

수소연료전지자동차 및 수소충전소 확산에 따른 수요예측 및 입지선정

Demand Prediction and Location theory
depending on the diffusion
of Fuel-Cell Electric Vehicle
and Hydrogen Station.

지도교수 신정우

경희대학교
산업경영공학과

이지호 이한슬 이현근 이호재 장성준

2019년 12월 목 차

표 목차	ii
그림 목차	iii
초록	iv
1. 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
2. 이론적 배경 및 선행 연구	4
2.1 정의 및 현황	4
2.2 선행연구조사	8
2.3 기존연구와차별성	8
3. 분석 모형	9
3.1 BASS 확산 모형	10
3.2 P-median model	10
4. 분석 결과	13
4.1 확산 모형	13
4.2 입지선정	18
5. 요약 및 결론	22
6. 참고 문헌	24

표 목차

[표 1] 수소경제 활성화 로드맵	2
[표 2] 연도별 수소연료전지 자동차 등록대수 현황	5
[표 3] 수소연료전지자동차 보급계획	5
[표 4] 국내 출시된 FCEV 종류	6
[표 5] 연도별 국내 수소충전소 등록 현황	6
[표 6] 수소충전소 설치계획	7
[표 7] 국내 지자체별 FCEV 보조금 지급 현황	7
[표 8] 일본과 한국의 수소차 및 충전소 로드맵	15
[표 9] 연도 및 파랑 대수 별 적절 충전소 대수	17

그림 목차

[그림 1] 연도별 수소자동차 등록대수 현황	5
[그림 2] 연도별 국내 수소충전소 등록 현황	7
[그림 3] 시간에 따른 Bass 모형 그래프	9
[그림 4] P-median 모형의 수식	10
[그림 5] Pareto Solution을 적용한 함수식	11
[그림 6] HEV,BEV,FCEV 간 상관관계 도출 데이터	12
[그림 7] R을 이용해 분석한 HEV의 p와 q값	13
[그림 8] R을 이용해 분석한 BEV의 p와 q값	13
[그림 9] Bass 모형을 활용한 FCEV의 판매예측 (2015 ~ 2050)	14
[그림 10] 정부의 로드맵과 Bass 모형 누적 예측치의 차이 비교	15
[그림 11] 적절 충전소 대수 회귀식	19
[그림 12] 연도 별 입지선정 배치 결과	20
[그림 13] 30년도의 충전소 대수 결과 (좌)와 빈도 표현 (우)	20

초록

수소연료자동차 및 수소충전소 확산에 따른 수요예측 및 입지선정

이지호 이한슬 이현근 이호재 장성준
경희대학교
지도교수 신정우

키워드

수소연료전지자동차(FCEV), 하이브리드자동차(HEV) 전기자동차(BEV), Bass모형,
Pareto 모델, P-median 모델

1. 서론

1.1 연구 배경

교토의정서에 이어 파리 협정까지 세계 각국은 지구온난화와 온실가스 배출에 따른 기후 변화 및 환경문제에 대응하기 위해 국제협력체계를 구축하며 파트너십을 확장하고 있다. 특히 유럽, 중국, 미국 등 전 세계적으로 각국의 정부는 CO_2 등의 배기가스와 관련된 환경규제를 지속해서 강화하고 있으며 자동차 분야에서 에너지 절감의 필요성이 급격하게 대두하고 있다. 유럽은 이미 1992년부터 '유로 1'이라는 배기가스 배출에 대한 규제를 시작했고 현재 '유로 6C'로 더욱 강화된 규제를 사용하고 있다. 2020년 1월부터는 유로 6D가 시행되며 이는 RDE(실주행 기준 배출량) 기준이 기존 유로 6C(0.168g/km)보다 1.5배 강화된 0.12g/km이다. 따라서 기존 석탄 연료를 대체할 저탄소 체제로의 전환에서 새로운 대체재로 신재생이 이끄는 저탄소 에너지원과 천연가스가 미래 주요 에너지원으로 부상하고 있다. 이에 따라 유럽, 미국, 일본 등은 친환경 차 시장을 급격히 성장시키고 있으며, 친환경 차 시장 육성에 있어 본격적으로 시장을 선점하려고 노력을 기울이고 있다.

이 중 전기자동차에 이어 수소연료전지 자동차(이하 FCEV)는 새로운 친환경 자동차의 대표주자로 주목받고 있다. 수소는 온실가스 감축, 재생에너지 이용 확대, 미세먼지 저감 등 친환경 에너지 확산과 다각화 등에 이바지하는 새로운 성장 동력이다. 수소 경제를 통해서 새로운 시장의 창출 가능성이 크기 때문에 수송 분야와 에너지 분야 등 다양하게 뻗어나 갈 수 있다는 장점이 있다. 또한, 수소는 어디에서나 구할 수 있으므로 현재 에너지의 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리나라와 같은 에너지자립도가 낮은 국가에서 안정적인 경제성장과 함께 해외 에너지 의존도 감소 및 에너지 자립을 확보할 기반이 된다. 무엇보다 FCEV는 온실가스와 미세먼지를 배출하는 기존 화석 연료보다 화학반응으로 동력을 일으키므로 사용 시 물만 배출되며 주행하는 것만으로 대기 중의 미세먼지를 정화하는 기능이 있어 친환경 차의 대표주자로 꼽을 수 있다. 더구나 한 번의 충전만으로 600km 이상의 거리를 주행할 수 있다는 것이 FCEV의 가장 큰 강점이기도 하다.

미국, 일본, 유럽 등을 시작으로 전 세계적으로 수소 경제 경쟁은 치열하지만 아직 초기 단계이며 우리나라 역시 수소 경제에 선두로 앞서가기 위해 많은 관심과 노력을 기울이고 있다. 정부는 2019년 1월 <수소 경제 활성화 로드맵>을 발표해 수소 차의 보급을 시작으로 세계 최고 수준의 수소 경제 선도국가로 도약하겠다는 계획을 내비쳤다. 따라서 2040년까지 수소 차 620만대, 수소충전소 1200개 이상을 목표로 하고 있으며, 2040년에는 연간 43조 원의 부가가치와, 42만 개의 새로운 일자리를 창출하는 혁신성장의 원동력이 될 것으로 기대한다고 발표했다. 나아가 수소경제 산업 육성을 위해 약 5000억 원으로 예산을 확대 편성했으며 수소충전소 등 인프라 구축을 중

[표 1] 수소 경제 활성화 로드맵

출처 : 산업통상자원부

		2018년	2022년	2040년
모빌리티	수소 차	1800대	8.1만대	620만대
	-승용차	1800대	7.9만대	590만대
	-버스	2대	2000대	6만대
	-택시			12만대
	-트럭			12만대
	충전소	14개	310개	1200개
에너지	발전용	307MW	1.5GW	15GW
	가정건물용	7MW	50MW	2.1GW
수소생산	연간공급량	13만 t	47만 t	526만 t
수소가격	(원/kg)		6천원	3천원

심으로 수소에너지 혁신기술 개발, 미세먼지 저감과 친환경 대중교통체계를 위한 예 산 등 수소를 새로운 경제성장과 친환경 에너지의 원천으로 삼으려 한다. 또한, 환경 부도 ‘2020년까지 친환경 차 100만대 보급’을 목표로 삼고 수소차 확산과 충전을 위 한 인프라 구축을 위해 약 3000억 원의 예산을 확대했다. 이는 온실가스를 감축하는 환경개선 효과와 함께 저탄소 에너지 체제로 전환 등을 통해 약 9000억 원의 경제적 효과를 보게 될 것으로 예측된다. 국내에서는 현대자동차가 유일하게 수소자동차 넥 소를 출시했으며 2030년까지 50만대의 수소차를 생산한다는 계획을 하고 있다. 현대 자동차를 기준으로 자동차 산업 전반에서도 수소 차 보급을 위한 시장 육성에 힘쓰고 있으며 연비와 배출가스, CO₂ 규제강화 및 친환경 차 보급 확대를 위해 보조금 지급, 세금 감면 등의 정부의 재정적 지원 역시 이를 더욱 가속하는 수단이 될 것이다. 이 러한 수소 사회로의 전환은 국가 경제, 국민 생활 및 사회 전반에 근본적 변화를 초 래할 것으로 예상된다.

1.2 연구 목적

정부는 본격적인 수소 경제 활성화를 위해 2019년 1월, 2040년까지 중장기적인 수소 경제 활성화 로드맵을 발표했다. 이를 통해 2040년까지 수소 차 보급 대 수 620만대, 수소 충전소 1200개소, 발전 및 가정건물용 연료전지 보급을 17.1GW로 설정했다. 이는 2018년과 비교해 각각 3444배, 85배, 58배로 다소 공격적인 목표이다. 하지만 2016년부터 강화된 온실가스 배출규제 기준 적용 및 미세먼지 저감 등을 위해 정부의 지원은 더욱 확대될 전망이다. 2019년 수소 차 관련 환경부 예산은 수소 차 구매 시 4천 대, 수소충전소 30기 지원을 위해 1496억 원이 편성되었다. 또한, 설치 보조금 및 운영 보조금과 더불어 장기적으로 수소 가격 하락을 통해 수소 경제성 확보를 통한 수소 인프라의 확대를 목표로 하고 있다.

하지만 이와 같은 정부의 노력에도 불구하고 현재 수소 차의 본격적 대중화를 위해서는 아직 전체적인 수소 차 시장의 인프라는 매우 부족한 실정이다. 2019년 12월 기준, 운영 중인 수소충전소는 30개소이며, 이 중 일반 수소 차 사용자에게 이용 가능한 수소 충전소 개수는 오직 25개소에 불과하다. 정부는 2020년까지 누적 80개소, 2025년 210개소, 2030년 520개소가 구축 예정이라는 목표를 세웠다.

본 연구에서는 우리나라의 수소 차 시장의 확산에 앞서 정부의 로드맵을 토대로 전반적인 확산과 인프라 구축 목표의 타당성을 산업 공학적 시각에서 비교해보고자 한다. 이를 통해 먼저 Bass 모형을 통해 FCEV의 확산을 예측하고 이를 바탕으로 한 수소충전소의 입지선정 및 전망을 CPLEX로 분석했다. 이렇게 FCEV의 확산과 수소충전소의 전망을 최종적으로 도출된 결과 값을 2040년 정부의 로드맵을 토대로 어떠한 차이를 보이는지 비교하는 것을 통해 의미를 도출하는 것을 목적으로 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서 이론적 배경 및 선행 연구에 대해 언급하며 제 3장에서 제 4장에서 정부의 로드맵과 비교를 통한 수소 차 확산을 예측하고 이를 기반으로 한 수소 충전소 입지 선정 및 확산을 분석했다. 제 5장에서는 시사점 및 한계점을 파악하고 요약 및 결론으로 마무리한다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

2.1 정의 및 현황

2.1.1 수소연료전지자동차

2.1.1.1 수소연료전지자동차의 정의

수소연료전지자동차란 기존 가솔린 내연기관 대신 연료전지(수소와 공기 중의 산소를 반응시키고, 이때 발생하는 전기)를 이용한 차세대 친환경 자동차를 말한다. 친환경이라고 하는 이유는 수소와 산소가 결합해 에너지를 만든 후 이산화탄소 등의 탄화수소물이 아닌 H_2O (물)이 배출되기 때문이다. 수소연료전지자동차에는 연료전지스택, 모터, 배터리, 수소탱크, 열·물 관리장치, 공조장치, 전력변환장치, 고압밸브 등이 탑재되어 있다. 이 중 스택은 일반적으로 수백 개의 셀을 직렬로 쌓아 올린 연료전지 본체로, 수소와 산소의 화학반응이 일어나 전기가 발생하는 지점이다. 스택의 단위 셀은 막전극접합체(MEA)와 분리막 (Separate)으로 구성되어 있다. 이 중 MEA는 수소 이온을 이동시켜주는 고분자 전해질막, 전해질막의 양면에 백금 촉매를 도포하여 구성되는 촉매전극인 양극과 음극으로 나뉜다. 수소연료전지차는 수소 공급방식에 따라 두 가지로 나뉘는데, 압축수소탱크 또는 액체수소탱크를 이용해 수소를 공급하는 방식과 메탄올을 분해하여 수소를 공급하는 방식이 있다.

2.1.1.2 수소 충전소

수소충전소는 수소 공급 방식(자체 수소 생산 여부)에 따라 아래와 같이 분류된다. Off-site 방식은 공장에서 생산된 수소를 파이프라인, 튜브트레일러 등으로 수소를 공급하는 방식이고 On-site 방식은 충전소 내에서 개질(추출), 수전해 등 통해 수소를 생산하는 방식이다. 현재 국내에 구축된 수소충전소는 대부분 튜브트레일러 방식이다. 튜브트레일러 방식 수소충전소를 기준으로 볼 때, 수소충전소는 CNG충전소와 유사하게 압축기, 저장용기, 냉동기/칠러, 충전기로 구성되어 있다. CNG충전소와 다른 점은 충전 과정에서 발생하는 수소의 온도 상승 방지를 위한 냉각설비가 추가된 점이 다르다. 충전과정은 수소 공급단계 - 수소 압축단계 - 수소 저장단계 - 냉각단계 - 충전 단계로 구성되어 있다. 수소충전소 1일 최대 충전 대수는 현재 14시간 운영 기준으로 하루 최대 넥쏘 70대 충전 가능하고 24시간 운영할 경우에는 넥쏘 120대 충전이 가능하다.(5kg/대 충전) 다만, 고압(900Bar) 저장탱크가 적용되지 않은 수소충전소의 경우, 연속으로 많은 차량 충전시에 수소가 압축기를 고압이 유지되어야 하므로 추가적인 시간이 소요될 수 있다. 향후 수소충전소 사양은 1200kg/day)로 상향이 될 여지가 있다.

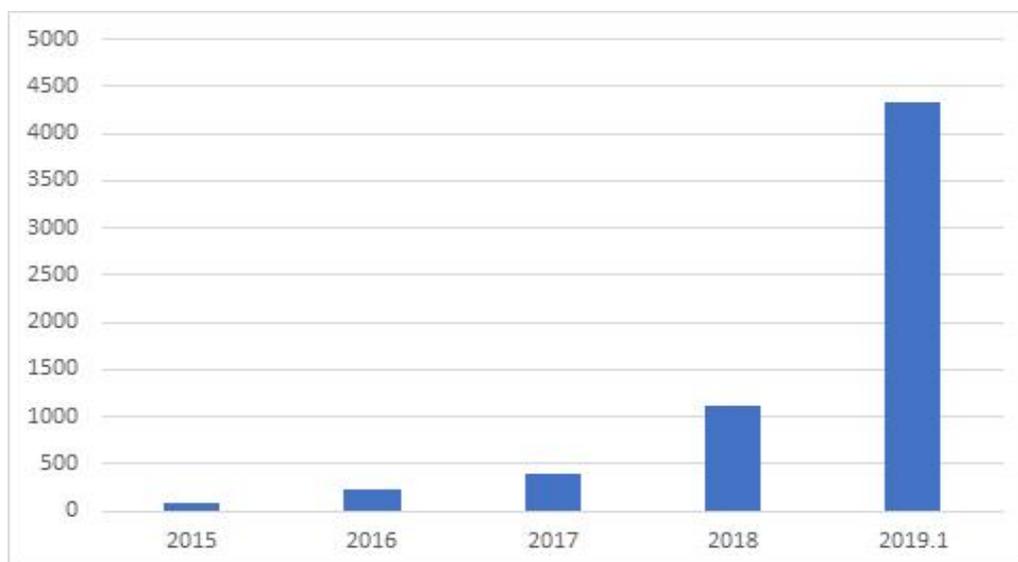
2.1.1.2 수소자동차의 현황

한국자동차산업협회(KAMA)에서 발표한 국내 연도별 수소차량등록대수에 따르면 우리나라에 처음으로 수소연료자동차가 등록된 시기는 2013년부터이나 2014년까지 누적 등록대수가 17대로 매우 미미하며, 데이터가 제대로 기록되어있지 않다. 따라서 본 연구에서는 2015년부터 기록된 데이터를 사용한다. 누적등록대수는 2015년 93대부터 점차 상승하여 2016년 221대, 2017년 391대, 2018년 1118대를 기록했으며, 2019년 10월 말 4325대를 기준으로 매우 빠른 속도로 상승하고 있다는 것을 알 수 있다.

[표 2] 연도별 수소연료전지 자동차 등록대수 현황

출처 : 국토교통부

구분	2015	2016	2017	2018	2019.10
수소연료전지자동차	93	221	391	1118	4325



[그림 1] 연도별 수소자동차 등록대수 현황

출처 : 국토교통부

정부는 수소경제로드맵을 통해 2040년까지 수소연료전지자동차 620만대(내수 290만대) 이상을 보급하겠다는 목표를 발표했다. 이를 위해 산업부에서는 수소연료전지자동차 연구개발(R&D)을 지원하고 있으며, 국토부에서는 수소충전소 설치 및 버스 등 대중교통 체계에 수소연료전지자동차 도입을 실시하고 있다. 환경부에서는 수소연료전지자동차 구매 보조금 지급 및 보급 지원 정책을 실시중이다. 2019년 기준 수소버스는 35대이며, 2040년까지 40,000대를 목표로 하고 있다.

[표 3] 수소연료전지자동차 보급계획(단위 : 만대, (내수))

출처 : 산업통상자원부

구분	2022	2030	2040
수소연료전지자동차	8.1(6.7)	180(85)	620(290)

국내에 출시된 수소연료전지자동차는 현대자동차의 넥쏘(NEXO)만 있으며 세부 모델로는 모던 (A/T)와 프리미엄 (A/T)가 있다.

[표 4] 국내 출시된 FCEV 종류

출처 : 현대모비스

이름	넥쏘 모던 (A/T)	넥쏘 프리미엄 (A/T)
가격	68,900,000원	72,200,000원
최고속도	177km/h	179km/h
타이어	17inch	19inch
표준연비	복합 96.2km/kg	복합 93.7km/kg

2.1.2 수소연료전지자동차 인프라

2.1.2.1 수소연료전지자동차 인프라 정의

수소는 생산방식에 따라, 개질 수소, 부생 수소, 수전해 수소로 분류할 수 있다. 탄소와 수소로 구성된 천연가스를 개질해 수소를 생산하는 개질 수소는 기존 천연가스 인프라를 활용할 수 있으며 제조 단가가 매우 저렴하지만, 이산화탄소 배출량이 매우 많다는 특징을 가지고 있다. 부생 수소는 석유화학 또는 제철 플랜트에서 종정 중 부산물로 발생하는 수소를 활용하는 기술인데 공정에 따라 부생 수소를 재활용할 수 있기 때문에 외부 공급 탄력성이 떨어지며, 지역적 제한으로 추가적인 운송비가 발생할 수 있다는 특징이 있다. 마지막으로 수전해 수소는 물을 전기분해해 수소를 생산하는 방식으로, 이산화탄소 배출이 전혀 없다는 특징이 있다. 하지만 수소를 생산하기 위해 전기 공급이 필요하며, 에너지변환에 따른 손실을 고려할 때 경제성이 매우 낮다는 특징이 있다.

수소를 운송하거나 저장할 때에도 다양한 기술을 적용할 수 있는데, 극저온 기술을 통한 액화수소 저장과 수소화합물 형성 반응을 이용한 금속산화물 저장, 압축 방식을 적용한 고압 수소탱크 저장, 수소를 포함하는 물질의 가역적 화학반응을 이용한 액화 유기물 저장 방식 등이 있다. 일반적으로 연료전지차에 고압 수소탱크 저장 방식을 적용하고, 대규모/장거리 운송에는 극저온 액화 저장 방식을 적용하고 있다.

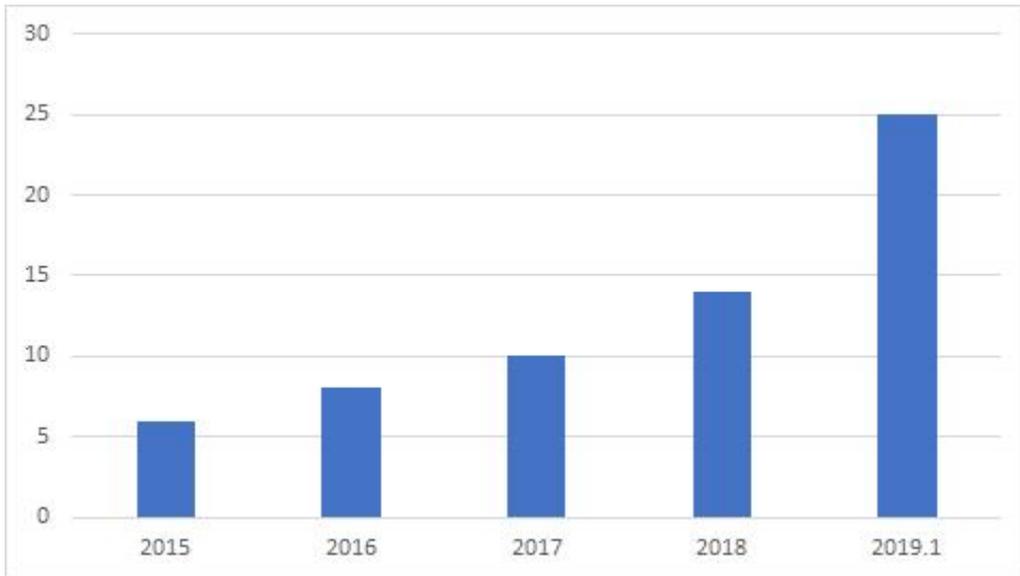
2.1.2.2 수소연료전지자동차 인프라 현황

효성중공업의 자료에 따르면 국내 수소충전소 운영/건설은 2001년부터 시작되었으나 대다수의 충전소들이 휴지 및 폐기되었다. 따라서 본 보고서에서는 정식으로 수소 연료전지차가 보급된 시기인 2015년부터 충전소 현황을 사용한다.

[표 5] 연도별 국내 수소충전소 등록 현황

출처 : 환경부

구분	2015	2016	2017	2018	2019.10
수소충전소	6	13	15	19	30



[그림 2] 연도별 국내 수소충전소 등록 현황

출처 : 환경부

정부는 수소경제로드맵을 통해 2040년까지 수소충전소 1200개소 이상 설치를 목표로 하고 있다. 자세한 정부 로드맵은 아래의 표와 같다.

[표 6] 수소충전소 설치계획 (단위 : 대소)

출처 : 산업통상자원부

구분	2022	2030	2040
수소충전소	310	660	1200

2020년 미세먼지 저감 등을 위한 환경부 예산 확대에 따라서 친환경차 지원 예산 역시 늘어날 전망이다. 2019년 수소차 관련 환경부 예산은 수소차(승용) 구매 시 4천대, 수소충전소 30기 지원을 위하여 1,496억원이 집행되었다. 최근 국회에 2020년 환경부 예산은 전년 대비 20% 증가된 9.4조원이 편성되었다. 이 중 수소차 관련 예산은 수소차 구매 보조금 지원에 10,100대, 수소충전소 보조금 40개소에 해당하는 예산이 편성되었다. 총 3,593억 원으로 전년대비 140% 증가하였다.

[표 6] 국내 지자체별 FCEV 보조금 지급 현황 (단위: 억 원)

출처 : 한국자동차산업협회

	서울	부산	용인시	대구	광주	대전	강원도	울산시
지원금액 (만원)	3,500	3,450	3,250	3,500	3,250	3,550	4,250	3,400
비고	개별소비세, 취득세, 교육세 등 최대 660만원 세제 감면, 공영주차장 주차료, 고속도로 통행료 50% 할인							

2.2 선행연구조사

이순정(2017)은 전기자동차 보급이 전력수요에 미치는 영향을 분석하였다. 충전량과 충전소 예측을 위해 Bass 확산모형을 이용하여 2050년까지의 국내 전기자동차 보급을 예측하였다. 또한, 주요 변수 추정을 위해 해외 주요국의 사례를 참고하여 도출해 내었다. 전기자동차 잠재 시장을 1980년부터 2015년까지 국내 자동차등록대수를 기반으로 ARIMA 모델을 이용해 전기자동차 잠재시장을 3,122,838대로 추정했다. 분석 결과 2017년 기준으로 국내에 보급된 전기자동차 충전기는 논문에서 추정한 결과에 비해 충분한 수준으로 평가되었지만, 2020년을 기점으로 급속히 증가할 것으로 예상되는 전기자동차 충전수요를 충족시키기 위해서는 전기자동차 충전기의 지속적인 확대 보급이 필요한 것으로 예측하고 있다. 최연수(2012)는 전기자동차 확산에 충전인프라가 영향을 미친다고 가정하고 이를 반영한 확산모형을 제안하고 교통망 모델을 통해 분석했다. 확산은 인프라의 증가에 따라 소비자의 잠재수요를 촉진시키고 이 수요는 또 다른 인프라 건설을 유도한다고 했다. 김거중(2019)은 수소충전 인프라 구축 초기단계에 적합한 수소 공급방식인 하이브리드형 방식을 제시하였다. 하이브리드형 수소공급방식 하에서 공급자 비용 및 이용자 수요를 모두 고려할 수 있는 수소 충전소 최적 입지 선정 모형을 개발하였다. 또한, 스마트톨링 시스템 도입으로 발생하는 전국 고속도로 요금소 유희부지를 대상으로 통행량의 최대화와 설치비용의 최소화를 목적함수로 고려하여 수소충전소 최적 입지를 선정하였다. Hudgson(1990)은 재화나 서비스의 총동구매 시설의 경우 시설 주변의 노드수요가 아닌 시설 경로기반의 통행량을 고려하는 것이 바람직하다고 주장하였다.

2.3 기존연구와의 차별성

앞서 설명한 수소연료자동차와 관련된 선행연구에서는 수소연료자동차의 기존 데이터를 사용하여 단순하게 확산되는 결과만 제시하고 있다. 본 연구에서는 수소연료자동차의 확산을 하이브리드자동차(HEV)와 전기자동차(BEV)의 시장 진입 시기, 점유율 등의 영향을 고려하여 도출해내었다. 또한, 정부의 로드맵과의 비교를 통해 정부의 로드맵을 실현시키기 위해 필요한 사항들에 대해 구체적으로 제시했다는 점에서 차별성을 가지고 있다.

3. 분석모형

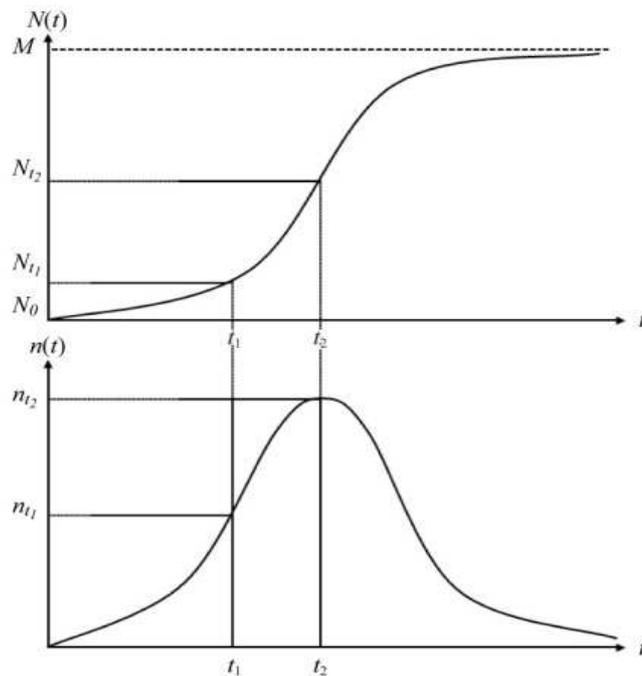
3.1 Bass 모형

Bass 모형은 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$n(t) = \frac{dN(t)}{dt} = p[m - N(t)] + \frac{q}{m}N(t)[m - N(t)] \quad (1)$$

- $n(t)$: t 시점에서 채택자의 수
- $N(t)$: t 시점의 누적채택자의 수
- m : 궁극적 채택자의 잠재 수
- p : 혁신계수
- q : 모방계수

Bass 모형에서 사용된 계수는 m (market potential)은 잠재수요, p 는 이전의 채택과 는 독립적인 영향력을 나타내는 혁신계수, q 는 채택 영향력을 나타내는 모방계수를 나타낸다(Bass, 1969). 따라서 식 (1)은 채택자의 수 증가가 마케팅이나 가격 등의 외부의 영향과 함께 기존 채택자의 영향을 동시에 받아서 생겨난다는 것을 의미한다. 이를 시간에 따른 그림으로 표시하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.



[그림 3] 시간에 따른 Bass 모형 그래프

3.2 P-median model

한 번 배치를 하면 장기성을 갖고 큰 비용이 사용되어 그만큼 신중한 선택을 요하는 충전소의 입지선정에 있어 P-median model을 사용하게 되었다.

P-median model은 입지선정 이론의 모델 중 하나로, 입지선정 이론은 지역 별 수요 값과 실제 이동 거리 데이터 등을 기반으로 실제 상황과 같은 제약 조건 하에서 최적의 입지선정을 해내는 함수식이다. 다양한 입지선정모형 중 P-median의 목적은 수요를 가중한 접근 거리의 최소화이고 이 프로젝트는 공적인 입장에서 많은 지역의 충전소 접근성을 높이하고자 하였기에 P-median model을 사용하였다.

$$\text{Min}(\sum_{i=1} \sum_{j=1} h_i * d_{ij} * Y_{ij})$$

subject to

$$\sum_{i=1} X_i = P$$

$$Y_{ij} \leq X_i \quad , \text{for all } i, j$$

$$\sum_{j=1} Y_{ij} = 1 \quad , \text{for all } i$$

[그림 4] P-median 모델의 수식

P-median 모델의 기본 수식은 왼쪽과 같다. Min(최소화)의 목적값으로 1) 수요 가중 거리의 최소화를 정의한 후, 아래는 제약함수를 정의하였다.

순서대로 앞서 예측한 데이터를 토대로 배치 대수를 설정하고, 입지 후보지 중 입지로 선정된 곳에만 수요지 간의 할당을 가능하게 하였다. 또 배치된 후보지와 수요지 간 일대다 관계만이 가능하게 하였다.

3.2.1 Pareto Solution

위와 같은 기본 모델에 추가적으로 고려할 사항이 있다. 이 프로젝트의 계산 거리 d_{ij} 는 차량의 우회 거리로, 도로 위의 차량을 분석 대상으로 적용 시엔 후보지의 차량의 통행량 또한 필수로 고려해야 한다. 통행량은 접근성을 나타내는 또 다른 변수가 되기 때문이다. 따라서 추가적으로 고려하게 된 목적값은 2) 할당 지역 앞 통행량의 최대화이다.

이에 고려할 목적값이 1), 2)와 같이 두 가지가 되어 기본적인 입지선정 이론엔 두 목적값을 고려할 수 없다. 따라서 Pareto Solution을 적용하게 되었다.

Pareto Solution은 정의하고 싶은 목적함수가 여러 값일 때 사용할 수 있는 방법으

로 한 목적값은 목적함수로 정의하고 나머지 목적값은 While loop를 통해 수차례 시도해보며 그 중 최적해를 도출할 수 있다. 1) 수요 가중 거리의 최소화를 목적값으로 두고 2) 할당 지역 앞 통행량의 최대화를 While loop를 통해 수차례 반복하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min}(\sum_{i=1} \sum_{j=1} h_i * d_{ij} * Y_{ij}) \\
 & \text{Max}(\sum_{i=1} c_i * X_i) \\
 & \text{subject to} \\
 & \sum_{i=1} X_i = P \\
 & Y_{ij} \leq X_i \quad , \text{for all } i, j \\
 & \sum_{j=1} Y_{ij} = 1 \quad , \text{for all } i \\
 & \sum_{i=1} X_i * c_i \geq T
 \end{aligned}$$

[그림 5] Pareto Solution을 적용한 함수식

새로운 목적값의 추가로 인해 변경된 함수식은 다음과 같다. loop의 구간은 해당 값의 최솟값부터 최댓값으로 설정하였으며 입지선정의 분석 툴은 CPLEX를 사용하였다.

3.2.2 변수정의

3.2.2.1 충전소 설치 후보지 I , 수요지역 J

충전소 설치 후보지는 지역 내 LPG, CNG 충전소의 위치를 i 변수로 설정하였다. 이는 수소차 산업에 앞서가고 있는 일본의 선례를 참고하여 결정하였다. 일본은 비용 절약, 장소의 효율성을 도모하기 위해 모두 기존 LPG, CNG 충전소에 부대시설로써 수소충전소를 설치하였다. 또한, 수요지역은 각 지역 내의 시, 군, 구 구청을 j 변수로 설정하였다. 이 때 위치의 고려와 거리 계산이 필요하여 Geocoder API를 사용하여 각 후보군의 위도 및 경도를 추출하였다. 17개의 시, 도 중에서 서울 지역의 데이터를 수집하였는데, 서울의 20개 구청을 수요지로 설정하였고, 101개의 LPG, CNG 충전소를 후보군으로 위도 및 경도로 변환하였다.

3.2.2.2 충전소 설치 대수 P , 통행량 $Traffic_i$, 수요예측값 $Demand_i$, 우회거리 X_{ij}

진행 지역, 해당 년도의 충전소 설치 대수를 P 라는 변수로 설정하였다. 통행량 변수는 주유소 인근 도로 통행량을 수집하여 통행량 값으로 사용하였고 $Traffic_i$ 변수로 설정하였다. 또한, 앞서 예측한 연도별 차량대수를 국내 지역 별 (시·도) 수소차량 분

포, 시·도 내 지역별 수소차량 분포 비율을 반영하여 계산하여 $Demand_i$ 로 설정하였다. 마지막으로 각 지역 j 와 수소충전소후보지 i 간의 최소 우회거리를 X_{ij} 변수로 설정하였다. 우회거리는 Manhattan Distance 계산법을 적용하였다.

3.2.2.3 결정변수 X_i , Y_{ij}

결정변수는 충전소 후보지 설립 여부를 X_i 로 설정하였고, 지역 j 를 후보지 i 로 할당 여부를 Y_{ij} 로 설정하였다.

4. 분석결과

4.1 확산 모형

4.1.1 사용 데이터

사용한 시장데이터로 한국자동차산업협회에서 ‘2008년부터 2019년의 하이브리드자동차 판매대수’와 ‘2010년부터 2019년의 전기자동차 판매대수’, 그리고 ‘2015년부터 2019년의 수소연료전지자동차의 판매대수’를 반영했다. 하이브리드자동차의 경우, 2008년 519대를 시작으로 2019년 10월 기준 69500대를 기록했고, 전기자동차는 2010년 66대에서 2019년 10월 26518대, 수소연료전지자동차는 2015년 7대를 시작으로 2019년 3207대를 기록했다.

[표 8] 국내 연도별 자동차 판매 현황 (단위: 억 원)

출처 :유안타증권 리서치센터

	하이브리드		전기		수소	
	판매량	누적판매량	판매량	누적판매량	판매량	누적판매량
2008	519	519				
2009	7074	7593				
2010	8462	16055	66	66		
2011	19371	35426	281	347		
2012	36603	72029	517	864		
2013	29060	101089	614	1478		
2014	34516	135605	1315	2793		
2015	39014	174619	2945	5738	76	76
2016	62210	236829	5177	10915	128	204
2017	84614	321443	14337	25252	170	374
2018	93094	414537	31154	56406	727	1101
2019	69500	484037	26518	82924	3207	4308

4.1.2 확산 모형 분석 결과

본 연구에서는 앞서 설명된 데이터를 기반으로 수소 차 시장이 어떻게 확산할 지에 대해서 Bass 모형을 사용해 분석해 보았다. Bass 모형 분석에는 오픈소스 데이터 분석 프로그램인 R(Version 3.6.1)과 엑셀을 사용했다.

4.1.2.1 m값(잠재시장) 도출

	HEV		BEV		FCEV	
	Sales	Acc	Sales	Acc	Sales	Acc
2008	519	519				
2009	7074	7593				
2010	8462	16055	66	66		
2011	19371	35426	281	347		
2012	36603	72029	517	864		
2013	29060	101089	614	1478		
2014	34516	135605	1315	2793		
2015	39014	174619	2945	5738	76	76
2016	62210	236829	5177	10915	128	204
2017	84614	321443	14337	25252	170	374
2018	93094	414537	31154	56406	727	1101
2019.10	69500	484037	26518	82924	3207	4308
2010-2014	Var(HEV)	136261030.3	Var(BEV)	224164.3		
	Cov(HEV,BEV)	4162342.7				
	Corr(HEV,BEV)	0.753127968				
2015-2019			Var(BEV)_2	157651132.7	Var(FCEV)	1788166.3
			Cov(BEV,FCEV)	10493770.1		
			Corr(BEV,FCEV)	0.6249986		
2015-2019	Var(HEV)	441869100.8	Var(BEV)	157651132.7	Var(FCEV)	1788166.3
	Cov(HEV,BEV)	202319718.9	Cov(BEV,FCEV)	10493770.1		
	Corr(HEV,BEV)	0.766554167	Corr(BEV,FCEV)	0.6249986		
		263934014.9		16790069.76		
BEV	p	0.002636	Corr(HEV,BEV)	0.7531280		
	q	0.291392				
HEV	p	0.002377	Corr(BEV,FCEV)	0.6249986		
	q	0.289754				
FCEV	p	0.00249446	m(FCEV)	2591551	m(BEV)	3,122,838
	q	0.290496855				

[그림 6] HEV,BEV,FCEV 간 상관관계 도출 데이터

가장 먼저 Bass 확산 모형에 필요한 m값 도출을 위해 위와 같은 3가지의 판매량 데이터를 이용하였다. 이는 수소 차 시장이 아직 초기 단계이기 때문에 기존 데이터 만으로는 Bass 모형을 실행시키기에 연간매출 데이터가 부족했기 때문이다. 따라서 친환경 자동차의 대표적인 BEV의 확산 추세가 FCEV의 확산과 유의미한 상관관계를 갖고 있을 것으로 판단했고 다음과 같은 HEV, BEV의 시장 확산 추세를 이용해 상관관계를 도출해내고 이를 통해 수소 차 시장의 확산을 파악하고자 했다.

관계를 도출하기에 앞서 Time period를 일치시키기 위해 우선 HEV 출시 1년 차(2010년)부터 5개년 매출과 동일 시점 HEV 자동차의 매출을 분석하고 FCEV 출시 1년 차(2015년)부터 5개년 매출과 동일 시점 BEV의 매출을 분석해 두 상관관계의 유사점을 찾아냈다. 그 결과 2010년부터 2014년의 HEV, BEV의 상관관계(Corr(HEV,BEV))는 0.753으로 도출되었고, 2015년부터 2019년 10월의 BEV, FCEV의 상관관계(Corr(BEV,FCEV))는 0.625로 도출되었다. 둘 다 유의미한 상관관계 값이 도출되었고, 이 값에서 이순정(2017)의 연구에서 발췌한 전기자동차의 잠재시장 3,122,838 대에서 두 상관관계의 유사도($\frac{Corr(BEV,HEV)}{Corr(BEV,FCEV)}$)를 곱했다. 이를 통해 최종적으로 수소 차의 잠재시장 m값을 2,591,551 대로 설정 할 수 있었다.

4.1.2.2 p, q값 도출

혁신계수(p), 모방계수(q)값의 도출을 위해서는 오픈소스 데이터 분석 프로그램인 R(Version 3.6.1)을 이용했다. m값을 도출했을 때와 마찬가지로 HEV와 BEV의 확산 데이터를 통해 각각의 p, q값을 출력했고 이는 아래와 같다.

```
Parameters:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
b0 0.002377    0.001013   2.347 0.051320 .
b1 0.289754    0.048353   5.992 0.000546 ***
---
```

[그림 7] R을 이용해 분석한 HEV의 p와 q값

```
Parameters:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
b0 0.002636    0.001126   2.341 0.051747 .
b1 0.291392    0.048479   6.011 0.000537 ***
```

[그림 8] R을 이용해 분석한 BEV의 p와 q값

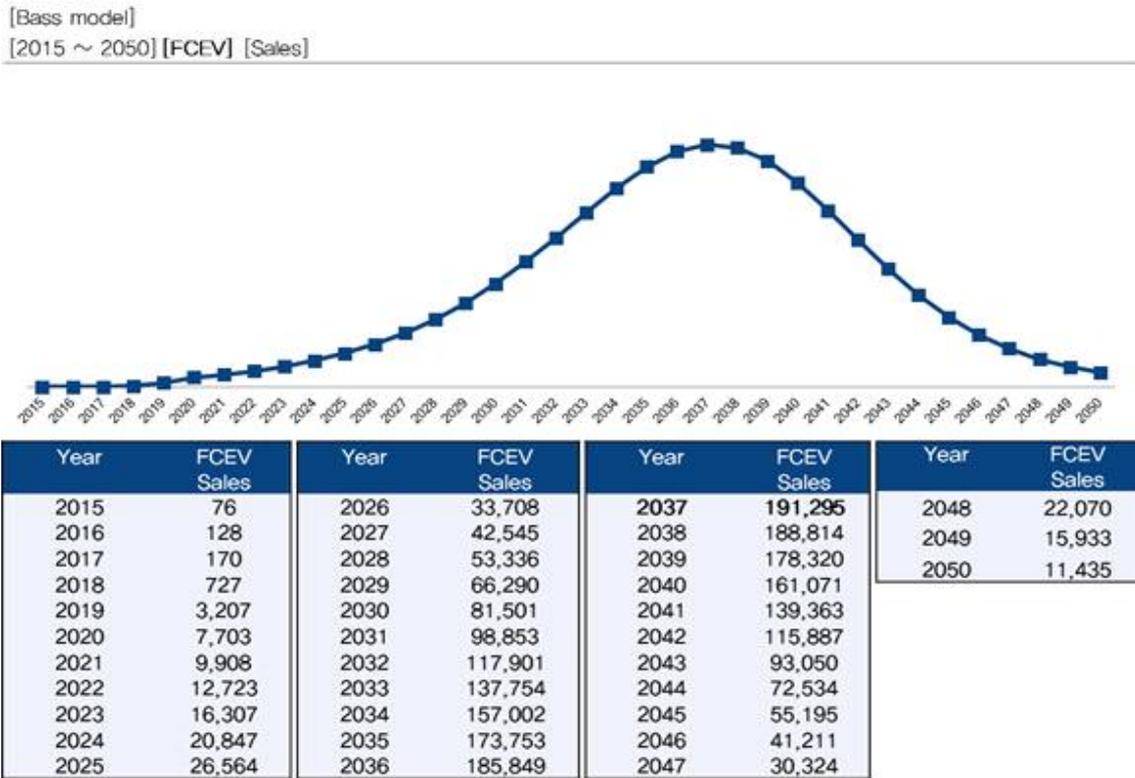
그 결과로, 하이브리드 자동차 시장의 혁신계수는 0.00237, 모방계수는 0.289754로 분석되었고, 전기자동차 시장의 혁신계수는 0.002636, 모방계수는 0.291392로 분석되었다. 위 값에 기존에 도출된 상관관계들의 가중치 합을 이용해 FCEV의 혁신계수와 모방계수를 도출하였고, 이는 각각 0.00249, 0.2905로 도출되었다.

4.1.2.3 Bass 모형 분석 및 정부 로드맵과의 비교

위에서 구한 m, p, q 값을 기존의 Bass 모형에 도입하면

$$S(t) = 0.002636[2591551 - Y(t)] + \frac{0.2905}{2591551} Y(t)[2591551 - Y(t)]$$

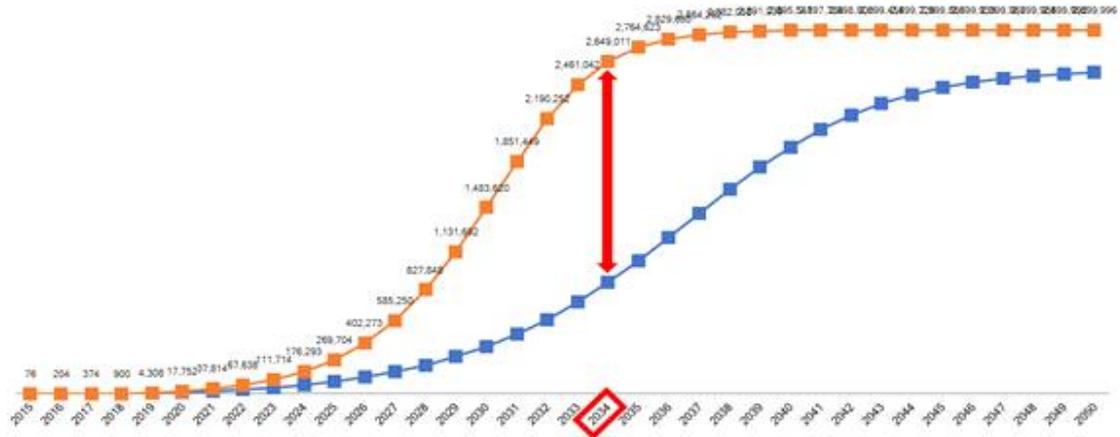
의 형태로 만들 수 있다. 이를 그래프로 모식화한 모습은 다음과 같다.



[그림 9] Bass 모델을 활용한 FCEV의 판매예측 (2015 ~ 2050)

이를 통해 2050년까지의 확산 모형을 파악할 수 있으며, 2037년에 약 191000여 대의 임계 값을 갖게 됨을 알 수 있었다. 이는 정부가 발표한 수소 경제 로드맵에서의 예측치와 비교적 큰 차이를 나타냈다. 2020년을 기점으로 추정치와 정부의 로드맵 사이에 현저한 격차가 발생하며, 가장 큰 차이를 보이는 지점은 2037년에 약 176만 대로 정부의 로드맵이 다소 낙관적인 측면을 보인다고 파악했다.

[Bass model]
 [2015~2050] [FCEV][Acc. Sales]



[그림 10] 정부의 로드맵과 Bass 모델 누적 예측치의 차이 비교

4.1.3 시나리오 분석

국내에 가정용 연료전지가 보급된다는 시나리오를 가정하고, 수소연료전지자동차의 확산을 일본과 한국의 관점에서 각국의 로드맵을 비교해보았다.

	2017수소차	2017충전소	2025수소차	2025충전소	2030수소차	2030충전소
일본	2000여대	92개소	20만대	640개소	80만대	-
한국	170여대	12개소	27만대	280개소	180만대	-

[표 8] 일본과 한국의 수소차 및 충전소 로드맵

출처 : 산업통상자원부

일본은 한국보다 수소 경제의 활성화가 더욱 진행되었음에도 불구하고 각 정부에서 제시한 로드맵을 보면 한국이 매우 낙관적으로 제시하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 현재 일본은 20만대 이상의 가정용 연료전지를 보급한 반면에, 한국은 몇 천대 정도의 가정용 연료전지를 보급한 상태이다. 이에 대한 이유는 수소 관련 기술이 일본과 한국이 큰 격차가 벌어지면서 일본은 좀 더 세밀한 예측이 가능하지만, 한국은 세밀한 예측이 불가능하다고 볼 수 있다. 따라서, 한국이 일본보다 더욱 긍정적인 로드맵을 발표했다고 판단할 수 있다. 이에 따라 한국에 가정용 연료전지가 보급된다면, 더욱 세밀하고 구체적인 로드맵을 발표할 수 있을 것이고, 발표한 로드맵의 실현가능성도 높아질 것이다.

4.2 입지선정

4.2.1 사용 데이터 및 변수 정의

4.2.1.1 사용 데이터

공공데이터포털에서 한국가스안전공사 기관의 전국 LPG 충전소 현황 데이터 (2019.09.), 전국 CNG 충전소 현황 데이터 (2019.09.)를 수집하여 이 충전소에 부대 시설로 시설을 세운다고 가정하여 후보지로 선정하였다. 이 중 프로젝트를 진행한 서울 지역의 데이터만을 사용하였다. 수요지에 있어서는 네이버 포털에 서울의 구청 데이터를 수집하여 구청 주소를 수요지로 선정하였다.

또 앞서 도출한 연도 별 국내 수소차량 수를 가져와 지역 별 차량의 분포 비율로 서울 지역의 예측 차량 수를 구한 후, 회귀분석을 통하여 적절 충전소 대수를 도출하였다. 이 데이터에 지역 별 배치 계획안과 배치 현황, 주관적으로 현실성을 감안하여 보정하였다. 그리고 '서울시 교통정보과 교통량 조사자료'에서 도로 통행량을 수집하여 통행량 값으로 사용하였다. 도로 이동의 우회 거리에 있어 주소 간 거리 계산으로 후보지-수요지 간 거리 행렬을 만들었다.

4.2.1.2 변수 정의

4.2.1.2.1 충전소 설치 후보지 I , 수요지역 J

충전소 설치 후보지는 지역 내 LPG, CNG 충전소의 위치를 i 변수로 설정하였다. 이는 국내의 충전소 설치 선례와 수소차 산업에 앞서가고 있는 일본의 선례를 참고하여 결정하였다. 모든 선례들은 비용 절약, 장소의 효율성을 도모하기 위해 모두 기존 LPG, CNG 충전소에 부대시설로써 수소충전소를 설치하였다. 또한, 수요지역은 각 지역 내의 시, 군, 구 구청을 j 변수로 설정하였다. 이 때 위치의 고려와 거리 계산이 필요하여 Geocoder API를 사용하여 각 후보군의 위도 및 경도를 추출하였다. 17개의 시, 도 중에서 서울 지역의 데이터를 수집하였는데, 서울의 20개 구청을 수요지로 설정하였고, 101개의 LPG, CNG 충전소를 후보군으로 위도 및 경도로 변환하였다.

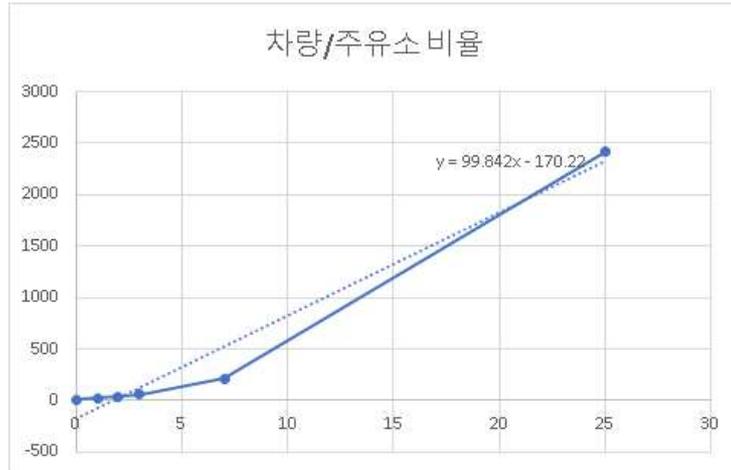
4.2.1.2.2 충전소 설치 대수 P , 통행량 $Traffic_i$, 수요예측값 $Demand_i$, 우회거리 d_{ij}

진행 지역, 해당 년도의 충전소 설치 대수를 P 라는 변수로 설정하였다. 통행량 변수는 주유소 인근 도로 통행량을 수집하여 통행량 값으로 사용하였고 $Traffic_i$ 변수로 설정하였다. 또한, 앞서 예측한 연도별 차량대수를 국내 지역 별 (시·도) 수소차량 분포, 시·도 내 지역별 수소차량 분포 비율을 반영하여 계산하여 $Demand_i$ 로 설정하였다. 마지막으로 각 지역 j 와 수소충전소후보지 i 간의 최소 우회거리를 d_{ij} 변수로 설정하였다. 우회거리는 Manhattan Distance 계산법을 적용하였다.

4.2.1.2.3 결정변수 X_i , Y_{ij}

결정변수는 충전소 후보지 설립 여부를 (1,0)의 X_i 로 설정하였고, 지역 j 를 후보지 i 로 할당 여부를 (1,0)의 Y_{ij} 로 설정하였다.

4.2.2 데이터 추출 결과



[그림 11] 적절 충전소 대수 회귀식

지역 별 적절 충전소 대수의 산정에 연도와 차량 수를 고려하였을 때, 연도 별 예측 차량 수와 산출된 적절 충전소 대수 P 의 회귀는 다음과 같다. $y = 99.842x - 170.22$ 그에 따라 사용한 데이터는 아래와 같은 연도 별 값이다.

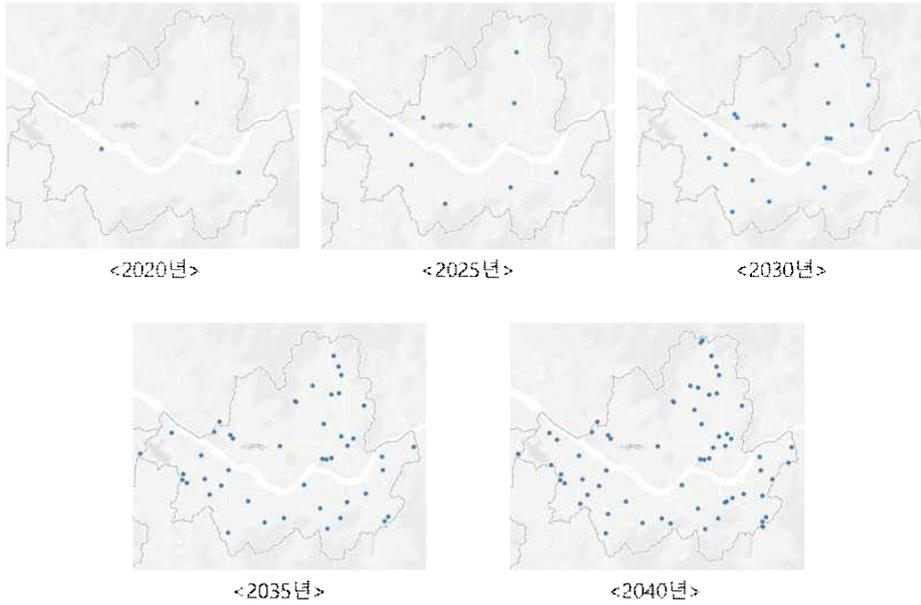
연도 및 차량 대수 별 적절 충전소 대수		
연도	차량 대수 (대)	충전소 대수 (개소)
2020	942	3
2025	7716	9
2030	29476	22
2035	83234	46
2040	154258	65

[표 9] 연도 및 차량 대수 별 적절 충전소 대수

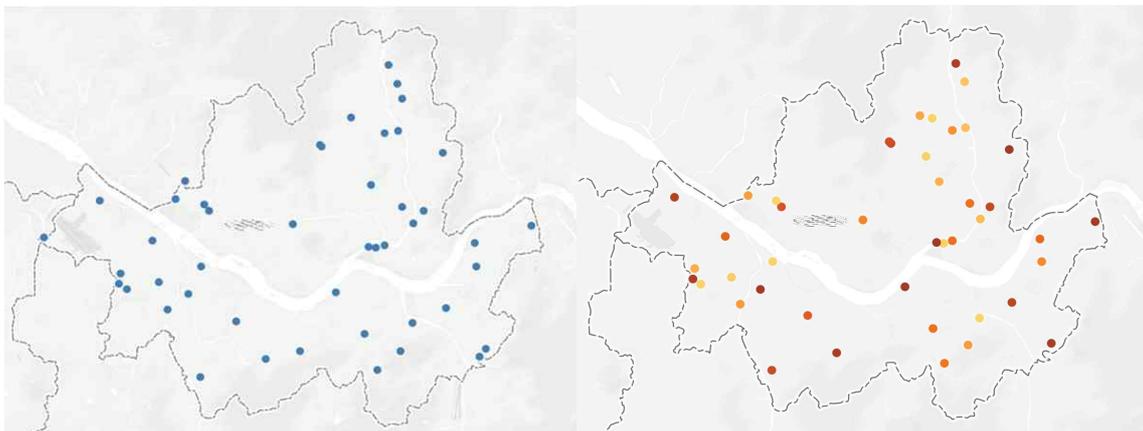
그 외 101개의 I 집합 데이터와 통행량 $Traffic_i$, 20개의 J 집합 데이터와 101개와 20개의 쌍으로 2020개의 d_{ij} 값을 도출하였다. 25년도 이후로 충전소 대수의 증가 폭이 현저히 커지는 변화를 볼 수 있다.

4.2.3 입지선정 결과

그에 따른 연도 별 입지선정 결과는 다음과 같다. 결과를 보면 대수가 늘어나면서도 초반에 선정된 입지는 대부분 누적되어 다음 기간에도 선정이 되는 변화를 볼 수 있다.



[그림 12] 연도 별 입지선정 배치 결과



[그림 13] 30년도의 총전소 대수 결과 (좌)와 빈도 표현 (우)

또 배치된 충전소들의 빈도에 따른 중요도 또한 확인할 수 있다. 30년도의 입지선정을 예로 보면 CPLEX를 실행해본 결과 결정된 22개소의 충전소 중에서도 loop 구간을 반복하며 진행된 85번의 횡수 중 좀 더 진한 색의 선정지가 더 많은 횡수 내에 빈번히 선정되었다. 따라서 이 결과는 목적값으로 정의한 접근성의 최대화가 가장 높게 고려된 선정지임을 의미하기 때문에 22개소 중 높은 중요도를 가진다고 볼 수 있다.

5. 요약 및 결론

2015년 파리 기후변화협약 체결, 2020년 유로 6D 발표 등의 이슈로 환경오염 및 온실가스 감축을 위해 전 세계적으로 많은 움직임을 보이고 있다. 전 세계 각국 정부는 환경오염 문제를 해결하기 위해 다양한 방면에서 정책을 수립하고 실행하고 있다. 그 중에서 친환경자동차는 다양한 이점에서 온실가스 감축에 효과적이므로 대두되고 있는 정책이다. 친환경자동차는 하이브리드자동차, 전기자동차, 수소연료전지자동차 3가지 종류에 대해 많은 연구들이 진행되고 있다. 그 중에서 내수시장 활성화에 큰 영향을 미치고, 운행하면서 청정공기를 생산해 낼 수 있는 수소연료전지자동차는 환경보존의 측면에서 가장 효과적인 수단이라고 판단되고 있다. 일본 및 국내에서도 수소연료전지자동차에 대한 관심이 높아지고 있으며, 규모의 경제 활성화를 이루기 위해 다방면의 정책을 내놓고 있다. 이에 정부의 정책을 뒷받침할 수 있는 수소연료전지자동차에 대한 정확하고 의미있는 연구의 필요성이 높다.

따라서 본 연구는 수소연료전지자동차의 확산과 확산결과를 바탕으로 5년 주기의 수소충전소의 최적의 입지선정을 진행하였고, 시각화하여 나타내었다. 이를 위해 Bass 확산모형을 사용하였다. 해당 모형에서 적용한 확산계수 p 와 모방계수 q 는 하이브리드 자동차와 전기차의 영향력을 상관계수를 통해 도출해내었으며, 잠재시장 m 은 선례연구와 상관계수를 통해 도출해내었다. 이 때 수소연료전지자동차의 잠재시장 m 은 전기자동차의 잠재시장보다 작다는 가정 하에 진행하였다. 그 결과 유의미한 수요 예측결과를 얻을 수 있었다. 값을 살펴보면 수소연료전지자동차는 2022년 연간 판매량이 1만 2천여대에 도달하고 누적 판매대수는 3만 4천여대를 돌파한다. 2030년에는 연간 판매량이 8만대를 돌파하고, 누적 판매대수는 37만대를 훌쩍 돌파하게 되는 것으로 나타났다. 2037년에 연간 판매량 191,295대로 최고점에 도달하게 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 2022년에 6만 7천대, 2030년에 85만대를 보급하겠다는 정부의 로드맵에 비해 현저히 작은 값이었다. 이에 정부의 로드맵은 매우 긍정적이며 낙관적인 측면에서 작성되었다는 것을 파악하였다. 또한, 정부의 로드맵과의 비교를 통해 가정용 연료전지의 보급이라는 시나리오를 가정하여 분석을 실시하여, 수소 경제 활성화가 일본에 비해 현저히 낮은 한국은 세밀한 예측이 불가능하여 긍정적인 측면에서 제시된 것이라고 파악할 수 있었다.

위의 확산모형 결과값을 바탕으로 2020년부터 5년 단위로 2040년까지 수소충전소 최적의 입지를 선정하였다. P-median model을 사용하여 수요를 가중한 접근 거리의 최소화를 목적으로 공적인 입장에서 최적의 입지를 선정하였다. 목적값은 수요 가중 거리의 최소화를 목적값으로 두고 할당 지역 앞 통행량의 최대화를 While loop 통해 수차례 반복하여 도출하는 Pareto Solution을 사용하였다. 변수는 충전소 설치 후보지 I , 수요지역 J , 충전소 설치 대수 P , 통행량 $Traffic_i$, 수요예측값 $Demand_i$, 우회

거리 X_{ij} 로 정의하였고, 결정변수는 충전소 후보지 설립 여부를 X_i , 지역 j 를 후보지 i 로 할당 여부를 Y_{ij} 로 정의하였다. 위의 모든 값과 데이터를 적용하여 CPLEX를 사용하여 수소 충전소의 최적 입지 위치 데이터를 얻었다. 또한, 이를 Tableau를 사용하여 시각화하였다.

본 연구의 의의는 국내의 실증 데이터를 바탕으로 수소연료전지자동차 시장을 예측하였고, 과정에서 하이브리드자동차와 전기차의 영향력을 반영하여 예측하였다는 점이 있다. 또한, 예측한 값을 바탕으로 정부의 로드맵과 비교하여 여러 시사점을 찾을 수 있다는 점이 있고, 수소충전소의 입지선정을 위에서 앞서 실제로 예측한 데이터 값을 활용하여 선정하였다는 점과 5년 주기로 선정하였다는 점에서 의의가 있다.

본 연구의 한계점은 다양하게 나타난다. 연구시작에 앞서 정부의 로드맵이 맞다는 가정 하에 연구를 했다는 점이 첫 번째 한계점으로 나타난다. 두 번째 한계점은 정확한 예측을 위해서 최대한 많은 실제 데이터가 필요하다. 하지만, 수소연료전지자동차는 초기시장의 한계로 데이터의 표본의 개수가 적었다는 점이 있다. 세 번째 한계점은 국도 통행량을 반영하지 못했다는 점과 2019년 11월 FCEV 데이터를 기준으로 하였기 때문에 제주도 등의 도서산간 지역의 충전소를 고려하지 못했다는 점이 있다. 마지막으로 입지 선정 과정에서 현재 설치되어 있는 LPG기반 충전소만을 가정하였고, 향후 추가적으로 설치될 파이프라인 및 가정용 연료전지 등의 다른 공급방식을 고려하지 않았다는 점이 있다.

6. 참고문헌

- [1] Bass, F. M., A new product growth model for consumer durables, Management Science, 1969, p. 215-227.
- [2] 구훈영 외 2인, 확산이론 관점에서 로지스틱 모형과 Bass 모형의 비교, 2012, p. 3-6
- [3] 권오성 외 3인, 로드 밸런싱을 위한 전기차 충전소 입지선정 문제, 2018, p. 3-8
- [4] 김거중 외 2인, 하이브리드형 수소공급방식을 고려한 수소충전소 입지 선정 모형 개발, 2019, p. 6-9
- [5] 김군수 외 4인, 경기도 수소경제 미래를 생각하다, 2018, p. 19-21
- [6] 김재경 외 2인, 수소연료전지 자동차(FCEV) 충전용 수소 시장조성을 위한 정책연구 - 에너지경제연구원 수시연구보고서, 2018, p. 28-21
- [7] 이순정 외 3인, 국내 전기자동차 확산 전망과 영향, 2017, p. 3-9
- [8] 채현석 외 2인, Bass 확산모형을 이용한 전기자동차 수요예측, 2013, p. 4
- [9] Young Dae Ko & Byung Duk Song, Sustainable service design and revenue management for electric tour bus systems: seoul city tour bus service and the eco-mileage program, 2019, p. 10-12
- [10] 산업통상자원부, 수소경제 활성화 로드맵, 2019, p. 5-13
- [11] 강철구 외 2인, 경기도의 수소차 보급 활성화를 위한 충전인프라 구축방안 연구, 2019, p. 73-83, 106-110
- [12] 한국투자증권, 수소차 너머로 수소경제가 온다, 2019, p. 18
- [13] IBK투자증권, 수소, 충전소가 있어야 자동차도 달린다, 2019, p. 18