

무인기용 연료전지 시스템 안전 기준 도출을 위한 기울기 안전 성능 평가

최재욱 · 임종우 · 최성준 · 이정운[†]

한국가스안전공사 가스안전연구원

The Tilt Effect on Electrochemical Performances and Safety Parameter of a Fuel Cell System Applied to Unmanned Aerial Vehicles

JAE-UK CHOI, JONG-WOO LIM, SUNG-JOON CHOI, JUNG-WOON LEE[†]

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation, 1390 Wonjung-ro, Maengdong-myeon, Eumseong 27738, Korea

[†]Corresponding author :
ljw@kgs.or.kr

Received 11 September, 2020
Revised 28 April, 2021
Accepted 28 April, 2021

Abstract >> Unmanned aerial vehicles (UAVs) employing hydrogen fuel cells as power sources have been studied in a wide range of applications. The safety standards for the hydrogen fuel cells have not been established yet. For this, it is necessary to identify the failures and performance degradations that may occur during a unit cell evaluation according to the UAVs' operation conditions. In this study, the change of electrochemical performances and safety parameters such as sealing and pressure differential characteristics were investigated depending on the tile angles of the unit cell.

Key words : Fuel cell(연료전지), Unmanned aerial vehicle(무인기), Safety standard (안전 기준), Tilt(기울기), Performance test(성능 평가)

1. 서론

수소경제 활성화에 따라 수소활용처 다변화 시장인 수소연료전지를 적용한 무인기에 대한 세계적 관심이 높아지고 있다. 운송, 군사용, 농업, 스포츠 등 다양한 분야에서 활용할 수 있으며, 산불 진화 및 구조 등 위험성이 따르는 작업에 사용할 수 있기 때문이다. 또한, 기존 배터리용 무인기의 에너지밀도가 약 200 Wh/kg으로 항속 시간이 60-90분에 그치는 반면, 연료전지의 에너지밀도는 배터리보다 약 5배에서 7배 높아 항속 시간 약 3-5배 정도 길고 충전 시

간이 짧아 더 넓은 범위의 산업에 경제적, 효율적으로 활용할 수 있다는 장점이 있다^{1,2)}. 이러한 장점 덕분에, 해외 B사, I사와 국내 D사, G사에서는 상용화된 연료전지용 무인기 제품의 생산, 판매가 이루어지고 있다.

현재 항공안전법에 의해 무인기 기체에 대한 안전 기준은 제정되었으나, 무인기용 연료전지 시스템에 대한 국제전기기술위원회(IEC), 영국표준규격(BS), 한국공업표준규격(KS), 가스안전 기술기준(KGS) 등 국내·외 공인된 안전 기준이 아직 마련되지 않은 상황이다. 무인기의 운전 특성 및 외부환경요인에 따

라 연료전지 시스템이 과압, 연료공급차단, 누설 등이 발생하면 추락할 수 있고, 무인기 중량과 체공 고도를 고려하면 추락 시 안전사고가 발생할 수 있기 때문에 무인기용 연료전지 시스템 안전 기준 제정이 요구된다.

KS C IEC 62282-4-101³⁾, KS C IEC 62282-5-100⁴⁾ 등 현행 지게차용 및 휴대용 연료전지 시스템의 안전 기준을 분석해보면, 연료전지 시스템의 평가항목이 연료용기 고정시험, 진동시험, 온도시험, 충격시험 등 다양하게 명시되어 있다. 하지만 무인기용 연료전지 시스템에 적용하기 어려운 항목이 있고, 무인기의 운전 특성을 고려한 성능 평가 및 안전 기준 개발이 필요한 실정이다. 연료전지 시스템이 지게차, 선박, 무인기, 열차 등 활용처에 따라 평가기준 및 시험방법이 상이하기 때문에 안전 기준 개발을 위해 무인기의 운전 특성을 반영한 안전 기준 개발 연구가 요구된다.

무인기의 운전 특성을 반영한 연료전지 시스템 성능 평가 연구 논문 및 보고서는 여러 편 발행되어 있다. Sisco와 Robinson⁵⁾의 연구에서는 proton-exchange membrane fuel cell (PEMFC)을 적용한 드론의 고압용기, 연료충전 등의 안전이슈(safety planning approach)를 도출 및 실증하였다. 또한, 연료전지 시스템 안전 기준 및 failure mode and analysis, hazard and operability 방법을 활용해서 시스템을 내부, 외부 등으로 구조적으로 분할하여 위험요소를 분석하였다. 그리고 연료전지 시스템 안전 기준을 적용하여 헥사로터(hexarotor)로 실증테스트를 수행하였다. H₂ Safety Panel 보고서(2019)⁶⁾에서는 무인기용 연료전지 시스템의 고압가스 안전 이슈와 수소용기 안전요구사항 등을 분석하고 전문가의 인터뷰를 통해 안전 기준을 도출하였다.

하지만 무인기의 운전 특성상 외부환경에 의해 기울임이 자주 발생함에도, 기울기 관련 연료전지 시스템의 안전 관리 방법을 제시하고 있는 논문 및 보고서는 찾기 어렵다. 연료전지가 기울어지면, 공기공급 채널에 물 배출 관련 문제가 생겨 성능저하 및 연료공급 차단 문제 등이 발생할 수 있는데, 이런 현상은

무인기의 안전 문제를 야기할 수 있다⁷⁾. 따라서 무인기 운전 특성을 반영하여 도출한 안전 기준의 기울기 성능 평가 시험을 수행하여 연료전지 시스템의 발생 가능한 고장과 성능 저하를 식별해야 한다.

무인기의 운전 특성을 반영하지 않고, 연료전지의 기울임에 따른 연료전지 특성을 분석한 선행 연구는 있다. Kim⁷⁾의 연구에서는 무인잠수정의 운용에 필요한 1 kW 급 PEMFC 시스템 부하 조건별 성능 시험 중 스택 기울기에 따른 성능 특성 시험을 진행하였다. 시험 결과 수평 조건에서의 운전보다 기울임 조건에서의 운전 조건일 때의 퍼징 전 전압강하가 더 크게 발생하며, 단위전지의 전압 차이도 다소 커지게 나타남을 확인하였다. 또한 장기 운전 시 성능 저하가 더 크게 발생할 수 있다고 명시하였다. Wan 등⁸⁾, Das 등⁹⁾ 연구팀에서는 연료전지의 유로 내 발생한 물방울(droplet)에 연료전지 기체 확산층(gas diffusion layer, GDL)에서의 기울임에 따른 물방울의 접촉력을 분석하였다. 그 결과, 유로 내 물방울 제거 능력은 전지의 기울임 각도가 증가할수록 향상되며 수직일 때 최대라는 결론을 도출하였다. 하지만 이 연구들은 무인기와 다른 무인잠수정의 운전 특성에 맞춰 기울기 성능시험을 진행하였으며, GDL에서의 물 배출 특성만을 분석한 것이기 때문에 무인기 운전 특성에 따른 연료전지의 성능 변화를 알 수 없다. 또한, 일정 기울기에서 실험을 진행하였기 때문에 외부환경에 따른 가변적인 무인기의 기울기 특성을 반영하였다고 보기 어렵다.

본 연구에서는 무인기의 운전 특성에 따른 연료전지 기울기 성능 평가를 수행하여 발생 가능한 고장과 성능 저하를 식별하고자 한다. 이를 위해 문헌 분석을 통해 무인기의 일반적인 운전 특성을 분석하고, 이에 부합하는 실험 방법을 도출하였다. 또한, 전기 화학적 성능 평가 이외에 기계적 안정성 평가를 진행하였다.

2. 실험

무인기용 연료전지 시스템은 운전 중 다양한 환경

에 노출되며 수시로 기울어질 수 있다. 따라서 연료 전지 시스템이 기울어질 경우 발생 가능한 고장과

성능 저하를 식별하기 위해 연료전지 단위전지 기울임 시험을 수행하였다. 기울임 시험 후, 기밀, 차압 시험을 수행하여 물리적, 기계적 안전성 평가를 진행 하였다.

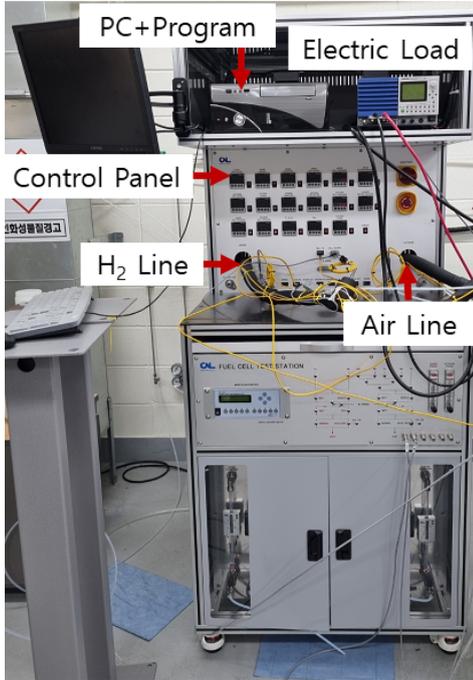


Fig. 1. Fuel cell test station used in this study

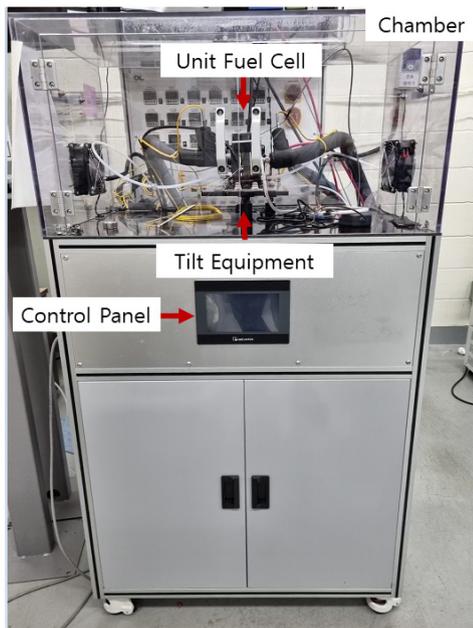


Fig. 2. Tilting equipment used in this study

2.1 실험 장치

연료전지 단위전지의 기울기에 따른 전기화학적 성능 평가는 CNL사에서 제작한 fuel cell station 및 기울기 평가장치를 활용하였다. 연료전지는 C사의 PEMFC를 사용하였다. 각 실험 장치 및 단위전지는 Figs. 1-3에 명시하였다.

2.2 실험 조건

무인기의 정상운전 상태에서 외부환경에 따라 기울어지는 각도 범위를 산출하기 위해, 멀티콥터형 무인항공기의 균형 분석(trim analysis)과 궤도제어(trajec-tory control)를 연구한 논문인 Dawkins와 De Vries¹⁰⁾의 연구를 분석하였다. 이 논문의 연구 내용을 바탕으로 무인항공기가 정상적으로 운전될 수 있는 받음각(angle of attack) 범위를 산출하였고, 이를 기울임 구간으로 설정하였다. 기울기 방향은 외부 환경 변화에 따라 가동 중 다양한 방향으로 기울어짐을 고려하여



- Gasket : teflon fabric
- GDL : SGL 39BC
- Size : 5 cm*5 cm (25 cm²)
- Channel : 4 channels
- Current collector : Plate type
- Relative humidity : An 100%/ Ca 100%
- Output range : 0.5-0.6 V
- OCV : 0.92 V
- Operating temperature : 70°C

Fig. 3. PEMFC unit cell and its specification

Table 1. Operating condition of tilting test

Parameter	X-axis	Y-axis	Z-axis
Time (min)	20	20	20
Velocity (m/min)	6		
Tilting angle (°)	-18 to 18		

X, Y, Z축 3방향으로 수행하였고, 기울기 변화 속도는 평가장치에서 모사 가능한 최고 속도로 설정하였다. 또한 실험 시간은 상용화된 무인기 제품의 체공 시간을 고려하여 90분으로 설정하였다. Table 1에 시험 조건에 대해 명시하였다.

안전 기준 도출을 위해 기울임이 연료전지에 미치는 영향을 여러 방향으로 분석해야 한다. 이에 가스 누설, 물리적 파손 여부 등을 평가하기 위해 기밀 시험을 진행하였다. 기밀 시험 압력은 제조사가 명시한 정상압력의 1.1배로 설정하였으며, 30분 동안 유지하여 압력강하가 있는지와 배관 이음부 누설 여부를 발포액으로 확인하였다. 또한 음극과 양극의 20 Kpa 압력 차이를 설정하여 10분 동안 분리막 파손 여부 및 크로스오버(cross-over)가 있는지 여부를 확인하였다.

2.3 실험 방법

순산소 조건에서 연료전지 단위전지 polarization curve 성능시험과 정격운전을 진행하였으며, 운전조건은 Table 2에 명시하였다.

외부 영향을 받지 않은 단위전지에 대해 polarization curve 성능과 정격부하 1시간 운전을 수행하였고, 기울임을 인가하면서 성능측정을 반복하여, 기울임 전후 데이터를 비교 분석하였다. 실험 순서는 Fig. 4, 실험 과정은 Fig. 5에 명시하였다.

Table 2. Operating condition for polarization curve and rated operating condition

Parameter	Value
Stoichiometry of hydrogen gas	1.5
Stoichiometry of oxygen gas	2
Relative humidity of hydrogen gas (%)	100
Relative humidity of oxygen gas (%)	100
Cell temperature (°C)	70
Maximum current density (mA/cm ²) ^a	3,000
Rated operating current (A) ^b	55

^aOperating condition of polarization curve

^bRated operating condition

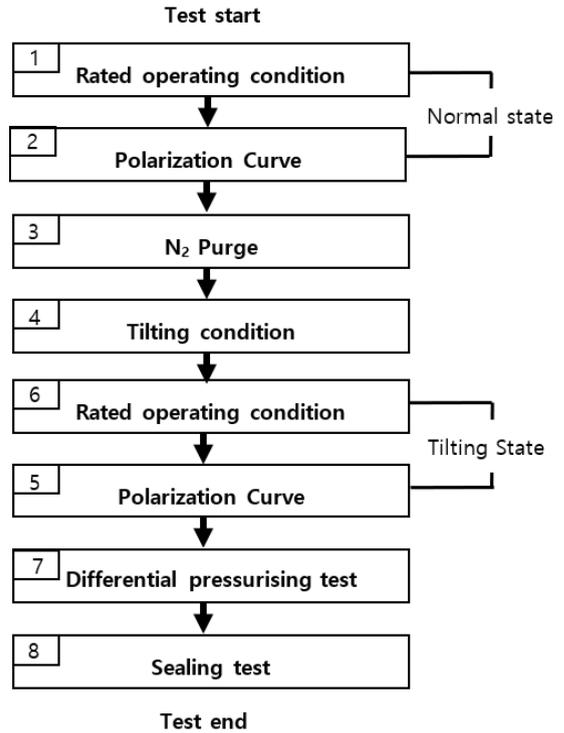


Fig. 4. Procedure of performance tests

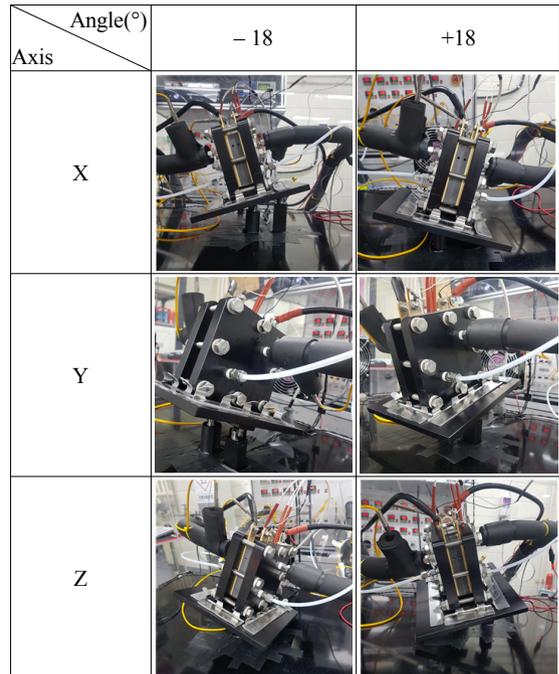


Fig. 5. Experiment scene of tilting test

3. 실험 결과 및 분석

3.1 기울임 시험 후 전기화학적 성능 변화

시험 결과, 1시간 동안 X, Y, Z축에 대한 불규칙기울임 안전 성능 테스트 후 인가 부하 0-3,000 mA/cm²의 범위에서 Fig. 6에 보여주는 것과 같이, 큰 성능 변화는 관찰되지 않았다.

하지만, 이와 유사한 기울임 실험을 다룬 논문인 Wan 등⁸⁾ 연구팀의 실험 결과를 참고하였을 때, GDL 채널 내 맺힌 물방울이 제거되면서 생긴 결과로 연료전지의 성능이 변할 수 있다는 것을 알 수 있다. 해당 논문에서는 스택의 기울기를 0-90°까지 기울이며 물방울 크기에 따른 스택에 대한 영향을 평가하였다. 그리고 기울기가 커질수록 더 작은 반경(radius)의 물방울까지 제거될 수 있다는 결과를 도출하였다. 이 결과를 근거로 단위전지의 기울기는 스택의 유로 채

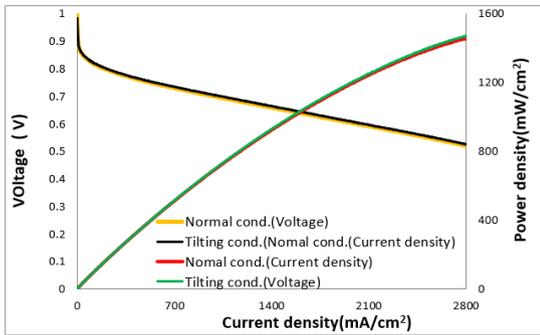


Fig. 6. Test result of tilting test

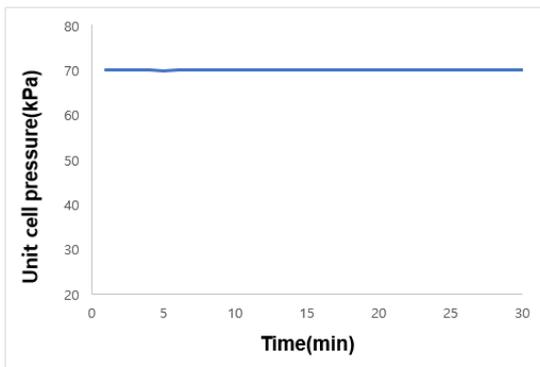


Fig. 7. Test result of sealing test

널 내 물방울 제거 효과가 있다고 판단하였으며, 채널 내 물방울의 제거 유무에 따라 성능 변화가 발생할 수 있다고 판단하였다.

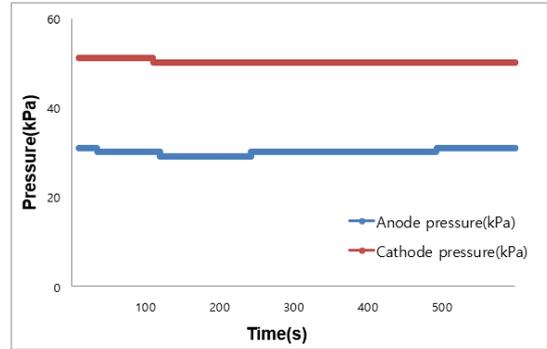


Fig. 8. Test result of differential pressurising test (Anode 30 kPa, Cathode 50 kPa)

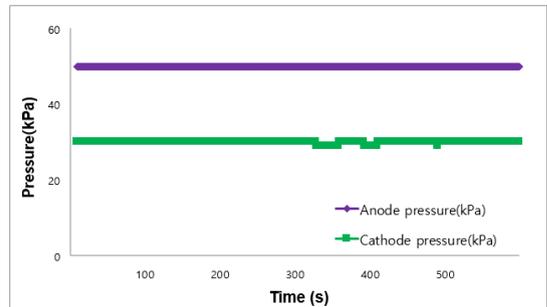


Fig. 9. Test result of differential pressurising test (Anode 50 kPa, Cathode 30 kPa)

Table 3. Method of tilting test

Operating condition	Fuel cell test condition (polarization curve, Rated operation)	Collaboration with the unmanned aerial vehicle manufacturer
	Direction	X, Y, Z-axis
	Time (min)	20 min/axis
	Velocity (m/min)	6
	Tilting angle (°)	-18 to 18
Test procedure	Fig. 4. Procedure of performance tests	
Requirement of safety	<ul style="list-style-type: none"> • There shall be no leakage • The fuel cell power system shall not be adversely affected by tilt condition. • Parts shall not show signs of rupture, fracture, deformation or other physical damage 	

3.2 기율임 시험 후 기밀, 차압성능 변화

기밀 시험 결과, Fig. 7에서 보여주는 것과 같이 30분 간 70 kPa에서 압력 변화가 거의 없었으며, 실링재 손상, 체결 풀림 등의 기계적 파손이 발생하지 않았다는 것을 알 수 있다.

차압 시험 결과, Figs. 8, 9에서 보여주는 것과 같이 10분간 20 kPa 차압 변화가 거의 없었다는 것을 알 수 있으며, 분리막의 파손 및 수소, 산소 크로스 오버가 발생하지 않았다는 것을 알 수 있다. 실험 도중에 압력이 변화되는 구간이 관찰되나, 다시 원래 압력으로 돌아오는 것을 보아 압력계의 계측오차로 판단하였다.

4. 결론

본 논문에서는 무인기용 연료전지 시스템 운용 중 시스템이 기율여졌을 경우의 성능 특성과 고장 및 위험요소를 분석하기 위해 고분자 전해질 연료전지 단위전지 기율임 시험 장치를 제작하여 시험을 수행하였다. 연료전지 시스템이 공중에서 비행하는 무인기에 장착되기 때문에 시험 장치는 다음과 같은 특성을 만족하도록 설계 및 제작하였다.

- 멀티콥터의 받음각범위 -18° to 18° 의 기율임 가능
- 임의의 기율임 방향 및 각도 적용 가능
- 기율임 속도 조절 가능

순수 산소를 이용한 무인기용 연료전지 단위전지 기율임 시험 결과, 1시간 동안 20분씩 X, Y, Z 각 3축으로 기율임을 인가하였을 때, $0\text{-}3,000\text{ mA/cm}^2$ 의 범위에서 단위전지의 큰 성능 변화는 관찰되지 않았다.

단위전지가 아닌 kW 급으로 여러 개의 전지가 집적될 경우 기율기에 따라 물배출 성능이 악화되어 연료공급이 일시적으로 차단되거나 성능 하락이 발생할 가능성이 있다^{7,11)}. 이는 단위전지에 비해 연료전지 시스템은 물 배출량이 급격하게 증가하여, GDL 채널 내 물방울이 맺히는 것이 아닌 플러딩(flooding)이 발생하여 유로를 막을 수도 있기 때문이다. 또한,

연료전지 운전 시 단위전지 규모에서의 기율임은 성능향상에 도움이 될 수 있으나, 이동형 연료전지 발전시스템으로 확장한다면 부수적으로 고려해야 할 사항이 발생한다. 이를테면, 장시간 사용으로 연료탱크 내 가스 잔량이 적을 경우 압력이 크게 감소하여 시스템이 기율어짐에 따라 연료공급의 불균형이 발생할 수 있다. 또한, 시스템이 전체적으로 기율면서 한쪽으로 응력이 쏠려 내부 고정 장치 등의 체결 요소가 풀리게 될 경우 심각한 물리적 파손이 발생할 수 있다. 위와 같은 위험요소를 고려하기 위해서는 무인기용 이동형 연료전지 시스템의 안전 기준에 기율임 시험은 필요하며, Table 3과 같이 기율기 시험 방법을 도출하였다.

후 기

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20173010032210).

References

1. J. H. Shim, S. M. Kwon, J. C. Kim, S. W. Kang, and T. G. Kim, "Development of hydrogen generator for 1kW PEM fuel cell systems of high-altitude unmanned aerial vehicles", Proceeding of the 2015 KSAS Fall Conference, 2015, pp. 308-310. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE06768682>.
2. T. G. Kim, J. H. Sim, and J. C. Kim, "Development of chemical hydride-based 200W fuel cell system for electric UAVs". 2013 KSPE Fall Conference, 2013, pp.687-690. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE02457613>.
3. "Fuel cell technologies - part 4-101: fuel cell power systems for propulsion other than road vehicles and auxiliary power units (APU) - safety of electrically powered industrial trucks", IEC 62282-4-101, 2014. Retrieved from <https://www.sis.se/en/produkter/energy-and-heat-transfer-engineering/fuel-cells/iec6228241012014/>.
4. "Fuel cell technologies - part 5-100: portable fuel cell power systems - safety", IEC 62282-5-100, 2018. Retrieved from <https://webstore.iec.ch/publication/32485>.
5. J. C. Sisco and P. Robinson, "Fuel cell powered UAS: hydro-

- gen safety, handling, and field experience”, 2019.
6. “Safety of mobile hydrogen and fuel cell technology applications: an investigation of by the hydrogen safety panel (HSP)”, Hydrogen Safety Panel Report, 2019. Retrieved from https://h2tools.org/sites/default/files/Safety_of_Mobile_Hydrogen_and_Fuel_Cell_Technology_Applications-Oct_2019.pdf.
 7. H. D. Kim, “Concept research of fuel cell system for the UUV”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 6, 2014, pp. 751-760, doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.6.751>.
 8. Z. M. Wan, J. H. Wan, J. Liu, X. Chen, and K. L. Su, “Investigation in the effect of gravity on the droplet removal in the flow channel of PEMFC”, Advanced Materials Research, Vol. 314-316, 2011, pp. 1487-1491, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.314-316.1487>.
 9. P.K. Das, A. Grippin, A. Kwong, and A. Z. Weber, “Liquid-water-droplet adhesion-force measurements on fresh and aged fuel-cell gas-diffusion layers”, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 159, No. 5, 2012, pp. B489. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.052205jes>.
 10. J. Dawkins and L. De Vries. “Modeling, trim analysis, and trajectory control of a micro-quadrotor with wings”, Drones, Vol. 2, No. 2, 2018, pp. 21, doi: <https://doi.org/10.3390/drones2020021>.
 11. I. S. Han, J. Jeong, B. K. Kho, C. H. Choi, S. Yu, and H. K. Shin, “Development of a 25kW-class PEM fuel cell system for the propulsion of a leisure boat”, Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 25, No. 3, 2014, pp. 271-279, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.3.271>.