

Global Report

남아프리카 공화국 일부 선정된 도시에 풍력발전 수소충전소 최적설계

1. 개요
2. 연구사례
3. 연구의 목적 및 사이트 설명
4. 연구방법 및 구성
5. 수소 충전소 경제 모델분석
6. 결론

1. 개요

인구 증가와 삶의 질 향상에 대한 열망은 전 세계적으로 에너지 소비를 이끄는 두 가지 주요 요인입니다. 그러나 쉽게 접근할 수 있는 에너지원의 대부분은 온실 가스(GHG)를 배출하는 화석연료입니다. 이러한 배출은 오늘날 전 세계가 직면하고 있는 가장 큰 환경적 도전(기후변화)의 원인이며 인류의 존재를 위협하고 있습니다. 교통 부문은 유해 가스를 대기로 배출하는 세계 화석연료(예: 가솔린, 디젤 등)의 상당 부분을 사용합니다. 도로 교통은 전 세계 액체 화석 연료 소비의 약 절반을 차지하며 2050년에는 3배 증가할 것으로 예상되므로 이 분야에서 지속 가능한 대안이 필요합니다.

배출을 줄이는 방법 중 하나는 운송에 사용되는 연료 유형을 현재의 고탄소 연료에서 더 안전하고 효율적이며 환경 친화적인 대체 연료로 변경하는 것입니다. 수소의 물리적, 화학적 특성이 화석연료의 특성과 잘 맞아 화석연료에 가까운 수준의 효율성과 유연성을 제공하기 때문에 수소는 이상적인 대체 에너지 운반체로 보입니다.

차량이 수소로 주행하는 방법은 다음과 같은 두 가지가 있습니다.

(i) 수소가 대기의 산소와 함께 연소되는 내연 기관의 사용 및 (ii) 수소가 산소와 전기화학적으로 결합되어 생성되는 전기를 이용하는 연료전지의 사용, 이 전기로 전기 자동차를 구동함.

일반적으로 수소 자동차는 가솔린 엔진보다 훨씬 높은 효율로 소음이 없고, 유일한 부산물로 수증기를 생성합니다. 수소전기차는 배터리 전기차에 비해 재충전할 수 있는 거리가 더 길고, 재충전에 걸리는 시간이 상대적으로 짧습니다. 수소는 약 122kJ/g의 높은 질량 에너지 밀도를 가지며 이는 기존 탄화수소 연료보다 거의 3배나 더 큼니다.

예를 들어, 일반 내연기관 차량은 400km의 주행거리에 대해 약 24kg의 휘발유를 사용합니다. 수소 동력 차량은 내연 기관과 같은 주행거리에 대해 8kg을 사용하고, 수소 동력 연료 전지 전기 자동차의 경우 4kg을 사용합니다. 수소는 무게가 가벼워 온보드 모바일 애플리케이션에 탁월하고, 다양한 소스에서 생성될 수 있기 때문에 우주에서 가장 풍부하게 이용 가능한 원소입니다.

에너지 운반체로서의 수소의 단점은 부피 밀도가 낮다는 것입니다.

이것의 의미는 수소 동력 차량이 더 큰 연료탱크를 필요로 하여 다른 액체연료에 비해 수소 저장이 더 문제가 된다는 것입니다. 또한 수소 생산은 현재 비용이 많이 듭니다. 그러나 수소 활용의 동기는 특히 운송 부문에서 대기 오염을 줄이고 온실 가스를 줄이는 능력에 있습니다. 따라서 대기오염 문제가 있는 선진국에서는 수송용 수소의 활용이 증가할 것으로 예상됩니다. 그러나 이러한 전환은 더 깨끗하고 재생 가능하며 지속 가능한 공급원에서 수소를 생산하는 것과 도시에 널리 보급된 수소 충전소에 크게 좌우될 것입니다.

충전소에서 깨끗한 수소를 생산할 수 있는 두 가지 주요 기술은 증기 개질 공정과 물 전기분해입니다. 증기 개질 공정은 비용 효율적이지만 약간의 오염이 발생합니다. 물 전기분해는 비교적 효율이 좋은 성숙한 기술입니다. 특히 재생 가능한 에너지원에서 생산할 때는 무공해입니다. 현장 수소 충전소는 소규모 수소 생산을 제공합니다. 수소 디스펜스 센터까지 장거리로 수소를 운반해야 하는 중앙 집중식 수소 생산 스테이션에 비해 저렴합니다. 따라서 물 전기분해 기술을 통한 충전소의 현장수소 생산은 접근 가능한 청정 연료 제공을 통해 운송 부문의 탄소를 제거하는 깨끗하고 지속 가능한 수단을 제공합니다.

2. 연구사례

수소 충전소와 같은 자본 집약적 프로젝트의 경제적 실행 가능성과 기술적 타당성을 모델링하는 것은 그러한 프로젝트의 물리적 건설보다 더욱 중요합니다. 이것은 정보에 입각한 경제적 결정을 내리는 데 도움이 될 뿐만 아니라 그러한 프로젝트에 대한 최적의 설계에 대한 아이디어를 제공할 수 있습니다. 이를 위해 세계 여러 지역에서 재생 에너지로 구동되는 수소 충전소를 모델링하기 위해 여러 저자가 다양한 시도를 해왔습니다.

Gökçek과 Kale는 HOMER 소프트웨어를 사용하여 터키 Gökçeada 섬에 풍력/태양광/배터리 하이브리드 재생 에너지 구동 충전소를 제안했습니다. 주유소는 하루에 5kg 탱크가 있는 차량 25대를 처리할 수 있었습니다. 저자들은 현장에서 수소 생산 비용이 8.92\$/kg에서 11.08\$/kg 사이라고 결론지었습니다. 저자들은 나중에 터키의 Izmir-Cesme 시를 위한 PV-풍력 하이브리드 재생 에너지 시스템으로 구동되는 수소 충전소의 기술적 및 경제적 평가에 대한 연구를 수행했습니다. 저자들은 이 도시가 7.53\$/kg에서 7.87\$/kg 범위의 수소 생산 비용으로 Gökçeada 섬에 비해 수소 충전소를 배치하기에 더 유망한 위치라는 사실을 발견했습니다. Lordache 등은 유럽연합 회원국 내 수소 충전시설의 상업적 실행 가능성과 수익성을 결정하기 위해 회원국에서 수소 충전소의 운영을 평가했습니다. 저자들은 수소가 운송 부문의 탈탄소화를 위한 솔루션이라고 지적했습니다. 따라서 회원국 내에서 원하는 수준의 상업적 실행 가능성과 수익성을 위해 수소 연료 보급 인프라를 개발할 필요가 있습니다. Syal 등은 두 개의 서로 다른 터빈(V82 및 V112 풍력 터빈)을 사용하여 스웨덴의 선택된 3개 지역에 대해 풍력 에너지로 구동되는 수소 충전소의 경제적 실행 가능성을 수행했습니다. 주유소는 HOMER를 사용하여 매일 200대의 차량을 수용하도록 설계되었습니다. 저자들은 재생 가능한 수소가 현장에서 일년 내내 풍력 에너지에서 생산될 수 있다고 결론지었습니다. 수소 비용은 V112 풍력 터빈이 사용된 경우 5.18~7.25\$/kg인 반면, V82 풍력 터빈의 경우 비용은 6.52~9.62\$/kg입니다.

또한 Qadrdan과 Shayegan에 의해 이란에 대한 수소 충전소의 경제성 평가가 수행되었으며, 저자들은 나중에 천연 가스에서 생성된 수소를 물 전기분해에서 생성된 수소와 비교했습니다. 저자는 천연 가스에서 생산된 수소의 비용이 6~10\$/kg 범위의 물 전기분해에 비해 비용이 더 저렴(3~7\$/kg)하다는 것을 밝혔습니다. 또한 용량 계수가 증가하면 수소 생산 비용이 감소하는 것으로 나타났습니다.

Menanteau 등은 HyFrance 3 프로젝트에 따라 프랑스에서 수송용 풍력 에너지로부터 수소 생산에 대한 경제적 분석이 수행되었습니다. 다양한 수소 생산 구성에 대한 이해를 제공하기 위해 다양한 시나리오가 만들어졌습니다. 저자는 스토리지 시스템을 최소한으로 유지하는 것이 최상의 구성이라고 결론지었습니다. 이 경우 그리드가 백업인 풍력 그리드 연결 구성은 4 €/kg의 수소 생산 비용에 대한 최적의 옵션을 제공했습니다.

Li 등은 일정한 풍속과 가변 풍속과 같은 다양한 바람 조건에서 수소 확산을 조사했습니다. 두 가지 바람 조건이 수소 확산에 다른 영향을 미치는 것으로 나타났습니다. 저자는 가변 풍속이 일정한 풍속보다 더 위험한 상황을 유발할 수 있다고 지적했습니다.

Chrysochoidis-Antsos 등은 수소 생산을 목적으로 기존 주유소에 설치할 풍력 터빈에 대한 기술 평가를 수행했습니다. 생산된 수소는 연료 전지 차량뿐만 아니라 기존 지역 가스 그리드에 공급하기 위한 것입니다. GIS 기법을 활용하여 개발된 지역과 근접하게 설치되는 풍력발전기의 위험성을 고려하여 적합한 주유소를 선정하였습니다. 저자는 기존 주유소의 약 4.6%가 기준을 충족하여 이 목적에 적합하다고 밝혔습니다. 저자들은 또한 30% FCEV 구동계 시나리오에서 수요의 2.3%가 주유소에서 충족될 수 있다고 보고했습니다.

다른 연구에서는 Massaoudi 등이 알제리 Adarr 지방에서 수소충전소를 위한 가장 실현 가능한 부지 선정에 대한 구조적 절차를 제안했다. 저자들은 부지 분류를 위해 GIS 기법을, 부지에 대한 다양한 선택 기준의 가중치를 결정하기 위해 AHP(MCDM 방법 중 하나)를 활용했습니다. 그 결과 아드라 지방의 많은 지역이 서로 다른 적합성 지수를 가진 풍력 수소 생산에 적합한 것으로 나타났습니다. 높음, 중간 및 낮음 적합 영역은 각각 54.59%(236320.16km²) 및 1.12%(4842.94km²)의 2.95%(12808.97km²)로 결정되었습니다. 이 연구는 또한 미리 설정된 제약 조건에 따라 4개의 기존 스테이션이 Adarr 지방의 풍력 발전 수소 연료 보급 시스템으로 전환될 수 있음을 보여주었습니다.

또 다른 연구에서는 독일의 기존 주유소에서 전환할 수 있는 풍력 발전 수소 충전소의 잠재적 수와 수소 생산 및 분배 비용 비용이 Chrysochoidis-Antsos et al.에 의해 결정되었습니다. GIS 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하여 연구 결과에 따르면 기존 주유소의 약 5~10%가 독일 내 현장 풍력 수소충전소로 전환될 가능성이 있는 것으로 나타났다. 이 스테이션의 수소는 6.1 €/kg에서 생산되고 4.8 €/kg으로 분배되며 총 가격은 약 10.9 €/kg입니다.

Carr et al. 는 수소 충전소 운영을 위한 최적화 루틴을 제안했습니다. 제안된 루틴은 영국 로더햄의 첨단 제조 단지에 위치한 수소 충전소의 성능을 분석하는 데 활용되었습니다. 저자들은 최적화 루틴이 수소 수요와 풍력 수준에 따라 시장에서 운영할 때 이익을 증가시킬 수 있다고 결론지었습니다. Panet al. 은 태양열과 풍력의 하이브리드로 구동되는 중국의 전형적인 수소 충전소에 대한 안전성 연구를 수행했습니다. 저자는 먼저 수소 충전소를 구성하는 구성 요소와 관련된 위험 요소(즉, 통합 수소 생성, 튜브 트레일러 운송, 수소 압축, 수소 저장 및 수소 충전 시스템)와 관련된 위험을 식별한 후 일반적인 고장 시나리오를 이벤트 확률 측면에서 분석했습니다. 저자는 주요 위험 요인이 압축기이며 압축기 고장으로 인한 위험을 줄이기 위해 추가 안전 조치가 필요하다고 보고했으며, 나중에 저자는 수소 충전소와 관련된 위험을 줄이는 데 도움이 될 수 있는 다양한 안전 조치를 권장했습니다.

3. 연구의 목적 및 사이트 설명

남아공에서는 수소경제 발전이 특히 PEM(Proton Exchange Membrane) 연료전지 자동차의 사용을 고려하고 있습니다. 그 이유는 남아프리카에서 대량으로 발견되는 백금 광산이 널리 퍼져 있기 때문입니다. 이 금속은 PEM 연료 전지의 전극으로 주로 사용되어 국가의 사회적 경제 활동을 향상시킬 수 있습니다. 이를 위해 2008년 남아프리카 공화국 정부는 과학 기술부 산하 "HySA(Hydrogen South Africa)"로 알려진 국가 수소 및 연료 전지 기술 연구, 개발 및 혁신 전략을 수립했습니다. HySA는 백금 촉매의 사용을 장려하고 세계 연료 전지 시장의 25%를 차지할 목적으로 다양한 수소 연료 기술에 대한 연구를 수행할 책임이 있습니다.

Hydrogen South Africa에는 HySA 촉매, HySA 인프라 및 HySA 시스템의 세 가지 역량 센터가 있습니다. 현재 HySA 촉매는 저온 양성자 교환막 연료 전지에 사용할 수 있는 백금 촉매 제품 "HyPlat"을 개발했습니다. Hyplat은 연구 목적뿐만 아니라 국내 및 국제 시장을 대상으로 상업화 단계에 도달했습니다. 또한 또 다른 역량 센터인 HySA Infrastructure는 수소 저장을 위한 다양한 재료를 생산하고 테스트할 수 있는 최첨단 시설을 갖춘 실험실을 개발했습니다. 정부의 이러한 노력 외에도 일부 토착 연구자들은 국가의 수소 경제 발전을 장려할 수 있는 수소 생산의 다른 측면에 대한 조사를 수행했습니다.

예를 들어, Ayodele과 Munda는 남아프리카 해안 지역의 풍력 에너지 자원에서 수소 생산에 영향을 미치는 요인뿐만 아니라 수소 생성의 실행 가능성을 조사했습니다. 정격 풍력 2MW, 컷인 풍속 2m/s, 정격 풍속 11m/s, 컷아웃 풍속 22m/s의 풍력 터빈 WT9(ServionSE MM100) 및 100m의 터빈 허브 높이가 남아프리카 해안 지역의 풍력 생산에 가장 적합했으며, 정격 풍속은 터빈 허브와 같은 다른 풍력 터빈 매개 변수와 비교하여 수소 생산 비용에 상당한 영향을 미치는 것으로 보고 되었습니다. 높이, 컷인 풍속 및 컷아웃 풍속 등 여러 풍력 터빈 매개 변수에 비해 정격 풍속이 수소 생산비용에 중요한 역할을 하는 것으로 알려졌습니다. 그러나 연구에서는 남아공 풍력 발전 수소 시스템의 최적 설계를 위한 최적 아키텍처와 발전 잠재력을 고려하지 않았습니다. 저자들은 이후 남아프리카 자유주(Free State) 지방의 메멜(Memel) 마을의 바람 특성을 이용하여 수소로부터 전기 생산을 평가하는 연구를 수행했습니다. 연구의 목적은 연료 전지를 사용하여 풍력 에너지에서 생성된 저장된 수소로부터 발전 잠재력을 결정하는 것이었습니다. 연구에 따르면 Memel 시는 단위 비용이 5.8\$/kWh인 양성자 교환막(PEM) 연료 전지에 사용될 때 1980GWh의 발전 잠재력과 함께 연간 104톤의 수소를 생산할 수 있는 잠재력이 있음을 보여주었습니다. 그러나 연구는 전기를 생성하는 데 필요한 최적의 건축 구성 요소를 지정하지 않고 발전 잠재력만 고려했습니다.

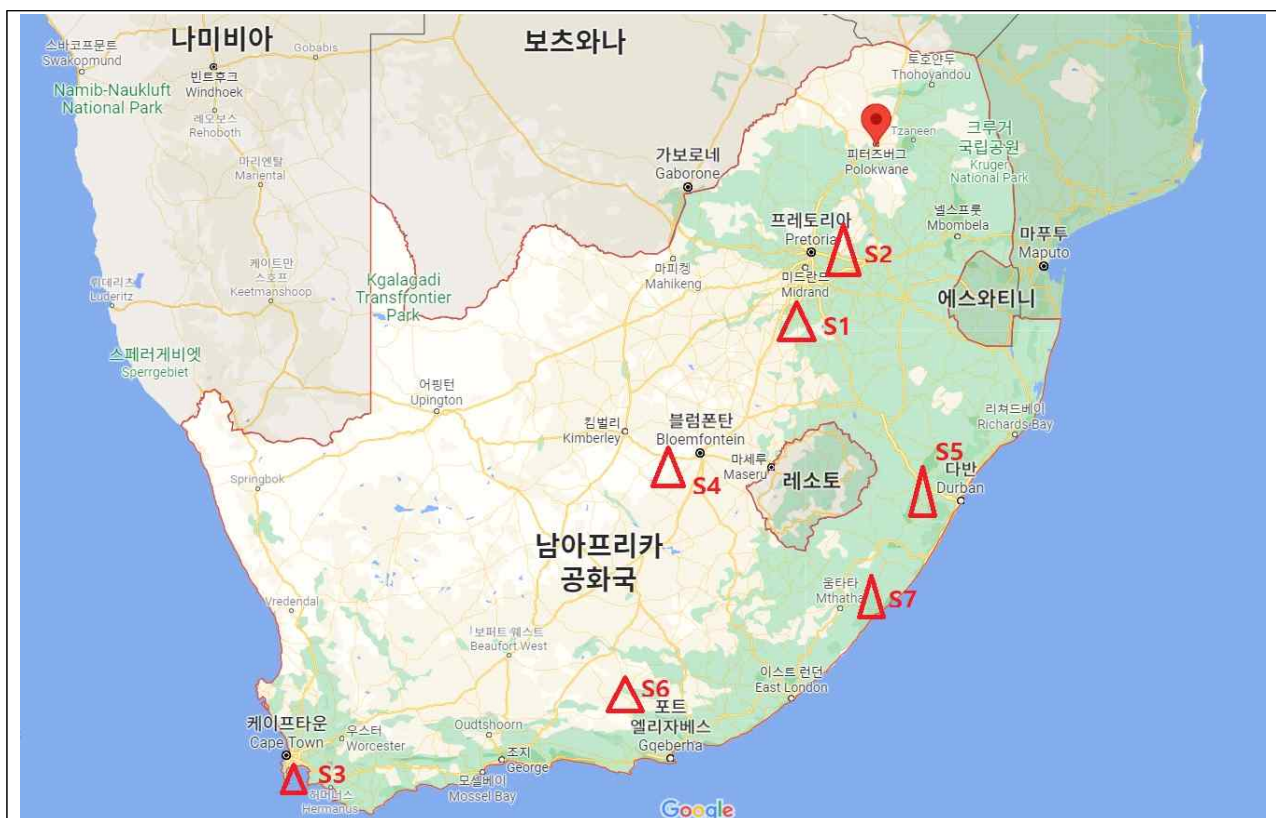
앞서 언급한 문헌에 나타난 바와 같이 다양한 노력이 이루어지고 있지만, 남아공의 수소 수요를 최적으로 충족시킬 수 있는 충전소 구조 및 수소 충전소에 대한 문헌은 부족한 실정입니다. 남아프리카 공화국은 세계에서 14번째로 많은 온실가스를 배출하는 국가이며, 운송 부문은 국가 전체 배출량의 1/3을 차지합니다. 따라서 이러한 배출을 줄일 수 있는 보다 깨끗하고 지속 가능한 대안을 찾을 필요가 있습니다. 이를 달성하기 위한 방법 중 하나는 가용한 재생 가능 에너지 자원을 사용하여 국내 육상 운송용 수소 충전소를 개발하는 것입니다. 수소충전소 건설은 자본집약적 사업이기 때문에 물리적 실현에 앞서

수소충전소의 기술경제적 실행가능성을 평가할 필요가 있습니다. 이 연구는 중앙 집중식 오프사이트 스테이션 생산 단위 대신 남아프리카에 있는 7개의 자율적인 온사이트 수소 충전소를 조사합니다. 이는 현장 수소충전소에서 중앙집중식 충전소의 공통적인 단점인 운송비와 운송의 위험성이 제거되기 때문입니다. 전기 생산을 위한 모든 재생 에너지 기술 중에서 풍력 터빈이 두드러집니다. 이는 다른 기술에 비해 기술이 성숙하고 이해도가 높기 때문입니다. 풍력 터빈에서 전기를 생산하는 비용은 이제 기존 발전기의 비용에 비해 매우 경쟁력이 있습니다. 더욱이 풍력 자원은 남아프리카, 특히 해안 지역에서 이용 가능합니다. 본 연구의 목적은 남아프리카공화국의 연료전지차 현장 수소충전소를 위한 풍력에너지 기반 발전시스템의 최적 구성을 결정하는 것입니다. 이 연구는 또한 충전소에서 수소를 생산하는 최적의 비용과 충전소의 가능한 탄소 감소 가능성을 결정할 것입니다. 연구는 HOMER Pro 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하여 수행됩니다.

이 연구에서는 풍력 터빈으로 구동되는 수소 충전소를 남아프리카 공화국의 7개 주요 도시에 위치하도록 제안합니다. 이 도시는 탄소 배출량이 높고 남아프리카에서 가장 많은 차량 인구를 가지고 있기 때문에 선택되었습니다. 주유소는 고속도로를 따라 위치하고 있으며 유사한 수소 부하 프로파일을 가지고 있다고 가정합니다. 각 스테이션은 매일 125kg의 수소 수요를 수용하도록 설계되었습니다. 이는 탱크 용량이 5kg인 수소 차량 25대의 요구를 충족하기에 충분합니다. 도시의 풍력 에너지 자원은 SAWS(South African Weather Service)와 WASA(Wind Atlas for South Africa) 웹사이트에서 입수했습니다. 풍속은 10m 풍속계 높이에서 관찰된 10분 평균 데이터입니다. 기상 돛대가 도시에 위치하지 않는 경우 가장 가까운 기상 돛대의 데이터를 사용하였습니다. 남아프리카공화국의 위치 분포는 <표1> <그림 1>에 나와 있습니다.

구분	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
도시	요하네스버그	프리트리아	케이프타운	블룸폰테인	더반	포트엘리자베스	로도스

<표1> 남아프리카 공화국 선정된 도시



<그림1> 남아프리카공화국 선정된 도시 위치

4. 연구 방법 및 구성

주유소를 구성하는 구성 요소는 풍력 터빈, 변환기, PEM 전해조, 수소 압축기, 수소 탱크, 수소 디스펜서 및 배터리로 구성됩니다. 평균 수소 요구량은 5.21kg/h로 결정되었으며 수소 요구량의 피크 시간은 12-14시 사이입니다. 이 연구는 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 개발한 HOMER Pro 시뮬레이션 도구를 사용하여 수행되었습니다. 소프트웨어는 NREL의 조정 하에 다양한 연구원에 의해 수년에 걸쳐 개선되었습니다. 경제 모델과 기술 모델 모두 테스트를 거쳤으며 구성 요소와 경제 모델이 상세하기 때문에 유효하다고 판단됩니다. 이 소프트웨어는 정의된 제약 조건에서 특정 에너지 수요를 충족시키는 가장 낮은 순 현재 비용을 가진 에너지 생산 시스템을 식별할 수 있는 기능이 있습니다. 재생 에너지 자원(풍력, 태양열, 온도 등)과 함께 연구 중인 기술의 기술 및 경제적 매개변수가 HOMER Pro에 먼저 입력됩니다. 또한 전체 에너지 프로젝트의 경제적 매개변수(예: 할인율, 인플레이션율, 프로젝트 수명 주기 등)는 최적화 프로세스를 수행하기 위해 소프트웨어에 입력됩니다. 이 소프트웨어는 프로젝트의 수명 기간 동안 실행 가능한 구성에 대한 설치 및 운영비용을 추정하기 위해 연간 각 시간 단계에서 생산 및 소비되는 에너지의 균형을 유지하는 원칙에 따라 작동합니다. 이것은 풍력 발전 에너지의 간헐적 특성을 고려하는 것이 적절합니다. HOMER Pro에는 최적의 시스템 구성을 찾을 수 있는 옵티마이저 도구가 장착되어 있습니다. HOMER 옵티마이저는 컨버터, 저장 시스템, PV 및 풍력 터빈 구성 요소를 위해 존재합니다. 가장 낮은 순 현재 비용을 초래하는 최적의 아키텍처는 시설에서 결정할 수 있습니다. HOMER Pro에서는 수소 미충족 부하를 0으로 설정하여 수소 충전소가 연중 매시간 100% 수소 수요를 충족함을 나타냅니다. HOMER Pro 옵티마이저 도구는 주유소를 구성하는 각 구성 요소에 대한 최적의 크기를 결정하는 데 사용되었습니다.

1) 풍력 터빈의 출력

풍속은 일반적으로 터빈 허브 높이와 다른 풍속계 높이에서 관찰됩니다. 일반적으로 0.05~0.5 범위입니다. 이전 연구에서는 남아프리카의 많은 사이트에 대해 0.104와 0.196 사이에서 변하는 것으로 나타났습니다. 따라서 값의 평균(즉, 0.15)이 이 연구에서 사용되었습니다. HOMER Pro는 풍력 터빈의 출력 곡선에서 풍력 터빈의 출력을 결정합니다. 출력 곡선은 일반적으로 일련의 성능 테스트 후에 제조업체에서 제공하며 터빈마다 다릅니다. 본 논문에서는 Enercon E-82를 채택하였습니다.

2) 전해조

일반적으로 사용되는 두 가지 유형의 전해조는 알칼리성 전해조와 양성자 교환막(PEM) 전해조입니다. 알칼리 전해조는 60~80°C의 온도에서 작동합니다. 기존의 알칼리 전해조는 5bar의 압력에서 작동하는 반면 고급 전해조는 10~30bar에서 작동합니다. PEM 전해조는 알칼리 전해조에 비해 비교적 새로운 기술입니다. 저전류, 수소밀도, 부분부하, 저압 운전이라는 알칼리 전해조의 단점을 PEM 기술로 극복하였습니다. 이 기술은 빠른 동적 응답 시간, 넓은 작동 범위, 고효율(85% 이상) 및 매우 높은 가스 순도(99.999%)를 제공하여 추가 정제 없이 직접 사용할 수 있습니다. 이러한 장점 외에도 남아프리카에 풍부한 백금이 일반적으로 PEM 전해조의 전극으로 사용됩니다. 따라서 본 연구에서는 PEM 전해조를 사용하였습니다.

3) 수소 압축기

전해조에서 생성된 수소는 수소 탱크에 저장되기 전에 압축되어야 합니다. 수소는 상온에서 휘발유 등 가솔린에 비해 약 3000배의 저장 공간을 차지합니다. 수소 충전소는 350 또는 700 bar의 압력에서 연료 전지 차량을 채우도록 설계되었습니다. 그러나 수소는 이러한 압력보다 낮은 압력에서 전해조에 의해 생성됩니다. 따라서 압축기가 필요한 압력으로 압력을 올릴 필요가 있습니다.

4) 수소탱크

수소 탱크는 전해조에서 생성된 수소를 저장하는 데 사용됩니다. 고압가스 실린더는 가장 일반적인 수소 저장 기술입니다. 최근 기술의 발전으로 인해 최대 800bar의 압력을 견딜 수 있는 새로운 경량 복합 가스 실린더가 개발되어 수소 가스가 36kg/m³의 부피 밀도에 도달할 수 있게 되었습니다.

5) 배터리 저장 및 변환기

풍속은 본질적으로 매우 간헐적입니다. 이는 수소를 생산하기 위한 전력 공급의 보안 측면에서 수소 충전소의 무결성을 훼손할 수 있습니다. 따라서 풍력 터빈의 출력 변동성을 보상하기 위해 에너지 저장 장치가 필요합니다. 이 문서에서는 AES 6.6kWh, 48Vdc 배터리가 에너지 저장 장치로 사용되었습니다. 배터리는 약 95%의 높은 왕복 효율과 10년 내 38MWh의 수명을 가지고 있기 때문에 선택되었습니다. DC 버스와 AC 버스 사이의 에너지 흐름은 변환기를 사용하여 유지되었습니다. 시뮬레이션에 사용된 컨버터는 양방향 3상 컨버터로 인버터 효율은 92%, 정류기 출력은 90%입니다. 배터리와 컨버터의 최적 크기는 소프트웨어의 옵티마이저 도구를 사용하여 HOMER Pro에 의해 결정되었습니다.

6) 수소 디스펜서 및 냉각 시스템

수소는 350 또는 700바 노즐이 있는 디스펜서를 사용하여 고압 탱크에서 수소 차량 탱크로 공급됩니다. 팽창하는 동안 수소 온도가 상승하므로 저장 탱크의 온도 상승을 수용하기 위해 예냉이 필요합니다. SAE TIR J2601 수소 급유 프로토콜을 준수하고 -20°C의 온도에서 수소를 분배할 수 있는 Type B70과 같은 수소 분배기가 이 백서에서 선택되었습니다. Murat Gökçek and Kale의 연구에 따르면 수소를 15°C에서 -20°C로 냉각하는 데 필요한 에너지 소비는 0.18kWh/kg으로 취해진 반면 냉각 용량은 1.5의 유량에서 0.72kW였습니다. 이 냉각을 유발하는 데 필요한 전기 에너지와 수소 충전소의 원활한 작동을 위해 필요한 기타 전기 부속품이 HOMER Pro 모델에 전기 부하로 포함되었습니다.

5. 수소 충전소 경제 모델분석

수소충전소의 경제성은 HOMER Pro를 이용하여 수행하였습니다. 순현재비용(NPC), 평균화에너지비용(LCOE) 및 평균화수소생산비용(LCOH)은 스테이션의 경제적 실행 가능성을 결정하는 기초로 사용됩니다.

풍력 터빈으로 구동되는 수소 충전소는 남아프리카의 7개 도시를 위해 설계되었습니다. 수소 스테이션은 일년 내내 하루에 125kg의 수소를 생산할 수 있는 능력을 갖습니다. 각 스테이션은 하루에 5kg의 탱크 용량을 가진 25대의 수소 차량의 수소 수요를 충족시킬 것입니다.

1) 선정된 도시의 풍속 특성

수소 충전소는 도시의 풍력 에너지 자원에서 생산된 전기로 작동하도록 설계되었습니다. 따라서 수소 충전소의 기술적 가능성과 경제성은 풍력에너지 자원의 특성에 크게 좌우됩니다. 도시의 연간 평균 풍속은 <표2>와 같습니다.

구분	사이트	도시	평균풍속
1	S1	Johannesburg	4.14
2	S2	Pretoria	4.04
3	S3	Cape Town	6.39
4	S4	Bloemfontein	5.11
5	S5	Durban	5.53
6	S6	Port Elizabeth	6.15
7	S7	Rhodes	7.9
<표2> 선정된 도시들의 연간 평균 풍속			

<표2>은 Rhodes(S7)가 7.9m/s의 값으로 가장 높은 연평균 풍속을 경험하는 반면 Pretoria(S2)는

4.04m/s의 값으로 가장 낮은 풍속을 경험함을 보여줍니다. 도시는 9월에 가장 높은 월별 풍속을 경험하고 3월에 가장 낮은 값을 경험합니다. 케이프 타운(S3), 포트 엘리자베스(S6), 로도스(S7)의 도시는 10m 풍속계 높이에서 6m/s 이상의 평균 연간 풍속을 경험합니다. 사이트 S7의 월별 풍속 변화가 본질적으로 물결 모양임을 보여줍니다. 그러나 대부분의 풍속은 선택된 풍력 터빈의 컷인 및 컷아웃 풍속 범위 내에 있습니다. 풍속의 물결 모양의 특성으로 인해 현장(S7)에서 풍속의 높은 난류 강도가 발생할 수 있지만 용량 계수는 수소 생산을 돕기에 충분할 것입니다.

2) 도시에 최적화된 수소충전소 구성

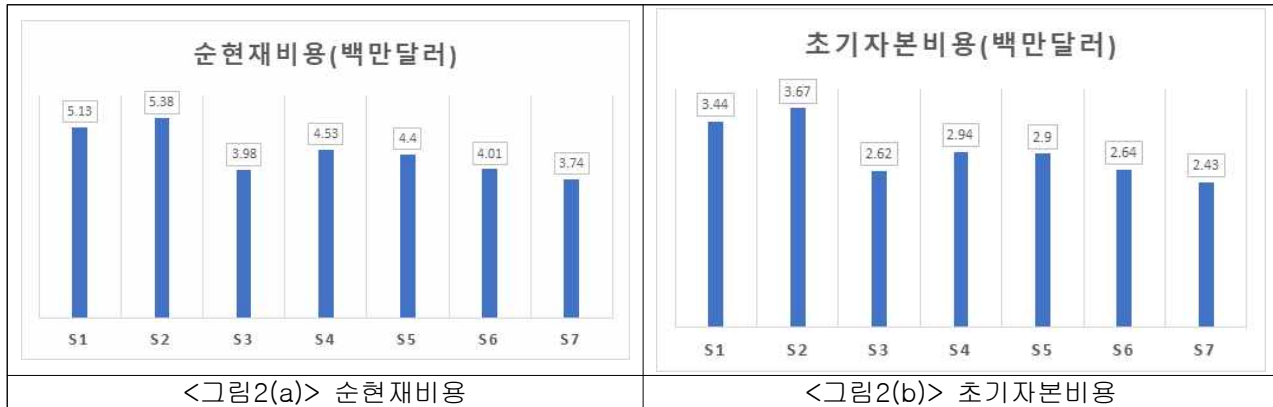
도시의 풍력 에너지 자원을 기반으로 HOMER Pro에 제공된 옵티마이저 기능을 사용하여 각 5kg의 탱크 용량을 가진 25대의 차량에 대한 수소 수요를 충족하는 데 필요한 수소 보급의 최적 아키텍처(구성 요소)를 계산했습니다. HOMER에서 모델링한 수소충전 아키텍처를 나타내고, 각 도시별 최적 아키텍처와 주유소 연간 수소 생산량(tons/yr)을 <표3>에 나타내었습니다.

사이트	수소를 생산하는 주유소의 최적 부품 크기						
	풍력터빈 (Nos)	배터리 (Nos)	전해조 (kW)	수소탱크 (kg)	전환기 (kW)	재생에너지 비율 (%)	연간수소생산량 (ton/yr)
S1	30	1048	350	1000	1354	100	4.646
S2	42	1042	400	1000	1281	100	4.638
S3	38	842	300	170	1190	100	4.568
S4	29	1050	350	300	1304	100	4.58
S5	38	999	300	300	1206	100	4.582
S6	39	832	300	170	1233	100	4.567
S7	30	752	300	170	1295	100	4.572
<표3> 도시 및 연간 수소 생산을 위한 최적의 수소 충전소 건축요소							

남아프리카 공화국의 주유소에 필요한 풍력 터빈의 수는 29개에서 42개로 다양합니다. Pretoria(S2)는 수소 충전소에 전력을 공급하기 위해 가장 많은 수의 풍력 터빈(42)이 필요합니다. 이것은 도시가 가장 낮은 풍속을 경험하기 때문에 예상됩니다. 낮은 풍력 자원을 보상하기 위해 풍력 터빈의 수를 늘려야 합니다. 이것은 차례로 도시의 수소 충전소의 경제적 실행 가능성에 영향을 미칠 것입니다. 일반적으로 배터리 수는 Rhodes(S7)의 752개에서 Bloemfontein(S4)의 1050개까지 다양합니다. 수소 충전소는 하루에 25대의 수소 차량에 연료를 공급하는 데 필요한 125kg의 수소를 공급하기 위해 연간 최소 4,563톤의 수소를 생산할 것으로 예상됩니다. HOMER Pro 결과에서 전해조에서 연간 생산되는 수소의 양은 Rhodes에서 4.572ton/yr에서 Johannesburg에서 4.646ton/kg 사이입니다. 이는 주유소가 연중 차량의 수소 요구 사항을 충족했음을 나타냅니다.

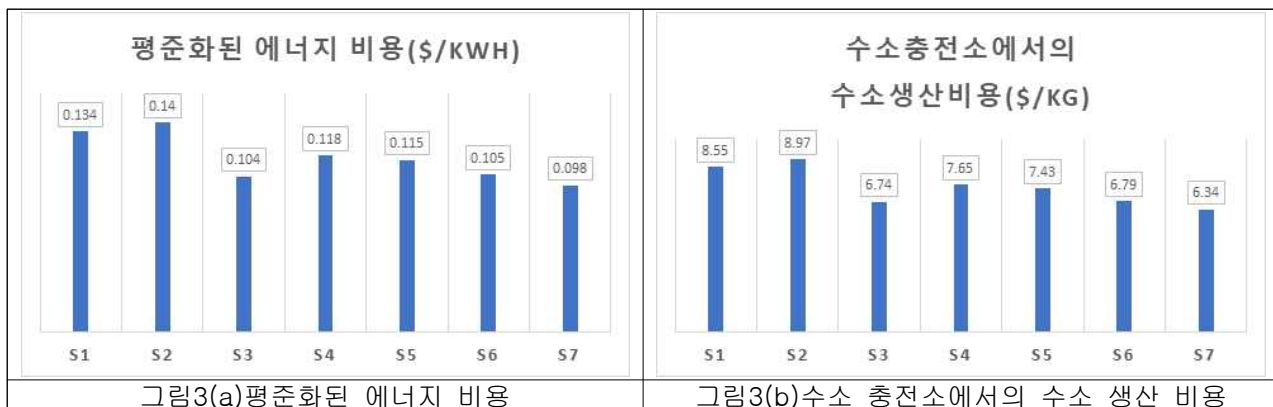
3) 수소충전소 경제성 평가

수소충전소의 경제성은 순현재비용(NPC), 초기자본비용(ICC), 풍력발전기에서 생산되는 평준화된 에너지비용(LCOE), 평준화된 수소생산비용(LCOH)을 기준으로 평가되었습니다. <그림2>는 각 도시의 수소 충전소에 대한 순현재비용(NPC)과 초기자본비용(ICC)을 나타냅니다. 그림 2(a)와 2(b)의 결과는 NPC 범위가 \$3.74 ~ \$5.38 백만인 반면 수소 연료 보급을 위한 초기 자본 비용은 \$2.43 ~ \$3.67 백만임을 나타냅니다.



Rhodes 시(S7)는 각각 \$374만 및 \$243만 값으로 최소 NPC 및 최소 초기 자본 비용을 나타냅니다. 프리토리아(S2)는 NPC와 초기 자본 비용이 가장 높습니다. 선정된 도시 중 풍력 자원이 가장 불리한 도시이기 때문이다. 따라서 풍력 터빈 및 수소 충전소를 구성하는 기타 구성 요소는 낮은 풍력 자원을 보상하기 위해 증가되어야 합니다. 일반적으로 케이프타운(S3), 더반(S5), 포트엘리자베스(S6), 로도스(S7)와 같은 해안 지역의 도시들은 풍력 자원 측면에서 더 유리합니다. 이것은 도시가 최소 순현재비용과 초기자본비용을 반환하기 때문에 도시의 경제적 생존 가능성에 반영됩니다. 따라서 이러한 도시의 수소 충전소에 대한 투자는 매우 고무적입니다.

물 전기분해는 물을 수소와 산소로 분해하기 위해 전기가 필요합니다. 따라서 수소 생산 비용은 발전 비용에 크게 좌우됩니다. 풍력 터빈에서 생성된 전기의 평균화 비용과 수소 생산 비용이 그림 3에 나와 있습니다. 풍력 터빈에서 생성된 전기 비용은 그림3(a)와 같이 로도스(S7)의 0.098\$/kWh에서 프리토리아(S2)의 0.14\$/kWh까지 다양합니다. 그림 3(b)는 균등화된 수소 발생 비용이 6.34\$/kg에서 8.97\$/kg 사이에서 다양함을 보여줍니다.



일반적으로 이러한 비용은 전 세계 다른 도시의 수소 생성 비용과 비교할 때 경쟁력 있는 것으로 간주됩니다. 예를 들어, 이란의 수소충전소에서 나오는 수소의 비용은 6\$/kg에서 10\$/kg 사이로 계산되었습니다. 터키의 Göğçeada에서는 비용 범위가 8.92 \$/kg에서 11.08 \$/kg 사이이며 터키의 Izmir-Cesme에서는 비용이 7.53\$/kg에서 7.87\$/kg까지 다양합니다. 스웨덴에서는 비용이 V82 풍력 터빈의 경우 6.52~9.62\$/kg으로 결정되었습니다. 따라서 남아프리카 공화국의 수소 충전소 투자는 세계 다른 도시에 비해 경쟁력이 있다고 할 수 있습니다. 국가의 해안 지역에 위치한 도시(즉, S3, S5, S6 및 S7)는 각각 6.74, 7.43, 6.79 및 6.34\$/kg의 값으로 매우 고무적인 수소 생산 비용을 가지고 있습니다. 그러나 본토의 도시, 즉 요하네스버그(S1), 프리토리아(S2) 및 블룸폰테인(S4)은 풍력 에너지 자원이 낮으므로 NPC 및 초기 자본 비용이 더 높습니다. 풍력 에너지 자원에서 수소 생산 비용은 각각 8.55, 8.97 및 7.65\$/kg의 값으로 이러한 도시에서 더 높습니다.

5) 주유소의 휘발유 교체 및 탄소저감 능력

주유소의 연간 수소 생산량을 기준으로 수소를 운송 연료로 사용하여 대체할 수 있는 휘발유의 양을 계산

했습니다. 이후 각 도시에서 저감할 수 있는 CO₂ 및 CO 배출량을 결정하고 그 결과를 <표4>에 나타내었습니다. 표의 결과는 88.9톤의 휘발유가 수소충전소에서 대체할 수 있음을 보여줍니다. 남아프리카 공화국에서 매년 선정된 도시. 이는 CO₂ 및 CO 배출량을 각각 연간 73.95톤 및 0.133톤 감소시킬 수 있습니다.

사이트	가솔린 교체 (tons/yr)	연간CO ₂ 감소(tons/yr)	연간CO감소(tons/yr)
S1	4.646	10.6858	0.0192
S2	4.638	10.6674	0.0192
S3	4.568	10.5064	0.0189
S4	4.58	10.534	0.0189
S5	4.582	10.5386	0.0189
S6	4.567	10.5041	0.0189
S7	4.572	10.5156	0.0189
Total	88.9	73.9519	0.1328
<표4> 연간 가솔린 교체, CO ₂ 및 CO 감소			

6. 결론

남아공 7개 선정 도시를 대상으로 풍력 수소충전소의 최적 설계와 경제성을 확보했습니다. 주유소는 1년 내내 각각 5kg의 탱크가 있는 25대의 수소 차량의 일일 수요를 충족할 수 있는 용량을 갖습니다. 도시의 풍력 발전 잠재력에 대한 통찰력을 얻기 위해 먼저 도시의 풍력 자원의 특성을 평가했습니다. 이후 풍력발전 수소충전소의 경제성과 탄소저감 잠재력을 판단했습니다. 연구에서 남아공 해안 지역의 도시는 풍력 발전 수소 충전소를 현장에서 사용할 수 있다는 결론을 내렸습니다. 선정된 충전소에서 수소를 현장에서 생산하는 비용은 전 세계의 다른 현장에 비해 경쟁력이 있습니다. 수소충전소는 연간 88.9톤의 휘발유를 대체할 수 있는 능력을 갖추고 있어 탄소배출을 저감할 수 있습니다. 향후에는 남아공을 대상으로 현장 수소충전소와 단일 중앙 집중식 오프사이트 수소충전소 간의 비교를 수행하고 기술, 경제 및 운송 기준 측면에서 평가할 예정입니다. 또한, 다른 지역에 풍부한 태양광, 유체역학, 바이오매스와 같은 다른 재생 가능 에너지 자원을 탐색하여 국내 수소 충전소 지원 가능성을 모색할 것입니다.

<원문제목> Optimal design of wind-powered hydrogen refuelling station for some selected cities of South Africa

<원문출처> In International Journal of Hydrogen Energy 16 July 2021 46(49):24919–24930