되는 수소 저장량을 확보할 수 있으므로, 700 bar까지 압력을 높여 얻을 수 있는 추가적인 이점은 제한적인 반면 시스템 부담은 크게 증가한다. 이러한 이유로 트램과 같은 대중교통 수단에서는 저장 밀도의 극대화보다 전체 시스템의 비용 효율성, 운용 안정성, 안전성을 종합적으로 고려한 350 bar급 저장 압력이 가장 현실적인 선택으로 인식되고 있다.

또한 Air Liquide는 수소 공급 및 시스템 통합을 운영하고 있다는 점을 우선적으로 명시하였다. 실제 탱크의 세부 사양은 Hexagon, Forvia, Plastic Omnium과 같은 글로벌 OEM들이 이미 표준화된 상용 제품으로 제공하고 있으며, 한국 역시 이러한 공급망이 충분히 구축된 시장이라는 설명이 이어졌다. 따라서 연구 모델이나 시스템 설계 단계에서 산업계에서 이미 검증된 Type IV, 350 bar급 탱크를 기준 사양으로 채택하는 것은 기술적 보수성이 아니라 오히려 상용화와 현실적 기준을 충족하는 선택이라는 점을 명확히 이해할 수 있었다.

② 글로벌 수소 모빌리티 시장에서 수소 트램의 위치

시장 관점에서 본 수소 트램의 위치 역시 중요한 논의 주제였다. Air Liquide는 현재 글로벌 수소 모빌리티 시장의 중심이 bus와 장거리 트럭에 있으며, 승용차와 도심 단거리 교통에서는 배터리 전기차가 효율과 비용 측면에서 우위를 확보하고 있다고 평가하였다. 수소는 배터리가 구조적으로 불리한 장거리, 고중량, 혹한 환경, 혹은 충전 인프라 제약이 큰 경우에만 경쟁력을 가진다는 것이다. 이러한 맥락에서 수소 트램은 주류 시장이 아닌 특수 목적형 틈새 시장으로 분류되며, 이미 전차선 인프라가 구축된 유럽 도시에서는 추가적인 수소 도입이 경제적으로 설득력이 낮다는 점이 강조되었다.

③ 도시 맥락에 따른 적용 가능성과 인프라 운영 전략

서울과 같이 트램 인프라가 아직 존재하지 않고, 전차선 설치가 도시 경관이나 공사 리스크 측면에서 부담이 되는 경우에는 수소 또는 배터리 기반의 무가선 대형 교통수단이 이론적 대

안이 될 수 있다는 점도 함께 언급되었다. 이 경우 Air Liquide는 이를 전통적인 의미의 트램이라기보다는, 대용량 무가선 교통수단 혹은 extended bus에 가까운 개념으로 인식하고 있음을 분명히 했다. 즉, 시장성은 레일 기반 트램 자체가 아니라 무가선 대중교통 수단이라는 관점에서 재정의되어야 한다.

또한 하이브리드 에너지 허브(전기+수소)에 대한 논의에서는 정책과 시장의 간극이 드러났다. 유럽의 AFIR 규제는 전기 및 수소 충전 인프라 구축을 요구하지만, 두 에너지원의 물리적 통합을 의무화하지는 않는다. Air Liquide의 실무 경험에 따르면, 다중 에너지 스테이션의 형태는 정책보다는 교통 수요와 운영 동선에 따라 자율적으로 결정되며, 특히 수소 버스나 트램의 경우 공공 도로변 충전소보다는 차고지 기반 충전 방식이 안전성과 인허가 측면에서 훨씬 유리하다는 점이 강조되었다.

④ 사회적 수용성과 사업 구조: 정책·재정의 중요성

본 연구에서 수행한 설문조사 결과에서도 확인할 수 있듯이, 시민들은 수소 에너지 및 수소 인프라에 대해 여전히 안전성에 대한 불안을 갖고 있는 것으로 나타났다. 이러한 인식과 관련하여 사회적 수용성과 안전성에 대해서도 Air Liquide 측에서는 실질적인 시각을 제시하였다. Air Liquide는 수소 인프라에 대한 시민 불안이 실제 기술적 위험보다는, 수소가 일상적으로 접해보지 않은 ‘새로운 가스’라는 인식에서 비롯된 심리적 저항에 가깝다고 분석한다. 이에 대한 대응 전략의 핵심은 수소를 천연가스와 유사한 관리 철학을 가진, 이미 산업 현장에서 오랜 기간 검증되어 온 표준화된 에너지로 인식시키는 것이다. 실제 운용 과정에서 발생할 수 있는 누출이나 압력 이상과 같은 incident는 대부분 설계 단계에서 반영된 안전 밸브 및 차단 시스템에 의해 자동으로 제어되며, 이러한 사례와 안전 데이터는 기업 간 경쟁을 넘어 산업 전반에서 공유되고 있다는 점이 강조되었다.

사업 구조 측면에서는 수소 트램 프로젝트가 단일 주체로 추진될 수 없다는 점이 분명히 드러났다. 지자체, 교통 운영사, 차량 OEM, 에너지 공급자가 핵심 이해관계자로 얽혀 있으며, 실제 발주 주체는 대부분 지자체이다. Air Liquide는 최종 소비자를 대상으로 하는 사업자가 아닌 전형적인 B2B 기업으로서, 지자체나 교통 운영사와 직접 협력하여 입찰 제안을 공동으로 구성하고, 수소 충전소 구축과 안정적인 수소 공급을 포함한 패키지 형태의 솔루션을 제공하는 역할을 수행한다. 특히 현재 수소 모빌리티 프로젝트는 정부 보조금 없이는 성립이 어렵다는 점이 반복적으로 강조되었으며, 수소 트램 역시 기술 문제가 아니라 재정 구조와 정책 지원이 실현 가능성을 결정하는 핵심 요소로 제시되었다.

본 면담은 수소 트램의 실현 가능성이 기술적 완성도보다는 정책 지원, 재정 구조, 그리고 적용 범위 설정에 의해 좌우된다는 점을 명확히 보여주었다.

2) EMPA

(1) 기관 소개

EMPA(Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology)는 스위스 연방정부 산하의 국가 연구기관으로, 재료과학, 에너지 시스템, 지속가능 공학을 중심으로 기

초 연구부터 산업 응용까지를 포괄하는 연구를 수행하고 있다. 특히 수소 저장, 고압 가스 시스템, 연료전지 및 에너지 인프라 분야에서 실험·모델링·표준화 연구를 동시에 수행하는 기관이다. EMPA의 연구는 단순한 개념 검증에 그치지 않고, 실제 산업 적용과 인증 체계를 염두에 둔 물리 기반 분석을 특징으로 한다. 이러한 특성으로 인해 EMPA는 수소 모빌리티 분야에서 기술적 가능성과 제도적 현실을 동시에 검토할 수 있는 대표적인 연구기관으로 평가된다.

(2) 면담 내용

① EMPA 인터뷰 목적과 논의 범위

본 연구팀은 수소 연료전지 기반 무가선 트램 시스템의 설계 타당성을 보다 정밀하게 검토하기 위해, EMPA 연구진 및 교수님과의 인터뷰를 통해 수소 저장 탱크 충전 과정에서 발생하는 실제 물리 현상과 설계상의 제약 조건을 집중적으로 논의하였다. 특히 고압 수소 저장 시스템에서 발생하는 내부 유동, 국부 과열, 충전 조건과 열 관리의 상호작용은 이론적 모델만으로는 충분히 포착하기 어려운 문제로 지적된다. 이하에서는 EMPA 교수진이 제시한 실험적·이론적 통찰을 바탕으로, 수소 저장 탱크 충전 시 발생하는 핵심 열·유동 현상과 이에 따른 설계적 시사점을 정리한다.

② 고종횡비 수소 저장 탱크에서의 내부 열 거동 문제

트램과 같은 대용량 대중교통 수단에 수소 저장 시스템을 적용할 때 가장 먼저 고려해야 할 요소는, 단순히 저장 압력이나 탱크 형상이 아니라 실제 충전 과정에서 탱크 내부에서 발생하는 유동 및 열 거동의 본질이다. 해외 탐사 과정에서 진행된 인터뷰는, 길이에 비해 직경이 매우 긴 형상을 갖는 원통형 수소 저장 탱크, 즉 고종횡비(high aspect ratio) 구조 내부에서 발생하는 열 거동이 설계 단계에서 반드시 고려되어야 할 핵심 요소임을 명확히 보여주었다. 여기서 고종횡비란, 탱크의 길이를 직경으로 나눈 비율이 큰 구조를 의미하며, 대용량 수소 저장 탱크에서 흔히 나타나는 형상적 특성이다. 이러한 탱크에서는 충전 과정에서 발생하는 열이 내부 전체에 균일하게 분포하지 않고, 특정 구간에 국부적으로 집중되는 경향이 나타난다. 인터뷰를 통해 확인한 바에 따르면, 이러한 열적 불균일성은 단순한 해석 모델이나 평균 온도 기준만으로는 충분히 설명되지 않으며, 실제 시스템 설계 시 안전성과 내구성에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 중요한 변수로 작용한다.

③ 고종횡비 수소 저장 탱크에서의 제트 혼합 한계와 설계적 대응 방향

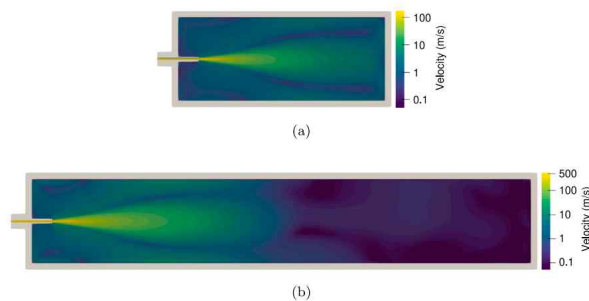


Fig. 2. Velocity magnitude field of (a) low AR (C1) and (b) high AR (C5) tanks. Note the log color scale. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

<그림1> 고중형비 수소 저장 탱크 CFD

교수진이 반복적으로 강조한 바에 따르면, 단일 주입 노즐을 통해 수소가 주입될 경우 형성되는 제트는 탱크 전체 길이에 걸쳐 균일한 혼합을 유도하지 못한다. 수소가 주입 노즐을 통해 탱크 내부로 분사될 때 형성되는 제트 유동은 노즐 근처에서는 비교적 강한 운동량을 유지하며 주변 기체를 끌어당기고 혼합을 유도한다. 그러나 제트의 영향 범위를 평가하는 무차원 거리 x/D —즉, 노즐로부터의 거리 x 를 노즐 직경 D 로 나눈 값을 기준으로 약 $x/D \approx 3$ 수준을 넘어가면, 제트의 운동량은 급격히 감소하여 더 이상 탱크 내부 전체에 충분한 혼합 효과를 제공하지 못하게 된다. 이로 인해 노즐에서 멀리 떨어진 반대편 영역, 이른바 후방 영역 (back zone)은 제트의 직접적인 영향을 받지 못한 채 상대적으로 정체된 유동 상태로 남게 된다. 이러한 구조적 특성은 충전이 진행될수록 중요한 열적 문제로 이어진다. 후방 영역에서는 유동 혼합이 제한되기 때문에, 압축 과정에서 발생하는 열이 효과적으로 분산되지 못하고 국부적으로 축적되는 경향을 보인다. 그 결과 탱크 전체의 평균 온도는 안전 기준 범위 내에 있더라도, 특정 위치에서는 벽면 온도가 상대적으로 빠르게 상승할 수 있다. 이러한 국부적인 온도 상승은 평균 온도만을 기준으로 한 단순 해석이나 단일 영역 모델에서는 포착되기 어렵기 때문에, 설계 단계에서 이를 고려하지 않을 경우 잠재적인 과열 위험을 내포하게 된다.

이와 관련하여 다중 노즐 또는 양방향 주입과 같은 다중 주입 전략의 가능성이 논의되었다. 유체역학적·열역학적 관점에서 볼 때, 여러 위치에서 수소를 주입하거나 노즐을 탱크 내부 깊숙이 삽입하여 제트를 형성할 경우 내부 혼합이 강화되고 공간적 온도 편차가 감소하는 것은 이론적으로 명백하다. 실제로 교수진이 언급한 선행 연구들에서도 이러한 접근이 최대 온도를 낮추고 온도 분포를 균일화하는 데 효과적임이 수치해석을 통해 확인된 바 있다. 그러나 인터뷰에서 도출된 결론은, 이론적 타당성과 실질적 적용 가능성 사이에는 분명한 간극이 존재한다는 점이었다.

수소 저장 탱크는 본질적으로 고압 용기이며, 구조적 안정성과 인증 요건이 매우 엄격하다. 탱크의 원통부에는 구조적 이유로 추가적인 포트나 밸브를 설치하는 것이 사실상 불가능하며, 실질적으로 주입부를 구성할 수 있는 위치는 양 끝단으로 제한된다. 다중 주입 전략을 적용할 경우 밸브, 배관, 씰링, 누설 감지 시스템이 모두 증가하게 되며, 이는 단순한 비용 증가를 넘어 유지보수와 법정 검사 과정에서 상당한 부담으로 작용한다. 특히 고압 수소 시스템에서는 연결부 하나하나가 잠재적 리스크 요소로 간주되며, 특정 탱크에 문제가 발생할 경우 전체 시스템을 해체해야 하는 상황으로 이어질 가능성도 배제할 수 없다. 이러한 현실적 제약 속에서 교수진은 탱크 구조 자체를 변경하는 접근보다는 충전 시간, 압력 상승률, 예냉 조건 (pre-cooling)과 같은 충전 파라미터를 조정하는 것이 훨씬 현실적인 설계 전략이라는 점을 분명히 하였다.

④ 수소 저장 압력 선택이 열 관리와 시스템 복잡성에 미치는 영향

이 논의는 저장 압력 선택 문제와도 직접적으로 연결된다. 현재 유럽의 수소 모빌리티 기준에서 700 bar는 주행 거리 확보가 절대적으로 중요한 승용차를 중심으로 사용되는 압력 등급인 반면, 350 bar는 트럭이나 버스와 같은 대형 운송 수단에서 주로 채택되고 있다. 두 압력 등급의 차이는 단순히 저장 밀도의 문제가 아니라, 충전 과정에서 발생하는 열 거동과 시스템

복잡성 전반에 직접적인 영향을 미친다. 700 bar급 저장 시스템은 동일한 부피에서 더 많은 수소를 저장할 수 있다는 장점이 있으나, 그 대가로 충전 시 압력 상승 폭이 크고 압축 과정에서 발생하는 열량이 급격히 증가한다. 이는 예냉 설비, 복잡한 충전 프로토콜, 엄격한 온도 제어를 필수적으로 요구하며, 시스템 전반의 비용과 운용 난이도를 상승시키는 요인으로 작용한다. 특히 고중형비를 갖는 대형 탱크에서는 앞서 논의한 국부 과열 문제가 더욱 민감해질 수 있어, 고압 충전은 열 관리 측면에서 불리한 조건을 형성한다. 반면 350 bar 수준의 저장 압력은 충전 과정에서의 압력 상승 폭이 상대적으로 완만하며, 그에 따라 압축열 발생량도 크게 줄어든다. 이는 예냉에 대한 의존도를 낮추고, 충전 속도를 조절하는 것만으로도 내부 온도를 안전 범위 내에서 관리할 수 있는 여지를 제공한다. 트램과 같이 차체 공간이 비교적 넉넉한 시스템에서는 동일한 수소 질량을 저장하기 위해 압력을 극단적으로 높일 필요가 없으며, 탱크 체적을 다소 증가시키는 방식으로 충분히 대응할 수 있다. 이러한 접근은 열 관리의 안정성뿐 아니라 구조 설계, 인증 절차, 유지보수 측면에서도 시스템을 단순화하는 효과를 가진다.

교수 및 연구진들은 인터뷰를 통해, 수소 저장 시스템 설계에서 압력 값 자체를 우선적으로 결정하는 방식은 바람직하지 않다고 지적하였다. 대신, 차량이 실제로 요구하는 운행 거리와 소비 전력을 기준으로 필요한 수소 질량을 먼저 산정하고, 그 질량을 가장 안정적이고 효율적으로 저장할 수 있는 압력과 탱크 체적의 조합을 선택하는 것이 합리적인 설계 접근이라는 점을 강조하였다. 이러한 관점에서 볼 때, 대용량·장시간 운행을 전제로 하는 트램 시스템에서는 350 bar급 저장 전략이 열적 안정성, 시스템 신뢰성, 그리고 장기적인 운영 효율 측면에서 보다 적합한 선택으로 평가될 수 있다.

⑤ 예냉 및 외부 냉각의 물리적 한계와 단일 영역 충전 모델의 구조적 문제

또한, 예냉의 역할과 한계를 보다 현실적인 관점에서 다시 살펴보게 되었다. 예냉된 수소를 주입하더라도 후방 영역의 온도 상승이 충분히 억제되지 않는 이유에 대해 교수진은, 수소 탱크 충전 시 발생하는 열 거동의 지배적 원인이 외부 열 유입이나 마찰이 아니라 기체 압축 그 자체에서 발생하는 압축열임을 지적하였다. 예냉은 주입 초기에 노즐 인근 온도를 낮추는 효과는 있으나, 충전이 진행되며 압력이 상승하면 내부 에너지가 증가하고 온도는 다시 상승하게 된다. 특히 제트의 영향이 미치지 않는 후방 영역에서는 예냉의 효과가 근본적인 해결책이 될 수 없다는 점이 EMPA에서 진행한 실험 및 수치해석 결과에서 확인할 수 있었다. (그림2)

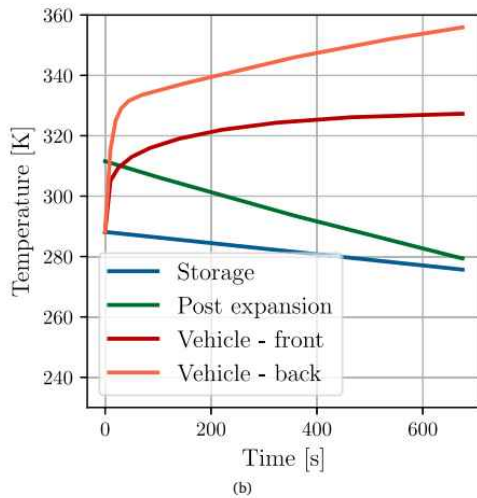
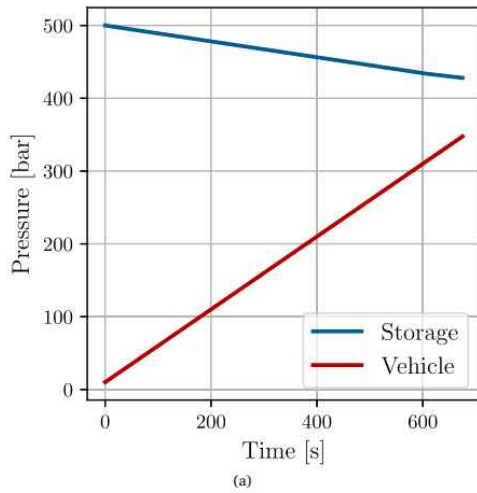


Fig. 6. Evolution of (a) pressure and (b) temperature during a filling process in the standard case.

<그림2> 표준 조건에서 충전 과정 동안의 (a) 압력 변화와 (b) 온도 변화.

외부 냉각의 한계 역시 시간 척도 관점에서 설명되었다. 충전이 매우 빠르게 이루어질 경우 내부에서 생성되는 열을 외벽을 통해 외부로 전달할 시간이 부족하며, 이때 외부 대류 계수를 아무리 높여도 내부-외부 온도 차가 충분히 형성되지 않으면 실질적인 냉각 효과는 제한적이다. 이는 Biot 수 개념으로 설명될 수 있으며, 충전 시간이 충분히 길어질 때에만 외부 냉각이 내부 열 거동에 의미 있는 영향을 미칠 수 있다. 더 나아가 실제 실험 경험을 바탕으로, 수소에 포함된 미량의 수분이 저온 예냉 조건에서 결빙되어 열교환기나 밸브를 막을 수 있다는 실무적 문제 또한 지적되었다. 이는 예냉 시스템이 단순히 비용 문제를 넘어 운전 신뢰성 측면에서도 신중히 검토되어야 함을 시사한다.

서울과 같은 대도시의 여름 환경을 고려한 외부 냉각 가능성에 대해서도 EMPA는 회의적인 입장을 보였다. 외기 온도가 35~40°C에 이르고 자연 대류와 풍속이 제한적인 도심 환경에서는, 탱크 외벽과 환경 사이의 온도 차를 충분히 확보하기 어렵다. 강우나 강제 송풍과 같은 조건이 일시적으로 외벽 온도를 낮출 수는 있으나, 내부에서 발생하는 압축열의 생성 속도를 따

라가기에는 근본적인 한계가 있다. 특히 충전 시간이 짧을 경우 외벽만 국부적으로 냉각되고 내부는 고온 상태를 유지하게 되어, 복합재(CFRP) 셸과 라이너 계면에 열응력이 집중될 가능성도 배제할 수 없다. 이러한 이유로 외부 냉각은 단독 해법이 아니라, 충전 시간 제어와 결합된 보조적 수단으로만 의미를 갖는다는 결론에 이르렀다. 실제로 예냉 온도를 추가로 낮추거나 외부 냉각을 적용하더라도, 후방 영역의 최대 온도는 제한적으로만 감소하며(그림3), 이는 외부 냉각이 근본적 해법이 되기 어렵다는 점을 EMPA와 함께 확인했다.

Table 3
Maximum liner temperature and HEx cooling energy required for different station configurations.

Case description	Max liner temperature [K]	HEx cooling energy [kJ]
Base case - $P_{target} = 700$ bar	373.7	-
Cooling at -30 °C	365.6	842
Cooling at -50 °C	362.5	1214
External HTC = 50 W/m ² /K	371.2	-
External HTC = 200 W/m ² /K	368.3	-

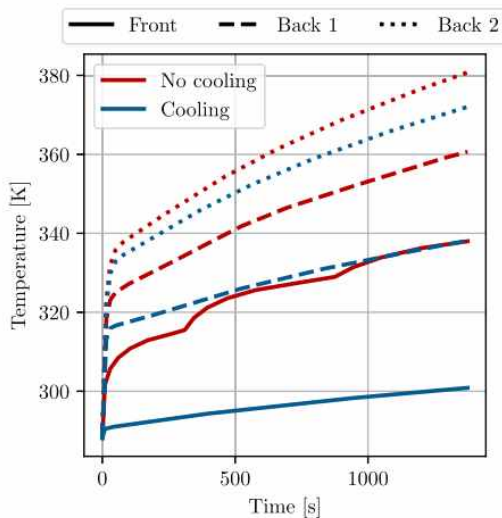


Fig. 10. Temperature evolution in the vehicle tank with and without heat exchanger.

<그림3> 열교환기 적용 여부에 따른 차량 탱크 내부 온도의 시간에 따른 변화.

이러한 열적 불균일성 문제는 기존의 단일 영역(single-zone) 충전 모델의 한계를 더욱 분명히 드러낸다. 현재 수소 차량 및 충전 인프라에서 널리 사용되는 단일 영역 모델은 탱크 내부의 온도와 상태가 공간적으로 균일하다는 가정을 전제로 한다. 그러나 고충량비를 갖는 원통형 수소 저장 탱크에서는 주입 노즐 인근과 노즐 반대편 영역 사이의 유동 혼합 정도가 현저히 다르며, 제트 유동의 영향 범위 또한 제한적이기 때문에 이러한 균일 가정이 실제 충전 과정에서 성립하기 어렵다. 그 결과, 평균 온도 기준으로는 안전 범위에 있는 것으로 판단되더라도, 특정 위치에서는 국부적인 과열이 발생할 수 있으며 이는 단일 영역 모델만으로는 충분히 포착되지 않는다. 평균 온도가 안전 기준 내에 있더라도, 특정 위치의 벽면 온도가 기준을 초과할 가능성이 존재하며, 실제 안전 기준에서 언급되는 85°C 역시 기체 평균 온도가 아니라 탱크 벽면 온도를 기준으로 한다는 점이 중요하다. 이러한 공간적 온도 분포 차이는 탱크 벽면 온도 분포에서도 명확히 나타나며, 전방 영역과 후방 영역의 셸 온도가 현저히 다르게 진화함을 EMPA가 제시해준 <그림4>에서 확인할 수 있다.

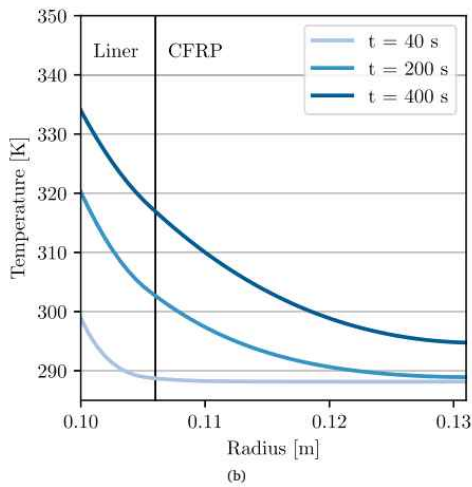
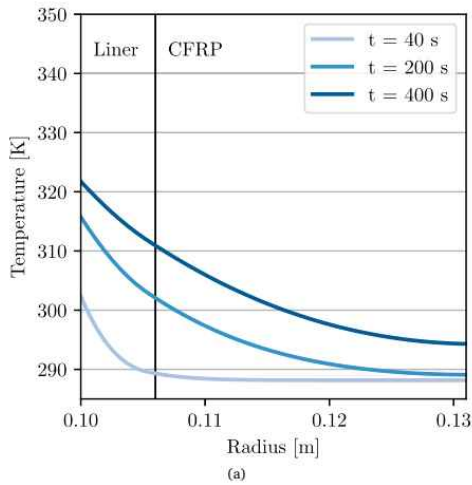


Fig. 8. Evolution of shell temperature in (a) front zone and (b) back zone during a filling process in the standard case. The vertical line shows the boundary between the liner and CFRP materials.

<그림4> 표준 조건에서 충전 과정 동안 (a) 전방 영역과 (b) 후방 영역에서의 탱크 셸 온도 변화. 수직 선은 liner와 CFRP 사이의 경계를 나타낸다.

⑥ 다영역 충전 모델의 가능성과 실제 적용 한계, 저압·저속 충전 전략

이에 대한 대안으로 다영역(multi-zone) 모델이 제시되었다. 다영역 모델은 탱크를 축 방향으로 분할하여 각 영역별 에너지 보존과 열전달을 계산함으로써 국부 최대 온도를 예측할 수 있으며, 교수진의 연구에서도 이러한 접근이 실험 결과와 비교하여 유의미한 예측력을 가진다는 점이 확인되었다. 그러나 동시에, 이를 실제 충전소 제어 알고리즘에 통합하는 과정에서는 기술적 문제보다 인증과 규제의 장벽이 훨씬 크다는 점이 강조되었다. 다양한 형상과 용량을 갖는 수소 저장 탱크, 그리고 서로 다른 충전 속도·초기 조건에 대한 실험 데이터가 아직 충분히 축적되지 않은 상황에서, 다영역 모델을 실제 충전 시스템에 적용하기 위해서는 기존 충전 프로토콜에 포함되지 않은 추가적인 상태 변수와 계산 절차를 충전소 제어 체계에 반영해야 한다. 이러한 변경은 현행 국제 표준에 따른 재인증 절차를 수반하게 되며, 기술적 타당성 외에도 제도적·운영적 부담을 크게 증가시킨다. 이와 같은 이유로 다영역 모델은 현 시점에서는 현장 적용을 위한 표준 해법이라기보다는, 탱크 내부 열 거동을 보다 정밀하게 이해하고 설계

방향을 검증하기 위한 연구 및 설계 지원 수단으로 활용되는 것이 보다 현실적인 위치에 있다.

높은 잔압 조건에서 충전을 시작하는 전략에 대해서는 열역학적으로는 오히려 유리하다는 점이 지적되었다. 초기 압력이 높을수록 최종 압력까지의 압축 비가 감소하고, 그에 따라 생성되는 압축열도 줄어든다. 그러나 교수진은 이러한 접근을 시스템 전체 관점에서 다시 평가해야 한다고 강조하였다. 잔압을 높게 유지하기 위해 더 자주 충전 인프라를 이용할 경우, 수소 공급·저장·운송 과정에서 추가적인 에너지 소비와 탄소 배출이 발생할 수 있으며, 이는 전체 시스템의 환경적 이점을 상쇄할 가능성이 있다.

이러한 일련의 인터뷰 결과는 본 연구에서 제안하는 수소 연료전지-배터리 하이브리드 트램 시스템이 왜 고압·고속 충전보다는 저압·저속 충전을 전제로 한 운영 전략을 채택해야 하는지를 물리적으로 뒷받침한다.

3) TUM

(1) 기관 소개

Technical University of Munich(TUM) School of Engineering and Design 소속 Institute of Automotive Engineering은 전기차, 하이브리드 차량, 상용 및 철도 차량을 대상으로 배터리 시스템 설계, 수명 예측, 진단 기법 및 실제 운용 조건을 고려한 차량 시스템 분석을 수행하는 연구기관이다. 본 면담은 LTO 배터리를 적용한 하이브리드 무가선 트램 시스템을 사례로, 실제 운용 데이터가 제한된 조건에서 배터리 모델링 및 진단 전략을 어떻게 설정하고 적용하는지에 대한 연구진의 접근을 공유받기 위해 진행되었다.

(2) 면담 내용

세미나 및 질의응답을 통해, 실제 운용 데이터가 제한된 조건에서 배터리 열화 모델링과 진단 전략을 어떻게 설정해야 하는지에 대해 실무적 관점에서 깊이 있는 통찰을 얻을 수 있었다. 특히 LTO 배터리를 적용한 하이브리드 무가선 트램 시스템을 사례로, 이론적으로 정교한 방법과 현실적으로 적용 가능한 방법 사이의 간극을 명확히 이해할 수 있었다.

① 데이터 가용성을 고려한 열화 모델 선택

배터리 열화 모델은 적용 대상의 화학계 특성과 확보 가능한 데이터 수준에 크게 의존한다. 물리 기반 모델은 열화 메커니즘에 대한 해석력을 제공하지만, 정확한 파라미터화를 위해서는 해당 화학계에 특화된 실험 데이터가 필수적이다. 그러나 실제 시스템에서는 이러한 데이터 확보가 제한적인 경우가 많으며, LTO 배터리 역시 공개된 실험 데이터가 충분하지 않다.

선행 연구에 따르면, 반경험적(semi-empirical) 모델은 상대적으로 적은 데이터로도 안정적인 예측 성능과 높은 해석 가능성을 제공한다. 따라서 초기 연구 단계에서는 물리 기반 모델이나 딥러닝 모델보다 단순한 반경험적 열화 모델을 적용하는 것이 불확실성을 줄이는 데 효과적인 접근으로 판단된다.

LTO 배터리는 일반적으로 열화 속도가 완만하고 수명이 긴 안정적인 화학계로 알려져 있다. 따라서 배터리 수명 감소 곡선이 파워 법칙(power-law) 형태를 따르고, 노화 속도 결정식에 기반할 경우, 일정 기간 동안은 비교적 신뢰성 있는 수명 예측이 가능할 것으로 판단된다. 다만, 수명 후반부에서 나타나는 급격한 성능 저하는 어떤 모델로도 정확한 예측이 어렵다는 한계가 존재한다.

$$SOH(Q) = 1 - \beta * Q^a$$

<수식 1> 배터리 수명 감소 곡선(Trajectory Model)

$$\beta = \beta_0 + \beta_T \cdot \frac{1}{T} + \beta_{DOD} \cdot DOD + \beta_C \cdot C_{ch} + \beta_{T,DOD} \cdot \frac{DOD}{T} + \beta_{T,C} \cdot \frac{C_{ch}}{T} + \beta_{DOD,C} \cdot (DOD \cdot C_{ch}) + \beta_{T2} \cdot \frac{1}{T^2} + \beta_{DOD2} \cdot DOD^2 + \beta_{C2} \cdot C_{ch}^2$$

<수식 2> 노화 속도 결정 공식 (Degradation-rate Submodel)

$\beta_T \cdot \frac{1}{T}$: 온도 영향

$\beta_{DOD} \cdot DOD$: 방전깊이 영향

$\beta_C \cdot C_{ch}$: 충전속도 영향

교차항 ($\beta_{T,DOD}, \beta_{T,C}, \beta_{DOD,C}$): 상호작용

제곱항 ($\beta_{T2}, \beta_{DOD2}, \beta_{C2}$): 가속도(비선형)항

이는 열화 모델의 목적이 수명 종료 시점을 정밀하게 예측하는 데 있기보다는, 정상 운용 구간에서의 성능 추세를 파악하고 시스템 설계 및 운영 판단을 지원하는 데 있음을 시사한다.

② 실험 설계(Design of Experiments)의 현실적 제약

이론적으로는 D-optimal 설계와 같은 최적 실험 설계 기법을 적용할 경우, 제한된 실험 횟수로도 모델 파라미터를 효율적으로 추정할 수 있다. 그러나 이러한 접근은 사전 정보 또는 최소한의 경험적 데이터가 존재하여, 실험 범위와 변수 공간이 어느 정도 규정된 상황에서 실질적인 의미를 가진다.

본 연구의 경우, 대한민국 내에서 트램 시스템이 아직 상용화되지 않아 실제 운행 데이터나 선행 실험 데이터가 전무한 상황으로, 초기에는 D-optimal 설계를 통해 실험 효율을 극대화할 수 있을 것이라는 가설을 설정하였다. 그러나 이와 같이 기초 데이터가 전혀 확보되지 않은 단계에서는 최적 실험 설계의 효용이 제한적이라는 지적에 따라, D-optimal 설계의 적용 가능성과 한계를 함께 검토하였다.

이에 따라 본 사례에서는, DOE 기반의 정교한 실험 설계보다는 향후 실제 운행 데이터 또는 단계적 실험 데이터 확보를 전제로 한 점진적 모델 보정 전략이 보다 현실적인 대안으로 판단된다.

③ 하이브리드 트램 시스템에서 배터리 진단의 목적

하이브리드 무가선 트램 시스템에서 배터리는 주행 거리 확보보다는 가속 및 제동 시 피크

전력을 보조하는 역할을 수행한다. 이로 인해 배터리 열화는 주행 가능 거리보다 출력 성능 저하로 시스템 성능에 영향을 미친다.

따라서 본 시스템에서의 배터리 진단 목적은 장거리 주행 가능성 평가보다는 출력 안정성 및 시스템 신뢰성 확보에 초점을 두는 것이 합리적이다. 이러한 맥락에서는 복잡한 진단 기법보다, 단순하고 해석 가능한 SOH(State of Health) 지표를 활용하는 전략이 실무적으로 충분하다고 판단된다.

④ LTO 배터리에 대한 ICA/DVA 기반 진단 기법의 한계

ICA(Incremental Capacity Analysis)는 충·방전 과정에서 전압 대비 용량 변화율(dQ/dV)을 분석하여 전극 반응 특성 및 열화에 따른 피크 변화를 추적하는 기법이며, DVA(Differential Voltage Analysis)는 용량에 대한 전압 변화율(dV/dQ)을 통해 전극 간 반응 불균형 및 열화 진행 양상을 평가하는 방법이다.

이러한 기법들은 셀 수준에서는 열화 메커니즘 분석에 널리 활용되고 있으며 이러한 분석 기법이 셀 단위 실험을 통해서도 향후 팩(Pack) 수준 적용 가능성을 판단할 수 있는지를 검토한다. 이는 실제 운용 환경에서 배터리 수명 상태를 진단하고 예측하는 방법론과 직접적으로 연관되며, 유지보수 전략 수립 및 시스템 운영 비용 측면에서도 중요한 의미를 가진다.

그러나 시스템 수준으로 확장할 경우, 측정 데이터의 품질 제약과 다수 셀의 거동이 중첩되면서 발생하는 신호 희석 현상으로 인해 ICA/DVA 기반 해석의 신뢰성이 저하되는 문제가 나타난다. 특히 LTO 배터리는 전압 곡선이 평탄한 특성을 가지므로, ICA/DVA 분석에서 의미 있는 피크를 안정적으로 추출하기가 더욱 어렵다. 이로 인해 미세한 피크 변화를 기반으로 한 수명 예측은 기술적·경제적 측면 모두에서 실용성이 낮으며, 시스템 수준의 수명 진단 기법으로 적용하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다.

교수진과의 면담 이후, 논의된 주제와 관련하여 참고할 만한 연구로 Institute of Automotive Engineering 소속 연구진의 논문인 Spoilt for Choice: User-Centric Choice of Battery Size and Chemistry for Battery-Electric Long-Haul Trucks와 Techno-economic Cell Selection for Battery-Electric Long-Haul Trucks 두 편이 추천되었다. 본 보고서는 해당 논문들의 내용을 검토함으로써, 면담에서 다뤄진 배터리 모델링 및 셀 선택에 관한 논의를 보다 확장된 시스템 관점에서 재고할 수 있었다.

Techno-economic Cell Selection for Battery-Electric Long-Haul Trucks는 장거리 전기 트럭을 대상으로 배터리 셀을 평가한 결과, 셀의 사이클 수명 자체보다는 에너지 밀도, 패키징 효율, 그리고 시스템 수준의 비용 구조가 차량의 경제성을 결정하는 핵심 요소임을 보여준다. 특히 LTO 셀은 우수한 수명 특성을 보이지만, 낮은 에너지 밀도로 인해 장거리 운송 시스템에서는 배터리 부피 및 중량 증가로 인한 제약이 주요 한계로 작용함을 확인하였다. 이는 초기 시스템 설계 단계에서 정밀한 열화 모델이나 고급 진단 기법을 적용하기보다는, 단순화된 수명 가정과 시스템 관점의 분석이 보다 실질적인 의사결정에 기여할 수 있음을 시사한다.

한편, Spoilt for Choice: User-Centric Choice of Battery Size and Chemistry for Battery-Electric Long-Haul Trucks는 배터리 전기 장거리 트럭의 배터리 용량 및 화학계 선택이 실제 운영 비용과 운행 조건에 미치는 영향을 사용자 관점에서 분석한다. 본 연구는 일일 주행 거리, 충전 인프라 수준, 적재량과 같은 운용 조건을 기반으로 최소 요구 배터리 용량을 산정하고, 다양한 충전 파워 환경에서의 비용 경쟁력을 비교하였다. NMC와 LFP 화학계를 비교한 결과, 높은 에너지 밀도로 인해 일부 조건에서는 NMC가 유리할 수 있으나, 대부분의 운용 시나리오에서는 LFP 화학계가 비용 및 운용 편의성 측면에서 더 우수한 선택지가 될 수 있음을 제시한다. 이러한 분석은 전기 트럭 운영자의 실사용 조건을 반영한 배터리 시스템 선택 전략을 제공한다.

이 두 논문은 면담에서 강조된 바와 같이, 복잡한 열화 진단이나 데이터 집약적 모델링보다도 운용 조건과 시스템 제약을 고려한 단순하고 해석 가능한 접근이 초기 설계 단계에서 중요함을 뒷받침하는 사례로 볼 수 있다.

4) MOBIL' IN PULSE 2026

(1) 기관 소개

'MOBIL' IN PULSE 2026'는 프랑스 파리에서 개최되는 국제 모빌리티 컨퍼런스로, 지능형 교통 시스템(ITS)과 스마트 모빌리티를 중심으로 한 최신 기술과 정책, 운영 사례를 공유하는 학회이다. 해당 학회에서는 기술 시연에 그치지 않고, 실제 도시 교통 네트워크에 적용된 사례를 통해 지속 가능한 교통 운영 모델을 공유한다는 점에서 실무적 성격이 강한 것이 특징이다.

(2) 발표 내용

이번 탐사를 통해 확인한 프랑스의 교통·모빌리티 사례들은 공통적으로 차량 기술 자체보다 '운영 방식'과 '에너지·데이터 인프라의 구조화'가 도시 교통의 편리함을 좌우한다는 점을 명확히 보여주었다. 이는 본 팀이 제안하는 수소 연료전지 트램과 LTO 배터리 기반 무가선 트램의 하이브리드 운용 모델을 구체화하는 데 중요한 시사점을 제공한다.

첫 번째 발표에서는 교통 신호 시스템을 설계하는 기업 SWARCO 소속의 Jean-Baptiste가 프랑스에서 운영 중인 지능형 교통시스템(ITS)을 소개하였다. 해당 시스템은 실시간 교통 데이터를 수집·분석하여 버스 운행을 자동으로 최적화하는 구조로, 지역 상황과 시간대에 따라 교통신호 접근 방식과 운행 전략을 유연하게 조정할 수 있다. 특히 데이터 기반 자동 학습 기능을 통해 반복적인 운영 판단을 시스템이 수행하고, 운영 인력은 예외 상황 대응에 집중할 수 있도록 설계되었다는 점이 강조되었다. 이와 같은 방식은 물리적 인프라 설치를 최소화하면서도 통신 네트워크를 100% 활용하여 비용 효율성과 확장성을 동시에 확보한 사례로 제시되었다. 생테티엔 시의 V2I 버스 우선 신호 시스템을 사례로, 전통적인 신호 인프라 구축 방식에서 벗어나 SaaS 기반 운영만으로도 교통 효율을 크게 개선할 수 있음을 보여주었다. 여기서 SaaS 기반 운영은 교차로마다 복잡한 제어 장비를 설치하는 대신에 차량과 신호 상태 데이터를 중앙의 클라우드 시스템에서 통합적으로 관리, 분석하고 원격으로 제어하는 방식을 의미한다. 이를 통해 현장 인프라를 최소화하면서도 신호 우선 운영 모니터링을 실시간으로 수행할 수 있는 운영법이다.

두 번째 발표에서는 기술 컨설턴트 기업 INGEROP 소속의 Elias Seddiki가 지역 급행 서비스를 중심으로 한 모빌리티 통합 모델을 설명하였다. 이 서비스는 단일 교통수단에 국한되지 않고 철도, 버스 등 다양한 교통수단을 연계하는 서비스로, 이미 프랑스 다수의 지역에서 도입되어 운영 중이다. 발표에서는 철도가 대도시와 지역을 연결하는 방사형 구조를 담당하고, 버스가 지역 내 세부 이동을 보완하는 역할을 수행함으로써 전체 교통 네트워크의 효율을 높이는 방식을 소개하였다.

철도는 장거리·방사형 이동을 담당하고, 고속 버스는 철도가 커버하지 못하는 지역을 빠르고 유연하게 연결함으로써 전체 교통망의 균형을 맞춘다. 이 구조는 본 팀이 제안하는 하이브리드 무가선 트램 운용 모델과 직접적으로 연결된다. 서울 도심의 짧은 노선에는 급속 충전이 가능한 LTO 배터리 트램을, 장거리 순환선이나 간선급 노선에는 수소 트램을 배치하는 전략은, 철도와 고속 버스의 역할 분담을 트램 내부에서 재현한 모델이라 볼 수 있다. 중요한 점은, 이러한 분업이 선로를 분리하는 방식이 아니라 동일 인프라 위에서 차종과 에너지 전략만 달리하는 방식으로 구현된다는 점이다.

d. 연구 결과 및 시사점

i. 최종 모델 제안

본 트램 모델은 수소 저장 압력을 350 bar 수준으로 설정하고, 충전 속도보다는 충전 안정성과 열 관리 용이성을 우선시하는 설계 전략을 채택한다. 이는 트램이 승용차와 달리 충분한 차체 공간과 정차 시간을 확보할 수 있다는 점을 적극 활용한 결과이며, 700 bar 이상의 고압 기반 수소 저장 시스템에서 필연적으로 요구되는 고가의 예냉(pre-cooling) 설비 의존도를 낮추는 방향으로 설계되었다.



<그림5> 최종 트램 이미지 (Chat GPT 생성)

(1) 차량 단면 기준 시스템 배치 개념

제안하는 트램의 단면 레이아웃은 기능별·위험도별 분리 배치를 핵심 원칙으로 한다. 수소 저장 탱크와 연료전지 시스템은 차체 상부에 배치하고, 배터리 시스템과 구동 계통은 차체 하부에 배치함으로써 안전성, 열 관리, 유지보수성을 동시에 고려한 구조를 형성한다.

차체 상부에는 Type IV 수소 고압 저장 탱크가 다수 병렬로 배치된다. 각 탱크는 폴리머 라이너와 탄소섬유 강화 복합재(CFRP)로 구성된 구조로, 길이 약 2.0~2.5 m, 직경 약 0.7~0.9 m 수준의 실린더형 형상을 갖는다. 단일 탱크당 약 6~8 kg의 수소를 저장할 수 있으며, 트램 1편성 기준으로 여러 개의 탱크를 조합함으로써 하루 이상 운행이 가능한 수소 저장량을 확보할 수 있다. 수소 저장 탱크를 차체 상부에 배치함으로써, 누출이나 비상 방출 상황에서 수소가 자연스럽게 상부로 확산되어 승객 공간 및 전기 설비로 유입될 가능성을 최소화할 수 있다. 이는 수소의 낮은 분자량과 빠른 부상 확산 특성을 고려한 배치로, 실제 상용 수소 열차에서도 채택되고 있는 안전 설계 원칙이다. 수소 연료전지 스택 및 전력변환 장치는 수소 탱크 인근의 상부 장비실 또는 객차 연결부 상단에 배치된다. 이와 같은 배치는 고압 수소 배관 길이를 최소화하여 누설 위험을 줄이고, 연료전지에서 발생하는 열을 상부에서 직접 방출할 수 있도록 한다. 또한 연료전지를 승객 공간과 분리함으로써 소음 및 유지보수 측면에서도 유리한 구조를 제공한다. 차체 하부에는 LTO 배터리 팩과 구동 인버터, 견인 모터가 배치된다. LTO 배터리는 높은 출력 특성과 긴 수명, 우수한 열적 안정성을 갖추고 있어 반복적인 가속·감속이 잦은 트램 운행 환경에 적합하다. 하부 배치는 무게 중심을 낮춰 주행 안정성을 향상시키며, 충돌 시 차체 프레임에 의해 보호될 수 있다는 구조적 장점도 가진다.

(2) 에너지 흐름 및 전력 관리 구조

제안하는 트램 시스템에서 에너지 흐름은 수소 연료전지를 중심으로 한 DC 기반 전력 아키텍처를 따른다. 수소 저장 탱크에서 공급된 수소는 연료전지 스택으로 전달되어 전기화학 반응을 통해 직류 전력으로 변환된다. 이때 생성되는 전력은 공용 DC 버스를 통해 차량 전체로 분배된다. 연료전지에서 생산된 전력은 우선적으로 트램의 평균 구동 전력을 담당하며, 가속 시와 같은 순간적인 출력 요구 증가 구간에서는 배터리가 추가 전력을 공급한다. 반대로 감속 및 제동 시에는 구동 모터가 발전기 역할을 수행하여 회생 에너지를 전기에너지로 변환하고, 이를 배터리에 저장한다. 이와 같은 구조에서 연료전지는 가능한 한 일정한 출력 범위에서 운전되도록 제어되며, 배터리는 출력 변동을 흡수하는 역할을 수행한다. 이러한 출력 분담 전략은 연료전지의 급격한 부하 변화를 방지하여 시스템 효율을 높이고, 장기적인 열화 및 수명 저하를 최소화하는 데 기여한다.

(3) 연료전지-배터리 출력 분담의 수학적 표현

트램의 순간 요구 전력을 $P_{req}(t)$ 라 할 때, 이는 연료전지 출력 $P_{FC}(t)$ 와 배터리 출력 $P_{bat}(t)$ 의 합으로 표현할 수 있다.

$$P_{req}(t) = P_{FC}(t) + P_{bat}(t)$$

설계 상 연료전지는 트램의 평균 운행 전력 P_{avg} 수준에서 일정하게 운전되도록 설정된다.

$$P_{FC}(t) \approx P_{avg}$$

이에 따라 배터리 출력은 다음과 같이 정의된다.

$$P_{bat}(t) = P_{req}(t) - P_{FC}$$

가속 구간에서는 $P_{bat}(t) > 0$ 으로 배터리가 보조 출력을 제공하며, 정속 주행 구간에서는 $P_{bat} \approx 0$ 에 가깝다. 감속 구간에서는 $P_{bat}(t) < 0$ 이 되어 회생 제동 에너지가 배터리에 저장된다. 이러한 출력 분담 구조는 연료전지를 ‘에너지 생산 장치’, 배터리를 ‘출력 완충 및 에너지 회수 장치’로 명확히 역할 분리함으로써 전체 시스템의 신뢰성과 효율을 동시에 확보한다.

(4) 정량적 에너지 소비 및 수소 요구량 분석

서울-인천 구간을 포함한 수도권 운행 시나리오를 고려할 때, 중형급 트램의 평균 에너지 소비량은 약 6~8 kWh/km 수준으로 가정할 수 있다. 서울-인천 왕복 거리 약 80 km를 기준으로 하면, 하루 운행에 필요한 총 에너지는 다음과 같이 계산된다.

$$E_{day} = 80 \times 7 = 560 \text{ kWh/day}$$

연료전지 시스템 효율을 약 55%, 수소의 저위발열량(LHV)을 33.3 kWh/kg으로 가정할 경우, 하루 운행에 필요한 수소 질량은 다음과 같다.

$$m_{H_2} = \frac{E_{day}}{\eta_{FC} \cdot LHV} = \frac{560}{0.55 \times 33.3} \approx 30.5 \text{ kg}$$

이는 350 bar Type IV 탱크 여러 개를 병렬 배치함으로써 충분히 충족 가능한 수준이며, 하루 이상 운행 후 야간에 저속 충전이 가능한 운영 전략을 가능하게 한다.

(5) 시스템 설계의 미래지향적 가치

본 연구에서 제안하는 무가선 수소 트램 모델은 기술적, 환경적, 운영적 측면에서 높은 미래 가치를 지닌다. 주행 중 이산화탄소, 질소산화물, 미세먼지 배출이 전혀 없으며, 소음 또한 기존 내연기관 기반 교통수단 대비 현저히 낮다. 전차선 설치가 불필요하므로 도시 경관 훼손을 줄일 수 있고, 노선 확장 및 변경이 용이하다.

또한 본 시스템은 이미 상용화된 수소 열차(예: Alstom Coradia iLint)와 구조적·기능적으로 유사한 설계 철학을 따르고 있어, 실험적 개념에 머무르지 않고 실제 도입 가능성이 높은 모델로 평가할 수 있다. 이러한 점에서 제안하는 트램 시스템은 수도권 통근·통학 축을 포함한 미래 도시 교통의 유력한 친환경 대안으로 기능할 수 있을 것이다.

ii. 탐사의 의의

이번 탐사의 핵심적인 의의는 수소 연료전지 기반 무가선 트램이라는 개념을 하나의 기술 아이디어로 다루는 데 그치지 않고, 실제 도시 교통 시스템에 적용 가능한지 여부를 여러 단계에서 점검했다는 점에 있다. 에너지 저장과 충전 물리, 차량 내부 에너지 관리, 산업적 적용 가능성, 그리고 도시 교통 운영 구조를 차례로 살펴보면, 수소 기반 대중교통이 어느 지점까지 현실적인 선택지가 될 수 있는지를 구체적으로 확인하는 과정이었다. 이 과정은 단순히 “수소 트램이 가능한가”라는 질문보다는, “어떤 조건에서 어떤 방식으로 적용하는 것이 합리적인가”를 따지는 데 초점을 두었다.

EMPA에서의 논의는 이러한 검토의 출발점을 제공하였다. EMPA 연구진은 수소 저장 압력과 충전 과정에서의 열 거동을 중심으로, 트램과 같은 대형 대중교통 수단이 승용차와는 전혀 다른 설계 조건을 가진다는 점을 강조하였다. 차체 공간이 충분하고 정차 시간이 확보되는 시스템에서는 주행 거리 확보를 위해 700 bar급 고압 저장을 선택할 필요가 없으며, 350 bar 수준의 저장 압력이 열 관리와 안전성, 시스템 복잡성 측면에서 더 적절하다는 점이 물리적으로 설명되었다. 충전 과정에서 발생하는 압축열, 예냉 설비에 대한 의존성, 반복 충전에 따른 열 부담을 고려할 때, 빠른 충전보다는 안정적인 충전을 전제로 한 운영 방식이 트램 시스템에 더 적합하다는 인식이 명확해졌다. 이를 통해 수소 트램 설계의 핵심이 고출력이나 충전 속도가 아니라, 장기 운용을 고려한 열 관리와 시스템 수명이라는 점이 분명해졌다.

TUM에서의 논의는 하이브리드 구조에서 배터리가 차지하는 역할을 보다 명확히 구분하는 계기가 되었다. TUM 연구진은 수소 연료전지-배터리 조합이 순수 배터리 전기차와 동일한 기준으로 해석되어서는 안 된다는 점을 지적하였다. 이 구조에서 배터리는 주행 거리를 결정하는 요소가 아니라, 연료전지 출력의 변동을 완화하고 가속과 회생 제동을 담당하는 역할을 수행한다. 이에 따라 배터리 상태 진단 역시 잔존 용량을 정밀하게 추정하는 문제라기보다는, 필요한 순간에 요구 출력을 안정적으로 제공할 수 있는지를 확인하는 방향으로 접근해야 함이 강조되었다. 특히 LTO 배터리의 특성상 전압 미분 기반 진단 기법이 실제 운용 환경에 적합하지 않다는 점은, 단순한 에너지 기반 지표와 운행 조건을 연계한 관리 방식이 오히려 현실적이라는 판단으로 이어졌다. 이는 차량 제어와 유지보수 전략을 과도하게 복잡하게 만들지 않으면서도 안정성을 확보하는 데 중요한 기준이 되었다.

Air Liquide와의 인터뷰는 이러한 기술적 논의를 실제 산업 환경으로 옮겨 놓는 역할을 했다. Air Liquide는 수소 저장 탱크와 연료전지, 충전 설비가 이미 검증된 기술이라는 점을 전제로, 문제의 초점이 기술 개발이 아니라 적용 대상과 사업 구조에 있다는 점을 분명히 하였다. 수소 트램은 글로벌 시장에서 일반적인 해법이라기보다는 특정 조건에서만 성립 가능한 선택지에 가깝고, 도심 단거리 교통에서는 배터리 기반 시스템이 여전히 유리하다는 점도 명확히 언급되었다. 반면, 장거리 운행이나 광역 통근 노선과 같이 배터리만으로는 부담이 커지는 구간에서는 수소 연료전지가 충분히 경쟁력을 가질 수 있다는 점이 강조되었다. 이러한 논의는 수소 트램을 하나의 해답으로 고정하기보다는, Extended Bus나 광역 노선과 같은 다른 형태의 대용량 무가선 교통수단과 함께 검토해야 한다는 방향으로 연구 범위를 확장하는 계기가 되었다.

파리에서 접한 교통 관련 컨퍼런스와 사례들은 앞선 기술 및 산업 논의를 도시 운영 차원에서 다시 바라보게 했다. 프랑스의 사례에서는 차량 기술 자체보다 운행 방식이 시민의 체감 편의성과 운영 효율을 좌우한다는 점이 반복적으로 확인되었다. 이는 수소 트램, 배터리 트램, Extended Bus와 같은 서로 다른 차량 유형이 각각 분리된 시스템으로 운영되기보다는, 동일한 데이터와 운영 플랫폼 위에서 통합적으로 관리되어야 한다는 결론으로 이어졌다.

정리하면, 이번 탐사는 수소 기반 대중교통을 단일 기술 아이디어로 검증하는 데서 출발해, 물리적 타당성, 에너지 저장 장치의 역할, 산업적 적용 가능성, 그리고 도시 교통 운영 구조까지 단계적으로 연결해 살펴보았다는 점에서 의미를 가진다. 이를 통해 수소 트램은 모든 상황

에 적용 가능한 해법이 아니라, 특정 조건과 역할을 전제로 할 때에만 현실적인 선택지가 될 수 있으며, 다른 무가선 대중교통 수단과 함께 혼합적으로 구성될 때 가장 설득력을 가진다는 점이 분명해졌다.

iii. 정책적 제언

이번 탐사를 통해 확인된 정책적 핵심은, 수소 기반 대중교통의 도입이 특정 차량을 채택할 것인가의 문제가 아니라, 서로 다른 에너지 기술이 어떤 역할과 조건에서 공공 교통 체계에 편입될 수 있는지를 재정의하는 문제라는 점이다. 수소 연료전지는 독립적인 해법이 아니라, 에너지 저장 방식, 운행 거리와 빈도, 차량 운용 구조, 충전 인프라의 형태와 결합될 때에만 의미를 갖는 기술 요소로 작동한다. 이에 따라 정책 논의의 중심 역시 ‘수소 트램을 도입할 것인가’라는 단순한 선택에서 벗어나, 수소 에너지가 공공 교통 시스템 내에서 어떤 영역을 담당하는 것이 합리적인지에 대한 구조적 질문으로 이동할 필요가 있다. EMPA, TUM, Air Liquide와의 인터뷰, 그리고 프랑스 교통 운영 사례 분석은 이러한 관점 전환의 근거를 제공하였다.

탐사 전반에서 공통적으로 확인된 점은, 단일 에너지원에 기반한 교통 정책은 기술적·산업적 측면 모두에서 지속되기 어렵다는 사실이다. EMPA와 TUM은 기술적 제약과 운용 조건을, Air Liquide는 시장과 산업 구조를, 프랑스 사례는 실제 운영 환경을 통해 이를 뒷받침하였다. 수소 연료전지는 장거리 운행, 차량 중량이 큰 조건, 반복 충전이 어려운 노선과 같이 배터리 시스템이 부담을 가지는 영역에서 분명한 장점을 가진다. 반면 도심 단거리 구간이나 정차 빈도가 높은 노선에서는 배터리 전기 시스템이 에너지 효율과 비용 측면에서 더 적합하다. 이러한 특성 차이를 고려하면, 정책은 특정 기술을 확대하는 방식이 아니라, 노선 특성과 운행 조건에 따라 서로 다른 에너지 기술이 선택될 수 있도록 제도적 여지를 마련하는 방향으로 설계되어야 한다.

이와 연결되는 중요한 정책 과제는 대형 대중교통 수단을 대상으로 한 수소 저장 기준의 재정비이다. EMPA와 Air Liquide의 논의에 따르면, 트램이나 대형 버스와 같이 차체 공간이 충분하고 운행 패턴이 고정된 차량에서는 350 bar급 수소 저장이 열 관리와 시스템 안정성 측면에서 가장 현실적인 선택이다. 그럼에도 불구하고 현재의 수소 관련 안전 기준과 인증 절차는 주로 승용차용 700 bar 시스템을 기준으로 형성되어 있어, 대중교통 적용 시 필요 이상의 기술적 요구와 행정적 부담을 발생시키고 있다. 대중교통 전용 수소 저장 기준을 별도로 설정하고, 350 bar급 Type IV 탱크를 전제로 한 안전·충전 규격을 명확히 하는 것은 예냉 설비 의무화나 과도한 안전 계수 적용 문제를 완화하는 데 직접적인 효과를 가질 수 있다. 이는 기술 개발이 아니라, 이미 검증된 기술을 어떤 기준으로 받아들이느냐의 문제에 가깝다.

배터리 관리 기준 역시 동일한 맥락에서 재검토가 필요하다. TUM의 분석이 보여주듯, 수소 연료전지-배터리 하이브리드 시스템에서 배터리는 주행 거리 확보를 위한 핵심 저장 장치가 아니라, 출력 변동을 완화하고 회생 제동 에너지를 흡수하는 역할을 수행한다. 특히 LTO 배터리는 높은 안전성과 긴 수명을 갖지만, 현행 제도에서는 이를 순수 배터리 전기차에 사용되는 배터리와 동일하게 평가하는 경우가 많다. 여기서 동일한 기준이란, 정격 용량 대비 잔존

용량을 중심으로 한 수명 평가나, 고정된 충방전 사이클 수를 기준으로 한 관리 방식이다. 그러나 하이브리드 대중교통 시스템에서는 배터리가 실제 운행 조건에서 요구되는 출력과 에너지를 안정적으로 제공할 수 있는지가 더 중요한 판단 기준이 된다. 따라서 배터리 상태를 에너지 및 출력 가용성 중심으로 정의하고, 운행 조건과 연계된 관리 방식을 허용하는 방향이 기술적 현실과 보다 잘 부합한다.

산업적 관점에서 Air Liquide가 제시한 시사점은 수소 트램의 적용 범위를 보다 명확히 구분할 필요성을 보여준다. 수소 트램을 도심 단거리 교통의 대안으로 설정하는 접근은 비용과 인프라 측면에서 설득력이 낮은 반면, 광역 통근·통학 노선이나 도심과 외곽을 연결하는 간선축에서는 수소 기반 시스템의 장점이 상대적으로 분명하게 드러난다. 이에 따라 도심 내부 고빈도 노선에는 배터리 기반 무가선 트램이나 대용량 전기 버스를, 장거리 반복 운행이 요구되는 노선에는 수소 연료전지 기반 Extended Bus나 광역형 트램을 병행하는 구조가 정책적으로 검토될 필요가 있다. 이는 트램 모델을 대체하거나 부정하는 접근이 아니라, 도입 초기의 기술적·재정적 부담을 분산시키는 방식에 가깝다.

수소 충전 인프라에 대한 사회적 수용성 문제 역시 정책 설계에서 분리될 수 없는 요소이다. Air Liquide와 프랑스 사례에서 확인된 바와 같이, 도심 공공 공간에 설치되는 수소 충전 설비는 기술적 안전성과 별개로 높은 심리적 저항과 행정적 갈등을 수반한다. 반면, 버스나 트램 차고지와 같이 운영자 전용 공간에서는 안전 관리와 규제 대응이 상대적으로 용이하며, 주민 수용성 문제도 크게 완화된다. 따라서 초기 도입 단계에서는 불특정 다수가 접근하는 공공 충전소보다는, 차고지 중심의 관리형 충전 인프라를 우선적으로 구축하는 전략이 현실적이다.

마지막으로, 파리 컨퍼런스 사례는 수소 대중교통 정책이 차량 도입에만 국한될 수 없음을 분명히 보여준다. 차량의 에너지원이 다르더라도, 운행 관리, 신호 우선 제어, 정비 계획과 같은 운영 요소는 동일한 체계 안에서 관리될 수 있다. 정책적으로는 차량 기술의 차이보다 실제 운행 성과와 시민 체감 개선을 평가 기준으로 삼는 접근이 요구된다.

정리하면, 이번 탐사가 제시하는 정책적 결론은 수소 트램을 도입할지 여부가 아니라, 수소 에너지를 공공 교통 시스템 안에서 어떤 역할로 제한적으로 사용해야 하는가에 대한 질문으로 논의를 전환해야 한다는 점에 있다. EMPA의 물리적 분석, TUM의 운용 중심 진단 관점, Air Liquide의 산업적 판단, 그리고 프랑스 사례의 운영 경험은 모두 수소 기반 대중교통이 단일 기술 중심이 아니라, 조건별로 역할이 구분된 혼합 구조 속에서만 현실성을 가질 수 있음을 보여준다.

iv. 연구의 한계점

이번 탐사는 수소 연료전지 기반 무가선 대중교통 시스템을 중심으로 기술적 가능성, 에너지 저장 및 진단 전략, 산업적 적용 조건, 도시 교통 운영 구조를 단계적으로 검토하였다. 다만 연구의 성격상 초기 개념 설계와 정책·산업적 검증에 초점을 두고 진행되었기 때문에, 개별 요소를 정량적으로 완결하는 단계까지는 도달하지 못했다. 여기서는 이를 단순한 미비점으로 나열하기보다는, 향후 연구가 구체적으로 확장되어야 할 방향으로 정리한다.

1) 수소 저장·충전 열 관리 분석의 범위와 한계

우선 수소 저장과 충전 과정에서의 열 관리에 대해서는 개념적·물리적 타당성 수준의 검토에 머물렀다는 한계가 존재한다. 350 bar 저압 수소 저장 전략이 트램과 같은 대형 대중교통 수단에 적합하다는 점은 충분히 확인되었으나, 충전 속도, 탱크 배열, 주변 온도 조건에 따라 탱크 내부 온도가 시간에 따라 어떻게 변화하는지에 대한 정량적 모델링까지는 도달하지 못했다. 특히 다수의 수소 탱크가 병렬로 배치되는 경우 발생할 수 있는 열 간섭 효과나, 반복적인 충전과 방전 과정에서 누적되는 열 사이클이 라이너 및 복합재 구조에 미치는 영향은 향후 반드시 검증이 필요한 요소로 남아 있다.

2) 정밀 열·유동 해석 접근의 현실적 제약

EMPA 교수 및 연구진은 인터뷰 과정에서, 자신들이 사용 중인 열·유동 해석 코드와 모델링 프레임워크를 기반으로 보다 정밀한 분석이 가능하다는 점을 언급하였으며, 연구 차원에서는 이러한 접근이 가장 이상적인 검증 방법임을 분명히 하였다. 그러나 실제 연구 수행 여건을 고려할 때, 해당 코드를 전달받아 적용하기에는 시간적 제약이 매우 컸으며, 무엇보다 실제 트램 정거장 간격, 충전 시간, 운행 패턴과 같은 핵심 입력 데이터를 확보하는 것이 현실적으로 불가능한 상황이었다. 국내에서는 아직 대전 트램을 포함한 수소·무가선 트램이 실질적으로 운행되지 않고 있으며, 관련 데이터 역시 일반 연구자나 학생 연구팀이 접근하기 어려운 수준에 머물러 있다. 이러한 이유로 본 탐사에서는 정밀 수치 해석이나 실험 기반 검증보다는, 물리 현상에 대한 이해와 설계 방향 설정에 초점을 맞출 수밖에 없었다는 한계가 존재한다.

3) 예냉 전략과 충전 시나리오 검증의 필요성

본 탐사에서는 트램의 충분한 정차 시간과 저속 충전을 전제로 예냉 의존도를 낮출 수 있다는 설계 방향을 제시하였으나, 이는 정량적 검증보다는 개념적·물리적 판단에 기반한 결론이다. 향후에는 실제 노선 조건과 충전 시나리오를 반영한 CFD 기반 열해석이나 축소 실험을 통해, 충전 과정에서의 최대 온도 분포와 안전 마진을 수치적으로 제시하는 연구가 필요하다. 이는 수소 트램 및 수소 기반 대중교통 시스템의 안전성 논의를 보다 실증적인 단계로 발전시키기 위한 필수적인 후속 과제로 남는다.

4) 복합 충전 거점 개념 검토와 실증 데이터 부족

또한 본 탐사에서는 수소 트램을 포함한 다목적 모빌리티 환경을 고려하여, 전기와 수소를 동시에 취급하는 복합 충전 거점의 가능성에 대해서도 논의를 진행하였다. 이 과정에서 확인된 중요한 점은, 이러한 복합 충전 거점이 단순히 하나의 공간에 전기 충전 설비와 수소 충전 설비를 병렬로 배치하는 문제로 환원될 수 없다는 사실이었다. 특히 수소 연료전지 트램과 수소 승용차를 동일 거점에서 동시에 충전하는 시나리오를 가정할 경우, 저장 압력 수준(350 bar와 700 bar), 탱크 용량, 요구 충전 시간, 그리고 충전 과정에서의 열 관리 조건이 본질적으로 상이하게 작용한다. 이로 인해 차량 유형별로 서로 다른 충전 프로토콜이 요구되며, 이들

시스템이 하나의 거점 내에서 사고 없이 안정적으로 공존하기 위해서는 매우 정교한 제어 체계와 사전 검증이 필수적이라는 점이 지적되었다.

면담을 통해 연구진들은 현재 이러한 다중 압력·다중 차량 조건을 전제로 한 통합 충전 실험 데이터와 실제 운영 사례가 아직 충분히 축적되지 않았다는 점을 분명히 하였다. 다시 말해, 복합 충전 거점이라는 개념 자체는 정책적·도시적 관점에서 충분히 매력적인 방향성을 가지지만, 이를 뒷받침할 수 있는 실증 데이터와 표준화된 운영 경험은 아직 초기 단계에 머물러 있다는 것이다. 본 탐사에서 이러한 문제의식을 바탕으로 관련 질의와 검토를 진행하였으나, 현 시점에서는 구체적인 설계 기준이나 정량적 안전성 평가까지 제시하기에는 한계가 있음을 확인하였다. 이로 인해 복합 충전 거점에 대한 논의는 본 연구에서 개념적 검토와 문제 정의 수준에 머물 수밖에 없었으며, 향후 실증 사업과 대규모 운영 데이터를 통해 단계적으로 검증되어야 할 과제로 남는다.

5) 연료전지 장기 거동과 통합 수명 관리 관점의 한계

연료전지 시스템의 장기 거동과 실제 운영 데이터의 부재는 이번 탐사의 범위를 규정한 가장 중요한 제약 조건이었다. 배터리(LTO)에 대해서는 운용 중심의 수명 진단 접근을 비교적 구체적으로 검토할 수 있었던 반면, 연료전지 스택의 성능 저하를 정량적으로 모델링하는 단계까지는 도달하지 못했다. 대중교통 시스템에서는 출력 변동, 반복적인 시동·정지, 습도 및 열 관리 조건이 누적되며 연료전지 성능에 영향을 미칠 수 있고, 이는 장기 운용 시 전체 시스템 효율과 직결된다. 본 탐사에서는 연료전지를 가능한 한 일정 출력 영역에서 운전함으로써 열화 속도를 완화할 수 있다는 운용 방향을 제시하는 데 그쳤으며, 출력 변동 허용 범위나 스택 열화가 시스템 성능에 미치는 영향은 향후 실증 데이터를 기반으로 보다 구체화되어야 할 과제로 남는다. 이와 같은 이유로, 연료전지와 배터리를 개별 요소로 분리해 다루기보다는 하나의 통합 수명 관리 관점에서 함께 해석하는 접근이 필요함을 확인하는 수준에 머물렀다.

III. 결론

i. 탐사 및 연구 요약

본 연구는 서울과 같은 고밀도 대도시 환경에서 무가선 트램을 실질적으로 상용화하기 위한 방안을 모색하기 위해, 수소 연료전지와 LTO 배터리·ESS를 결합한 하이브리드 연계형 무가선 트램 운용 모델을 제안하고 그 타당성을 검토하였다. 기존의 트램 및 친환경 대중교통 연구가 단일 에너지원 기반의 기술적 가능성에 초점을 맞추어 왔다면, 본 연구는 노선 특성, 에너지 요구 특성, 시민 수용성, 정책, 운영 구조까지 포괄하는 시스템 관점에서 접근하고자 하였다.

해외 사례 탐사에 앞서 수행한 사전 이론 검토를 통해, 트램 노선을 도심 구간과 순환·간선 구간으로 구분하고, 각 구간의 운행 패턴에 따라 요구되는 에너지 특성이 상이함을 확인하였다. 도심 구간은 정차와 가속이 빈번하여 순간 피크 전력이 반복적으로 요구되는 반면, 순환·간선 구간은 장시간 운행에 따른 지속 출력과 에너지 밀도가 중요하게 작용한다. 이러한 차이는 단일 구동 방식으로 모든 노선을 운영할 경우 비효율이 발생할 수 있음을 시사하며, 노선

특성에 따른 구동 방식 분리 전략의 필요성으로 이어졌다.

이에 도심 구간에는 고출력·급속 충전에 유리한 LTO 배터리 기반 무가선 트램, 순환·간선 구간에는 수소 연료전지-LTO 배터리 하이브리드 트램을 적용하는 이원화된 운용 모델을 하나의 합리적 대안으로 제시하였다.

더불어, 시민 인식 조사를 통해 서울형 무가선 트램 도입에 대한 사회적 수용성을 정량적으로 분석하였다. 설문 결과, 초기에는 트램 및 수소 기반 교통수단에 대해 중립적이거나 회의적인 인식이 다수 존재했으나, 연구팀이 제안한 하이브리드 구동 개념과 기술적 보완책을 설명한 이후 찬성 비율이 유의미하게 증가하였다. 이는 단순한 교통수단 도입 제안보다, 구체적인 기술적 구조와 안전·운영 전략을 함께 제시하는 것이 시민 신뢰 형성에 중요한 역할을 한다는 점을 보여준다.

ii. 연구의 의의

본 탐사의 가장 중요한 의의는, 수소 기반 무가선 트램이라는 개념을 개별 기술의 가능성 검토 수준에서 도시 시스템 단위의 문제로 확장하여 검증하였다는 점에 있다. EMPA, TUM, Air Liquide와의 논의, 그리고 프랑스 컨퍼런스에서 교통 사례 분석을 통해 본 연구는 에너지 물리, 배터리 진단, 산업적 현실, 도시 운영 구조를 단계적으로 연결하며 하나의 통합 프레임워크로 정리하였다.

이 연구는 수소 연료전지와 배터리(LTO)를 기반으로 하이브리드 무가선 트램 운용 모델을 제안하는 데 그 목적이 있으나, 탐사 과정에서 해외 사례 분석과 현장 인터뷰를 통해 확인한 바와 같이 교통 기술이 이미 일정 수준 이상의 단계에 도달해 있음에도 불구하고, 실제 도입 여부를 결정짓는 요인은 기술 그 자체가 아니라 운영 복잡성, 인프라 구축 비용, 제도적 수용성에 있음을 확인하였다. 특히 단일 에너지원 기반 교통 시스템은 초기 설계 단계에서는 단순히 보이지만, 장기 운영 과정에서 에너지 공급 불안정, 수요 변동 대응 한계, 비상 상황 대응 부족이라는 구조적 취약성을 드러낸다. 반대로 복수 에너지원 기반 시스템은 이론적으로는 안정적이지만, 에너지 관리 체계가 복잡해지고 운영 주체 간 역할 분담이 명확하지 않으면 오히려 비효율을 초래할 수 있다는 점 역시 이번 탐사를 통해 인식하게 된 중요한 한계이다. 또한 무가선 트램 도입 논의는 종종 ‘가선이 없는 친환경 교통수단’이라는 이미지에 집중되지만, 실제로는 충전 인프라의 위치 선정, 정차 시간 확보, 노선별 에너지 수요 예측과 같은 세부 운영 요소가 상용화의 핵심 변수로 작용한다. 이는 차량 기술만을 중심으로 한 접근이 현실적인 해법이 될 수 없음을 의미한다.

이와 같은 한계 인식은 연구의 방향을 단순한 기술 조합 제안에서, 에너지/운영/도시 기능을 통합적으로 고려하는 시스템 설계 문제로 확장시키는 계기가 되었다. 따라서, 모든 문제를 해결하는 완성된 해답을 제시하기보다는, 서울이라는 고밀도 도시 환경에서 무가선 트램을 실질적으로 적용하기 위해 반드시 고려해야 할 구조적 쟁점을 드러내고, 그에 대한 합리적인 설계 방향을 제안하는 데 의의를 둔다.

기존 무가선 트램 및 친환경 교통수단 도입 논의는 대부분 단일 에너지원에 기반해 왔다. 전기 배터리 기반 트램은 충전 시간과 주행 거리의 제약을 받고, 수소 연료전지 트램은 충전 인프라 구축 비용과 입지 확보의 어려움이 뒤따른다. 이러한 접근 방식은 특정 노선이나 도시 조건에서는 기술적으로 가능하더라도, 서울과 같은 고밀도 대도시 전반에 적용하기에는 한계를 가진다. 본 연구는 이러한 한계를 해결하기 위해 LTO 배터리와 수소 연료 전지 하이브리드 트램 모델을 제안한다. 이를 통해 각 에너지원의 장점을 극대화하고 단점을 상호 보완한다. 이는 에너지 선택을 단일 해답으로 고정하지 않고, 노선 특성과 운행 조건에 따라 최적의 에너지를 선택하는 유연한 운영 전략을 제시한다는 점에서 의의를 가진다. 특히 무가선 방식이므로, 도시 경관 훼손을 최소화하고 초기 구축 비용을 크게 낮출 수 있는 현실적인 장점이다.

iii. 후속 연구 방향

미처 연구하지 못했던 연구의 한계점을 바탕으로, 수소 연료전지와 배터리 하이브리드 기술을 트램에 한정하지 않고 Extended Bus와 같은 보다 현실적인 교통수단으로 확장 적용하는 모델을 함께 제안한다. Extended Bus 모델은 레일 인프라 구축이 필요 없고, 기존 도로망과 차고지를 활용할 수 있어 초기 도입 리스크가 낮으며, 수소 연료전지가 가지는 장거리·고중량 운행의 장점을 효과적으로 활용할 수 있다. 특히 서울과 수도권을 잇는 광역 출퇴근 노선이나 신도시 연결 노선과 같이 인구 이동 수요가 큰 구간에서는, 트램보다 Extended Bus가 정책·재정·시간 측면에서 상용화에 더 근접한 대안이 될 가능성이 높다. 이러한 접근은 트램 모델을 대체하는 것이 아니라, 동일한 하이브리드 에너지·운영 프레임워크를 서로 다른 교통수단에 단계적으로 적용하는 전략으로 이해될 수 있다.

또한 한국철도기술연구원(KRRI)의 자료에 따르면, 현재 국내 도입이 검토 중인 트램은 모두 상부 가선이 없는 무가선 방식을 전제로 하며, 주요 구동 후보 기술로는 배터리, 슈퍼캐퍼시터, 수소 연료전지의 세 가지가 제시되고 있다. 이는 국내 트램 정책이 이미 특정 기술을 단일 해답으로 상정하기보다는, 도시 미관과 유지비, 운행 특성을 고려한 방향으로 전개되고 있음을 보여준다. 다시 말해, 향후 국내 트램 및 무가선 대중교통의 발전 방향은 특정 에너지원의 우위 경쟁이 아니라, 노선 특성에 따른 에너지 저장·공급 방식의 혼합 적용에 있을 가능성이 높다. 이러한 맥락에서, 배터리·슈퍼캐퍼시터·수소 연료전지를 경쟁 기술로 비교하는 데서 나아가, 동일한 도시 교통 네트워크 내에서 이들이 어떻게 역할을 분담하고 상호보완할 수 있는지를 규명하는 방향으로 확장될 필요가 있다.

따라서 향후 연구에서는 수소 트램의 실현 가능성에 대한 근본적인 질문보다는, 어떤 노선 조건과 운행 환경에서 수소 기반 무가선 대중교통이 기존 교통수단보다 실질적인 이점을 가지는지를 구체적으로 분석할 필요가 있다. 이는 기술적 가능성 검증을 넘어, 실제 정책 적용과 상용화를 판단하기 위한 필수적인 검토 단계이며, 본 연구에서 제안한 하이브리드형 교통수단으로의 접근을 보다 현실적인 도시 교통 모델로 구체화하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

IV. 참고문헌

- i. Lin Fu, Yu Chen, Shijuan Li, Mingshun Zhang, Shan Jiang, Xiaoyuan Chen, Boyang Shen (2026), 「Hydrogen-electricity hybrid-energy system with superconducting-battery energy storage for urban rail transit: design, case study, and techno-economic analysis」, 『Applied Energy』, Vol. 405, pp. 119–132.
- ii. Arthur Couteau, Henry Raymond Alvarez, Patrick Jenny, Panayotis Dimopoulos Eggenschwiler (2025). 「Thermal and heat transfer dynamics in high-pressure, high aspect ratio hydrogen tank filling processes」, 『International Journal of Hydrogen Energy』, Vol. 194, pp. 2-8.
- iii. Arthur Couteau, Panayotis Dimopoulos Eggenschwiler, Patrick Jenny (2025), 「Flow patterns and heat transfer characterization during large aspect ratio hydrogen tank filling」, 『International Journal of Hydrogen Energy』, Vol. 131, pp. 27-31.
- iv. al-Ezee, Hussain & Tennakoon, Sarath & Taylor, I & Scheidecker, Daniel, Schweickart, J. (2018), 「An On-Board Battery System for Catenary Free Operation of a Tram」, Vol. 5, pp. 1-3.
- v. Dubarry, M., Devie, A., Liaw, B. Y., Stein, M. (2017), 「Battery pack diagnostics for electric vehicles: Transfer of differential voltage and incremental capacity analysis from cell to vehicle level」, 『Journal of Power Sources』, Vol. 360, pp. 59–70.
- vi. Attia, P. M., Grover, A., Jin, N., Severson, K. A., Markov, T. M., Liao, Y. H., Chen, H., Cheong, B., Perkins, N., Yang, Z., Herring, P. K., Aykol, M., Braatz, R. D., Ermon, S., Chueh, W. C. (2020), 「Comparing experimental designs for parameterizing semi-empirical and deep learning-based lithium-ion battery aging models」, 『Energy & Environmental Science』, Vol. 13, No. 8, pp. 2579–2594.
- vii. Offer, G. J., Kontou, E., Brandon, N. P., Wu, B. (2022). 「Techno-economic cell selection for battery-electric long-haul trucks」, 『eTransportation』, Vol. 12, 100225.
- viii. Kontou, E., Offer, G. J., Wu, B., Brandon, N. P. (2024). 「Spoilt for choice: User-centric choice of battery size and chemistry for battery-electric long-haul trucks」, 『Energies』, Vol. 17, NO. 1, pp. 158.
- ix. 김진출, 박하민, 이주, 이형우, 박찬배, 이재범, 정광우(2024), 「커플드 인덕터를 적용한 수소전기트램용 인터리브드 부스트 컨버터의 고밀도 설계에 관한 연구」, 『전기학회논문지』, 제73권, 제10호, pp. 1802–1813.

[부록] - 인터뷰(면담) 사진 및 인터뷰 내용 전문

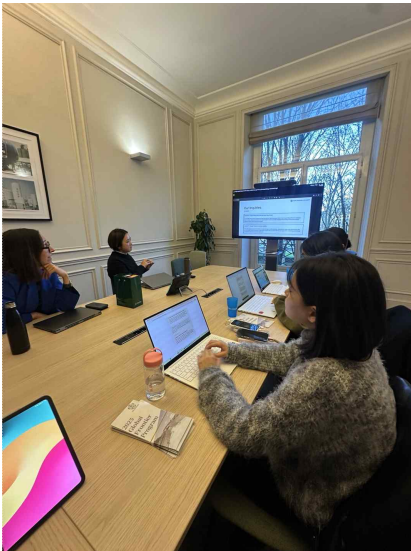
i .Airliquide

1) 기관 개요

기관 2. Airliquide	
기관 장소	Airliquide
세부 일정	1. 수소탱크 운반 및 글로벌 마케팅 관련 질의응답 2. Airliquide 견학 방문

<표 6> Airliquide 기관 일정

2) 탐방 사진



<그림 6> 견학 사진 1



<그림 7> 견학 사진 2

3) 인터뷰 전문

Q1. 수소 저장 탱크 표준화 및 운송 규격 전략

저희는 최근 스위스 EMPA와의 미팅을 통해, 수소 트램 모델의 정확도를 확정하고 열관리 (Thermal Management)에 관한 다양한 해석 기법을 적용하기 위해서는 수소 탱크의 구체적인 크기 및 재질에 대한 데이터가 필수적이라는 조언을 받았습니다. 그래서 수소 운송 및 저장 분야의 글로벌 리더로서 가장 안정화된 기술력을 보유한 에어리퀴드에 여쭙고 싶습니다. 저희가 참고할 수 있는 대략적인 탱크 사양(재질, 수치 등)을 알 수 있을까요? 공유해 주신다면 저희 모델의 신뢰성을 높이는 데 큰 도움이 될 것 같습니다.

수소 모빌리티 분야에서 차량 탑재용 수소 저장 기술은 이미 상당 부분 표준화가 이루어져 있습니다. 현재 버스, 트럭 등 상용 모빌리티에서 가장 널리 사용되는 방식은 Type IV 복합재 수소 저장 탱크(탄소섬유 + 폴리머 라이너)이며, 350 bar 압력 조건이 산업적으로 가장 보편적인 사양입니다.

이러한 Type IV 탱크는 경량화 측면에서 유리하여 승객 수송용 차량에 적합하며, 안전성과 비용 사이의 균형이 검증된 기술로 평가됩니다. 탱크의 소재와 구조 자체는 이미 상용화된 기술이므로, 추가적인 연구개발(R&D)이 필수적인 영역은 아니며, 실제 프로젝트에서는 요구 사양을 정의한 뒤 기존 공급업체로부터 조달하는 방식이 일반적입니다.

따라서 수소 트램 모델링 및 열관리 해석을 위해서는 기존 수소버스·수소트럭에 적용된 대표적인 Type IV 탱크 사양을 참고하는 것만으로도 충분히 현실성 있는 분석이 가능하다고 판단됩니다.

Q2. 글로벌 수소 모빌리티 시장에서 수소 트램의 틈새 시장과 ‘서울 모델’의 수출 가능성

현재 글로벌 수소 모빌리티 시장은 버스와 트럭 중심으로 형성되어 있는 것으로 알고 있습니다. 에어리퀴드의 마케팅 관점에서 보시기에, ‘수소 트램’은 이러한 시장 구조 속에서 어느 정도의 성장 가능성을 가진 틈새시장이라고 평가하시는지 궁금합니다.

저희가 추후 모델에 대한 보고서를 적어야 하는데 이때 경제적인 측면에서도 모델의 가치를 증명하려고 합니다. 이에 만약 한국이 서울과 같은 고밀도·복잡한 대도시에서 ‘수소를 배터리와 접목한 하이브리드 트램 + 복합 에너지 허브(정류장 통합 플랫폼)’ 모델을 세계 최초 수준으로 성공적으로 안착시킨다면, zeroemission이라는 전세계적 공통 목표를 이뤄 낼 수 있는 첫걸음을 완성시킨 것이기에 향후 ‘수소 모빌리티 패키지’ 라는 새로운 수출 경쟁력을 가질 수 있다고 생각합니다. 마케터님 입장에서 이에 대한 의견, 그리고 저희 모델이 가질 수 있는 경제적 가치에 대해 생각하시는 바를 구체적으로 듣고 싶습니다.

또한, 이러한 방향성이 현재 글로벌 수소 모빌리티 시장의 트렌드와 얼마나 부합한다고 생각하시는지도 듣고 싶습니다.

현재 글로벌 수소 모빌리티 시장은 수소 버스와 대형 수소 트럭을 중심으로 형성되어 있습니다. 이는 장거리 주행, 중량 운송, 혹한 환경 등에서 배터리 대비 수소가 가지는 명확한 장점 때문입니다. 반면, 수소 트램은 이러한 주류 시장이 아닌 틈새(Niche) 시장으로 분류됩니다.

그러나 수소 트램을 단일 교통수단이 아닌, ‘수소-배터리 하이브리드 트램 + 통합 에너지 허브’라는 시스템 패키지 개념으로 접근할 경우 전략적 가치를 가질 수 있습니다. 특히 서울과 같은 고밀도 대도시에서는 공간 제약, 전력망 부담, 복합 교통 수요가 동시에 존재하므로, 이러한 모델은 도시 맞춤형 레퍼런스 사례로서 수출 가능성을 가질 수 있습니다.

Q3. 하이브리드 에너지 허브 수요 전망과 정책·인센티브 동향

서울은 좁은 부지에 전기차 충전소와 수소 충전소를 통합하는 '하이브리드 허브'를 지향합니다. 유럽 내에서도 이러한 복합 에너지 스테이션에 대한 수요가 늘고 있는지, 그리고 이를 활성화하기 위해 정부나 기업 차원에서 어떤 규제 완화나 비즈니스 인센티브가 논의되고 있는지 궁금합니다.

유럽에서는 전기차 충전과 수소 충전을 결합한 다중 에너지 스테이션(Multi-energy station)에 대한 수요가 점진적으로 증가하고 있습니다. 다만, 현재 정책적으로 이러한 하이브리드 허브를 의무화하고 있지는 않습니다.

EU 규제(AFIR 등)는 일정 거리마다 전기 충전소와 수소 충전소를 각각 설치하도록 요구할 뿐, 이를 하나의 공간에 통합할지는 시장의 판단에 맡기고 있습니다. 따라서 실제로 하이브리드 허브가 도입되는 경우는 교통량, 부지 활용 효율, 운영 편의성이 충분히 확보되는 지역에 한정됩니다.

정책적 인센티브는 주로 인프라 구축 비용(CAPEX)에 대한 보조금 형태로 제공되며, 복합 에너지 허브의 경제성은 규제보다는 현장 운영 논리와 수요 구조에 의해 결정됩니다

Q4. 시민들 인식 관련 마케팅 전략

서울 시민 대상으로 진행한 저희의 설문조사 결과, 응답자의 40.5%는 수소 모빌리티 및 도심 수소 설비의 안전성에 대해 우려를 나타낸 것으로 조사되었습니다.

에어리퀴드는 수소 충전소나 관련 인프라를 도심 지역에 설치할 때, 이러한 시민들의 안전 우려와 심리적 거부감을 줄이기 위해 지자체, 공공기관 등과 어떤 형태의 협력 모델과 마케팅·커뮤니케이션 전략을 활용해 왔는지 궁금합니다.

특히 시민들의 인식을 수소를 '위험한 가스'가 아닌 '일상의 친환경 에너지'로 인식되게끔 만드는 데 가장 효과적이었던 마케팅 사례나 노하우가 있다면 공유해 주실 수 있을까요?

도심 내 수소 시설에 대한 시민들의 안전 우려는 글로벌 공통 과제입니다. Air Liquide는 이러한 문제를 해결하기 위해 다음과 같은 전략을 취하고 있습니다.

첫째, 국제 안전 기준(ISO, IEC 등)을 철저히 준수하고 이를 명확히 설명합니다.

둘째, 수소를 '새로운 위험 물질'이 아닌, 이미 익숙한 천연가스와 유사한 관리형 에너지로 비교 설명합니다.

셋째, 지자체 및 운영기관과 협력하여 초기 단계부터 투명한 커뮤니케이션을 진행합니다.

특히 수소 충전 및 저장 시설을 공공 도로가 아닌 차량기지(Depot)와 같은 통제된 공간에 설치할 경우, 사회적 수용성이 크게 향상되는 것으로 나타났습니다. 수소 안전 시스템은 사고 발생 시 자동으로 작동하도록 설계되어 있으며, 실제 운영 과정에서 이러한 안전 메커니즘이 효과적으로 작동하고 있음을 지속적으로 입증하는 것이 중요합니다.

Q5. 이해관계자 관리 및 사업 구조 설계

수소 트램 사업은 지자체, 공공기관, 부품 제조사 등 수많은 이해관계자가 얽혀 있습니다. 에어리퀴드는 각기 다른 목표를 가진 파트너들을 하나의 프로젝트로 모으기 위해, 각 이해관계자에게 어떤 차별화된 '가치'를 제안하여 참여를 유도합니까? 특히 공공기관의 '공익성'과 기업의 '수익성' 사이에서 어떻게 균형 잡힌 비즈니스 모델을 제시하는지 궁금합니다.

수소 트램 프로젝트에는 정부, 지자체, 교통 운영사, 차량 제조사(OEM), 에너지 기업 등 다양한 이해관계자가 참여합니다. 이들을 하나의 프로젝트로 통합하기 위해서는 역할 분담이 명확해야 합니다.

일반적으로 정부는 정책 방향 설정과 보조금 제공을 담당하고, 교통 운영사는 공공 입찰에 참여하며, OEM은 차량을 공급하고, 에너지 기업은 수소 및 충전 인프라를 제공합니다. 이러한 구조 속에서 공공성(환경 개선, 서비스 질 향상)과 민간 수익성의 균형은 보조금과 제도적 지원을 통해 맞춰집니다.

현 시점에서 수소 모빌리티는 보조금 없이는 경제성이 확보되기 어려우며, 이는 글로벌 공통 현실로 인식되고 있습니다.

Q6. 수소 트램의 차별화 요소 및 글로벌 도입 사례

이미 대중교통망이 매우 조밀한 서울 같은 도시에서, 수소 트램이 전기 버스나 지하철과 차별화되는 Unique Selling Point는 무엇이라고 생각하시는지 궁금합니다. 또 이와 연관되어 에어리퀴드가 참여했던 글로벌 프로젝트 중, 기존 교통 인프라와의 충돌을 극복하고 시장에 성공적으로 안착한 사례가 있나요?

이미 전기 지하철과 전기 버스가 잘 구축된 도시에서는 수소 트램이 에너지 효율 측면에서 뚜렷한 우위를 가지기 어렵습니다. 따라서 수소 트램의 차별성은 운영 유연성에 있습니다.

가공 전차선 설치가 어려운 구간, 전력망 여유가 부족한 지역, 혹은 신규 노선 개발 구간에서는 수소·배터리 기반 트램이 대안이 될 수 있습니다. 다만, 글로벌 사례를 보면 기존 철도망이 전기화된 도시에서는 수소 트램 도입 사례가 매우 제한적입니다.

결과적으로 수소 트램은 기존 인프라를 대체하는 수단이라, 특정 조건에서 보완적 역할을 수행하는 교통수단으로 이해하는 것이 타당합니다.

<p>Q7. 사업성 평가를 위한 전략·마케팅 기준</p> <p>에어리퀴드에서 새로운 수소 모빌리티 사업의 실현 가능성을 검토할 때, 그리고 만약 저희의 서울의 'H2E 하이브리드 트램 및 복합 에너지 허브'와 같은 대규모 도심 프로젝트의 사업화를 검토할 때, 기술적 완성도 외에 마케터님께서 '마케팅 및 전략적 측면'에서 적용하는 '실현 가능성(Feasibility)'의 구체적인 기준은 무엇인지 궁금합니다.</p> <p>에어리퀴드는 새로운 수소 모빌리티 사업의 실현 가능성을 검토할 때 기술적 완성도뿐만 아니라 마케팅 및 전략적 측면에서의 종합적인 기준을 함께 적용합니다. 우선, 해당 사업에서 실제로 비용을 지불할 수요처가 존재하는지, 또는 사업 추진을 뒷받침할 수 있는 확정된 보조금 구조가 마련되어 있는지를 핵심적으로 검토합니다. 이는 현재 수소 모빌리티 시장이 전 세계적으로 보조금 기반의 시장 구조를 가지고 있으며, 정책적 지원 여부가 사업 성립의 중요한 전제 조건이기 때문입니다.</p> <p>또한 국가 및 지자체 차원의 중·장기 정책 방향과의 정합성 역시 주요한 판단 기준으로 고려합니다. 수소 모빌리티 사업이 일회성 프로젝트에 그치지 않고 지속적으로 확대되기 위해서는 에너지 정책, 교통 정책, 탄소중립 전략 등과의 일관성이 확보되어야 하기 때문입니다. 이와 더불어, 해당 적용 분야에서 배터리 대비 수소가 명확한 장점을 가지는 사용 시나리오가 존재하는지도 면밀히 검토합니다. 즉, 기술 적용 가능성 자체보다는 수소가 실질적인 대안이 되는 영역인지 여부가 사업성 평가의 중요한 요소로 작용합니다.</p> <p>아울러 OEM, 운영사 등 관련 이해관계자와의 협력 가능성 또한 전략적으로 중요한 기준으로 고려합니다. 수소 모빌리티 사업은 단일 기업의 역량만으로 추진되기 어렵기 때문에, 초기 단계부터 안정적인 파트너십을 구축할 수 있는 구조가 사업 실현 가능성에 큰 영향을 미칩니다. 마지막으로, 단발성 실증 사업이 아닌 향후 다른 노선이나 지역으로 확장 가능한 구조인지, 즉 사업의 확장 가능성 또한 주요 평가 기준으로 포함됩니다.</p>

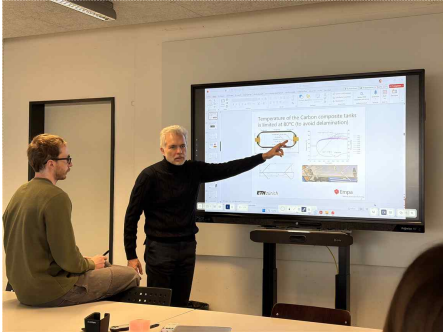
ii. EMPA

1) 기관 개요

기관 2. EMPA	
기관 장소	Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology
세부 일정	1. 트램용 수소탱크 및 수소배터리 관련 질의응답 2. EMPA 연구실 견학 방문

<표 7> EMPA 기관 일정

2) 탐방 사진



<그림 8> 견학 사진1



<그림 9> 견학 사진2

3) 인터뷰 전문

Q1. 대형·고중황비 트램 수소 탱크에서 제트 침투 한계와 다중 노즐 가능성
 논문에서 제트 기류의 영향력이 $x/D = 3$ 지점으로 제한된다고 하셨습니다. 트램용 초장
 대형 탱크 설계 시, 후방 구역(Back Zone)의 온도 상승을 억제하기 위해 다중 노즐 배치
 나 내부 순환 유도 구조체를 도입하는 것이 가능할까요? 만약 가능하다면 단일 노즐 대비
 얼마나 효과적일까요?

이 질문을 주신 맥락은 잘 이해했습니다. 제트가 노즐에서 일정 거리 이상 가면 영향이 사
 라지고, 그래서 탱크 후방 영역에서 온도가 올라가는 문제가 생긴다는 거죠. 유체역학적으
 로만 보면 답은 사실 굉장히 단순합니다. 노즐이 많을수록 혼합은 좋아지고, 온도도 더 균
 일해집니다. 그건 거의 자명한 이야기입니다.

다만 여기서 바로 문제가 되는 건 탱크 설계입니다. 실제 고압 수소 탱크를 보면, 밸브나
 포트를 넣을 수 있는 위치는 거의 탱크 양쪽의 원형 단면부밖에 없습니다. 원통부에는 구
 조적으로 뭔가를 추가하기가 굉장히 어렵습니다. 그래서 이론적으로는 양쪽에서 주입하거
 나, 노즐을 안쪽으로 깊게 넣으면 분명히 도움이 되지만, 탱크 제조사 입장에서는 ‘이건 안
 된다’고 바로 말할 가능성이 큼니다.

저희도 과거에 시뮬레이션으로 양방향 주입이나 내부로 들어간 노즐을 검토한 논문을 본
 적이 있습니다. 그런 경우 혼합은 확실히 좋아지고, 온도 분포도 완화됩니다. 하지만 동시
 에 배관이 늘어나고, 밸브가 늘어나고, 연결부가 늘어납니다. 수소에서는 이게 굉장히 큰
 문제입니다. 비용도 비용이지만, 유지보수와 검사 문제입니다.

이 탱크들은 고압 용기라서 정기 검사를 받아야 합니다. 만약 연결부가 많고, 배관이 복잡
 한 상태에서 검사 과정에서 ‘이 탱크 하나를 교체해야 한다’는 이야기가 나오면, 전체 시스
 템을 거의 다 해체해야 할 수도 있습니다. 실제로 저희가 운영하는 충전소에서도 그런 경
 험을 했습니다. 저장 병이 여러 개 연결된 구조에서는, 하나를 보기 위해 다 뜯어야 했습
 니다. 굉장히 비효율적입니다.

그래서 제 개인적인 조언은, 탱크 설계를 바꾸는 쪽보다는 충전 조건을 바꾸는 게 훨씬 현
 실적이라는 겁니다. 충전 시간을 늘리거나, 압력 상승률을 조정하는 쪽이 설계 변경보다
 훨씬 쉽고, 비용도 적게 듭니다. 이론적으로는 다중 노즐이 좋지만, 실제 시스템에서는 ‘설
 계 가능한가’가 훨씬 더 중요합니다.

Q2. 대형 탱크에서 예냉의 한계와 85 °C 안전 기준을 지키기 위한 우선 설계 요소 -50°C 예냉 수소를 주입해도 후방 구역 냉각 효과가 미미하다는 결론을 얻으셨는데, 대형 트랩 탱크에서 안전 임계치인 85°C를 지키기 위해 기체 냉각보다 더 우선시되어야 할 설계 요소는 무엇이라고 보십니까?

예냉에 대해서는 질문하신 방향이 정확합니다. 저희 연구에서도 확인된 건, 아무리 -50 °C 로 예냉한 수소를 넣어도 탱크 후방 영역의 온도 상승은 충분히 억제되지 않는다는 점입니다. 이유는 단순합니다. 가장 큰 열 발생 원인은 마찰이나 외부 열 유입이 아니라, 압축 자체에서 생기는 열이기 때문입니다.

예냉은 노즐 근처에서는 효과가 있습니다. 하지만 제트가 도달하지 않는 영역에서는 거의 영향을 주지 못합니다. 결국 압력이 올라가면 내부 에너지가 증가하고, 온도는 다시 올라갑니다. 그래서 ‘얼마나 차갑게 넣느냐’보다 ‘얼마나 빨리 압축하느냐’가 훨씬 중요합니다.

설계 요소 우선순위로 보면, 사실 탱크 형상이나 재료를 마음대로 고를 수 있으면 좋겠지만, 현실에서는 그렇지 않습니다. 대부분은 제조사에서 제공하는 표준 탱크를 사용하게 됩니다. 그러면 형상과 재료는 이미 고정된 조건입니다. 이 상태에서 우리가 조정할 수 있는 건 결국 충전 시간과 충전 전략입니다.

외부 냉각도 질문하셨는데, 이건 시간 척도의 문제입니다. 충전이 너무 빠르면 내부에서 생긴 열이 외벽을 통해 밖으로 나갈 시간이 없습니다. 이건 Biot 수로 설명할 수 있습니다. 외부에서 팬을 불거나 물로 냉각해도, 내부와 외부 온도 차가 충분히 형성되지 않으면 효과가 거의 없습니다. 그래서 외부 냉각을 하려면, 충전 시간이 충분히 길어야 의미가 있습니다.

그리고 하나 더 말씀드리면, 저온 예냉에는 실무적인 문제가 있습니다. 수소 안에 미량의 수분이 있으면, 저온에서 얼어서 열교환기나 밸브를 막을 수 있습니다. 저희도 실제로 -30 °C 이하에서 냉각이 더 이상 안 되는 현상을 경험했습니다. 나중에 알고 보니 수분이 얼어서 막힌 거였습니다. 이런 점도 예냉 전략을 쓸 때 반드시 고려해야 합니다.

Q3. 서울과 같은 고온·고습 도심 환경에서 외부 냉각의 실효성

서울의 고온다습한 여름 기후는 비오 수(Bi)와 외부 대류 계수에 영향을 줍니다. 자연 대류가 제한적인 도심 환경에서 탱크 외부에 수랭식이나 강풍 냉각을 병행하는 것이 라이너 온도를 낮추는 데 실질적인 도움이 될까요?

도심 환경에서의 외부 냉각은 가장 구현하기 쉬운 방법이긴 합니다. 탱크를 바꿀 필요도 없고, 외부에서만 작업하면 되니까요. 하지만 효과가 있느냐는 또 다른 문제입니다.

서울처럼 여름에 35~40 °C까지 올라가는 환경에서는, 내부 온도와 외부 온도의 차이를 충분히 만들기 어렵습니다. 온도 차가 작으면, 아무리 대류 계수를 높여도 실제로 빠져나가는 열은 많지 않습니다. 그래서 충전이 빠른 경우에는 외벽만 잠깐 식고, 내부는 계속 뜨거운 상태로 남을 수 있습니다.

만약 외부 냉각을 한다면, 반드시 충전 시간이 길어야 합니다. 그래야 내부에서 외부로 열이 이동할 시간이 생깁니다. 그렇지 않으면 오히려 벽면 내부에 온도 구배가 생기고, 이게 재료 측면에서는 바람직하지 않을 수도 있습니다. 저희는 외부 냉각이 단독 해법이 되기는 어렵고, 충전 시간 제어와 함께 보조적으로 쓰이는 정도가 적절하다고 보고 있습니다.

Q4. 고중형비 탱크에 단일 영역 충전 프로토콜 적용 가능성

교수님의 연구를 보면 기존의 단일 구역(Single-zone) 모델에 기반한 충전 프로토콜이 고중형비(AR) 탱크에는 적합하지 않음이 명확해 보입니다. 저희는 서울에서 승용차와 트램이 충전소를 공유하는 모델을 구상 중인데, 이들에게 동일한 압력 상승률(APRR)과 냉각 프로토콜을 적용하는 것이 물리적으로 가능하다고 보십니까? 만약 불가능하다면, 충전기가 차량의 AR을 인식하여 실시간으로 블록별 온도를 예측하고 가압 속도를 가변적으로 조절하는 '스마트 적응형 프로토콜(Adaptive Protocol)'을 도입하는 것이 유일한 대안이 될까요? 이 모델에 대한 의견이 궁금합니다.

이 질문에 대해서는 답이 비교적 명확합니다. 고중형비 탱크에서는 단일 영역 모델은 충분하지 않습니다. 길이가 길어질수록, 앞쪽과 뒤쪽의 온도 차이를 하나의 평균값으로 처리하는 건 위험해집니다.

특히 중요한 건, 안전 기준으로 말하는 85 °C가 기체 평균 온도가 아니라 탱크 벽면 온도라는 점입니다. 가스 온도는 100 °C를 넘을 수도 있지만, 벽면이 괜찮으면 문제가 없을 수도 있습니다. 반대로 평균 온도는 괜찮아 보여도, 특정 위치의 벽면 온도가 기준을 넘을 수 있습니다. 단일 영역 모델은 이것 잡아내기 어렵습니다.

적응형 프로토콜, 그러니까 차량이 탱크 형상이나 AR을 알려주고 충전 속도를 바꾸는 개념은 물리적으로는 굉장히 합리적입니다. 다만 문제는 인증과 표준입니다. 현재 충전소-차량 간 인터페이스는 매우 단순하게 설계되어 있고, 여기에 새로운 변수를 넣으려면 새로운 인증이 필요합니다. 이게 기술 문제라기보다는 제도 문제에 가깝습니다.

Q5. 다영역 모델을 실제 충전소 제어에 적용할 때의 장벽

교수님이 개발하신 다중 구역 모델(Multi-zone Model)을 실제 충전소의 표준 제어 알고리즘에 통합하게 된다면 현실에 마주해 해결해야 할 기술적 또는 제도적 장벽이 존재할 것이라고 생각합니다. 교수님께서 혹시 생각해보신 문제점이나 고려사항이 있으신지 궁금합니다. 또 그에 대한 해결방안에 대해 생각해보신적 있으신가요? 의견을 들어보고 싶습니다.

다영역 모델을 실제 제어 알고리즘에 넣는 데 있어서 가장 큰 장벽은 기술 그 자체가 아니라 검증과 인증입니다. 다양한 크기와 형상의 탱크에 대해 실험 데이터를 충분히 확보해야 하고, 모델이 항상 보수적으로 안전하다는 걸 보여줘야 합니다.

저희도 실험과 시뮬레이션을 비교했지만, 아직은 '설계 참고용' 수준이라고 보는 게 맞습니다. 인증에 바로 쓰기에는 데이터가 부족합니다. 그리고 인증 과정에서는 종종 기술적으로는 예상하지 못한 요구사항이 튀어나옵니다. 예를 들면 화재 시 60초 안에 탱크를 비워야 한다든지 하는 조건들입니다. 이런 요구는 모델링 문제와는 또 다른 차원의 문제입니다.

<p>Q6. 높은 잔압 상태에서의 충전과 열적 위험</p> <p>교수님의 연구에서는 초기 압력이 낮은 상태에서의 충전을 주로 다루셨습니다. 하지만 잔류 압력이 높은 상태(예: 35MPa → 70MPa)에서 충전을 시작하면, 초기 가스 밀도가 높아 제트의 관성이 기존 가스에 의해 더 빨리 상쇄될 것 같습니다. 이 경우 후방 구역(Back Zone)이 85°C 임계 온도에 도달하는 시간이 빈 탱크를 채울 때보다 훨씬 빨라질 위험이 있지 않습니까?</p>
<p>열역학적으로 보면, 잔압이 높은 상태에서 충전을 시작하는 게 유리합니다. 압축 비가 줄어들고, 그만큼 열 발생도 줄어듭니다. 이건 분명한 사실입니다.</p> <p>하지만 시스템 전체로 보면 이야기가 달라집니다. 잔압을 높게 유지하려면 더 자주 충전 인프라에 접근해야 하고, 수소를 더 자주 공급해야 합니다. 지금처럼 수소를 트럭으로 운송하는 구조에서는, 이게 정말로 환경적으로 이득인지 다시 계산해 봐야 합니다. 열적으로는 좋지만, 시스템 차원에서는 복잡한 문제입니다.</p>

<p>Q7. 잦은 부분 충전과 장기 열 축적, 내구성 문제</p> <p>트램 정거장에서 짧은 간격으로 수시 충전이 이루어진다면, 탱크 벽면(Shell)이 충분히 식지 않은 상태에서 다시 충전이 시작되는 '열 누적 현상'이 발생할 수 있습니다. 이때, 수소 저장 시스템 자체의 안전성 및 수명 측면에서 어떤 영향이 끼칠 수 있는지 궁금합니다. 또, 연구하신 비오 수(Bi)와 열확산율 관점에서 볼 때, 이러한 반복적인 부분 충전이 라이너(Liner)와 CFRP 층 사이의 열 피로(Thermal Fatigue)나 계면 박리에 장기적으로 어떤 영향을 줄 것으로 예측하시나요?</p>
<p>이건 시간 척도에 달려 있는 문제입니다. 충전을 하면 온도는 올라가지만, 사용하면서 압력이 내려가면 온도도 자연스럽게 내려갑니다. 충전과 사용 사이에 충분한 시간이 있으면, 열이 누적되지 않을 수도 있습니다.</p> <p>하지만 충전 간격이 짧고, 탱크가 충분히 식기 전에 다시 충전이 시작된다면, 장기적으로 열 축적이 생길 가능성은 있습니다. 이게 라이너와 CFRP 계면에 어떤 영향을 미치는지는 아직 데이터가 부족합니다. 저희도 한 번의 충전만 실험했지, 연속적인 반복 충전은 아직 충분히 다루지 못했습니다. 이 부분은 분명히 추가 연구가 필요한 영역입니다.</p>

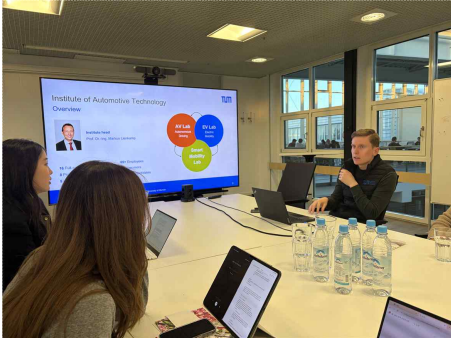
iii. TUM

1) 기관 개요

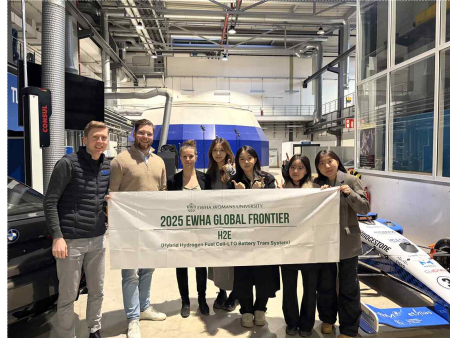
기관 3. Technical University of Munich	
기관 장소	TUM School of Engineering and Design Institute of Automotive Engineering
세부 일정	1. 트램용 LTO 배터리 진단 및 수명 예측 평가 관련 질의응답 2. TUM 연구실 견학 방문

<표 8> TUM 기관 일정

2) 탐방 사진



<그림 10> 견학 사진1



<그림 11> 견학 사진2

3) 인터뷰 전문

Q1. 데이터가 제한된 조건에서 반경험적 모델의 적용성
 논문에서 실험 시간을 획기적으로 줄여주는 '반경험적 모델'을 제안하신 걸 보았습니다. 그런데 저희가 서울형 트램에 이 모델을 대입해보려니, 한국은 이제 막 도입하는 단계라 참고할 만한 실제 운행 데이터가 너무 부족하더라고요. 이렇게 데이터가 거의 없는 '공백 상태'에서도 논문의 모델이 힘을 발휘할 수 있을까요? 아니면 초기에는 조금 복잡하더라도 원리 중심의 '물리 기반 모델'을 같이 쓰는 게 더 안전할까요?

첫 번째 질문은 세미 경험적 모델을 적용할 수 있느냐는 거였고요.
 저희가 먼저 말씀드리고 싶은 건, 배터리 열화는 배터리 화학계 자체에 굉장히 크게 의존한다는 점입니다. 그래서 모델을 쓰려면 그 화학계에 맞는 파라미터화가 꼭 필요합니다. 그런데 LTO의 경우에는 공개된 데이터에 의존해야 하는 상황이 많아서, 물리 기반 모델을 파라미터화하는 게 사실상 굉장히 어렵습니다. 그래서 물리 기반 모델은 저희는 추천하지 않습니다. 대신에 아주 단순한 세미 경험적 모델을 추천하고요, 예를 들면 운용 조건이나 운용 일수의 함수로 열화를 선형적으로 모델링하는 방식입니다.
 이건 개인적인 코멘트인데요, LTO를 왜 선택하셨는지가 조금 궁금했습니다. 어떤 설문 결과 때문인지, 아니면 다른 이유가 있었는지는 잘 모르겠지만요. LTO는 열화 특성 면에서는 굉장히 좋은 배터리입니다. 수명이 길고 안정적인 편이죠. 다만 어떤 경우에는 성능이 갑자기 떨어지는 현상이 나타날 수도 있는데, 이런 부분은 사실 예측하기가 어렵습니다. 그래서 선형 회귀 모델은 꽤 오랜 기간 동안은 잘 맞을 수 있지만, 수명 말기 쪽에서는 문제가 생길 수 있고, 그건 사실상 예측이 어렵습니다. 그래도 전반적으로 보면 LTO는 안정성이나 수명 측면에서 굉장히 좋은 화학계라서, 제가 처음 자료를 봤을 때는 솔직히 조금 놀랐습니다. LTO가 워낙 안정적인 걸로 잘 알려져 있어서요.

Q2. 극도로 데이터가 제한된 초기 적용 단계에서의 D-최적 실험설계(DOE)의 타당성 한국에 트램 도입 초기라 데이터가 부족하다는 현실적인 제약 때문에, 저희는 Full Factorial처럼 모든 케이스를 다 보는 대신 효율적인 D-optimal DOE가 우리 상황에 적합하다고 생각했습니다. 논문에서도 반경험적 모델에는 D-optimal이 효과적이라고 나와 있었는데, 저희처럼 데이터가 극도로 적은 '초기 도입 단계'의 특수성을 고려했을 때도 이 방식이 여전히 유효할지 전문가의 의견을 듣고 싶습니다.

그 다음 질문은 실험 설계에 대한 거였는데요, 제 질문은 실제로 배터리 실험을 진행할 계획이 있는지였습니다. 지금 단계에서는 모델의 아주 초기 단계라고 이해하고 있고요, 아직 실험을 하는 단계는 아닌 것 같습니다.

일반적으로는 실험 데이터를 가지고 모델을 피팅하는 게 가장 이상적인 방법이긴 합니다. 하지만 실험 데이터가 없다면 그건 사실상 어렵습니다.

만약 나중에 한국에서 실제 운행 데이터나 실험적인 인사이트를 얻을 수 있다면, 그런 데이터를 모델에 적용해서 점진적으로 보정해 나가는 건 가능하다고 생각합니다. 이 방법에 대해서는 뒤쪽 슬라이드에서 다시 말씀드릴 예정입니다.

Q3. 하이브리드 에너지 시스템에서 배터리 진단의 역할

배터리가 유일한 에너지원이 아닌 하이브리드 시스템에서는, 배터리 진단(DVA/ICA)의 중요성이 오히려 더 커질지, 아니면 완화될지에 대해 어떻게 생각하시는지 궁금합니다.

그 다음은 배터리 진단에 대한 질문이었는데요.

저희가 이해하기로는 이 시스템에서 배터리는 가속이나 제동 시에 피크 전력을 조절하는 버퍼 역할을 합니다. 그리고 이 피크 전력은 배터리 열화의 영향을 받습니다.

반면에 주행 거리는 배터리 열화의 영향을 받지 않습니다. 주행 거리는 연료전지가 제공하기 때문입니다. 그래서 배터리 상태를 고려하는 건 여전히 중요하다고 결론을 내렸습니다.

다만 앞에서 말씀드린 것처럼, 이 경우에도 선형 열화 모델이면 충분하다고 생각합니다.

Q4. 무가선 트램 시스템을 새로 도입하는 도시를 위한 진단 전략

신규 무가선 트램 시스템을 도입하려는 도시가 있다면, 초기 단계부터 DVA·ICA와 같은 전압 기반 진단 기법을 적용하는 것이 바람직할지, 아니면 보다 단순한 SOH 지표부터 도입하는 것이 현실적일까요?

진단 전략은 열화 모드를 추정하는 데 도움을 줄 수 있습니다. 그래서 이론적으로는 열화 메커니즘을 이해하는 데 유용할 수 있습니다.

하지만 LTO의 경우에는 이런 접근이 실제로는 잘 작동하지 않습니다. 그래서 ICA나 DVA 같은 방법보다는, 사용 가능한 방전 에너지 기반의 SOH를 사용하는 걸 강하게 추천합니다.

그리고 하나 더 질문이 있는데요, LTO 말고 반대쪽 전극은 어떤 걸 사용하고 있는지 알고 계신가요? 제가 이걸 여쭙보는 이유는, LTO는 경우에 따라 양극으로도 쓰이고, 음극으로도 쓰일 수 있기 때문입니다. 그래서 LTO 하나만 말하면, 반대쪽 전극이 뭔지가 굉장히 중요합니다. 예를 들어 배터리에는 항상 양극과 음극이 있고, LTO는 양쪽 역할을 다 할 수 있어서 만약 여러분 경우에 LTO가 양극(cathode)이라면, 그럼 반대쪽 전극은 무엇인지가 중요해집니다.

이런 진단 방법들을 쓸 때 가장 중요한 건, 어떤 전극 조합을 쓰고 있는지를 정확히 아는 것입니다. 만약 LTO를 음극(anode)으로 쓰면, 문제는 보통 양극(cathode) 쪽에서 나타납니다. 반대로 LTO를 양극(cathode)으로 쓰면, 그때는 음극(anode) 쪽이 문제가 됩니다. 그래서 어떤 전극이 어떤 역할을 하는지 반드시 확인해야 합니다. 배터리가 실제로 어떻게 구성되어 있는지를 한 번 더 점검해 보시는 게 좋겠습니다. 이건 굉장히 중요한 부분입니다. 제가 보기에는, 지금 보여주신 자료로 보면 아마 LTO가 양극 쪽인 것 같긴 한데요, 그래도 그래픽이나 데이터상으로 열화가 어느 쪽에서 나타나는지를 정확히 봐야 합니다. 이건 사실 어떤 배터리 화학계에서도 중요한 문제입니다. 다만 화학계마다 해석이 어려운 정도가 다르죠. 예를 들어 NMC 같은 경우와 비교하면, 전압 특성이나 열화 추정이 상대적으로 더 쉬운 편입니다.

그래서 저희는 사용 가능한 에너지 기반 SOH를 쓰는 게 괜찮다고 생각합니다. 예를 들어 SOH가 95%라고 하면, 그 한 가지 값만으로도 충분합니다. 왜냐하면 열화 모드들을 각각 해석하는 게 굉장히 어렵기 때문입니다. ICA나 DVA 같은 방법에서 나오는 결과를 가지고 거기서 어떤 의미 있는 행동이나 결론을 끌어내는 건 훨씬 더 어렵습니다. 반면 SOH는 하나의 숫자로 상태를 표현해 주기 때문에 해석하기가 훨씬 쉽습니다. 그리고 LTO의 경우에는 DVA 자체가 잘 맞지 않습니다. 피크 트래킹이 제대로 작동하지 않기 때문입니다. 이건 LTO 화학계의 특성 때문입니다. 그래서 제가 보기에는, 아마 여러분 배터리에서는 LTO 말고 다른 쪽 전극이 NMC(니켈·망간·코발트)일 가능성이 있고, 그렇다면 실제 열화는 양극 쪽에서 나타날 가능성이 큼니다.

Q5. LTO 배터리에 특화된 진단 및 특성 추출 기법

논문은 NMC/흑연 셀을 기준으로 DVA/ICA의 유효성을 입증하셨습니다. 하지만 저희 프로젝트의 핵심인 LTO(리튬티타늄산화물) 음극은 전압 곡선이 매우 평탄하여 미분 신호를 얻기가 더 까다로운 것으로 알고 있는데, LTO처럼 전압 변화가 미세한 물질에서도 논문의 DVA 기법이 유의미한 피크(Peak)를 검출해낼 수 있는지, 혹은 LTO 특유의 'Zero-strain' 특성을 고려한 별도의 FOI(관심 특징점) 추출 방식이 필요한지 알고 싶습니다.

Q6. 트램용 장수명 LTO 배터리의 수명 예측 기법의 실용

LTO는 굉장히 긴 수명을 가지는 걸로 알고 있습니다. 논문은 일반 전기차의 노화를 다뤘는데, LTO처럼 노화 속도가 매우 느린 배터리에서, 그리고 일반 차와는 달리 급제동이 많은 트램에서 DVA/ICA의 미세한 변화를 감지해 수명을 예측하는 것이 비용이나 기술 면에서 실용적일까요?

질문 요지를 다시 말하면, LTO 배터리에는 DVA나 ICA 같은 방법이 잘 맞지 않습니다. 물론 한 가지 코멘트를 덧붙이자면, 만약 다른 전극이 양극이라면 DVA를 이용해서 양극 열화만 추정해 볼 수도 있습니다. 다만 이 경우에도 정확하다고 보기는 어렵습니다. 지금 프로젝트가 아주 초기 단계라는 점을 고려하면, 그래서 저희는 가능한 한 단순하게 접근하는 걸 추천합니다. 즉, 선형 열화 모델과 하나의 SOH 값만 사용하는 방식입니다. 이렇게 하면 가장 안전한 접근이 됩니다. 배터리 열화는 굉장히 복잡한 문제이고, 초기 단계에서는 가정이 너무 많아지기 때문에 복잡한 모델을 쓰더라도 실제로 더 정확해지지 않습니다. 그래서 저희는 이 단계에서는 복잡한 방법보다는 거친 추정(rough estimation)을 사용하는 걸 권장합니다.

Q7. 트램 시스템을 위한 딥러닝 기반 수명 모델링의 타당성

LTO 배터리는 수명이 매우 길어서 딥러닝 모델을 학습시키기 위한 수명 데이터를 확보하는 데 시간이 너무 많이 걸릴 것으로 예상이 됩니다. 또 트램은 운행 경로가 정해져있어 데이터가 정형화될텐데 이런 환경이 딥러닝 모델의 실험 설계 측면에서 일반 승용차보다 유리한 결과값이 나올 수 있을지 궁금합니다.

딥러닝 기반 수명 모델에 대해서 말씀드리면요, 저희가 이해하기로는 이 시스템의 부하가 굉장히 구조화되어 있고 반복적입니다. 항상 정거장 사이가 비슷한 거리이고, 가속을 한 번 하고, 그다음에 일정 속도로 주행하고, 그 다음에 제동을 하는 패턴이 계속 반복됩니다. 그래서 사실 이 정확한 주행 프로파일을 그대로 사용할 수 있습니다. 예를 들면 가속 한 번 하고, 20초 정도 일정 속도로 달리고, 그 다음에 제동하는 이런 프로파일을 하나 만들어서 그걸 부하 프로파일로 쓰면 됩니다. 이렇게 하면 굳이 복잡한 실험 계획이나 딥러닝 모델 같은 걸 쓸 필요가 없습니다. 그냥 배터리를 이런 방식으로 충전·방전시키면 됩니다. 이론적으로는 가속-정속-제동 한 사이클에서의 전력만 한 번 측정하면 그걸로 충분합니다. 정거장 하나에서 다음 정거장까지의 가속, 일정 속도 주행, 제동이 한 사이클을 그대로 실험실에서 배터리 셀에 적용해서 그걸 계속 반복하면 됩니다. 그래서 복잡한 모델은 필요 없습니다. 항상 같은 패턴이기 때문에 이 한 가지 프로파일만 있으면 됩니다. 그래서 저희는 그렇게 할 계획이고요. 그리고 나중에 저희 연구실 동료들이 쓴 논문 두 편도 한 번 참고해 보셔도 좋을 것 같습니다. 그 논문들은 트럭용 배터리 셀 선택에 관한 내용이라 완전히 같은 주제는 아니지만, 개념적으로는 비슷한 부분이 있어서 참고는 될 겁니다.

iv. MOBIL'IN PULSE 2026

1) 기관 개요

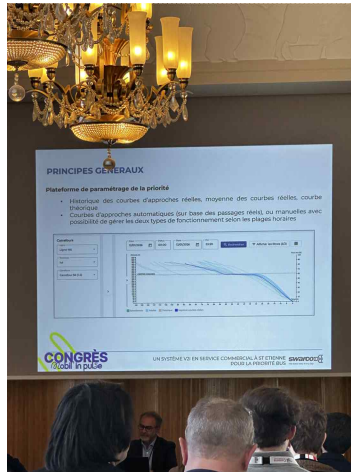
기관 4. MOBIL' IN PULSE 2026	
기관 장소	Paris, Beffroi de Montrouge
세부 일정	1. 생테티엔에서 상용화된 버스 우선권 관리를 위한 V2I 시스템 2. SERM을 위한 철도 운송 보완형 고속버스 개념 개발

<표 9> MOBIL' IN PULSE 2026 기관 일정

2) 탐방 사진



<그림 12> 발표 사진1



<그림 13> 발표 사진2



<그림 14> 견학사진

3) 발표 전문

발표 1. SWARCO 소속 Jean-Baptiste

이것은 아직 사람들이 흔히 생각하는 전통적인 방식의 우선순위 시스템만은 아닙니다. 교육적 측면이나 인프라 간의 정보 교환, 즉 표준화되고 일반화된 메시지 교환을 통해 우리에게 어떤 '의도'를 생성해주는 단계에 있습니다. 구체적으로 말씀드리면, 매우 많은 텍스트와 데이터가 SAE(버스 운영 시스템) 인터페이스를 통해 전략적으로 차량과 상호작용합니다. 차량의 출발, 방향 등을 식별하며 4.0 유닛이 컨트롤러와 인터페이스를 형성합니다. 이 인터페이스에서는 프랑스의 지역적 상황에 맞는 요소들을 만나게 됩니다. 인프라와 컨트롤러가 수집한 이 데이터들은 전체 정보 프로세스를 가동하는 모델이 됩니다. 이 정보 교환의 핵심에는 SaaS의 역할이 큼니다. 시스템 위에서 관리되는 모든 것들, 즉 보안 물류, 미학, 영향력 등의 교환이 여기서 이루어집니다. 이러한 메시지들은 특정 통신 방식에 얽매이지 않습니다. 라디오 기술을 쓸 수도 있지만, 이는 거리 제한이 있습니다. 셀룰러 네트워크를 통해서도 전송될 수 있는데, 이는 시스템에 엄청난 유연성과 유용성을 부여합니다. 시스템 설정에는 크게 세 가지 영역이 있습니다. 우리가 일일이 관리해야 했던 과거 시스템과 달리, 이 시스템은 실시간으로 버스의 접근 방식을 수집합니다. 실시간으로 수집된 버스 접근 데이터는 시스템을 자동으로 적응시키고 업데이트하게 해줍니다. 이는 데이터 기반의 전략적인 작업입니다. 또한 주간 시간대별로 이론적인 접근 곡선을 강제로 설정할 수도 있습니다. 매우 유연한 이 시스템은 사용자의 의도와 시스템의 자동 측정값을 조화시킵니다. 상세한 내용까지 생각하겠지만, 색상 표시기를 통해 문제가 있는지 즉시 식별할 수 있습니다. 온라인 SaaS를 통해 실시간으로 통계 수치에 접근할 수 있습니다. 실시간 시각화를 통해 잠재적 결함을 파악하고 리서치 패널을 작업할 수 있습니다. 이러한 훈련의 효율성을 실시간으로, 그리고 원격으로 관리할 수 있다는 것이 큰 장점입니다. 제가 가장 흥미롭게 보는 것은 이 에코시스템입니다. 국가 데이터 팀의 데이터 반환을 기다리지 않고도 새로운 라인을 구축하거나 어시스턴스를 설정할 수 있습니다. 현재 저는 셀룰러 네트워크 기반으로 100% 작동하는 시스템을 보고 계십니다. 이것이 매우 흥미로운 유연성을 가져다줍니다. 과거에는 매번 라디오 도달 거리를 측정하고 버스가 오는 방향에 맞춰 안테나 위치를 세밀하게 조정해야 했습니다. 하지만 이제는 셀룰러 안테나를 갖춘 도로 유닛으로 설치를 표준화하여 멀리 있는 차량과도 통신할 수 있습니다. 물리적 구성에 따른 전파 방해 문제도 해결되었습니다. 지자체가 이 아키텍처를 선택한 또 다른 이유는 확장성입니다. 추가 버스를 등록하거나 작업을 수행하고 설정을 변경하는 것이 매우 자유롭습니다. 물리적인 안테나 위치에 구애받지 않기 때문입니다. 강조하고 싶은 큰 장점 중 하나는 자가 학습 능력입니다. 시스템이 스스로 작동하므로 지자체 팀은 특히 케이스에만 집중하면 됩니다. 나머지는 자동 시스템과 통신망이 알아서 적응합니다. 세 번째 핵심은 실시간 모니터링 능력입니다. 사용자 입장에서 보면 이동 시간 단축은 물론, 버스 도착 빈도 정보도 정확해집니다. 지자체 입장에서는 전체 서비스 라인에서 추가 운행 횟수를 확보할 수 있고, CO2 배출을 줄일 수 있습니다. 정지 후 재출발 시 탄소가 3배 더 배출되는데 이를 막아주기 때문입니다. 운영 6개월의 결과, 대기 시간을 60% 줄였습니다. 현재 80%의 교차로를 대기 없이 통과하고 있습니다. 이는 단순히 절대적 우선순위가 아니라 관리된 맥락 하에서의 결과입니다. 이미 45개의 교차로를 추가할 계획이 잡혀 있습니다. 또한 4G 인프라의 공동 활용을 통해 지자체의 재정적 참여와 효율성을 높이고 있습니다.

(Q&A 시작)

질문 1: 발표하신 이 기술이 과도기적인 논리인가요, 아니면 확고한 지상 인프라로서의 논리인가요? 국제 시장의 조직화 측면에서도 흥미로운데, 우리 메시지 체계가 특정한 경제적 상황에 종속되지 않는다는 점에서 매우 유사한 사례들이 있었거든요. 예를 들어 지방정부 차량이나 긴급 차량들의 이동 같은 것 말입니다.

답변 1: 구체적으로 말씀드리면, 이 에코시스템 내에서 지역 공동체에 설치된 장비들은 긴급 상황과도 통신할 수 있게 될 것입니다. 큰 시스템이 펼쳐지는 것이죠. 이곳에만 국한된 것이 아닙니다.

질문 2: 생테티엔 지역에서 테스트를 하셨는데, 혹시 이보다 훨씬 더 밀집도가 높거나 교통 제약이 많은 지역에서도 테스트를 해보셨나요? 혹은 생테티엔의 사례를 통해 그런 복잡한 지역에 적용할 만한 교훈을 얻으신 게 있나요?

답변 2: 이 프로젝트는 프랑스의 교통 역사 속에서 자연스럽게 떠오른 결과물입니다. 재미 있는 점은, 이 시스템은 오히려 밀집도가 높을수록 더 큰 이득을 얻는다는 것입니다. 시스템 내에 새로운 기술이나 인터페이스를 추가할수록 시스템의 기능적 완성도는 더욱 높아지기 때문입니다. 따라서 환경의 다양화에 아주 잘 적응하는 모델이라고 할 수 있습니다.

발표 2. INGEROP 소속의 Elias Seddiki

세바스티앙 파바르와 함께 서비스 조직화 관점의 비전을 살펴보겠습니다. 안제로프 (Angérop) 내에서의 경험과 여러 프로젝트 장들의 협력을 통해 시스템을 구축해온 과정입니다. 조직화된 서비스를 이해하기 위해서는 지능적인 순환 구조를 보아야 합니다. 이번 발표는 모달리티 간 상호 보완성에 대한 것입니다. Express 서비스가 어떻게 구조적인 역할을 하는지, 특히 이용자가 한 지점에서 다른 지점으로 이동할 때의 가치와 권리를 어떻게 보장할 것인지에 대해 말씀드리겠습니다. 오늘날 광역 급행 서비스(SERM)는 단지 열차 시간표의 문제가 아닙니다. 대도시를 중심으로 한 이동성 서비스이며 철도, Express 버스, 자전거 노선 등을 모두 통합한 멀티모달 모델입니다. 프랑스 26개 분석 지역 중 16개 이상의 지역에서 이러한 통합이 이루어지고 있습니다. 오늘 논의할 핵심은 '어떻게 철도와 버스가 보완적인 관계를 맺을 것인가'입니다. 지리적 관점에서 볼 때, 철도는 대도시를 중심으로 방사형 구조를 가집니다. 여기서 Express 버스가 나머지 지역의 연결성을 매우고 네트워크의 균형을 맞추는 역할을 합니다. 철도망을 늘리는 것은 수십 년이 걸리지만, 버스 서비스는 훨씬 더 빠르게, 몇 년 안에 구축할 수 있습니다. 또한 버스 시스템은 기존 지상 인프라(도로)를 기반으로 하기 때문에 비용이 훨씬 저렴하며 매우 다양하고 유연하게 운영될 수 있습니다. 핵심은 단순히 버스를 배치하는 것이 아닙니다. 현재 버스는 주로 학생용이라는 인식이 강해 일반인들에게 매력이 떨어질 수 있습니다. 우리는 이 모드에 다시 매력을 부여해야 합니다. 이를 위해 Express 버스가 갖추어야 할 특징 3가지가 있습니다. 첫째, 목적지까지 빠르게 도착해야 합니다. 자가용과 비슷하거나 더 빠른 속도를 내야 사람들이 버스를 선택합니다. 둘째, 아침부터 저녁까지 넓은 시간대에서 정기적인 배차가 이루어져야 합니다. 셋째, 통합되어야 합니다. 즉, 물리적인 인프라뿐만 아니라 정보와 결제 시스템이 연결되어야 합니다. 구체적인 사례로 낭시(Nancy)와 스트라스부르(Strasbourg)를 들 수 있습니다. 낭시의 경우 여러 방식을 혼합하여 매우 광범위한 지역을 커버하고 있습니다. 스트라스부르는 매우 시각화된 시스템을 통해 이용자들이 서비스를 쉽게 인지하게 했습니다. 우리의 목표는 학교로의 연결, 편리한 환승, 그리고 각 거점에서의 처리 능력을 높이는 것입니다. 프랑스어로 'Rabatement'라고 부르는데, 이것이 핵심 역량입니다. 시뮬레이션 모델을 통해 점진적으로 위치를 조정하고 최적화했습니다. 예를 들어 스트라스부르 남쪽이나 서쪽 입구는 배차 간격이 2~3분에 달할 정도로 매우 높습니다. 이는 거의 대량 수송 시스템과 같습니다. 접근 방식은 조금씩 다릅니다. 어떤 곳은 기존 노선을 개선하고 확장하는 데 집중하고, 어떤 곳은 인프라 우선순위를 정하는 데 더 세밀한 공을 들입니다. 결국 이 Express 버스 네트워크는 이동 수요에 따라 4가지 정도의 서비스 등급으로 나뉩니다.

(Q&A 시작)
질문 1: 교통량 모델링(Traffic Modeling)은 어떻게 이루어지나요?
답변 1: 낭시의 경우 기존의 고속도로 모델과 SNCF(프랑스 철도) 모델을 재사용하고 조정했습니다. 새로운 유형의 이동성에 맞춰 모델을 최적화한 것입니다.
질문 2: 기존 노선을 변경하는 것인가요, 아니면 완전히 새로운 노선인가요?
답변 2: 낭시는 거의 새로운 전체 도식(Schema)을 그리는 작업이었고, 스트라스부르는 기존 노선을 기반으로 하되 배차와 경로를 획기적으로 개선한 사례입니다.
질문 3: 카풀(Covoiturage)과의 연계는 어떻게 되나요?
답변 3: 카풀도 고려 대상이지만 Express 버스만큼 집중적으로 파고들지는 않았습니다. 대신 카풀용 주차장(Parking) 조성 등을 통해 보조적인 수단으로 활용하고 있습니다. 중요한 점은 버스 전용 차로(BRT) 같은 물리적 개선입니다. 특히 스트라스부르처럼 밀집된 지역에서는 버스 운영이 복잡하기 때문에, 인프라 차원에서 전용 차로를 확보하는 논의가 지자체와 계속되고 있습니다. 마지막으로, 룩셈부르크 접경 지역의 사례처럼 과거 철도가 끊긴 곳에 Express 버스가 훌륭한 대안이 되고 있습니다.
질문 4: 서비스가 너무 많아져서 이용자가 혼란스러워할 위험은 없나요?
답변 4: 매우 중요한 지적입니다. 그래서 우리는 새로운 서비스의 '가시성'을 확보하고 브랜딩을 통합하는 고민을 하고 있습니다. 요금 체계(Tarification)를 하나로 합치는 것이 이용자 혼란을 막는 가장 핵심적인 해결책이 될 것입니다.