

날숨이 혼합된 물을 사용한 압축기없는 용존기체 분리기의 분리 특성

허필우^{1†}

(Received October 7, 2016 ; Revised October 24, 2016 ; Accepted November 6, 2016)

Separation characteristics of separation devices using inlet water mixed with exhalation gases without a compressor

Pil Woo Heo^{1†}

요약: 물속의 용존산소를 이용하면 물고기가 아가미를 이용하여 호흡하듯이 사람이 수중에서 호흡이 가능하지만, 물속에 포함된 용존산소의 양이 적기 때문에 필요한 산소량을 확보하는 문제가 해결되어야 한다. 우선 물의 유량을 증가시켜 분리되는 산소량을 증가하는 것이 가능하지만, 필요한 펌프와 멤브레인 그리고 주변기기의 용량 증가로 분리장치의 부피와 무게 그리고 소비비용도 함께 증가하게 된다. 이러한 문제를 효과적으로 해결하기 위해 많은 양의 산소를 포함하는 날숨의 특성을 이용하면 필요한 산소량을 효과적으로 확보할 수 있다. 일반적으로 날숨에 포함된 산소량은 공기보다 낮고, 이산화탄소량은 공기보다 많은 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 용존기체 분리장치의 입력단에 날숨을 혼합한 후, 용존기체 분리장치에서 산소를 포함하는 용존기체를 재분리하는 과정을 거치며, 이때, 입력단에 설치된 수중펌프의 동작으로 수압이 증가하므로, 이러한 수압을 갖는 물에 날숨을 혼합하기 위해서는 압축기가 요구되므로 분리장치의 무게와 부피 그리고 소비 전력이 증가하게 된다. 본 연구에서는 입력단의 압력을 감소시킴으로써 압축기를 사용하지 않고도 날숨을 물에 혼합하는 구조를 갖는 것이 특징이다. 실험을 통해 압축기를 사용하지 않고 날숨이 입력단의 물에 혼합되는 것이 가능함을 제시하였으며, 날숨이 입력단에 공급된 후 분리장치를 통해 분리된 기체의 분리특성을 제시하였다. 날숨을 사용함으로써 용존기체의 분리량이 크게 증가하였으며, 공급되는 날숨의 유량이 증가하면 분리되는 용존 기체의 양도 증가하였다.

주제어: 분리특성, 날숨, 분리장치, 혼합된 물, 용존산소

Abstract: It's possible for a human to breathe under water, but the amount of dissolved oxygen in the water is small and a large amount of water is necessary to obtain sufficient dissolved oxygen from water. So, large separation system with large water pumps, having large surface areas, and large battery sources are needed. Exhalation gases are used to solve this problem. These gases contain some oxygen, nitrogen, and carbon dioxide; they contain less oxygen and more carbon dioxide compared to air. Therefore, reduction of the amount of carbon dioxide is necessary. If exhalation gases are employed appropriately, the separation device can be made more compact. Inlet water mixed with exhalation gases is supplied into the separation device, and dissolved gases are separated from the mixed water as it passes through the device. The inlet part of a typical separation system with a water delivery pump before the membrane module has more than one atmosphere. Hence, a compressor is used to mix the exhalation gases. In this study, the pressure at the inlet due to the use of a suction pump after the membrane module was less than one atmosphere; hence, compressors were not required. Separation characteristics were studied using a separation device without a compressor. The use of exhalation gases led to an increase in the amount of dissolved gases being separated. As the amount of inlet exhalation gases was increased, the separation of dissolved gases was increased as well.

Keywords: Separation characteristics, Exhalation gases, Separation device, Mixed inlet water, Dissolved oxygen

1. 서론

물속의 용존산소를 이용하면 물고기의 아가미 특성과 같이 사람이 수중에서 호흡이 가능하지만, 물속에 포함된 용존산소의 양이 적기 때문에 사람이 호흡하기 위해 필요한 산소

를 분리하기 위해서는 많은 양의 물이 요구된다[1]. 다른 방법으로 캐리어용액을 사용한 용존산소의 분리량을 증가할 수 있으며, 산소의 용해도가 높은 캐리어용액을 사용함으로써 용존산소를 농축하는 효과가 있다[2][3]. 따라서 먼저 물과 캐

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7814-5662>): Extreme Mechanical Engineering 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.

리어용액을 접촉하여 캐리어용액에 용존산소를 농축한 후 캐리어용액에서 농축된 용존산소를 분리함으로써 분리량을 증가하는 특징이 있다. 이러한 캐리어용액의 용해도는 물질의 종류에 따라 온도에 반응하는 경우도 있고, 광에 반응하는 경우도 있으며, 응용분야에 따라 물질을 선택하여 사용할 수 있다. 다만 캐리어용액이 필요한 점과 이를 순환하는 장치가 추가적으로 요구되므로 시스템이 복잡하고 사이즈가 큰 점이 응용분야에 따라서는 불완함과 사업화에 문제가 될 수 있다.

용존산소를 이용한 소형화된 분리장치가 개발되면 선박을 이용할 때, 갑작스런 사고로 익사의 위험이 있을 경우 구명조끼에 연동하여 호흡하는 장치로 이용이 가능하다[4]. 즉, 큰 파도가 밀려올 때 분리장치에서 공기호흡과 용존산소 호흡을 병행함으로써 위험한 상황에서 생존이 가능하다. 휴대형 수중호흡장치가 개발되면 해양 혹은 수중에서 사고 발생시 일정시간동안 생존이 가능하므로 빠른 대응이 이루어지면 구조가 가능하다[5]. 용존산소를 이용한 휴대형 수중호흡장치에 대한 연구는 크기를 소형화하면서 분리량을 증가하는 것이 가장 중요한 부분이다[6]. 분리량을 증가하면 멤브레인의 개수를 줄일 수 있으므로 비용과 크기를 개선할 수 있다[7].

효과적으로 분리량을 증가한 방법으로 날숨을 이용할 수 있으며, 날숨에는 공기보다는 약간 적지만 비교적 많은 산소가 포함되어 있고, 질소와 이산화탄소도 포함되어 있다. 이산화탄소를 줄이면 나머지 성분은 호흡에 재이용이 가능하므로, 날숨의 재순환을 이용한 가능성을 제시한 바 있다 [8]. 날숨의 성분을 고려한 인공적인 날숨을 제조하여 멤브레인모듈의 입력단에 공급하였으며, 멤브레인모듈의 입력단에는 수증펌프를 통해 물이 멤브레인에 유입되므로 유로 저항에 따른 수압 상승이 발생된다. 날숨의 성분을 모사한 혼합기체통에 저장된 용존기체는 자체 압력에 의해 수압을 견디면서 멤브레인 전단부의 물에 혼합되며, 이렇게 유입된 날숨모사기체는 멤브레인에 의해 물에 포함된 용존기체가 멤브레인내의 중공사의 튜브 내부로 포집되어 밖으로 방출된다. 분리된 날숨의 양을 측정할 결과 날숨을 혼합하지 않은 분리장치에 비해 분리되는 용존기체의 양이 크게 증가함을 보고하였다. 실험장치에서는 가스통의 압력으로 인공기체를 멤브레인 전단부의 물에 주입하는 데 문제가 없지만, 이 물의 수압이 증가하므로, 실제 필드에서는 사람의 날숨을 혼합하기 위해서 압축기가 요구되고 있으나, 압축기는 무게와 전력을 요구하므로 휴대형 분리장치로 이용하기에는 어려움이 있다.

본 논문에서는 수증펌프를 멤브레인모듈 후단에 위치하여 물을 흡입하는 구조로 멤브레인모듈에 물을 공급하는 특징이 있으며, 이렇게 하면 멤브레인 전단부의 수압을 떨어뜨려 압축기가 필요 없이 날숨의 주입이 가능하므로 휴대형 분리장치로 유용하게 사용될 수 있다. 날숨을 고려한 혼합기체의 유량에 따른 분리량을 측정할 결과와 사람의 날숨을 실시간으로 공급하는 경우 그리고 호흡과 멤브레인 사이의 독립성과 유연성을 확보하기 위해 비닐 저장 용기

를 사용한 실험을 수행하였으며, 멤브레인모듈에서 분리된 용존기체의 분리량을 제시하였다.

2. 실험장치

실험장치의 개요는 Figure 1과 같으며, 멤브레인모듈, 수증펌프, 진공펌프, 유체 유량계, 기체 유량계 그리고 압력계로 구성된다. 멤브레인모듈은 Liqui-Cell 사 제품을 사용하였으며, 그 사양은 표 1과 같다. 표면적은 8.1 m²이고 중공사의 내경과 외경은 200 μm와 300 μm를 각각 갖고, 물이 지나가는 중공사 측면의 유량은 1.26 L를 갖는다. 물은 중공사의 측면으로 공급되며, 중공사의 내부로 용존기체가 분리되어 배출된다. 37 LPM 유량으로 멤브레인에 물이 공급되며, 멤브레인의 전단부에 혼합기체를 물에 섞어 멤브레인모듈에 주입한다. 혼합기체는 날숨의 성분을 고려하여 산소, 질소, 이산화탄소로 구성되며, 산소는 17.1%, 질소는 78.4%, 이산화탄소는 4.5%를 갖는다. 먼저, 혼합기체통을 레귤레이터로 1 LPM에서 5 LPM까지 1 LPM씩 증가하면서 멤브레인모듈에 공급하였으며, 다음으로 사람의 날숨을 실시간으로 혼합부에 주입하면서 멤브레인모듈을 통해 분리된 용존기체의 분리량과 진공펌프를 사용하여 분리할 때 튜브내부의 압력을 측정하였다. 마지막으로 사람의 날숨을 5 L 비닐 저장용기에 저장한 후 멤브레인 전단부의 혼합부에 연결하여 멤브레인모듈에 주입하면서 멤브레인모듈에 포함된 중공사의 안쪽방향으로 분리한 후 분리량을 측정하였다.

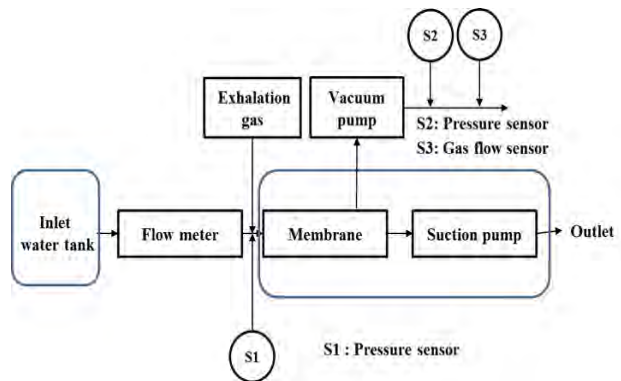


Figure 1: Outline for the separation system without a compressor

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

먼저, 물에 포함된 용존기체의 분리량을 파악하기 위해 날숨을 섞지 않은 상태에서 멤브레인모듈에서 진공펌프를 이용하여 분리되는 분리량과 압력을 측정하였으며, 이 결과와 날숨을 사용하였을 때의 분리량을 비교 분석한다. 측정결과 **Figure 2**와 같이 날숨을 혼합하지 않은 상태에서 멤브레인모듈에서 분리량은 500 mLPM을 약간 상회하며, 압력은 100 Torr보다 약간 큰 값을 나타낸다. 다음에는 인공날숨을 혼합한 상태에서 분리량의 증가를 조사하기 위해 실험을 수행하였다. 실험결과는 **Figure 3**과 같으며, 멤브레인 모듈의 전단부에 1 LPM의 제조된 인공날숨을 공급했을 때, 분리량과 압력을 나타낸다. 분리량이 인공날숨을 섞지 않는 경우에 비해 증가함을 알 수 있다. **Figure 4**는 2 LPM 날숨을 유입되는 물에 섞은 후 멤브레인모듈을 통해 분리되는 분리량과 압력을 나타낸다. 혼합되는 인공날숨의 양이 증가함에 따라 분리량도 증가함을 알 수 있으며, 진공도는 1 LPM에 비해 약간 감소함을 알 수 있으며, 같은 용량의 진공펌프를 사용시 분리량의 증가를 예상할 수 있다. 인공날숨의 공급량을 3, 4, 5 LPM으로 증가시킬 때 멤브레인모듈에서 분리되는 분리량과 압력은 **Figure 5**, **Figure 6** 그리고 **Figure 7**과 같다. **Figure 8**은 1 LPM에서 5 LPM으로 날숨을 1 LPM씩 증가할 때의 분리량만의 특성을 나타내며, 분리량의 증가를 확인할 수 있다. 날숨을 사용하지 않은 용존기체의 분리량에 비해 5 LPM의 날숨을 사용하면 용존기체의 분리량이 거의 9배 이상 증가하므로, 분리장치의 용량을 증가하지 않고도 분리성능을 크게 개선하는 효과를 나타낸다. 따라서 분리장치의 소형화와 실용화에 크게 기여할 수 있다.

다음에는 인공날숨이 아닌 실제 날숨에 대한 분리실험을 수행하였다. 날숨을 실시간으로 직접 멤브레인 전단부에 혼합하면서 주입하는 실험과 날숨을 비닐 저장용기에 일정량을 포집한 후 멤브레인 전단부에 주입하면서 분리량을 측정하였다. 비닐 저장용기를 사용하면 들숨과 날숨을 독립적으로 동작하는 효과가 있으며, 날숨이 멤브레인 전단부에 혼합될 때 저항감을 최소화하는 효과가 있다.

Figure 9는 날숨을 직접 물에 섞어 주입하면서 멤브레인 모듈에서 분리되는 분리량과 압력을 나타내며, 날숨이 주입되면 멤브레인을 통한 분리량도 증가함을 알 수 있다. 별도의 압축기가 필요 없이 직접 물에 주입이 가능함을 알 수 있었다. **Figure 10**은 5 L용량의 비닐 저장용기에 날숨을 저장한 후 유입되는 물에 연결하여 분리실험을 수행하였으며, 멤브레인모듈에서 분리되는 양이 증가함을 알 수 있다. 실제로 날숨을 재순환하여 이용할 때는 버퍼 백을 이용하는 것이 호흡과 날숨 재순환을 분리시켜 날숨에 의한 저항

을 최소화하고, 동시에 물에 공급되는 날숨을 버퍼 비닐 저장용기에서 적시에 공급이 가능한 특징이 있다.

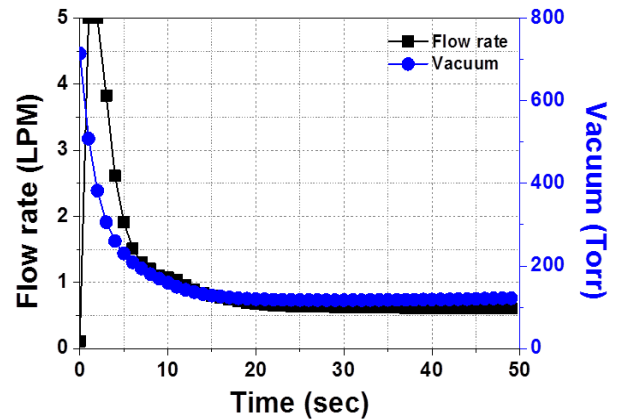


Figure 2: Separation and vacuum state without the exhalation gas

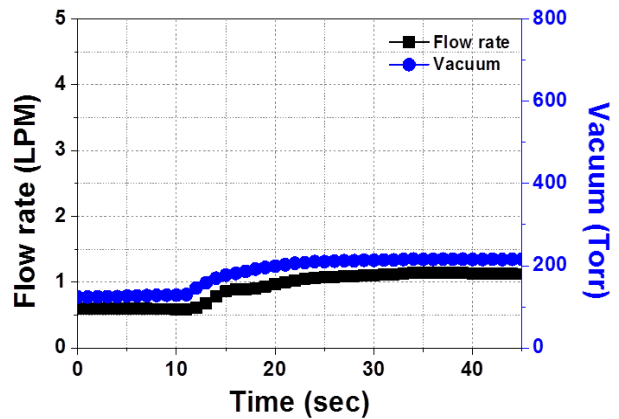


Figure 3: Separation and vacuum state for 1 LPM of synthesized exhalation gas

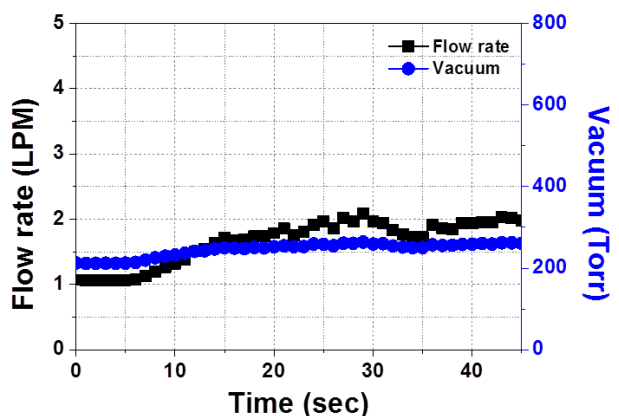


Figure 4: Separation and vacuum state for 2 LPM of synthesized exhalation gas

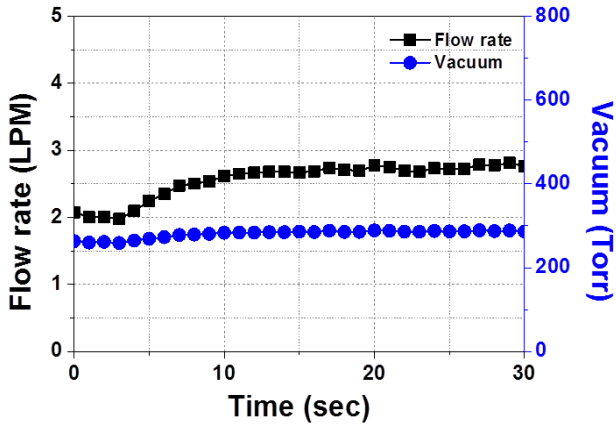


Figure 5: Separation and vacuum state for 3 LPM of synthesized exhalation gas

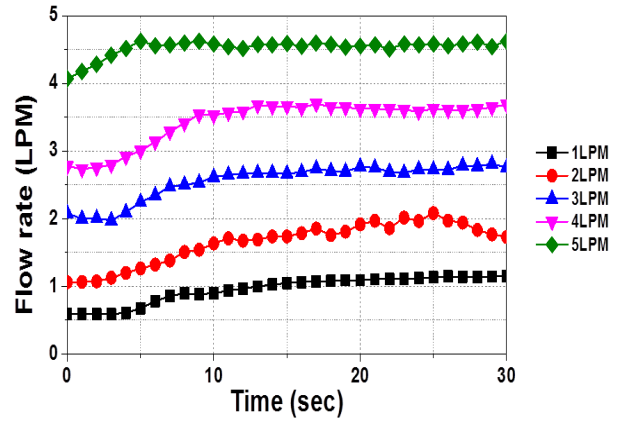


Figure 8: Separation characteristics for 1-5 LPM of synthesized exhalation gases

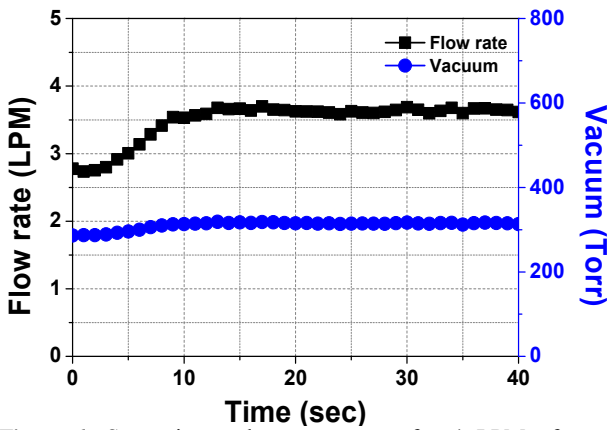


Figure 6: Separation and vacuum state for 4 LPM of synthesized exhalation gas

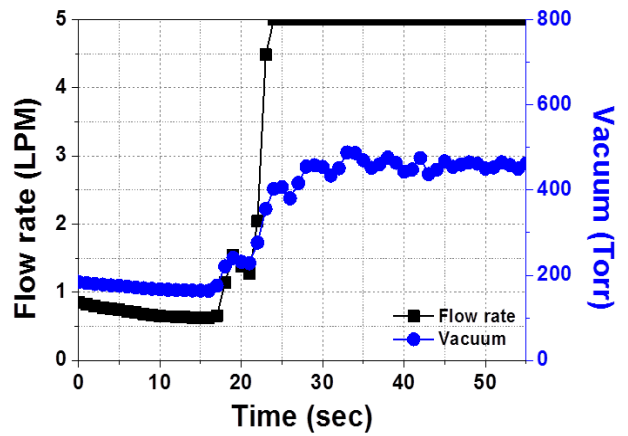


Figure 9: Separation and vacuum state for realtime exhalation gas

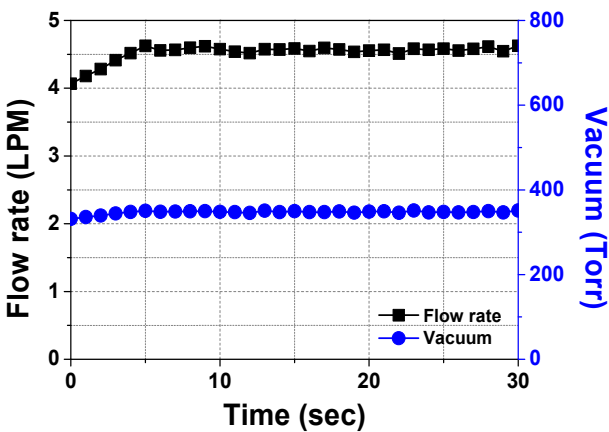


Figure 7: Separation and vacuum state for 5 LPM of synthesized exhalation gas

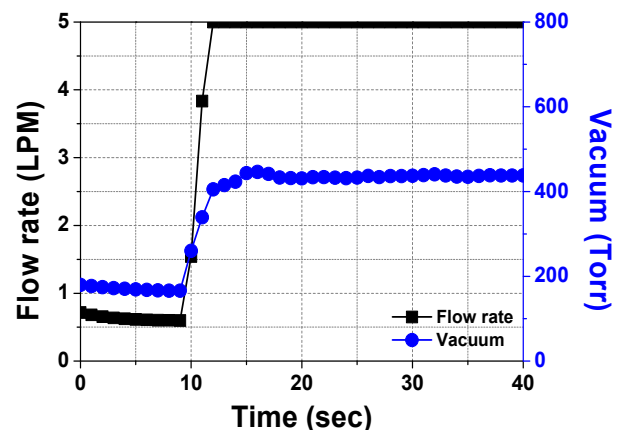


Figure 10: Separation and vacuum state for the separation system using 5 L of exhalation gas bag

4. 결 론

본 연구에서는 멤브레인 전단부의 압력을 감소시켜 압축기를 사용하지 않고도 낄숨의 혼합이 가능한 분리장치를 제시하였으며, 흡입형 수증펌프를 멤브레인모듈의 후단에 위치하는 것을 특징으로 한다. 인공낄숨을 섞지 않은 상태에서 멤브레인모듈의 분리량과 압력을 측정하였고, 다음으로 인공낄숨을 섞은 물을 주입하면서 멤브레인모듈의 분리량과 압력을 측정하였으며, 낄숨을 섞지 않은 경우에 비해 분리량이 증가됨을 알 수 있었다. 낄숨의 양이 증가함에 따라 멤브레인모듈의 분리량도 증가함을 알 수 있었다. 특히, 5 LPM 인공낄숨을 혼합하면 9배 이상 분리량 증가를 나타냈으며, 이것은 분리장치의 소형화에 크게 기여할 것으로 기대된다. 압력 측정결과를 살펴보면 진공도는 낄숨의 양이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었다.

그리고 실시간으로 낄숨을 주입되는 물에 혼합하면서 멤브레인모듈에서 분리된 분리량과 압력을 측정하였으며, 분리량이 증가함을 알 수 있었다. 마지막으로 낄숨을 5 L 용량의 비닐 저장용기에 저장한 후 주입되는 물에 섞으면서 멤브레인모듈을 통해 분리된 분리량과 압력을 측정하였으며, 역시 분리량이 증가함을 알 수 있었다. 실제로 낄숨을 섞어 사용할 때는 버퍼탱크를 이용함으로써 낄숨 동작시 낄숨이 물에 혼합되는 동작을 분리할 수 있다. 이렇게 함으로써 낄숨에 따른 저항감을 최소화하고 낄숨의 재순환에도 효과적이 될 수 있다.

본 실험을 통해 압축기가 없이 낄숨을 물에 혼합하는 것이 가능하며, 멤브레인모듈을 통해 분리된 용존기체의 분리량 증가와 낄숨의 직접적인 이용이 가능함을 제시하였다. 향후 낄숨을 활용하여 수중 호흡하는 장치에 효과적인 적용이 기대된다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 주요사업 연구로 수행된 연구 결과입니다.

References

- [1] P. W. Heo, "Artificial gill technology," *Machinery and Materials*, vol. 22, no. 3, pp. 110-119, 2010.
- [2] N. Matsuda, K. Sakai, T. Nakamura, and R. Majima, "Temperature-controlled enhancement of oxygen uptake from water using oxygen carrier solution," *Journal of Membrane Science*, vol. 184, no. 1, pp. 17-26, 2001.
- [3] K. Nagase, F. Kohori, and K. Sakai, "Development of a compact artificial gill using concentrated hemoglobin solution as the oxygen carrier," *Journal of Membrane Science*, vol. 215, no. 1-2, pp. 281-292, 2003.
- [4] P. W. Heo and I. S. Park, "Separation of dissolved gas for breathing of a human against sudden waves using hollow fiber membranes," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 69, pp. 1258-1261, 2012.
- [5] P. W. Heo and I. S. Park, "Separation of dissolved gases from water for a portable underwater breathing," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 79, pp. 1066-1069, 2013.
- [6] P. W. Heo, "Separation characteristics of dissolved gases from water using a portable separation system with hollow fiber membrane modules," *International Journal of Science and Engineering Investigations*, vol. 4, no. 46, pp. 71-74, 2015.
- [7] P. W. Heo, "Increasing separation of dissolved gases using a portable system with hollow fiber membrane modules including two inlets," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, no. 8, pp. 1457-1460, 2015.
- [8] P. W. Heo, "Enhancement of separation of dissolved gas from water using synthesized exhalation mixed to inlet of a membrane module," *International Journal of Science and Engineering Investigations*, vol. 4, no. 46, pp. 59-64, 2015.