Journal of KIIT. Vol. 20, No. 12, pp. 7-14, Dec. 31, 2022. pISSN 1598-8619, eISSN 2093-7571 7
http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.12.07

수소 제거 촉매의 잠수함 수소제거기 적용 가능성 연구

김영희*[1], 이인식*[2], 장두훈**[1], 서필원**[2], 최재욱***

Study of the Applicability of Hydrogen Removal Catalyst to Submarine Hydrogen Removal Equipment

Young Hee Kim*[1], In Sik Lee*[2], Du Hun Jang**[1], Phil Won Seo**[2], and Jae Wook Choi***

본 연구는 ㈜세라컴 기술연구소 지원으로 수행하였음

요 약

우리나라는 1983년 돌고래 잠수함(SSM-051)을 시작으로 에너지원이 디젤엔진과 배터리인 디젤잠수함을 사용하고 있으며, 디젤잠수함은 디젤발전기를 통해 발생하는 전기를 활용하여 축전지를 충전하고 충전된 전기로 추진용 프로펠러와 연결된 전기모터를 구동하는 방식이다. 여기서 사용되는 충전전지는 납축전지를 사용하며, 납축전지는 충전 중 화학반응으로 전해질 전기분해에 의해 수소가 발생하게 된다. 2019년 관광잠수함에서 폭발사고가 발생하여 3명의 직원이 부상을 당하는 사고가 발생하였는데 그 원인이 수소가스 누출로 인한 폭발사고로 확인되었다. 본 연구는 디젤엔진과 배터리를 에너지원으로 사용하는 관광잠수함 또는 군용잠수함의 운영 시 발생하는 수소가스의 폭발 하한치를 만족할 수 있도록 수소 제거 촉매의 적용 가능성을 확인해 보고자 한다.

Abstract

In Korea, starting with the ship Dolphin(SSM-051) in 1983, energy sources are diesel engines and diesel submarines, which are batteries. A diesel submarine uses electricity generated from a diesel generator to charge a storage battery and uses the charged electricity to drive an electric motor connected to a propeller for propulsion.. The rechargeable battery used here uses a lead-acid battery, and the lead-acid battery generates hydrogen by electrolysis of an electrolyte through a chemical reaction during charging. In 2019, an explosion occurred on a tourist submarine, injuring three employees, and it was confirmed that the cause was an explosion caused by a hydrogen gas leak. The purpose of this study is to confirm the applicability of the hydrogen removal catalyst to satisfy the lower limit of the explosion of hydrogen gas generated during the operation of a tourist submarine or a military submarine that uses a diesel engine and battery as an energy source.

Keywords
submarine, hydrogen gas explosion, catalyst, hydrogen gas removal

* 부경대학교 소방공학과 박사과정
- ORCID[1] : https://orcid.org/0000-0002-6768-0130
- ORCID[2] : https://orcid.org/0000-0002-2888-8991
** ㈜세라컴 기술연구소
- ORCID[1]: https://orcid.org/0000-0001-8879-3452
- ORCID[2]: https://orcid.org/0000-0002-2262-9577
*** 부경대학교 소방공학과 교수(교신저자)
- ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6417-3793

· Received: Sep. 27, 2022, Revised: Oct. 13, 2022, Accepted: Oct. 16, 2022
· Corresponding Author : Jae-Wook Choi
Room 411, Narae Gwan, Daeyeon Campus, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan of Korea
Tel.: +82-51-629-6470, Email: jwchoi@pknu.ac.kr

Ⅰ. 서 론

핵연료를 에너지로 사용하는 핵잠수함은 그림 1과 같이 디젤엔진과 배터리를 에너지원으로 추진되는 잠수함에 비해 지속적인 고속 주행이 가능하고, 7~30년 주기로 핵연료만 교체하면 원자로 작동에 있어 외부의 기체가 필요하지 않아 많은 나라에서 도입하길 기대하고 있다. 그러나 핵잠수함은 국제조약 및 협약에 의한 제한으로, 전 세계에서 핵추진잠수함을 보유한 국가는 미국·영국·러시아·프랑스·중국·인도 6개국에 지나지 않는다[1].

표 1. 핵잠수함과 디젤잠수함 비교
Table 1. Comparison of nuclear submarines and diesel submarines

	Diesel submarine	Nuclear submarine
Fuel	Accumulator	Nuclear Power
Engine size	Hull 50%	Hull 30%
Speed	11～12 km	37～47 km
Max dive duration	3 weeks	6 months

우리나라는 1983년 4월 2일 돌고래 잠수함(SSM-051)을 시작으로 에너지원이 디젤엔진과 배터리인 디젤잠수함을 사용하고 있는데, 디젤잠수함은 디젤발전기를 통해 발생하는 전기를 활용하여 축전지를 충전하고 충전된 전기로 추진용 프로펠러와 연결된 전기모터를 구동하는 방식이다[2]-[4].

그림 1와 같이 잠수함의 단면도를 보면, 축전지는 잠수함의 바닥면인 하부에 설치되어 있고 구동해 주는 디젤엔진과 연결되어 있다.

여기서 사용되는 충전전지는 납축전지를 사용하며, 납축전지는 충전 중 화학반응으로 전해질 전기분해에 의해 수소가 발생하게 된다.

수소는 모든 원소 중에서 가장 간단한 구조로 일반적인 자연 상태에서는 거의가 화합물로 존재하고 반응성이 높은 물질로, 공기 중에 누출되면 폭발성 혼합가스를 형성하고 점화원이 존재하면 폭발 ·화재를 일으켜 주변에 대규모의 피해를 수반하게 된다[5][6].

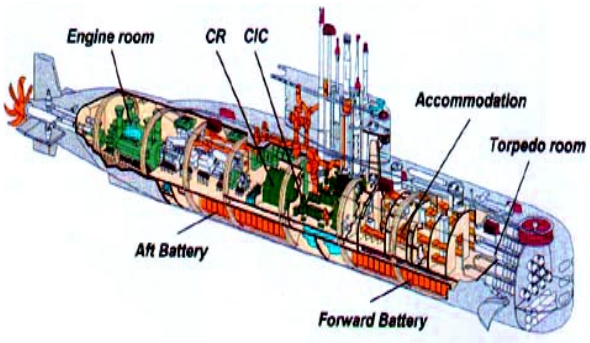


그림 1. 209급 잠수함 단면도[7]
Fig. 1. (class 209)Submarine cross-section[7]

2019년 6월 26일 정박 중이던 관광잠수함에서 폭발사고가 발생하여 3명의 직원이 부상을 당하는 사고가 발생하였는데 그 원인이 수소가스 누출로 인한 폭발사고로 확인되었다[8].

본 연구는 디젤엔진과 배터리를 에너지원으로 사용하는 관광잠수함 또는 군용잠수함의 운영 시 발생하는 수소가스의 폭발 하한치를 만족할 수 있도록 수소 제거 촉매의 적용 가능성을 확인해 보고자 한다.

Ⅱ. 수소 제거 촉매의 잠수함 수소제거기 적용

잠수함에서 생성되는 수소는 평상시 운행조건과 다른 경우를 고려해야 한다. 특수 목적을 가지고 급격히 출동하여 군사 작전을 수행하는 경우가 이에 해당되는데 이런 경우, 배터리로부터 전력을 많이 생산해야 하며 평상시보다 수소 발생량이 많이 생성된다.

본 실험을 통해 잠수함에 적용할 수 있는 수소 촉매제 최적의 형태와 구조를 적용할 수 있으며, 배터리를 많이 사용하거나 적게 사용하거나 수소의 폭발 하한치를 유지 할 수 있는지 확인해 볼 것이다.

또한 상용 촉매와의 비교를 통해 함내의 수소를 기존보다 낮은 농도에서 제어 할 수 있는지도 알 수 있다.

수소가 원활하게 제거되기 위한 최소 농도가 얼마인지도 실험을 통해 알아보고자 한다.

III. 실 험

3.1 시험 장치 및 방법

그림 2은 본 연구에 사용한 자연대류 시험장치로 내부 부피가 12.5m^{3}인 탄소강 압력 용기(높이 3.3m, 지름 2.2m의 원통형)로 이루어졌다.

압력, 온도, 습도, 수소 농도 및 화학약품, 물 분사 등 다양한 조건에서 성능 테스트를 수행하도록 구성되었고, 용기 내부에는 믹싱 팬, 스프레이 노즐 및 전기 히터가 설치되어 있다.

그림 2. 자연대류 시험장치
Fig. 2. Natural convection test equipment

본 연구에서는 자연대류 시험장치 상단에 수소제거 촉매를 설치하고, 외부에서 수소를 일정한 속도로 주입하면서 장치 내부의 수소농도를 조절하였다. 수소를 주입하는 동안에는 장치 내부의 수소농도를 균일하게 하기 위하여 상부의 믹싱 팬을 구동하였다. 수소는 장치 내부의 가스를 펌프를 이용하여 외부로 뽑아내어 수소분석기를 이용하여 분석하였다. 시험에 사용한 각종 계측기 및 부속품 제원을 표 2에 나타내었다.

3.2 수소제거 촉매

수소를 제거하는 핵심기술은 수소산화에 직접적으로 참여하는 촉매이다.

표 2. 자연대류 시험장치 부속품 제원
Table 2. Specifications of accessories for natural convection test equipment

No.	Equipment name	Equipment specifications	Manufacturer	Purpose of use
1	Thermocouple	-200~1370℃	B&C Tech	Catalyst top temperature
2	Thermocouple	-200~1370℃	B&C Tech	Catalyst inlet temperature
3	Pressure transducer	0~5bar(g)	Sensys	Pressure measurement
4	Temperature·humidity converter	0~100%	ROTRONIC	Relative humidity measurement
5	Hydrogen analyzer	0.0 ~ 10 vol.%	FUJI	Hydrogen concentration measurement
6		0.0 ~ 10 vol.%	FUJI	Hydrogen concentration measurement
7	Data recorder	12CH	H. Y. nux	Data record
8	Flexible pressure gauge	-0.1~1MPa	KINS	Pressure measurement

이러한 촉매는 활성물질 및 활성물질의 고른 분산, 넓은 표면적 제공을 위한 촉매 지지체, 또한 촉매의 형태 및 구조를 결정하는 촉매의 외형이라고 할 수 있다.

그림 3은 실험에 적용된 수소촉매의 외형이다. 일반적으로 산화촉매에서 가장 우수한 활성을 나타내는 물질은 Pt, Pd, Rh 등의 VIIIB족의 전이금속 원소들이며, 주로 금속 촉매의 활성물질로 사용된다.

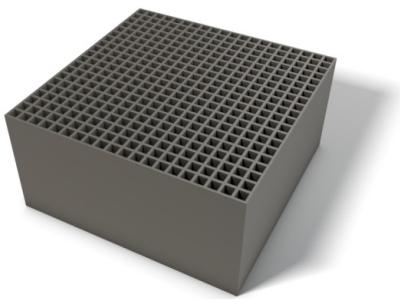


그림 3. 35 cell 수소촉매
Fig. 3. 35 cell hydrogen catalyst

Rh의 경우에는 다른 귀금속에 비해 고가이며, Pd의 경우에는 Pt에 비해 내구성이 약한 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 활성물질로 Pt를 사용하여 촉매를 제조하였다.

촉매를 통해 수소가 제거되는 메커니즘은 그림 4와 같다.

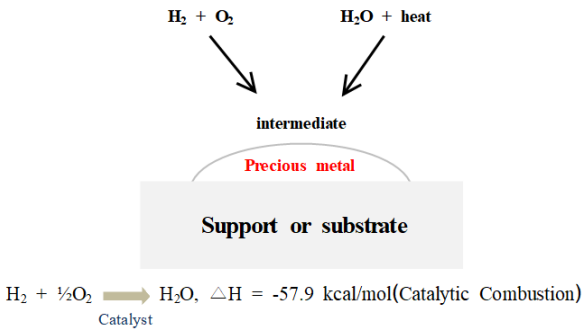


그림 4. 촉매상에서의 수소제거 메커니즘
Fig. 4. Mechanism of dehydrogenation on catalyst

IV. 실험 결과 및 고찰

4.1 수소제거촉매제의 셀수 선정

촉매의 활성에 영향을 미치는 인자 중 물리적 특성은 비표면적, 불순물 함량, 입자크기, 공극크기 분포 그리고 밀도 등으로 알려져 있다. 비표면적은 촉매 반응이 표면반응인 관계로 중요한 인자로 다루어져 왔다.

일반적으로 산업 및 환경 촉매로 많이 사용되어지는 촉매 구조체는 모노리스 타입의 하니컴(Honeycomb) 형태로 사용 되어진다. 하니컴형 촉매는 설치가 용이하며 셀수(CPSI, Cell Per Square Inch)의 조절에 따라 압력손실과 비표면적을 자유롭게 변형할 수 있는 장점이 있다.

잠수함에 적용될 수소제거 촉매는 무동력으로 자연대류에 의해 수소를 제거해야할 필요가 있으며, 이에 따라 압력 손실이 크면 수소제거율이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 잠수함 수소제거용도로 사용되는 수소제거 촉매의 최적 셀수를 결정하기 위하여 하니컴 촉매의 셀수에 따른 성능 영향을 검토하였다.

아래 그림 5은 잠수함 내부에 수소제거기가 없는 경우에 20시간만에 잠수함 내부의 수소농도가 2%까지 상승하는 것을 가정하여 수소주입량을 결정하고, 이후 하니컴 100셀 및 35셀 촉매에 대하여 수소제거 반응을 실시한 결과를 나타내었다.

그림 5에서처럼 수소제거 촉매를 설치하지 않은 blank 시험(검은색 실선)에서 약 20시간 만에 장치 내부의 수소가 2%에 도달함을 확인할 수 있다. 동일한 조건에서 100셀 하니컴 촉매를 설치하여 장치 내부의 수소의 농도를 측정한 시험(녹색 실선)에서도 수소 농도 상승 패턴은 블랭크 시험과 유사하게 나타났다. 이는 100셀 하니컴 촉매에서는 수소를 거의 제거하지 못하고 있음을 의미한다. 한편, 35셀 하니컴 촉매를 적용한 시험(붉은색 실선)에서는 약 1.3% (수소 주입시간 12시간)까지 수소 농도가 상승하다가 수소농도가 약간 감소하였으며, 이후부터는 1.2% 수준을 유지 또는 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 수소가 계속 외부에서 유입되더라도, 수소제거 촉매가 수소를 제거하는 반응이 진행되고 있기 때문에 나타나는 결과라고 할 수 있다.

강연석[9] 등에 의하면, 수소제어용 하니컴 촉매에 있어서 20셀과 35셀에 대한 수소제거율에 대한 시험을 실시하였으며, 35셀의 반응성이 더 우수함을 보고하였다. 이는 자연대류가 아닌 강제대류 조건에서의 시험결과로서, 35셀에서 수소가 더 잘 제거되는 이유를 촉매의 비표면적 증대로 설명이 가능하다.

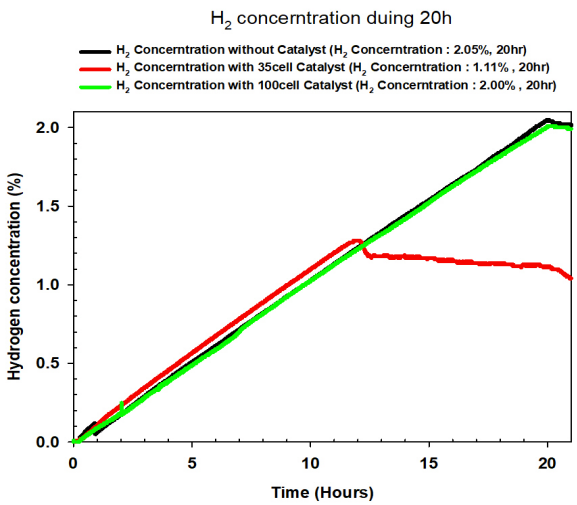


그림 5. 하니컴 셀수에 따른 수소제거 성능
Fig. 5. Hydrogen removal performance according to the number of honeycomb cells

본 연구에서는 100셀과 35셀 촉매를 비교시 35셀에서만 수소제거 반응이 진행되었으며, 이는 자연대류 특성상, 조밀한 100셀 채널로 유동이 형성되는 것보다, 넓은 35셀 채널로 유동이 보다 잘 형성되기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 수소 발생량 변화 조건에서의 시험

군사용 잠수함의 경우, 보안상 비밀스런 분야이기에 잠수함 운용 패턴이나 방식 등의 확인이 불가능하다. 다만, 핵잠수함을 제외하고 전세계에서 가장 널리 적용되는 디젤잠수함의 경우, 수중에서 축전지를 사용하여 각종 기계의 작동 및 잠수함의 추진력을 얻게 된다.

잠수함 운용에 따른 축전지 내부에서의 방전 반응은 다음과 같이 설명이 가능하다. 축전지 양극의 과산화납은 납 양이온과 산소 음이온으로 분리되어 납 양이온은 이동된 전자와 결합하고, 그 다음 황산 음이온과 결합하는 과정을 거쳐 황산납(PbSO4)으로 변환된다. 음극에서 납(Pb)으로부터 전자가 이동되었던 까닭으로 납 양이온이 만들어지고 이것이 전해액속 황산 음이온과 결합하여 황산납으로 바뀐다. 방전으로 인해 화학반응이 종료된 후에는 두 전극에는 황산납의 층이 형성되고, 황산(H2SO4)은 모두 분해되어 남은 수소이온과 양극에서 나온 산소이온의 결합물인 순수한 물만 남게 된다. 이는 이론적인 반응이며, 실제 황산납 배터리(축전지)에서는 충전 및 방전 과정에서 일정량의 수소가 지속적으로 생성되어 잠수함 내부로 확산된다[7].

본 연구에서는 군용 잠수함의 작전 상황에 따른 배터리 사용을 가정하여 3가지의 경우에서의 수소 제거 촉매의 적용 가능성을 평가하였다.

4.2.1 배터리를 많이 사용할 경우

잠수함이 작전 또는 특수 목적을 갖고 급격히 출동하여 운행하는 경우에 배터리로부터 전력을 많이 생산해야 한다. 이 경우에는 수소 또한 평상시보다 많이 생성될 수 있다. 그림 6에서는 잠수함 내부의 수소의 농도가 급격히 상승하는 경우를 가정하여 약 200분만에 수소 농도가 2%에 도달하는 상황을 가정하였다.

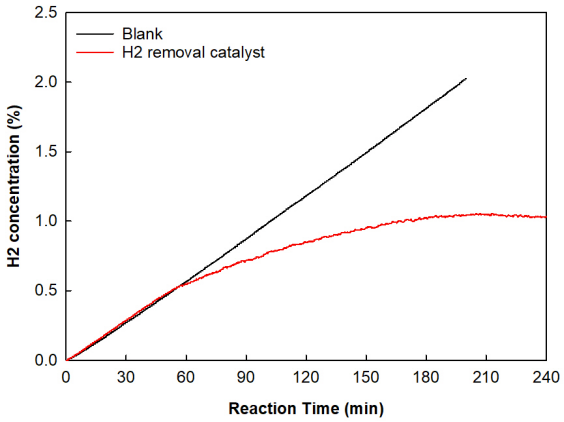


그림 6. Short time 수소 농도 변화치
Fig. 6. Short-time hydrogen concentration change

시험에 사용된 촉매는 앞절에서 결정된 35셀 하니컴 촉매를 사용하였으며, 자연대류 시험장치의 크기와 장보고 III 잠수함의 체적을 고려하여 촉매의 크기를 결정하였다. 시험 온도 및 압력은 평상시 승조원의 생활이 가능한 상온, 상압하에 실시하였다.

상기 그림에서처럼 촉매가 없는 조건에서는 200분만에 수소의 농도가 2%까지 상승함을 확인할 수 있다. 하지만 수소제거용 35셀 하니컴 촉매가 적용된 경우에는, 60분부터 시험 장치 내부의 수소 상승 속도가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 약 180분부터는 시험장치 내부의 수소 농도가 더 이상의 상승 없이 1%정도에서 수렴함을 확인할 수 있었다.

4.2.2 배터리를 적게 사용할 경우

잠수함이 평상시 운행 또는 정박해 있는 상황에서는 배터리로부터 전력을 적게 사용하게 된다. 이 경우에는 작전시보다 수소가 적게 생성될 수 있다. 그림 7에서는 잠수함 내부의 수소의 농도가 서서히 상승하는 경우를 가정하여, 약 95시간에 걸쳐 수소 농도가 2%에 도달하는 상황을 가정하였다.

시험 장치 내부의 수소농도는 95시간이 경과되었을 때 수소가 2%가 되도록 수소 주입량을 조절하였으며, 그림 8의 블랭크 시험 결과에서처럼 95시간이 경과하였을 때 수소 농도가 2%에 도달함을 확인할 수 있다. 동일 조건에서 수소 제거 촉매를 설치하여 수소를 주입한 결과, 약 10시간이 경과한 시점인 수소 0.4% 조건에서부터 수소 농도의 상승이 둔화됨을 확인할 수 있다. 약 20시간이 경과하자,

수소 농도는 더 이상 상승하지 않고 0.6~0.7% 수소 농도를 계속 유지하였다. 이때 10시간, 22시간, 33시간, 48시간 등에서 나타나는 수소 농도 피크는 분석기로 유입되는 수분을 제거하기 위하여 설치된 수분트랩의 물을 제거하는 작업 과정에서 수집된 데이터로서, 본 시험에서는 큰 의미는 없다.

결과적으로 수소가 천천히 발생하는 과정에서는는 시험 장비 내부의 수소가 0.7% 정도에서 유지됨을 확인하였으며, 이를 통해 잠수함의 평상시 운전 조건에서 발생하는 수소 역시, 수소 폭발 범위(4~75%)의 조건에 도달하지 않도록 수소제거 촉매가 원활히 작동됨을 확인하였다.

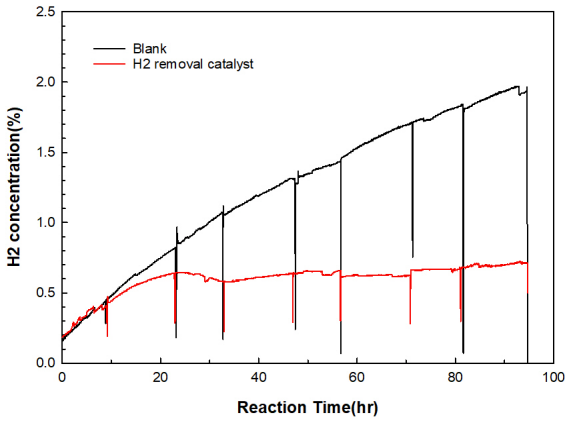


그림 7. Long time 수소 농도 변화치
Fig. 7. Long time hydrogen concentration change

4.2.3 상용 촉매와의 수소제거량 비교

앞선 실험을 통해 약 20시간이 지나면 수소량은 감소하고 95시간까지 0.7%를 넘어가지 않음을 확인하였다. 실제 잠수함에서는 황산-납 배터리의 수소 발생 문제를 해결하기 위하여 수소제거기가 장착되어 있다.

본 절에서는 실제 잠수함에 장착되어 있는 수소제거기 촉매의 일부를 입수하여, 본 연구에서 시험한 촉매와의 수소 제거 시험 상대 비교를 통해, 적용 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 시험은 앞선 시험과 동일하게 자연대류 시험장치와 잠수함의 크기를 고려하여 촉매의 사이즈를 동일 비율로 축소하여 수행하였다. 또한, 수소 주입량은 잠수함내에 설치된 상용 수소제거기에 의해 지속적으로 수소가 제거되며, 이때 수소 농도는 약 1.4% 정도라고 가정하여 설정하였다.

그림 8에 실제 수소제거기 촉매와 본 연구에서 사용한 수소제거 촉매의 시험결과를 나타내었다. 그림에서처럼 상용 촉매의 경우, 약 250분 시점에 수소 농도 1.5% 정도로 가장 높은 수소 값을 보이며, 이후 점차적으로 농도가 감소하다가, 약 1200분부터 수소 농도가 1.3% 정도로 안정화됨을 확인할 수 있다. 이에 비해 본 연구에서 사용한 수소제거 촉매의 경우, 약 120분까지 수소농도가 증가하다가 이후 반응이 언정화되어, 약 1% 전후에서 수소농도가 유지됨을 확인할 수 있다.

이러한 결과를 통해 본 연구에서 사용한 촉매가 상용촉매에 비해 보다 낮은 농도에서부터 수소를 제거하며, 잠수함에 설치되었을 경우 함내의 수소를 기존보다 낮은 농도에서 제어할 수 있음을 간접적으로 확인하였다.

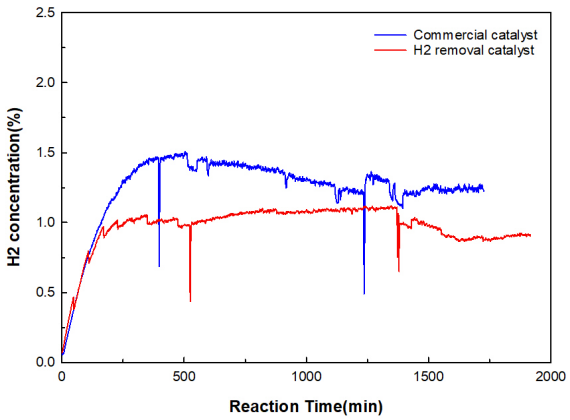


그림 8. Real time 수소 농도 변화치
Fig. 8. Real-time hydrogen concentration change

4.3 자연대류 조건에서의 최소 작동 수소 농도

수소제거 촉매는 그림 4의 메커니즘에 의해 수소를 제거할 수 있다. 촉매상에서 수소제거 반응이 시작되면 수소 1mol이 산소 0.5mol과 반응하여 물 1mol을 생성할 때 산화열이 발생하게 된다. 이때 산화열에 의해 생성된 물은 스팀 형태이며, 이로 인해 배출된 가스는 주변 공기와의 온도차이에 의해 대류가 형성되게 된다.

잠수함 수소제거기 촉매의 경우에도 동일한 수소 산화 메커니즘을 갖으며, 이에 따라 수소제거기 주

변으로 국부적인 대류가 형성되어 수소를 지속적으로 제거할 수 있다.

한편, 잠수함 내부의 다양한 승조원의 활동 및 이상상황에 의한 화재, 주방에서 불 사용을 통한 음식 조리 등을 감안한다면, 함내의 수소농도를 보다 낮은 농도로 제어할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 촉매에 대해 자연대류 반응에 의한 수소제거 반응이 원활하게 일어날 수 있는 조건을 확인하기 위하여 시험장치 내부의 수소농도를 변경하면서 자연대류 수소제거 시험을 실시하였다.

그림 9에 시험 장치 내부의 수소 농도를 변경하면서 4종류의 시험을 실시하여 나타내었다. 그림에서처럼 0.6% 조건에서는 수소를 제거하지 못함을 확인할 수 있다. 하지만 0.7% 조건에서는 약 500초부터 반응이 시작되어 0.5%까지 수소를 제거하였다. 수소 0.9% 조건 이상에서는 약 500초 이후부터 수소가 제거되기 시작하여 수소농도 0.5%까지 수소를 원활하게 제거함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 촉매는 잠수함과 같은 자연대류에 의한 수소제거 반응에서 0.7% 수소부터 수소를 원활하게 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

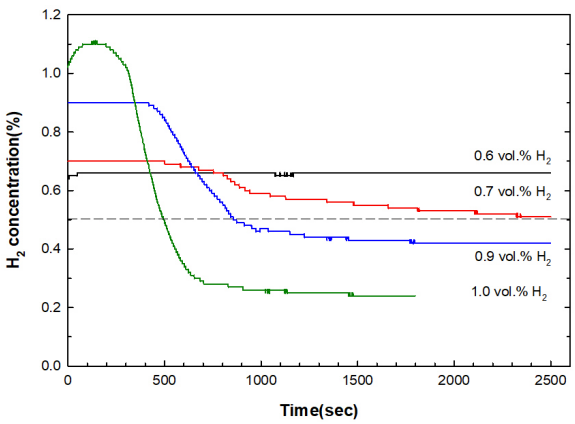


그림 9. 저농도 수소 조건에서의 자연대류 시험
Fig. 9. Natural convection test under low-concentration hydrogen conditions

V. 결 론

본 연구에서는 국내에서 사용되는 디젤 잠수함의 황산-납 배터리 충전/방전시 발생하는 수소를 제거하기 위한 수소제거 촉매의 반응특성에 대하여 검토 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 자연대류에 의한 수소제거 반응에서 하니컴형 촉매는 100셀보다 35셀 촉매의 수소제거 반응이 원활함을 확인하였다. 이는 본 반응이 촉매의 비표면적에 의한 제거율 상승보다는 하니컴 채널로 유입되는 가스의 마찰저항 감소에 따른 가스 유동 특성이 더 지배적일 수 있음을 의미한다.

2) 군사 작전 등에 의한 잠수함 기동 및 평상시 운전 조건 등을 모사하여 시험 장치 내부의 수소 주입량을 변경하여 시험을 실시하였으며, 모든 조건에서 수소제거 촉매의 반응으로 인해 수소농도 1% 이하로 수소를 제어할 수 있음을 확인하였다.

3) 상용 수소제거기 촉매와의 상대 비교 시험을 실시하였으며, 상용 촉매에 비해 본 연구에서 사용한 촉매가 보다 낮은 수소 농도에서 반응하여 수소농도를 더 낮게 유지함을 확인하였다.

4) 본 연구에서 사용한 촉매의 자연대류 조건에서의 최소 수소 농도는 약 0.7%정도이며, 반응이 시작되면 발생하는 수소를 지속적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.

References

[1] S. M. Shin, J. H. Park, Y. P. Yong, and K. W. Oh, "Propulsion System of R.O.K.N Warships & Future of Propulsion System", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 25, No. 6, pp. 53-59, Dec. 2021. https://doi.org/10.6108/KSPE.2021.25.6.053.

[2] E. H. Lee, T. W. Kim, S. G. Byun1, D. W. Seo1, H. J. Hwang, H. S. Kim, and S. K. Ryi1, "Hydrogen Purification from Methanol Reforming Gas for Submarine Fuel Cells Using a Pd-composite Membrane", Korea Institute of Energy Research, Clean Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 54-62, Mar. 2022. https://doi.org/10.7464/ksct.2022.28.1.54.

[3] A. Kirubakaran, S. Jain, and R. K. Nema, "A review on fuel cell technologies and power electronic interface", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. 9, pp. 2430-2440, Dec. 2009. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.04.004.

[4] M. G. Kim, J. T. Son, and T. W. Hong,

"Evaluation of TiN-Zr hydrogen permeation membrane by MLCA(Material Life Cycle Assessment)", The Korean Society of Clean Technology, Vol. 24, No. 1, pp. 9-14, Mar. 2018. https://doi.org/10.7464/ksct.2018.24.1.009.

[5] K. H. Oh and K. W. Rhie, "A Study on the Explosion Characteristics of Hydrogen", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 15, No. 3, pp. 228-234, Sep. 2004. https://doi.org/G704-001444.2004.15.3.004.

[6] J. Hord, "Is Hydrogen a safe fuel?", International Jounal of Hydrogen Energy, Vol. 3, No. 2, pp. 157-176, 1978. https://doi.org/10.1016/0360-3199(78)90016-2.

[7] Evidence of attracting the world to the 'secret businessman' of the deep sea, https://m.blog.naver.com/PostView.naver?isHttpsRedirect=true&blogId=thaitour&logNo=60204461815 [accessed: Oct. 09, 2022]

[8] Y. D. Choi, S. P. Kim, D. E. Lee, and S. K. Ko, "Study on the Risk of Hydrogen Explosion Accident for Tourism Submarine", Journal of Fire Investigation Society of Korea, Vol. 10, No. 3, pp. 59-72, Dec. 2019.

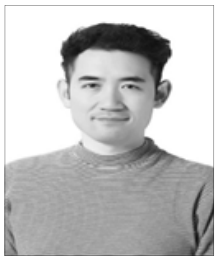
[9] Y. S. Kang, S. S. Kim, P. W. Seo, S. H. Lee, and S. C. Hong, "Hydrogen Recombination over Pt/TiO_2 Coated Ceramic Honeycomb Catalyst", Applied Chemistry for Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 648-652, Dec. 2011.

저자소개

김 영 희 (Young Hee Kim)

2013년 3월 : 부경대학교 안전공학과(공학석사)
2007년 7월 ~ 현재 : ㈜LG전자 안전보건팀 책임
2017년 2월 ~ 현재 :부경대학교 소방공학과 박사과정
관심분야 : 소방, 안전, 화재폭발

이 인 식 (In Sik Lee)

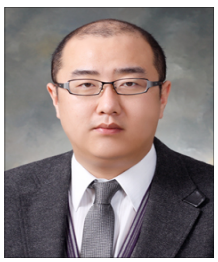


2005년 3월 : 부경대학교 안전공학과(공학석사)
2018년 4월 ~ 2022년 2월 : ㈜LG전자 미국 안전환경 주재원
2004년 12월 ~ 현재 : ㈜LG전자 해외안전지원팀장
2013년 2월 ~ 현재 :부경대학교 소방공학과 박사과정
관심분야 : Global 안전환경

장 두 훈 (Du Hun Jang)

2008년 2월 : 한양대학교 환경공학과(공학석사)
2012년 8월 : 경기대학교 환경에너지시스템(공학박사)
2021년 3월 ~ 현재 : ㈜세라컴 환경/에너지사업본부 이사
관심분야 : 미세먼지 저감 및 에너지 절약

서 필 원 (Phil Won Seo)



2005년 2월 : 경기대학교 환경공학과(공학석사)
2010년 8월 : 고려대학교 화공생명공학과 공학박사
2020년 11월 ~ 현재 : ㈜세라컴 기술연구소 본부장
관심분야 : 수소안전, 산업용 및 자동차용 촉매

최 재 욱 (Jae Wook Choi)

1992년 3월 : 동아대학교 화학공학과(공학박사)
2018년 9월 ~ 2020년 9월 : 부경대학교 부총장
1986년 4월 ~ 현재 : 부경대학교 소방공학과 교수
관심분야 : 위험물질, 화재폭발