

미국 캘리포니아 수소 버스와 충전소 운영 현황과 정책 고찰

김창모^{1†} · 진상규² · 진광성² · 권영인² · 백영순³

¹캘리포니아레이비스대학교 토목환경공학과, ²한국교통연구원 글로벌교통협력센터, ³수원대학교 건설환경에너지공학부

Status of Hydrogen Bus Operations and Charging Stations and Policy Reviews in California, USA

CHANGMO KIM^{1†}, SANGKYU JIN², GOANG SUNG JIN², YOUNG-IN KWON², YOUNGSOON BAEK³

¹Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, 1 Shields Avenue, Davis, CA 95616, USA

²Center for Global Transport Cooperation, Korea Transport Institute, 370 Sicheong-daero, Sejong 30147, Korea

³Division of Construction Environment Energy, The University of Suwon, 17 Wauan-gil, Bongdam-eup, Hwaseong 18323, Korea

†Corresponding author :
ykwon@koti.re.kr

Received 8 December, 2021
Revised 15 September, 2022
Accepted 6 October, 2022

Abstract >> After reviewing the current status of hydrogen buses and hydrogen charging stations in the United States, as well as related laws and programs, it was found that the federal and state governments supported the supports of hydrogen buses and the deployment of hydrogen charging infrastructure through various policies and programs. In order to promote the spread of domestic and overseas hydrogen buses and hydrogen charging infrastructure, it is necessary to develop and apply various legal systems and programs that can provide incentives to hydrogen bus manufacturers, hydrogen charging station installers, hydrogen bus operating organizations and entities. It is necessary to develop and apply various legal systems and programs that can provide incentives to hydrogen bus manufacturers, hydrogen charging station installers, hydrogen bus operating organizations and entities.

Key words : Hydrogen bus(수소 버스), Hydrogen charging station(수소 충전소), Hydrogen policy(수소 정책), Hydrogen program(수소 프로그램), Hydrogen infra(수소 인프라)

1. 서론

기후변화 위기에 대응하기 위한 국가 탄소중립 계획에 따라 온실가스 배출량이 많은 교통/운송 부문에서 온실가스 배출을 감소하기 위하여 배출가스 제로

인 교통수단의 보급에 노력하고 있다. 수소연료전지 자동차는 기존의 내연기관 자동차를 대체하는 교통 수단으로 보급이 확대되고 있다. 일주행거리와 연료 소모가 많은 대중교통 도시버스의 경우에도 버스운영기관이나 업체가 기존의 내연기관버스를 대체하여

수소 버스의 도입을 확대하고 있다. 본 연구는 미국 캘리포니아 주의 수소 버스 운영 현황과 수소 충전소 보급 및 확대를 위한 정책 및 프로그램을 고찰하여, 국내 수소 버스 확대를 위한 정책 수립 및 수소인프라 구축계획의 촉진에 기여하는 시사점을 도출하였다.

2. 미국 수소 충전소 현황

2.1 수소 충전소 운영 현황

미국의 캘리포니아주는 수소기반의 교통수단 운영과 정책을 세계적으로 선두해왔다. 미국은 2021년 현재 15개 주에 총 144개소의 수소 충전소가 운영 및 계획 중에 있다¹⁾. 이 중 67개소는 운영 중이며, 65개소가 계획 및 건설 중에 있으며, 12개소가 임시적으로 운영을 중단하고 있다. 1년 전인 2020년에 비하여 약 14%가 증가하였다. 캘리포니아 주에서 미국 전체 충전소의 80%에 해당하는 115개소의 수소 충전소를 운영 및 계획하고 있으며, 뉴욕(4), 하와이(4), 오하이오(4), 메사추세츠(4), 코네티컷(3), 미시간(2)을 포함한 14개 주에서 29개소의 충전소를 현재 운영하거나 계획하고 있다(Fig. 1). 특히, 캘리포니아 주는 2030년까지 1,000대까지 수소충전시설을 확충할 계획이며, 수소연료전지자동차를 1백 만 대로 확대할 계획을 가지고 있다²⁾.

미국의 수소 충전소는 연방정부(4개소), 지방자치정부(6개소), 주정부(6개소), 민간업체(128개소)가 운



Fig. 1. Locations of hydrogen charging stations in USA¹⁾

영하고 있으며, 민간업체들이 수소 충전소의 80%를 보유하고 있다.

2.2 수소 버스 충전소 위치 선정 방식

미교통연구위원회는 zero-emission 대중교통버스 확산을 위하여 2020년에 수소 버스 충전시설의 위치를 선정할 시의 고려사항을 제안하는 지침서³⁾를 발간하였다³⁾. 수소 연료 충전소 부지 선택을 위해 교통기관은 잠재적 부지 위치를 식별할 때 수소가 어떻게 생산되고 전달되는지 고려하고, 인프라에 연료를 공급하는 데 필요한 영역과 확장옵션을 고려하여야 한다. 현재 규정 상 수소 저장시설은 지상에 있어야 하며 필요한 경우 배관 및 전기 장비를 지하에 둘 수 있으며, 수소 연료 충전소에는 일반적으로 1) 공급업체가 수소를 공급하거나 현장에서 생산하는 수소 공급 시스템, 2) 수소 저장 탱크, 3) 기화기(액체 저장용), 4) 압축기, 5) 냉각기, 6) 차량에 연료를 공급하는 디스펜싱 시스템이 필요하다.

기체 수소 저장에는 저압 및 고압 저장이 모두 통합된 설계가 필요하며, 액체 수소 저장은 더 높은 저장 용량을 허용하기 때문에 운송 분야에서 더 일반적이며 미국에서 사용 가능한 수소 버스는 모두 350 bar (H35)에서 수소를 충전하도록 하고 있다.

2.3 수소 충전소 건설 비용

미국 에너지부에서 공개한 수소 충전소 건설 비용 분석 자료⁴⁾에 의하면 캘리포니아에서 수소 충전소 지원프로그램에 선택된 111개의 새로운 주유소에 대한 자본 시설 비용 추정은 일일 연료 공급 용량 및 수소 공급 방법에 따라 하루에 분배되는 수소 kg 당 약 1,200-3,000 \$로 나타났다. 이 액수는 화학공학 플랜트 비용지수를 사용하여 2016년의 달러 가치로 환산된 것이며, 2020년 캘리포니아 에너지 위원회의 보조금 및 매칭 펀딩을 합친 것으로, 보조금 신청서의 예상 비용이며 설치 후 최종 비용과 다를 수 있지만 당시에 공개적으로 사용 가능한 가장 현실적인

방식으로 산정되었다.

충전소 용량은 약 770-1,620 kg/일로 다양하며, 모든 충전소는 경량 차량 충전 지원이 가능한 700 bar 연료 공급 기능으로 설계된 것으로 파악되었다. 계획된 111개의 신규 수소 충전소 전체에 걸쳐 평균 수소 충전 용량은 1,240 kg/일(중간 용량 1,500 kg/일)이며 약 평균 190만 \$의 자본이 소요될 것으로 나타났다. Table 1은 이러한 충전소 비용을 수소운송방식에 따라 충전소 일일 연료 공급 용량으로 정규화한 총 자본 비용을 나타낸다. 정규화된 총자본 비용은 kg-H₂/일당 1,200-3,000 \$로 나타났으며, 디스펜서당 300-890 kg-H₂/일에 해당한다⁴⁾.

3. 미국 수소 버스 현황

3.1 수소 버스 운영 현황

미국의 대부분 도시들에서의 대중교통 버스 운영은 시 혹은 지방교통기관에서 공공서비스로 운영하고 있다. 미국에서 도심대중교통에 사용되는 버스의 평균연수는 7년 정도이며, 버스의 교체연한은 12년 이므로 단계적으로 많은 버스가 교체된다. 다수의 시내버스 운영기관들은 기존의 경유버스의 연료효율이 낮으며, 상당한 배기가스를 배출하는 이유로 인하여 다양한 대체연료 버스를 고려해 왔다. 미국 에너지부 산하의 국립재생에너지연구소의 자료⁵⁾에 의하면,

Table 1. Total capital costs by charging capacity according to hydrogen transport type⁴⁾

Category	Hydrogen transport type	
	Gaseous tube trailers	Liquid hydrogen tankers
Capacity/day (kg)	770	1,400-1,620
Total capital cost per capacity (\$/kg-H ₂ /day)	1,800	1,200-3,000
Total capital cost per dispenser (\$/kg-H ₂ /day/dispenser)	890	300-740
Total capital cost (\$'000)	1,400	1,009-4,200

2018년까지 미국의 7개 도시에서 총 98대의 수소 버스가 운영 중이거나 계획 중에 있다. 이 중 35대는 2020년 기준 운영 중에 있으며, 39대가 계획 및 개발 중, 24대는 운영을 임시 혹은 영구 종료한 상태이다.

3.2 수소 버스 구입 비용

미국 에너지부와 교통부는 수소 버스의 보급 기간 동안의 중간적 자본 비용을 약 1백만 \$로 목표하고 있으며, 최종적인 목표 금액은 60만 \$로 목표하고 있다(Fig. 2)⁵⁾.

2020년 기준으로 25대의 수소 버스 구입을 위한 자본비용은 평균 약 1.27백만 \$로 산정되었으며, 수소 버스 제조업체에서는 40대의 버스를 주문제작하는 경우 버스 1대당 1백만 \$가 될 것으로 산정하였다.

3.3 수소 버스 운영 비용

캘리포니아 로스앤젤레스 인근의 Foothill Transit은 34대의 전기 버스 도입과 30대의 수소 버스 도입을 위한 비용을 비교한 보고서⁶⁾에 의하면, 전기 버스의 경우 890,000 \$/대였으며, 수소 버스의 경우 1,100,000 \$/대로 수소 버스의 구입비용이 전기 버스 구입비용에 비하여 24% 높은 것으로 파악되었으며, 충전인프라 설치 비용은 전기 버스 34대를 위한 충전시설 비용이 322,000 \$/대와 수소 버스 30대의 충전시설 비용이 133,333 \$/대로 산정되어, 수소 버스 30대를 위한 충전시설 설치 비용이 전기 버스 34대 충전시설 비용의 34%에 해당하는 것으로 파악되었다⁶⁾.

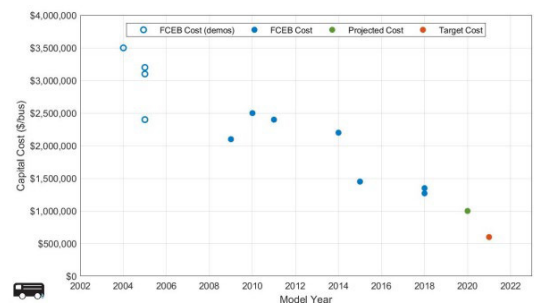


Fig. 2. Hydrogen bus capital cost trend in USA⁵⁾

버스의 연료비와 유지관리비용 측면에서는 전기 버스의 경우 0.76 \$/마일/대, 수소 버스의 경우 1.00 \$/마일/대로 산정되었고, 마일 당 유지관리비는 전기 버스의 경우 0.04 \$, 수소 버스의 경우 0.12 \$로 수소 버스의 운영비와 유지관리비가 높게 예측되었다. 전기 버스의 경우 수명연한 내에 배터리를 교체하는 경우 200,000 \$의 교체비용이 소요되는 반면에 수소 버스의 fuel cell stack 교체비는 30,000 \$로 저렴하게 예측되었다.

Foothill Transit은 전기 버스 34대와 수소 버스 20대의 12년간 버스구입비, 충전시설비, 연료비, 유지보수비 등을 계산할 경우 수소 버스의 비용절감액이 약 1,300만 \$에 해당하는 것으로 분석하였다.

Foothill Transit이 2018년까지 운행한 표본 수소 버스 8대의 41만 km 운행자료 분석에 따르면, 수소 버스의 연료효율은 6.22 mpdge로 천연가스 버스의 연료효율인 3.85 mpdge에 비하여 1.6배 정도 높은 것으로 나타났다. 수소 버스의 연료비용은 0.820 \$/km로 천연가스버스의 연료비용(0.174 \$/km)에 비하여 약 4.7배 정도 높은 것으로 나타났다⁶⁾.

4. 미국 수소 버스 관련 정책

4.1 수소 버스 활성화 관련 법규

2005년에 미국의회는 Public Law 109-59에 의거하여 National Fuel Cell Bus Program을 만들어 2012년까지 9천만 \$를 비영리기관에 수소 버스사업화로 지원하였다⁷⁾. National Fuel Cell Bus Program의 지원금을 받는 비영리기관은 사업비의 최소 50%를 지역 펀드로 충족해야만 했다. 9개 이상의 기관들이 이 프로그램을 통하여 수소 버스를 구입하여 시범운영하였으며, 국립재생에너지연구소(National Renewable Energy Laboratory)에서 각 사업의 평가를 수행하였다.

2017년 미국 정부는 Clean Air Act를 위반한 폭스바겐 사에 경유차량 배기가스 조작에 대하여 징벌적 과징금(25억 \$)을 부과하고 이 과징금을 수소자동차와 전기자동차를 포함한 clean air vehicle을 확산하

는 프로그램에 지출하고 있다⁸⁾.

미국의 시내버스는 지방자체 공공기관이 운영하고 있으며, 예산은 연방정부의 보조금, 지방자치단체의 보조금, 요금 수입으로 채워진다. 시내버스를 운영하고 있는 공공기관이 버스를 교체하여야 하는 경우 연방대중교통관리청(Federal Transit Administration)의 Statewide Transportation Improvement Program (STIP)⁹⁾에 제안서를 제출하여 경쟁평가 방식으로 사업비를 지원받을 수 있다(근거: 49 U.S.C. 5,304 [g]). 지원금 액수는 사업제안서의 규모와 내용에 따라 상이하하며, 미국 환경부는 디젤배출가스감소법안(Diesel Emissions Reduction Act, DERA)에 대한 예산을 할당하여 노후디젤 차량이나 장비를 교체하는 경우 예산이나 리베이트를 지원한다.

4.2 수소충전시설에 대한 세금 감면 혜택

2008년 긴급 경제 안정화법(Emergency Economic Stabilization Act of 2008)에는 수소 및 연료 전지 프로젝트 비용을 최소화하는 데 도움이 되는 세금 인센티브가 포함되어 있었다¹⁰⁾.

적격 연료 전지 자산에 대해 30%의 투자 세금 공제 또는 연료 전지 용량(즉, 예상 시스템 출력)의 3,000 \$/kW 중 더 적은 금액을 제공하였다. 또한, 열병합 시스템 자산에 대해 10%의 크레딧이 제공되었다. 2009년 미국 회복 및 재투자법(American Recovery and Reinvestment Act)은 연료 전지 및 수소 연료 보급 기반 시설의 설치를 장려하기 위해 다음과 같이 인센티브를 확대하였다.

- 2010년 12월 31일까지 30% 수소 연료 공급 기반 시설 세금 공제의 \$ 한도를 30,000 \$에서 200,000 \$로 인상한 연료 공급 시설 세금 공제 혜택을 제공함
- 에너지 자산에 대한 보조금(세액 공제 대신)으로 세금 부채가 부족한 시설이 투자 또는 생산 세액 공제를 청구하는 대신 보조금을 신청할 수 있도록 함
- 대상은 세금을 납부한 법인 자격으로 이 프로그램은 2011년 12월 31일까지 지원되었음

- 연료 전지 및 기타 기술 제조에 사용되는 자산에 대한 투자에 대해 30% 크레딧을 생성한 제조 크레딧 제공
- 현재는 추가 자금 지원에 대한 프로그램이 없음

4.3 캘리포니아 제로배기가스 버스 인센티브

캘리포니아의 하이브리드 및 제로배기가스 화물차 및 버스 바우처 인센티브 프로젝트(HVIP)¹¹⁾는 무공해 및 거의 무공해 기술의 확산에 중요한 역할을 하였다. HVIP는 point-of-sale (POS) 바우처를 제공하여 고급 차량을 보다 저렴하게 판매함으로써 상용화를 가속화하였다. 캘리포니아 기후 투자(California Climate Investments)의 일부로 2009년 캘리포니아 대기 자원 위원회(California Air Resources Board)가 시작되었으며, HVIP는 상업용 차량의 증분 비용을 줄이는 선착순 인센티브의 기능, 유연성 및 효율성을 입증한 미국 최초의 모델로 인정받고 있다(Fig. 3).

HVIP 바우처를 사용하면 업계 최고의 차량을 기존 화석 연료 차량만큼 저렴하게 구매할 수 있으므로 다양한 차종의 신규 구매자가 주 규정에 따라 더 깨끗하고 조용한 화물차 및 버스 고급 기술 혜택을 받을 수 있다.

하이브리드 및 무공해 트럭 및 버스 바우처 인센티브 프로젝트(HVIP)는 2021년 세 번째 바우처 지급 신청이 10월에 접수를 시작하였으며 사용 가능한 모든 자금(6,300만 \$)이 9분 이내에 소진되었다. HVIP는 더 많은 자금을 사용할 수 있을 때까지 대부분의 새로운 바우처 요청에 대해 일시적으로 폐쇄되지만 2022년에는 추가자금을 사용할 수 있다.

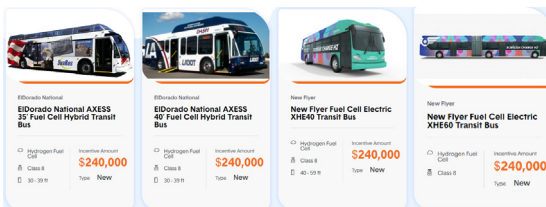


Fig. 3. Incentive amount of hydrogen bus types in California HVIP⁵⁾

5. 수소차 충전인프라 확산을 위한 고려사항

Kelley 등¹²⁾은 캘리포니아의 수소차 이용자들을 대상으로 한 설문 조사 내용을 민족지학적(ethnographic) 콘텐츠 분석 및 의사 결정 트리 모형을 적용하여 수소 충전소의 지리적 요소가 수소차를 선택하는 데 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 내용들을 요약하였다. 수소차 사용을 위한 동기 부여 요소로 수소차 이용자들은 무료 수소연료비, 다인승 차량의 1인 수소차 허용, 빠른 충전 속도, 전기차보다 친환경적인 대안, 개인주택에 Level 2 충전시설 설치 비용의 회피 등의 다양한 이유로 인하여 수소차를 선택하며, 운전자의 주요 통행 목적에 부합성 측면에서 수소차가 사용자의 요구를 충족시킬 것인지에 대한 생각 외에도, 장기적 여행을 계획하는 사람, 은퇴로 인하여 통행에 유연성이 있거나 통근 시간이 긴 사람들이 수소차에 대한 선호도가 높다. 수소 충전소와 거주지 간의 거리가 수소차를 선택한 운전자의 가장 중요한 요소가 된다고 한다. 이 연구에서 수행한 수소 충전소의 위치에 대한 인지도 설문조사에 따르면, 36% 응답자가 거주지에서 수소 충전소의 위치가 10분 이내에 위치하는 것을 선호하는 반면에 일부 응답자는 수소 충전소 위치가 1시간 이내에 있어도 불편하지 않다고 응답하였다. 수소 충전소와 직장 간의 거리에 대한 질문에는 수소 충전소와 거주지 간의 거리보다는 덜 중요한 요인이라고 응답하였으나, 36%의 응답자가 직장과 가까운 거리에 수소 충전소가 위치하는 것을 더 선호하며, 30%의 응답자는 수소 충전소가 직장과 거주지의 사이에 위치하는 것을 선호하였다. 여러 수소 충전소의 접근성에 관하여 대부분은 응답자는 3개 이상의 충전소가 접근가능하기를 선호하며, 18%에 해당하는 응답자만이 1개의 충전소만 있어도 만족한다는 응답한 것으로 나타났다. 수소자동차 이용자들은 장거리 통행이나 물품 운반 등의 통행 목적으로 수소차 이외의 일반차량이나 전기자동차를 보유하고 있었다. 수소자동차 이용자들은 인근의 충전소가 필요할 때 가용하지 않아 인근의 다른 수소 충전소를 이용해야 하는 경험을 하

였으며, 수소 충전소가 인근에 설치된다는 계획을 알고 수소차를 구입하였으나 수소 충전소 설치 계획이 실행되지 않거나 지연되어 불편을 경험하기도 하였다.

수소자동차 관련 업무 담당자들의 의견에 의하면 지역에서 수소차의 확산을 위해서는 부유한 주택가 인근에 수소 충전소를 먼저 설치해 나가는 것이 도움이 되었다는 경험과 특정지역에 수소차의 신속한 확산을 목표로 하는 경우에는 도입 초기에 복수의 수소 충전소를 동시에 신설하여 운영하는 것이 도움이 되었다고 한다.

6. 미국의 수소 버스 운행정보와 수소 충전소 웹기반 서비스 현황

현재 캘리포니아 오렌지 카운티와 샌베르나디노 카운티에서는 수소 버스 이용자들을 대상으로 수소 버스와 일반버스에 대해서 실시간으로 위치와 정류장 도착 시간을 알려주는 애플리케이션을 운영 중이다. 오렌지 카운티 애플리케이션의 경우 버스 노선별 정보를 실시간으로 제공하고 있으나 버스가 수소 버스인지 여부는 제공하지 않는다. 샌베르나디노 카운티 애플리케이션의 경우에는 일반버스는 앞에 숫자번호로, 수소 버스는 FC번호로 구분하여 서비스

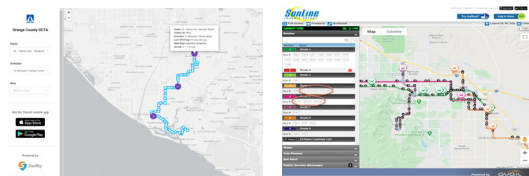


Fig. 4. Operation information for hydrogen buses in Orange County and San Bernardino County



Fig. 5. Examples of hydrogen charging station applications

해주고 있다(Fig. 4).

수소 충전소 웹기반 서비스와 관련하여 수소자동차 이용자의 편의를 제공한다(Fig. 5). 각 수소 충전소의 위치, 운영시간, 비용, 가용상태 여부, 가장 최근 운영 시간 등의 정보와 수소충전 인프라의 지역 소식을 알려주는 애플리케이션을 제공해 충전소로 이동하기 전에 목적지 충전소의 충전기 가용 여부를 미리 확인할 수 있도록 하고 있다.

7. 결론

미국의 수소 버스 및 수소 충전소 현황과 관련 법규 및 프로그램을 고찰한 바 연방정부와 주정부에서 다양한 정책과 프로그램을 통하여 수소 버스의 보급과 수소 충전소 인프라 확충을 지원하는 것을 확인하였다. 본 연구의 고찰 내용을 토대로 국내 및 해외 수소 버스의 확산과 수소충전 인프라 구축의 촉진을 위하여 수소 버스제조업체, 수소 충전소 설치업체, 수소 버스 운영기관 및 주체에게 인센티브를 제공할 수 있는 다양한 법제도의 구축과 프로그램의 개발과 적용이 필요하다.

후 기

이 연구는 국토교통부 해외 수소기반 대중교통 인프라 기술개발 사업(과제번호: 21OHTI-C163280-01)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. U. S. Department of Energy, "Alternative fuels data center", 2021. Retrieved from <https://afdc.energy.gov/>.
2. California Fuel Cell Partnership, "A California fuel cell revolution: a vision for 2030", 2020.
3. Transportation Research Board (TRB), "Guidebook for deploying zero-emission transit buses", 2020.
4. U. S. Department of Energy, "DOE hydrogen program record, hydrogen fueling stations cost", 2021.
5. U. S. National Renewable Energy Laboratory, "Fuel cell buses in U. S. transit fleets: current status 2020", 2021, pp.

- 28-29.
6. Foothill Transit, "Foothill transit's zero-emissions journey", 2020. Retrieved from <https://scag.ca.gov/sites/main/files/file-attachments/tt020221-foothill-transit.pdf>.
 7. U. S. Federal Transit Administration, "About national fuel cell bus program", 2015.
 8. U. S. Environmental Protection Agency, "Volkswagen clean air act civil settlement", 2017.
 9. U. S. Federal Transit Administration, "Statewide transportation improvement program (STIP)", 2019.
 10. Department of Energy, "Office of energy efficiency and renewable energy", Financial Incentives for Hydrogen and Fuel Cell Projects. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/financial-incentives-hydrogen-and-fuel-cell-projects>.
 11. California HVIP, "Hybrid and zero-emission truck and bus voucher incentive project (HVIP)". Retrieved from <https://californiahvip.org/>.
 12. S. Kelley, M. Kuby, R. Stotts, A. Krafft, and D. Ruddell, "Hydrogen fuel cell vehicle drivers and future station planning: lessons from a mixed-methods approach", Johnson Matthey Technol. Rev., Vol. 64, No. 3, 2020, pp. 279-286, doi: <https://doi.org/10.1595/205651320X15826270318193>.