

모터 회전에 의해 분산된 미세 기포들을 함유한 유입수에서 분리된 혼합기체의 성분 특성

허필우[†]

(Received October 4, 2019 ; Revised November 13, 2019 ; Accepted November 21, 2019)

Characteristics of mixed gases separated from water including small sized bubbles scattered by motor rotation

Pil Woo Heo[†]

요약: 수중에서 산소의 분리량을 효과적으로 증가하기 위해 날숨을 이용할 수 있다. 날숨에는 호흡에 필요한 산소와 질소 그리고 이산화탄소가 포함되어 있으며, 이산화탄소의 양을 감소할 수만 있으면 수중 호흡에 이용이 가능하다. 이산화탄소를 감소하기 위해 이산화탄소만 선택적으로 분리하는 멤브레인을 사용할 수 있지만, 이산화탄소의 감소율을 일정하게 유지하기 위해서는 적절한 주기로 멤브레인을 청소해야 하는 문제가 있다. 본 논문에서는 날숨에 포함된 이산화탄소를 연속적으로 감소하기 위해 날숨의 특성을 갖는 혼합기체와 물의 접촉 면적을 증가하는 믹서를 이용하였으며, 이로 인해 물에는 작은 직경을 갖는 미세 기포가 측정되었다. 이렇게 생성된 미세 기포를 포함하는 물을 멤브레인에 공급하면서 중공사의 내경으로 기체를 분리하였다. 믹서에 공급되는 기체량을 1 LPM에서 5 LPM으로 1 LPM 씩 증가하면서 물에 믹싱을 하였으며, 이때 분리된 기체의 성분을 분석하였다. 분리된 기체에 포함된 이산화탄소의 양이 원래의 혼합기체에 포함된 이산화탄소에 비해 감소하였다. 믹싱되는 혼합기체의 양이 증가함에 따라 분리된 기체에 포함된 이산화탄소의 양도 증가하는 경향이 있었으나, 이산화탄소의 감소 특성이 비교적 우수하게 나타났다.

주제어: 미세 기포, 혼합기체, 이산화탄소, 믹서, 회전, 분리장치

Abstract: Exhalation gases can be used to effectively increase the amount of separation of oxygen underwater. Exhalation, which contains oxygen, nitrogen, and carbon dioxide for breathing can be used for underwater breathing as long as the amount of carbon dioxide can be reduced. To reduce carbon dioxide, a membrane that selectively separates carbon dioxide from exhalation may be used, but the membrane needs to be cleaned at an appropriate interval to maintain the carbon dioxide reduction rate at proper levels. In this thesis, a mixer that increases the contact area between water and a mixed gas with exhalation characteristics was used to continuously reduce the carbon dioxide contained in the exhalation. Water, including the small-sized bubbles generated by the mixer, was supplied into the membrane; then, the dissolved gases were separated by a membrane module with many hollow fibers. The amount of gas supplied to the mixer with water was increased from 1 LPM to 5 LPM by 1 LPM and the components of the separated gas were analyzed by gas chromatography. The amount of carbon dioxide contained in the separated gas was reduced compared to the carbon dioxide contained in the original mixed gas. As the amount of mixed gas was increased, the amount of carbon dioxide contained in the separated gas also tended to increase, but the reduction of carbon dioxide was relatively successful.

Keywords: Small sized bubbles, Mixed gases, Carbon dioxide, Mixer, Rotation, Separation device

1. 서 론

수중에서 물고기는 아가미를 이용하여 산소를 섭취하며 서식한다. 물고기의 체내를 순환한 산소가 부족한 혈액은 아가미를 통해 물속의 산소가 상대적으로 풍부한 물과 접

촉하여 산소를 보충 받는다. 산소가 풍부한 혈액은 다시 물고기 체내를 순환하면서 체내에 필요한 성분을 공급한다. 인간은 물고기에 비해 많은 양의 산소를 필요로 하므로 아가미의 기능을 모방하면서 수중에서 호흡하는 장치를 개발

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7814-5662>) Principal Researcher, Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon, Korea, E-mail: pwheo@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7331

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하기 위해서는 어려움이 있다.

아가미의 역할을 수행하는 장치가 있다면 사람도 물속에서 호흡이 가능하다. 다만 사람이 호흡하기 위해서는 물고기보다 많은 양의 산소가 필요하므로 장치의 규모가 커지는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해서는 효율적인 구성이 필요하다.

먼저, 물고기의 아가미의 특성을 조사하여 보고하였다[1]. 아가미의 기하학적 크기를 조사하였고, 이러한 특성이 산소와 이산화탄소의 교환이 이루어질 때 최대 효율을 가짐을 제시하였다.

수중 산소의 이용 가능성과 관련하여 물속의 산소가 다공성 물질을 통해 유입되는 특성을 보고하였다[2]. 물속에 잠긴 상자의 재료가 상자의 재료가 다공성이 아닌 경우와 다공성인 경우를 비교하여 제시하였다. 상자가 산소가 없는 물과 접촉하고 있을 때 다공성 재질인 경우에 상자 내부의 산소량이 시간이 경과함에 따라 감소하였으며, 이어서 상자가 산소가 풍부한 물과 접촉을 하면 산소가 다시 증가하는 것을 제시하였다. 이것은 상자 밖의 물에 포함된 산소의 양에 연동되어 상자 내부의 산소량이 변화되는 것을 보여주며 다공성 물질을 통해 산소가 이동되는 것을 보여준다. 또한, 상자외부는 산소를 포함하는 물을 공급하면서 상자 내부에는 산소를 소모하는 소자를 설치하여 시간이 경과함에 따라 산소량이 감소할 때 다공성 재료인 경우 상자 내부의 산소량이 초기에는 감소하다가 거의 일정하게 유지되는 것을 제시하였다. 이것은 다공성 재료를 통해 상자 내부의 산소소모량을 상쇄하는 산소가 물에서 유입되는 것으로 볼 수 있다. 효과적인 상자의 특성을 통해 산소를 공급받아 사용할 수 있는 가능성을 제시해준다.

용존산소의 분리량을 증가하기 위해 산소의 자기적 특성을 이용한 사례가 보고되었다[3]. 멤브레인의 표면에 자기 물질을 코팅을 하여 산소의 분리량이 증가되는 것을 제시하였다. 전자석에 의해 동작되므로 분리되는 산소량을 자기특성을 이용하여 조절 할 수 있다. 필요시 분리되는 산소량을 증가할 수 있는 장점이 있다.

산소의 분리량을 증가하기 위해 물과 기체가 접촉하는 기하학적 구조가 분리량에 미치는 영향에 대해 보고하였다[4]. 산소의 분리량은 물과 기체의 접촉면의 크기에 비례하므로 접촉면의 크기를 증가함으로써 산소의 분리량을 증가할 수 있다.

분리량을 증가하기 위해 날숨을 이용할 수 있다. 날숨에 포함된 이산화탄소를 연속적으로 제거하거나 일정 수준이하로 감소하는 것이 필요하다. 이것을 위해 이산화탄소만 선택적으로 필터링하는 멤브레인을 이용하는 방법이 있다. 이것은 제한된 양의 처리에 적합하며 일정한 시간 후에는 멤브레인의 동작을 중지시킨 후 멤브레인에 부착된 이산화탄소를 탈착을 하여야 한다. 용량이 제한되며, 연속적으로 사용하지 못하는 단점이 있다. 이것을 개선하여 2개의 멤브레인을 사용하고 한 순간에는 1개만 사용하고, 일정시간 후

탈착 시간에는 다른 멤브레인을 사용하여 상호 교차적으로 사용하면 전체적으로는 연속적으로 사용이 될 수 있다. 하지만 이는 전체 시스템이 복잡해지고 처리량이 증가함에 따라 대형화가 필요한 부분이다.

날숨을 이용하면서 이산화탄소를 연속적으로 감소하는 것이 필요하다. 날숨의 특성을 갖는 혼합기체를 공급했을 때 멤브레인을 통해 분리되는 기체의 분리량 증가되는 것과 이산화탄소의 감소량을 제시하였다[5][6]. 기체의 분리량이 증가되는 것을 보여주었으며, 분리된 기체에 포함된 이산화탄소의 양이 원래의 혼합기체에 포함된 이산화탄소에 비교하여 감소되었음을 제시하였다.

본 논문에서는 산소의 분리량을 효과적으로 증가하고, 이산화탄소를 감소하기 위해 날숨의 특성을 갖는 혼합기체를 이용하여 멤브레인에 공급되는 물과 믹싱을 할 때 물과 기체의 접촉하는 전체적인 표면적을 증가한 상태에서 멤브레인을 통해 기체를 분리하는 것을 제안하였다. 즉, 작은 직경을 갖는 여러 개의 기포 형태로 물에 믹싱되어 공급되면서 멤브레인을 통해 분리 실험을 수행한 결과, 혼합기체에 포함된 이산화탄소가 효과적으로 감소되었다.

2. 실험장치

Figure 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 중공사 멤브레인(LiquiCel사, 주요사양은 Table 1참고), 혼합기체, 믹싱기, 진공펌프로 구성된다. 혼합기체는 날숨의 성분특성을 고려하여 제조하였으며, 포함된 기체의 성분은 산소, 질소, 이산화탄소로 구성되며, 각 함량은 Figure 2와 같다. 캐비트론사의 믹서는 Figure 3과 같이 물 유입부, 기체 유입부, 물과 기체가 믹싱된 물이 배출되는 물 배출부, 고정부와 회전부로 구성된다. 고정부는 원형의 골과 일정한 간격으로 홀이 있는 산으로 구성되고, 회전부는 모터에 연동되어 회전되면서 상보적으로 원형의 골과 마찬가지로 일정한 간격으로 홀이 있는 산으로 구성된다.

기체 유입부로 혼합기체가 유입되면서 회전부가 모터에 의해 회전되고 동시에 물이 유입부로 공급되면 믹싱기는 작은 크기의 기포를 여러 개 포함하는 물을 배출부를 통해 배출하여 중공사 멤브레인으로 공급한다. 중공사 멤브레인은 내경 200 μ m, 외경 300 μ m를 갖는 중공사를 일정한 간격으로 배치한 다발구조를 가지며, 중공사 다발의 외벽으로 혼합기체를 포함하는 물이 흐르고, 중공사의 측면으로 통해 중공사 내부로 진공펌프를 이용하여 혼합기체를 분리한다. 분리된 기체를 제외한 나머지 기체가 물에 포함되어 밖으로 배출된다.

공급되는 물의 유량은 17 L/min이며, 공급되는 혼합기체는 1 L/min에서 1 L/min씩 증가시켜 5 L/min까지 물에 믹싱하여 사용한다. 각 단계에서 중공사 멤브레인을 통해 배출되는 배출수의 기포 특성을 측정한다. 그리고 각 단계에서 진공펌프를 사용하여 기체를 분리하여 비닐백에 포집된다. 포집된 백의 각 성분을 가스크로마토그래피로 분석한다.

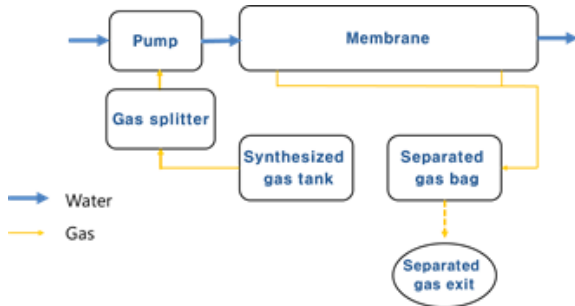


Figure 1: Outline for the separation system of dissolved gases with small sized bubbles

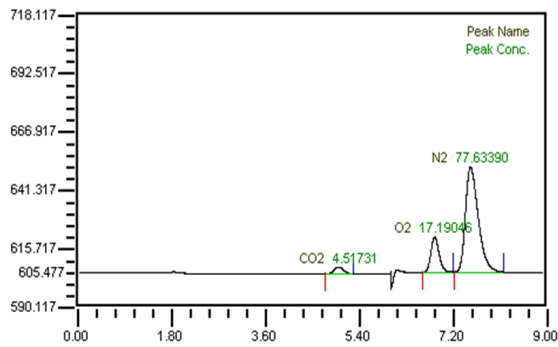


Figure 2: Compositions of synthetic exhalation gases

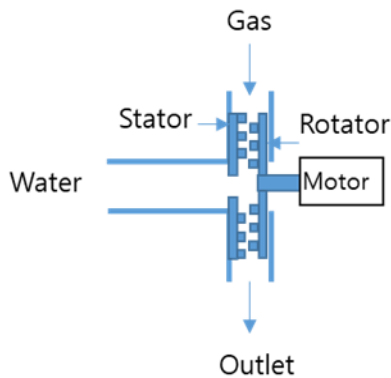


Figure 3: Gas splitter outline generating small sized bubbles

Table 1: Specifications for the membrane used in the separation system

Name	Spec.
Material	Polypropylene
Potting materials	Epoxy
Surface area (m ²)	8.1
Porosity (%)	~25
OD/ID (μm)	300/200
Shell side volume (L)	1.26
Lumen side volume (L)	0.61
Height (mm)	512
Diameter (mm)	116.1

3. 실험결과

Figure 4는 중공사 멤브레인을 통해 배출되는 배출수의 특성을 보여준다. 측정된 물의 상태를 살펴보면 작은 기포 형태로 기체가 포함되어 있음을 알 수 있다. 그리고 혼합기체의 양이 증가할수록 물에 포함된 혼합기체의 양이 증가함을 알 수 있다. 믹싱되는 기체가 3 L/min까지는 멤브레인 출구에서 기포가 거의 나타나지 않고 있으며, 이것은 분리장치에 의해 포함된 기체가 모두 분리된 것으로 분석된다. 4 L/min 이상이 되면 기포가 육안으로 확인되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 혼합기체의 양이 많아서 분리되지 않고 배출수에 남아 있음을 나타낸다.

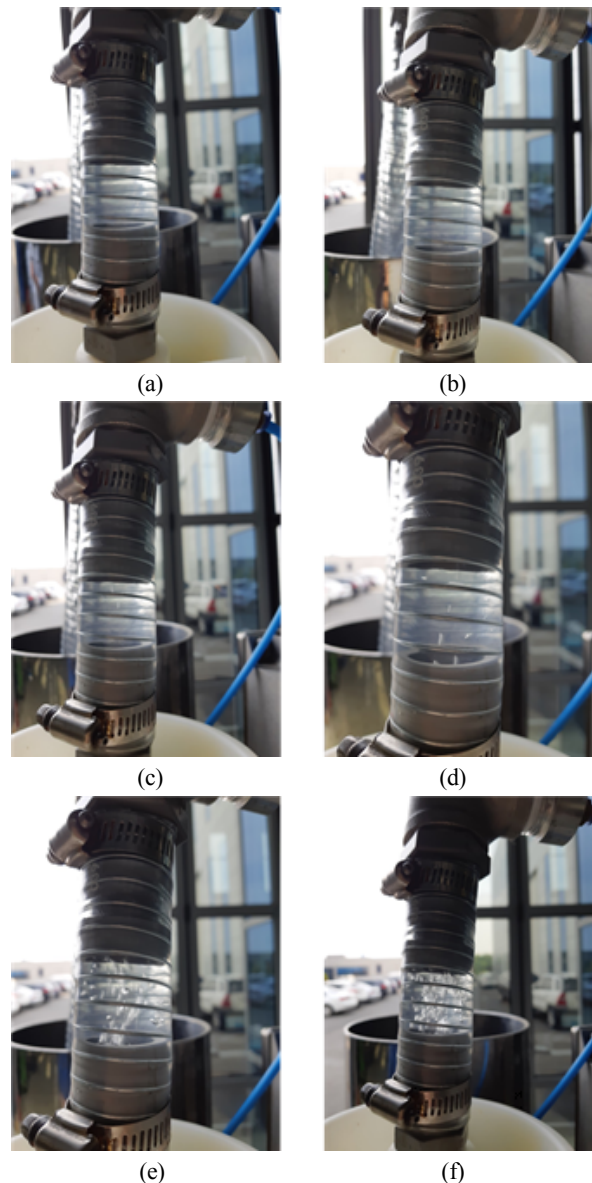


Figure 4: Water mixed with synthetic exhalation gases (a) at 0 l/min (b) at 1 l/min (c) at 2 l/min (d) at 3 l/min (e) at 4 l/min (f) at 5 l/min

분리된 혼합기체의 성분특성은 **Figure 5 ~ Figure 9**와 같다. 이산화탄소의 변화량만 살펴보면 **Figure 10**과 같다. 그림5에서 살펴보면 혼합기체를 1 L/min으로 유입하면 처리되기 전의 이산화탄소의 양에 비해 믹싱과 분리과정을 거친 분리된 혼합기체에 포함된 이산화탄소의 양이 훨씬 감소됨을 알 수 있다. 믹싱되는 혼합기체의 양이 증가함에 따라 이산화탄소의 양이 증가함을 알 수 있다. **Figure 8**에서 4 L/min의 혼합기체가 유입되더라도 분리된 혼합기체에 포함

된 이산화탄소의 양이 1 %이하의 특성을 나타내며, 5 L/min의 혼합기체가 공급될 때 1%보다 약간 증가하지만, 현장에 적용할 때 공급되는 유량의 증가를 고려하면 이산화탄소를 1%이하로 사용이 가능하다. 이것은 본 실험을 통해 이산화탄소의 양을 실시간으로 일정수준이상으로 감소할 수 있음을 보여주며, 수중 호흡장치의 측면에서 아주 의미 있는 결과로 볼 수 있다. 또한, 수중 호흡장치의 소형화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

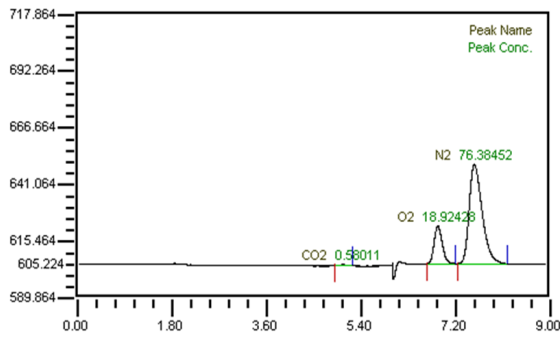


Figure 5: Compositions of gases separated from water mixed with 1 LPM of synthetic exhalation gases

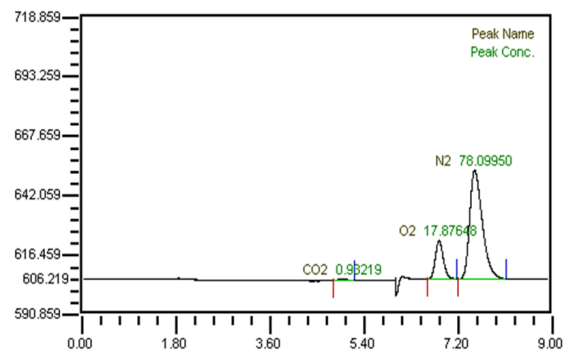


Figure 8: Compositions of gases separated from water mixed with 4 LPM of synthetic exhalation gases

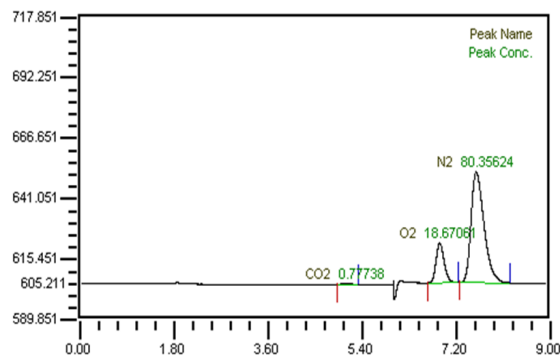


Figure 6: Compositions of gases separated from water mixed with 2 LPM of synthetic exhalation gases

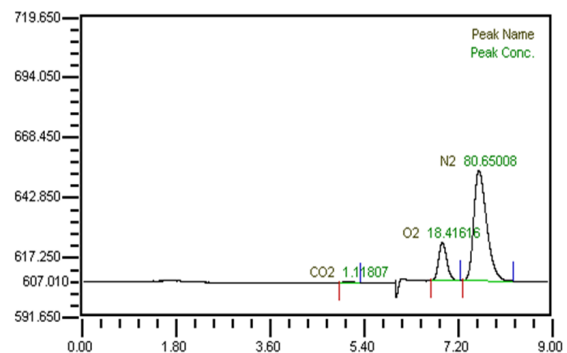


Figure 9: Compositions of gases separated from water mixed with 5 LPM of synthetic exhalation gases

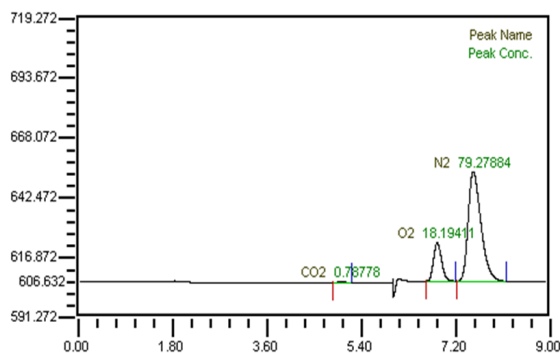


Figure 7: Compositions of gases separated from water mixed with 3 LPM of synthetic exhalation gases

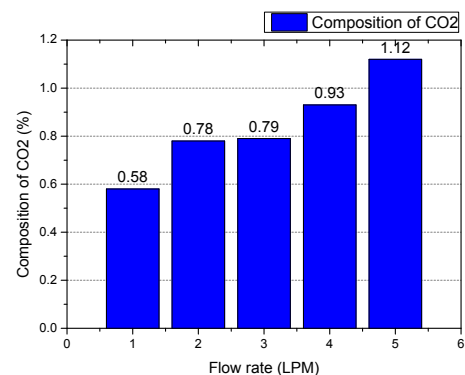


Figure 10: Composition of CO₂ with flow rates of mixed gas

4. 결 론

실험을 통해 물과 혼합기체가 효과적으로 믹싱되는 것을 나타내었다. 혼합기체의 양이 증가함에 따라 믹싱된 물에서 기포의 양이 증가하였다. 혼합기체에 포함된 이산화탄소의 양이 초기의 혼합기체에 비해 줄어드는 것으로 나타났다. 믹싱되는 혼합기체의 양이 증가함에 따라 믹싱된 후 멤브레인을 통해 분리되는 기체에 포함된 이산화탄소의 양은 증가하지만, 원래의 이산화탄소의 양에 비해 여전히 감소된 것을 알 수 있었다. 이산화탄소의 양이 1%이하이면 호흡에 사용가능한 수준이므로 혼합기체의 양을 4 L/min까지 사용이 가능할 것으로 분석된다. 공급되는 물의 양이 증가하면 혼합기체의 사용량도 더 증가할 수 있을 것으로 고려된다. 이 실험결과는 낚시의 특성을 나타내는 혼합기체를 미세한 크기를 갖는 기체상태로 믹싱함으로써 수중 호흡에 효과적으로 사용이 가능하다는 것을 제시한다는 점에서 중요한 의미가 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 산업기술혁신사업의(과제 번호: 20161520101340) 지원에 의해 수행되었습니다.

Author Contributions

The research presented in this paper was wholly contributed by the author.

References

- [1] K. H. Park, W. J. Kim, and H. Y. Kim, "Optimal lamellar arrangement in fish gills," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 111, no. 22, pp. 8067-8070, 2014.
- [2] N. J. Shirtcliffe, G. McHale, M. I. Newton, C. C. Perry, and F. B. Pyatt, "Plastron properties of a superhydrophobic surface," *Applied Physics Letters*, vol. 89, pp. 104106-1-104106-2, 2006.
- [3] Velianti, S. B. Park and P. W. Heo, "The enhancement of oxygen separation from the air and water using poly(vinylidene fluoride) membrane modified with superparamagnetic particles," *Journal of Membrane Science*, vol. 466, pp. 274-280, 2014.
- [4] P. W. Heo, "Separation characteristics of separation devices using inlet water mixed with exhalation gases without a compressor," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 40, no. 9, pp. 842-846, 2016 (in Korean).
- [5] P. W. Heo, "Characteristics of dissolved gases separated from water mixed with exhalation gases without

using a compressor," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 40, no. 10, pp. 916-921, 2016.

- [6] J. Lee, P. W. Heo, and T. Kim, "Theoretical model and experimental validation for underwateroxygen extraction for realizing artificial gills," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 284, pp. 103-111, 2018.