Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 4, 2022, pp. 284~292
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.4.284

KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

수소충전소 내 연료전지용 수소연료 품질 관리 및 표준화 동향

김동겸[1] · 임정식[1,2] · 이정순[1,2†]

[1]한국표준과학연구원 온실가스표준팀, [2]과학기술연합대학원대학교 측정과학전공

Current Status of Standardization for Quality Control of Hydrogen Fuel in Hydrogen Refueling Stations for Fuel Cell Electric Vehicles

DONGKYUM KIM[1], JEONG SIK LIM[1,2], JEONGSOON LEE[1,2†]

[1]Standard for Greenhouse Gas, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), 267 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea
[2]Department of Measurement Science, University of Science and Technology (UST), 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

[†]Corresponding author : leejs@kriss.re.kr

Received 10 June, 2022
Revised 4 August, 2022
Accepted 18 August, 2022

Abstract >> Hydrogen is promising a candidate for energy supporting the carbon neutrality policy for greenhouse gas reduction, which is being promoted in several countries, including Korea. Although challenging efforts—such as lowering the costs of green hydrogen production and fuel cells—remain, hydrogen fuel cell electric vehicles (FCEVs) are expected to play a significant role in the energy transition from fossil fuels to renewable energy. In line with this objective, the hydrogen FCEV working group in the International Organization for Standardization (ISO) compiled and revised international standards related to hydrogen refueling stations as of 2019. A well-established hydrogen quality management system based on the standard documents will increase the reliability of hydrogen charging stations and accelerate the use of FCEVs. In this study, among the published ISO standards and other references, the main requirements for managing charging stations and developing related techniques were summarized and explained. To respond preemptively to the growing FCEV market, a continuous hydrogen quality monitoring method suitable for use at hydrogen charging stations was proposed.

Key words : Hydrogen(수소), Fuel cell electric vehicle(연료전지차), Hydrogen refueling station(수소충전소), Hydrogen fuel quality(수소연료품질), Onsite diagnosis(현장 진단)

2022 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

1. 서 론

산업혁명 이후 인류는 석탄, 석유 그리고 천연가스 등의 화석연료로부터 필요한 에너지를 추출해 왔다. 주로 열원(heat sources)으로써 사용되던 화석연료는 내연기관, 발전기를 통해서 역학적 에너지, 전기에너지로 변환되어서 각종 기계와 전기 기구에 동력을 제공해 왔다. 이를 통해서 고도의 산업화와 윤택한 삶을 가져올 수 있었다. 하지만, 화석연료에 대한 지나친 사용은 막대한 양의 이산화탄소를 발생시켰다. 이산화탄소는 2005년 이후 발효 중인 교토의정서(Kyoto Protocol)에 포함된 감축 대상 온실가스 6종 중 하나이다. 현재까지도 화석연료는 지속적으로 사용되고 있으며 대기 중의 이산화탄소의 양은 매해 증가하고 있어[1], 지구 온난화로 인한 돌이키기 어려운 기후변화를 우려하고 있다[2-8].

수소(H_2)는 온실가스를 배출하지 않는 지속 가능한 에너지 자원 중 하나다. 자연계에 흔하게 있는 물의 구성 성분인 수소는 그 양이 풍부하여 고갈될 염려가 없다. 기존의 내연기관의 연료로서 동력원으로도 사용할 수 있으며[9], 연료전지(fuel cell)를 통해서 전기를 생산해 낼 수 있다[10,11]. 수소를 연료로 사용 시 배기가스가 수증기이므로 대기오염물이 없는 청정에너지원이다. 또한, 원자력, 태양열, 풍력, 수력 등의 대체에너지로 발생한 전기에너지를 저장하는 매개체도 될 수 있다[12]. 이처럼 수소는 무한에 가까운 부존량, 활용성, 청정성 그리고 에너지 저장 매개체라는 장점들 때문에, 전 세계의 각국에서 미래의 에너지원으로 높은 관심을 갖고 개발해 왔다. 일본(2018년), 한국(2019년), 미국(2020년), 독일(2020년), EU (2020년)은 수소경제 로드맵(roadmap)을 제정 하고 배포하였다[13].

국내의 경우, 2019년 “수소경제 활성화 로드맵” 발표[14] 그리고 2020년 “수소경제 육성 및 수소 안전에 관한 법률 (수소법)” 제정, 2021년 관련 법령이 시행되었다. “수소경제 활성화 로드맵”에서 모빌리티 부분에서 정부는 2040년까지 수소연료전지차(fuel cell electric vehicle, FCEV) 620만 대 생산과 수소충전소 1,200개소 구축을 담고 있다. 차세대 이동 수단으로 FCEV의 도입과 수소 공급 생태계 구축, 그리고 이들의 활성화를 위해서는 선행 연구되어야 할 부분들이 많다. 그중 하나가 수소 연료에 대한 품질 관리와 보증이다.

내연 기관에 사용되는 연료인 가솔린과 비교하여, FCEV에 공급되는 수소는 훨씬 더 고품질의 연료이어야 한다[15]. 고품질이란 매우 높은 순도를 의미한다. 차량의 연료전지는 수소 내에 존재하는 특정 미량의 불순물로 인하여 일시적 또는 영구적 성능 저하로 인한 타격을 받기 때문이다[15,16]. 특히, 영구적 성능 저하로, 차량의 핵심이며 가장 큰 비용을 차지하는 연료 전지부의 수명 단축 나아가서는 기능상실을 가져올 수 있다. 이를 방지하기 위해서, 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)는 수소연료 품질 사양(ISO 14687:2019), 충전소 내에서 수소 품질 보증 및 관리에 대한 규약(ISO 19880-8:2019) 그리고 수소 품질 관리를 위한 분석법 검증 기준(ISO 21087:2019)들을 기술하는 문서들을 배포하였다[17-19]. 본고에서는 가장 최근에 발표한 국제 표준규격(ISO 14687:2019, ISO 19880-8:2019, ISO 21087:2019)과 다른 참고문헌들을 토대로, 양성자 교환막(proton exchange membrane, PEM) 차량용 연료전지에 투입되는 수소연료의 품질관리 현황과 내용을 조사 분석하였다.

앞으로 화석연료를 극복하고 수소연료 시대로 옮겨가게 되면, 수소연료 충전소는 대한민국 곳곳에 늘어날 것이다. 많아진 수소충전소들과 함께 연료 품질 관리와 보증을 위한 순도 분석에 대한 수요는 함께 늘어날 것이다. 경제적이고 안전하면서 ISO 14687:2019 규격에서 요구하는 수준까지 수소 품질 평가를 할 수 있는 수소연료 분석장치 개발이 필요하다. 이에 현재 한국표준과학연구원에서는 수소품질 현장진단장치를 개발하고 있다. 현장진단장치는 수소충전소에 설치되어 운영될 수 있도록 저 비용과 안전하고 손쉬운 조작법 구현에 초점을 두고 있다. 본고에서는 현장진단장치를 간략하게 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 수소연료 품질에 관한 표준(ISO 14687:2019)

1994년에 Daimler 사(Stuttgart, Germany)에서 세계 최초의 FCEV인 NECAR1이 개발된 이후로, Hyundai Motor Company (Seoul, Korea)는 2013년 세계 최초 양산 FCEV인 투싼 ix를 시판하였고, 2018년 전용 FCEV인 NEXO를 출시하였다[13]. TOYOTA (Toyota, Japan)는 2014년 전용 차체를 적용한 FCEV 미라이를 개발하였고, 이후 2020년 2세대 미라이를 선보였다[13]. FCEV의 시판과 각국 정부 수소 인프라 구축 계획이 발표되면서, 앞으로도 FCEV 수요는 지속적으로 증가할 것으로 보인다. 하지만, FCEV의 대중화를 위해서는 연료전지 가격 저감을 통한 차량 가격 경제성 확보가 중요하다. 연료전지 가격 대부분은 촉매로 사용되는 백금(Pt) 사용량에 의해서 결정된다. 비용 절감을 위해서 백금의 사용을 줄이면 되지만, 수소연료 내 불순물들에 내성(tolerance)이 감소하기 때문에 연료전지의 수명도 따라서 감소하게 된다. 백금 사용량을 줄이기 위해서는 고순도의 수소연료가 필요하지만, 수소연료 생산 비용도 증가하기 때문에 경제성이 없어진다. 이 때문에 백금 사용량에 따르는 비용과 수소연료 순도 향상 비용 둘 다 고려한 최적의 수소연료의 품질 사양의 기준이 필요하다[20].

수소 분야 기술 표준위원회인 ISO/TC 197은 연료전지에 사용되는 수소연료 품질의 표준 기준인 ISO 14687-1을 출간하였다[20]. 이후 여러 차례 개정을 거쳐서 ISO 14687:2019에 이르렀다. ISO 14687:2019는 FCEV 그리고 고정식 발전 사용되는 수소연료 품질 기준을 모두 포함하지만[17], 본고는 FCEV용에 국한한다. ISO 14687:2019는 차량 연료전지에 공급되는 수소 연료의 최소 요구 품질 사양을 제시한다[17]. 품질 사양은 수소 연료의 순도와 불순물별 최대 허용량을 포함한다. 차량용 연료전지에 공급되는 수소 품질 사양은 Table 1과 같다. 연료전지 최적의 성능과 수명을 위해서 수소연료 순도는 99.97%와 동등하거나 그 이상의 순도를 유지해야 한다. 수소를 제외한 다른 성분들 즉, 총불순물들의 농도는 0.03% 혹은 300 ppm을 넘지 말아야 한다. 현재 총 15종의 불순물 각각에 대한 잔류 허용치는 정해져 있다. 연료전지 내에서 불순물의 행동 특성에 따라 잔류 허용치가 결정되는데, 크게 세 가지 불순물 그룹으로 나눌 수 있다.

첫 번째로 연료전지 내에서 반응성이 없는 기체들(CH_4, He, N_2, Ar)의 경우 100-300 μmol/mol 잔류 농도가 허용된다. 이들 기체 성분의 잔류는 연료전지 수명에 영향은 없지만, 단지 수소를 희석하는 효과가 있어서 연료전지 최적 성능에 방해된다.

두 번째 불순물 그룹은 그 양이 적을 때는 큰 문제는 없지만, 많아지면 연료전지의 수명에 영향을 주는 기체 성분들(H_2O, O_2, CO_2, 메탄을 이외의 탄화수소)로 이루어져 있다. 이들의 경우 허용되는 불순물 최

Table 1. Hydrogen fuel quality specifications for fuel cell electric vehicles

Constituents		Type Ⅰ, Type Ⅱ Grade D
Hydrogen concentration		99.97 %
Total non-hydrogen gases		300 μmol/mol
No.	Maximum concentration of individual impurities (μmol/mol)	
1	He	300
2	N_2	300
3	Ar	300
4	CH_4	100
5	H_2O	5
6	O_2	5
7	Total hydrocarbons except CH_4	2
8	CO_2	2
9	CO	0.2
10	HCOH	0.2
11	HCOOH	0.2
12	NH_3	0.1
13	Halogenated compounds	0.05
14	Total sulphur compounds	0.004
15	Maximum particulate concentration	1 mg/kg

*Type: hydrogen gas, Type Ⅱ: liquid hydrogen, Grade D: PEM fuel cells for road vehicles

대치는 2-5 μmol/mol 수준이다. 물(H_2O)의 경우 연료전지 내부 구성품에 영향을 주지 않지만, 물은 수용성 양이온(K^+, Na^+)의 전달 매개체로 작용할 수 있으며, 영하 기온 형성된 얼음은 각종 기계적 부품에 부담을 줄 수 있다. 산소(O_2)의 경우 연료전지의 음극(cathode)에서 소모되는 소재 중 하나로서 과량의 산소가 양극(anode)에 유입되면 원하지 않는 수소 산화물들을 생성시켜, 백금을 제외한 다른 전극 구성 성분들을 산화시키기 때문에 전극 수명을 단축시키는 효과를 가져온다. 또한, 금속수소화물(metal hydrides)로 수소를 저장하는 경우에 산소농도가 높을 때에는 금속수소화물이 쉽게 산화되기 때문에 저장탱크의 수명단축 문제를 야기하기도 한다[15,17]. 이산화탄소(CO_2)는 일반적으로 연료전지 기능에 별다른 영향력은 없지만, 연료 희석 효과로 인하여 연료전지 전력 시스템 효율에 영향을 미친다. 일반적인 작동 조건으로는 일어날 확률이 낮지만, 고농도 이산화탄소(몰 분율에서 25% 이상)일 때는 역수성 가스전이 반응(reverse water gas shift reaction)을 통해 H_2와 반응하여 생성물로 물(H_2O)과 일산화탄소(CO)를 발생할 수 있는데, 이때 발생한 CO는 연료전지 내부를 손상시킬 수 있다. 메탄은 연료전지 내에서 반응성이 없지만, 다른 탄화수소의 경우 연료전지 내 촉매의 표면에 흡착되어 산화반응에 참여하려는 수소의 접근을 차단한다. 일반적으로 방향족 탄화수소가 포화탄화수소보다 반응성이 더 크다.

세 번째는 연료전지 내에서 가장 반응성이 높은 기체들(황화합물[sulphur compounds], 할로겐 화합물[halogenated compounds], CO, 포름알데하이드[formaldehyde], 포름산[formic acid], 암모니아)로 이루어져 있다. 불순물로서 이들의 최대 허용치는 0.004-0.2 μmol/mol 수준이다. 이들 가스 성분들은 연료전지를 영구적으로 손상시키거나 또는 복구가 어려운 손상을 주기 때문에 적은 양의 노출로도 연료전지 수명단축에 큰 영향을 준다. 황화합물, 할로겐 화합물, CO, 포름알데하이드, 포름산들은 백금 촉매 표면에 강하게 흡착 또는 결합하여 전기화학적 촉매 활성도를 떨어뜨린다. 극미량의 불순물이 촉매 표면과 반응하여 촉매 활성이 감소되는 현상을 피독(poisoning) 현상이라고 하며, 연구자들은 촉매 활성에 부정적 영향 끼치는 불순물들을 촉매독(catalyst poison)이라 부르기도 한다. 촉매독으로 작용하는 가스 성분들과 더불어 피독된 백금 촉매로는 양극(anode)에서 수소(H_2) 흡착 및 산화반응이 원활히 진행되지 않기 때문에, 정상적인 연료전지 작동이 어려워진다. 촉매독 가스 성분의 농도, 노출시간에 비례하여 백금의 전기화학적 촉매 활성도는 감소한다. CO 관련된 촉매 활성도 감소는 전지 운용 조건, 주입 가스 조성 변경 등의 방법으로 복원할 수 있지만, 일상적으로 쉽게 접근할 수 있는 해결책은 아니다. 포름알데하이드, 포름산의 경우, 백금과 반응 시 CO라는 중간체를 거쳐서 반응한다. 그러므로 촉매 독성에서는 일산화탄소와 비슷한 반응경로를 따른다. 황화합물과 할로겐화합물의 경우는 CO와 다르게 일단 백금과 반응하여 영구적 결합을 만들기 때문에, 다시 원래 촉매 활성 백금으로 복원시킬 수 없게 된다. 이와 같은 이유로 일산화탄소 및 관련 화합물(포름알데하이드, 포름산), 할로겐화합물 그리고 황화합물 순으로 불순물의 잔류 허용치가 점점 낮아진다. 결국 황화합물이 가장 낮은 잔류 허용치(0.004 μmol/mol)를 나타낸다. 그러므로 황화물이나 할로겐화합물 발생할 수 있는 공정을 포함하는 수소생산 시설은 수소연료의 정제에 특별히 신경을 써야할 것이다. 수소연료 내 암모니아 불순물이 있는 경우에는 양성자 전도도를 감소시켜 비가역적 방향으로 연료전지 성능 저하를 가져온다. 마지막으로 기체 분자는 아니지만, 수소 연료 안에 있는 미립자 즉, 먼지 불순물은 필터를 이용하여 연료전지 시스템으로 유입을 방지할 수 있다.

2.2 수소충전소 내 수소 품질 보증 및 관리에 관한 표준(ISO 19880-8:2019)

국제표준규격 ISO 19880-8:2019는 충전소 내에서 연료전지에 공급되는 기체 수소연료의 품질을 보증할 방법과 관리에 대한 규약을 포함하고 있다. 충전소에서 수소의 품질을 관리하는 두 가지 일반적인

접근법은 오프라인 순도 분석법(offline purity method)과 온라인 순도 분석법(online purity method)이다. 두 가지 방법이 개별 혹은 함께 사용되어 수소연료 품질을 보증한다. 오프라인과 온라인 두 품질 관리법을 구분하는 가장 큰 기준은 샘플을 취하는 방법이다[18]. 점 시료 채취(spot sampling)는 오프라인 방법에 대응하고, 연속 모니터링(monitoring)은 온라인 방법에 대응한다.

점 시료 채취-오프라인 분석 방법의 경우, 충전소 내에서 채취된 시료의 분석은 충전소 외부 실험실에서 분석이 이루어진다. 대개 실험실은 시료 분석을 진행하기 위한 최적 조건과 많은 검사 장비를 보유하고 있다. 이를 통해서 채취된 수소 시료 대한 정확하고 포괄적인 불순물 분석이 이루어질 수 있다. 한 번의 분석을 수행하게 되더라도 시료의 채집과 분석에 이르기까지 걸리는 시간과 비용이 크기 때문에 분석을 자주하기 어렵다는 어려움이 있다. 또한, 분석 결과는 시료를 채취한 시점의 정보만을 주기 때문에 충전소 내의 불순물 유입에 대한 신속한 대응이 어렵다. 시료 채취 과정 중 시료의 오염이라는 어려움이 항상 도사리고 있기 때문에 주의하여 절차에 따라 시료를 채취해야 한다. 특히, 대기 성분 유입으로 인한 오염을 대비하는 방법은 필수다. 이를 위해서 전문적 시료 채취 전용 장비와 인력, 그리고 검증된 확보한 절차가 필요하다. 때문에 ISO 19880-1:2020는 수소 시료 채취에 관련한 표준 기준을 설명하고 있다[21].

연속-모니터링은 시료 채취와 분석이 동시에 같은 장소에서 수행되는 방법이다. 온라인은 현장에서 이루어지다 보니, 분석실에서 이루어지는 오프라인 방법에 비해 최적화된 분석환경을 구현하기 어렵다. 또한 오프라인 분석실 수준의 고비용 대규모 분석장비를 현장에서 운영하는 것도 현실적으로 어렵기 때문에 소규모, 저비용 분석장비가 필연이다. 따라서 오프라인 분석에 비해 정확하고 포괄적인 분석이 어려울 수밖에 없다. 하지만, 충전소나 생산시설 내의 연속적인 가스 흐름에서 직접 시료를 연결하여 신속한 분석이 가능하기 때문에, 이상 발생 시 실시간 관리와 대처가 가능하다. 수소연료 중 모든 불순물 하나하나에 대한 실시간 온라인 모니터링이 현실적으로 어렵다면, 일산화탄소와 같은 오염 지표종(indicator species)을 실시간으로 모니터링하여, 즉각적인 수소

Table 2. Combined risk assessment

Probability per one fuelling	Occurrence	Severity				
		No impact	No impact on the vehicle/temporary loss of power	Reversible damage/specific and light maintenance requirements	Reversible damage/quick maintenance is required	Irreversible damage/stalled or underpowered vehicles have an impact on safety
Frequent	4	+	*	*	*	*
Possible (1/10,000)	3	+	0	*	*	*
Rare (1/100,000)	2	+	+	0	*	*
Very rare (1/1,000,000)	1	+	+	+	0	*
Impossible	0	+	+	+	+	+

Analysis	+	0	*
	Acceptable risk area: adequate controls already in place.	Additional research is required: Existing controls may not be enough.	Unacceptable risk: more control is necessary.

연료의 불순물 오염을 확인할 수 있다. 이를 통해서 허용치 이상의 불순물에 대한 신속하고 즉각적 대응은 다수의 FCEV에 전가되는 피해를 최소화 할 수 있다.

국내 수소 경제 활성화 로드맵에 따르면, 앞으로 2040년에는 전국에 1,200개 이상의 수소충전소가 구축될 예정이다[14]. 이들 충전소의 관리를 위해서 수소연료 품질 분석에 대한 수요가 많이 늘어날 것이다. 오프라인 분석은 고비용, 낮은 빈도의 수소연료 관리가 이루어지고 있지만, 불순물 전체에 대한 포괄적인 분석이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 온라인 분석법은 제한된 불순물 적용 범위를 갖지만, 오염 지표종의 실시간 모니터링이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 온라인 방법과 오프라인 방법이 지닌 장점을 적절히 활용한다면 미래의 수소연료 품질 분석 수요를 양적, 질적인 면에서 모두 만족하는 전략이 될 것이다.

수소충전소 내 연료 품질 보증 계획을 위해서, ISO 19880-8:2019는 다음의 두 가지 접근 방식, 1) 규범적 접근 방식(prescriptive methodology), 2) 위험평가(risk assessment methodology)를 기술하고 있다. 규범적 접근 방식은 잠재적인 오염원을 고려하여 잠재적인 오염 물질을 분석하고 처리하기 위한 고정 프로토콜을 설정하는 방식이다. 공급되는 수소의 생산 방식과 운송 방식이 명확하게 고정된 곳은 규범적 접근 방식이 적용될 수 있다. 위험 평가는 사건이 발생할 확률(probability)과 발생한 사건의 심각도(severity)를 고려하여 발생한 사건의 합성위험도(combined risk assessment)를 평가하는 방법이다(Table 2). 최종적으로 평가된 위험도는 허용할 수 있는 위험, 허용 불가능한 위험, 추가 조사가 필요한 위험 3분위로 구분된다. 특히, 허용 불가능한 위험 발생 시, 충전소 내 즉각적 조치가 필요하다. 충전소에서 ISO 14687:2019 품질 사양을 충족하지 않는 수소를 공급하는 경우, 주유소 운영자는 연료 품질 관련 문제가 해결될 때까지 차량에 수소연료 공급을 중단해야 한다. 그리고 가능한 한 신속하게 충전소 소유자, 연료 공급자와 관할 당국에 통지해야 한다. 수소충전소의 수소연료 품질 보증을 위해 충전소 소유자/운영자는 품질 보증 방법을 숙지하고 적용과 개선을 위한 노력을 해야한다.

2.3 수소 품질 관리를 위한 분석법 검증에 관한 표준 (ISO 21087:2019)

FCEV를 위한 수소 공급망 인프라를 위해서, 수소의 품질 사양을 설명하는 ISO 14687:2019과 수소충전소 내 연료 품질 관리 및 보증 규약 관련한 ISO

Table 3. Analysis methods suitable for measuring individual impurities in hydrogen fuel

Impurity	Analytical technique
H_2O	Chilled mirror hygrometer, quartz crystal microbalnce, CRDS, Capacitance, continuous wave CRDS, GC-MS, GC-MS with jet pulse injection, FTIR
Total hydrocarbon	GC-FID, Methaniser GC-FID, GC-MS (with pre-concentrator), FTIR
O_2	Electrochemical sensor, GC-MS with jet pulse injection, GC-TCD, GC-PDHID, continuous wave CRDS
He	GC-TCD
N_2	GC-TCD, GC-PDHID, GC-MS with jet pulse injection
Ar	GC-TCD, GC-PDHID, GC-MS with jet pulse injection
CO_2	Methaniser-GC-FID, GC-PDHID, GC-MS with jet pulse injection, FTIR, continuous wave CRDS
CO	GC-PDHID, Methaniser-GC-FID, FTIR, Continuous wave CRDS
Total sulphur compounds	GC-SCD (with pre-concentrator), GC-FPD (with pre-concentrator), GC-SCD (without pre-concentrator)
HCOH	GC-MS (with pre-concentrator), GC-MS (without pre-concentrator), continuous wave CRDS, HPLC (with DNPH cartridge), FTIR
HCOOH	FTIR, IC with impinger sampling device
NH_3	GC-MS, FTIR, IC, IC with impinger sampling device, continuous wave CRDS
Halogenated compounds	IC with impinger sampling device, GC-MS (with pre-concentrator)

19880-8:2019가 배포되고 있다. 앞 두 문서는 상세한 불순물 분석법을 포함하지 않는다. 따라서 적절한 분석법과 방법의 유효성을 평가할 방법이 필요하다. ISO 21087:2019는 수소충전소에서 수소연료 품질 관리에 사용되는 분석법과 이를 검증하기 위한 기준을 기술한다. 분석 방법의 검증은 지명된 분석 결과가 수소연료 품질 분석에 유효한지를 평가하는 과정이다.

ISO 21087:2019는 수소 환경 내에서 ISO 14687:2019의 기술된 불순물들을 정량 분석하는 절차와 불확도 평가 과정을 포함한다. 검증 과정에서 선택성(selectivity), 검출한계(limit of detection, LOD) 및 정량한계(limit of quantification, LOQ), 작업 범위(working range), 진실도(trueness), 정밀도(precision), 측정 불확도(measurement uncertainty), 둔감도(ruggedness) 등의 항목 평가를 통해서 ISO 수소 품질 관련 문서가 지정한 연료 품질 분석에 부합하는지 확인한다. 만약 부합하지 않았다면, 해당 분석법 사용을 중지하고 다른 대안을 찾는다. 사용한 분석법이 ISO 21087:2019가 제시한 방법 혹은 동등한 방법에 해당한다면 해당 분석법은 적합하다. ISO 21087:2019의 경우 오프라인 분석법을 지원하는 표준 문서이다. 수소충전소 연료 분석 시 오프라인 분석의 보완하기 위해서 온라인 분석법이 제안되거나 개발되고 있기 때문에[15] 온라인 분석법 검증을 위한 ISO 표준 제정에 대한 수요가 늘어날 것으로 보인다.

ISO 14687:2019는 수소연료 품질 기준을 위한 분석에 적합 가능한 분석기술을 나열하였다(Table 3). 수소연료 내 품질 분석은 가스크로마토그래피와 분광학적 방법이 주를 이루고 있다[15]. 다양한 불순물 분석 방법이 존재하지만 불순물 모두 분석할 수 있는 범용 분석 방법이나 장비는 없다. 분석 대상 불순물별로 적합한 분석법을 적용해야 하므로 수소 품질 사양에 만족하는 결과를 내려면 매우 잘 갖추어진 연구실이라도 실현하기 쉽지 않다[15]. 불순물 농축 관련된 장비를 사용하면 검출한계가 낮은 분석 방법을 적용할 수 있는 잇점이 있기 때문에 경제적일 수 있다[15].

2.4 수소연료 품질 현장 진단 의의

앞으로 수소경제가 활성화되면 수소충전소의 수는 가파르게 늘어나게 될 것이다. 고비용과 낮은 빈도 품질관리의 어려움을 지닌 오프라인 분석법만으로는 증가한 수소연료 품질 분석 수요에 대응하기 어렵게 된다. 또한, 점 시료 채취 방식의 샘플링이 필수인 오프라인 분석법만으로는 충전소 내 불순물 유입에 대한 신속한 대응은 사실상 어렵다. 수소충전소 내에서 수소연료 품질 관리 측면에서 저비용, 높은 분석 업무 처리량, 그리고 실시간 모니터링 가능한 신속한 온라인 분석법이 필요하다. 하지만 온라인 분석법의 경우 오프라인 분석법과는 다르게 수소충전소 현장에 설치 가능한 장비 규모와 적용에 현실적 어려움이 있으므로 적용 가능한 불순물의 범위가 제한적이라는 단점을 가지고 있다.

수소연료의 생산 및 정제 과정에 대한 충분한 이해가 있다면, 잠재적 불순물들을 예측할 수 있다[15,18]. 순도 분석 시 사용되는 분석 방법이 수소 가스 내에 존재할 가능성 있는 불순물에 집중된다면, ISO 14687:2019에 해당하는 15종 불순물 모두 측정하는

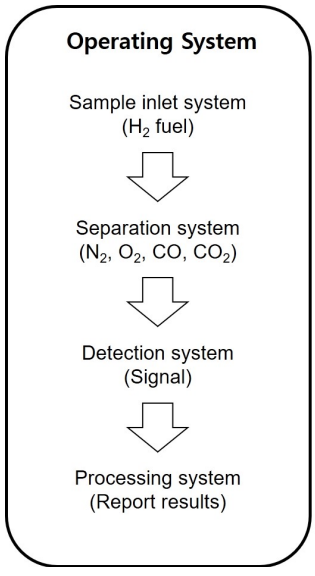

Fig. 1. A schematic diagram of the continuous hydrogen quality monitoring system being produced by Korea Research Institute of Standards and Science

것보다 비용 효율적인 접근 방법으로 분석법 적용이 가능하다[15]. 검출할 수 있는 불순물 중 오염 지표종 역할을 하는 불순물이 존재한다면, 검출 불가능한 다른 불순물의 존재를 유추할 수 있어서 일정 수준의 포괄적인 분석법 개발이 가능할 것으로 보인다.

현재 한국표준과학연구원에서는 위의 "예측할 수 있는 불순물 검출" 접근방식에 근거하여 국내 수소 공급 인프라에 활용할 수 있는 수소연료 현장 진단 장치를 개발하고 있다. 수소연료 현장 진단 장치는 수소충전소 현장에서 저비용, 높은 분석 처리량, 실시간으로 불순물을 모니터링 할 수 있는 장치가 될 것이다. 단일 분석 장비로 ISO가 지정한 15가지 불순물 모두 다루기에는 현실적으로 어렵기 때문에, 대기환경 노출(N_2, O_2) 그리고 수소 생산 과정(천연가스의 수증기 개질법)에서 포함되는 불순물들(CO, CO_2)의 검출을 목표로 삼았다. 기 개발한 수소연료 불순물 표준물질[22]을 이용하여 실시간 현장진단장치는 ISO 기준에 부합하는 수준의 분석능력을 갖출 것이다(Fig. 1). 또한, 현장의 작업자에 의해 손쉽게 운영할 수 있도록 한글화된 메뉴 구성 그리고, 측정과 결과 보고가 자동 수행될 수 있도록 운영체제 개발이 LabVIEW 그리고 Python 개발 플랫폼을 통해 수행 중이다. 제작 완료된 수소연료 품질 현장 진단장치는 다수의 수소충전소에 설치되어, 시범 운용으로 현장 적용성 연구를 수행할 예정이다.

3. 결 론

화석연료 남용으로 증가된 이산화탄소는 지구 평균 온도를 매해 상승시키고 있다. 지구 온도가 높아질수록 빙하는 녹고 해수면이 상승하는 등 기후변화가 가속화될 것이다. 이에 자연재해 강도와 빈도가 심화되고 있다. 고조된 위기의식 속에서 국제사회는 "탄소중립"계획과 정책을 발표하여 온실가스 감축을 위해서 노력하고 있다. 그 "탄소중립"추진전략 중 대표적인 정책이 수소에너지 확대이다. 수소에너지 사용 확대를 위해서 각국 정부는 수소공급 인프라 구축과 FCEV 공급 확대를 계획하고 있다. FCEV의 경우 연료 품질에 의해 차량 수명이 결정될 수 있어서 공급망 내 수소연료 품질 관리가 중요한 사항이다. ISO는 충전소 내 수소연료 품질 관리에 관련한 주요한 3종의 기술 표준을 제정 및 출간하였다. "수소연료 품질 사양"의 표준은 ISO 14687:2019에서 소개하고 있으며, "수소충전소 내에서 수소 품질 보증 및 관리"의 표준은 ISO 19880-8:2019에서 담당하고 있다. "수소연료 품질 관리를 위한 분석법 검증 기준"의 표준은 ISO 21087:2019에 포함되어 있다. 수소충전소의 안전과 수소연료 품질에 관련한 기술 개발을 위해서는 전 세계적으로 통용되고 있는 ISO 규격의 이해와 적용이 필수다. 본고에서 수소연료 품질 관련 ISO 3종 문서들의 중요 내용 및 주요사항들을 정리하였다. 충전소 내에서 수소연료 품질을 온라인으로 평가할 수 있는 장비의 필요성을 언급하고, 온라인 분석 방법의 가능성을 보여주고자 한국표준과학연구원에서 개발 중인 현장 진단장치를 간단히 소개하였다. 수소 경제 활성화가 이루어지면 충전소의 수소연료를 품질 분석, 안전 검사 등의 수요가 많아질 것이다. 이에 대응하기 위해서 현재까지 진행된 국제표준 규격의 사항을 정확하게 이해하고, 현장에 적용할 수 있는 기술 개발과 개선을 위해 노력할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부(MOTIE)재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)이 지원한 연구사업(No. 20213030040380)과 한국표준과학연구원의 "수소스테이션 신뢰성 평가기술 개발" 사업(2022-GP2022-0009) 지원으로 수행된 연구입니다.

References

1. D. C. Harris, "Charles David keeling and the story of atmospheric CO_2 measurements", Anal. Chem., Vol. 82, No. 19, 2010, pp. 7865-7870, doi: https://doi.org/10.1021/ac1001492.
2. S. Piao, P. Ciais, Y. Huang, Z. Shen, S. Peng, J. Li, L. Zhou, H. Liu, Y. Ma, Y. Ding, P. Friedlingstein, C. Liu, K. Tan, Y. Yu, T. Zhang, and J. Fang, "The impacts of climate change on water resources and agriculture in China", Nature, Vol. 467,

2010, pp. 43-51, doi: https://doi.org/10.1038/nature09364.
3. J. Tollefson, "Fire, drought, flood: climate challenges laid bare in US government report", Nature, 2018, doi: https://www.nature.com/articles/d41586-018-07483-x.
4. Y. Chai, Y. Li, Y. Yang, B. Zhu, S. Li, C. Xu, and C. Liu, "Influence of climate variability and reservoir operation on streamflow in the Yangtze River", Sci. Rep., Vol. 9, No. 1, 2019, pp. 5060, doi: https://doi.org/10.1038/s41598-019-41583-6.
5. T. H. Moon, Y. Chae, D. S. Lee, D. H. Kim, and H. Kim, "Analyzing climate change impacts on health, energy, water resources, and biodiversity sectors for effective climate change policy in South Korea", Sci. Rep., Vol. 11, No. 1, 2021, pp. 18512, doi: https://doi.org/10.1038/s41598-021-97108-7.
6. M. S. Speer, L. M. Leslie, S. MacNamara, and J. Hartigan, "From the 1990s climate change has decreased cool season catchment precipitation reducing river heights in Australia's southern Murray-Darling Basin", Sci. Rep., Vol. 11, No. 1, 2021, pp. 16136, doi: https://doi.org/10.1038/s41598-021-95531-4.
7. A. Chakraborty and P. Singhai, "Asymmetric response of the Indian summer monsoon to positive and negative phases of major tropical climate patterns", Sci. Rep., Vol. 11, No. 1, 2021, pp. 22561, doi: https://doi.org/10.1038/s41598-021-01758-6.
8. L. Dai, T. F. Cheng, and M. Lu, "Anthropogenic warming disrupts intraseasonal monsoon stages and brings dry-get-wetter climate in future East Asia", npj. Clim. Atmos. Sci., Vol. 5, No. 1, 2022, pp. 1-10, doi: https://doi.org/10.1038/s41612-022-00235-9.
9. C. M. White, R. R. Steeper, and A. E. Lutz, "The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review" Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 31, No. 10, 2006, pp. 1292-1305, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001.
10. R. A. Felseghi, E. Carcadea, M. S. Raboaca, C. N. Trufin, and C. Filote, "Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications", Energies, Vol. 12, No. 23, 2019, pp. 4593, doi: https://doi.org/10.3390/en12234593.
11. Y. Manoharan, S. E. Hosseini, B. Butler, H. Alzhahrani, B. T. F. Senior, T. Ashuri, and J. Krohn, "Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect", Appl. Sci., Vol. 9, No. 11, 2019, pp. 2296, doi: https://doi.org/10.3390/app9112296.
12. G. Glenk and S. Reichelstein, "Reversible power-to-gas systems for energy conversion and storage", Nat. Commun., Vol. 13, No. 1, 2022, pp. 2010, doi: https://doi.org/10.1038/s41467-022-29520-0.
13. M. H. Kim, "R&D Technology and Dissemination Policy and of FCEV", Korean Industrial Chemistry News, Vol. 24, No. 4, 2021, pp. 22-35. Retrieved from http://www.riss.or.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=1a0202e37d52c72d&control_no=71ec116ae0105e6347de9c1710b0298d&keyword=FCEV%20%EA%B8%B0%EC%88%A0%20%EA%B0%9C%EB%B0%9C%20%EB%B0%8F%20%EB%B3%B4%EA%B8%89%20%EC%A0%95%EC%B1%85%20%EB%8F%99%ED%96%A5.
14. Ministry of Trade, Industry and Energy , "Korea's Hydrogen Economy Roadmap", 2019 Retrieved from https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=112&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=1490593.
15. A. Murugan and A. S. Brown, "Review of purity analysis methods for performing quality assurance of fuel cell hydrogen", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 40, No. 11, 2015, pp. 4219-4233, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.041.
16. G. Postole and A. Auroux, "The poisoning level of Pt/C catalysts used in PEM fuel cells by the hydrogen feed gas impurities: the bonding strength", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 11, 2011, pp. 6817-6825, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.018.
17. ISO 14687:2019, "Hydrogen fuel quality-product specification". Geneva, Switzerland: International Organization for Standardisation; 2019.
18. ISO 19880-8:2019, "Gaseous hydrogen-fuelling stations-Part 8: Fuel quality control". Geneva, Switzerland: International Organization for Standardisation; 2019.
19. ISO 21087:2019, "Gas analysis-Analytical methods for hydrogen fuel-Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles". Geneva, Switzerland: International Organization for Standardisation; 2019.
20. J. W. Kim, T. Lee, and J. W. Choi, "Current status of standardization of ISO TC197", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 27, No. 3, 2016, pp. 245-255, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2016.27.3.245.
21. ISO 19880-1:2020, "Gaseous hydrogen-Fuelling stations-Part 1: General requirements". Geneva, Switzerland: International Organization for Standardisation; 2020.
22. J. Lee, S. Kim, and G. Kim, "Preparation of gas standards for quality assurance of hydrogen fuel", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 47, No. 55, 2022, pp. 23471-23481, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.141.