

# 인공아가미기술

허필우 | 한국기계연구원

## [ 요약문 ]

인공아가미기술은 수중에서 용존산소를 분리하여 호흡에 사용하는 것을 말한다. 이를 위해 아가미의 특성을 분석하고 현재까지 제시되고 있는 용존산소의 분리를 위한 메커니즘 특성을 기술하였다. 즉 압력 강하, 캐리어 용액, plastron의 관점에서 용존산소를 분리하여 수중 호흡에 사용하는 부분에 대해 소개하였다. 또한, 현재 진행 중인 용존산소 분리실험장치를 이용한 수중 용존산소의 감소특성을 제시하였다. 압력을 감소함에 따라 용존산소량이 비례하여 감소함을 알 수 있었다. 중공사막에 공급되는 유량을 증가시키면 용존산소량의 감소가 둔화되는 특성을 나타낸다. 휴대형 인공아가미기술은 물놀이와 관련된 레저활동의 안전도구로 활용이 가능하고, 스쿠버다이빙, 마이크로연료전지, 인공부레, 잠수함 그리고 인공폐 분야에 사용이 기대된다.

## 1. 서론

인공아가미기술은 수중에서 용존산소를 분리하여 호흡에 이용하고자 하는 것이다. 용존산소 분리를 통한 산소이용 방법은 기존의 전기 분해방법에 비해 저 에너지와 소형으로 수중에서 사용되는 에너지시스템에 필요한 산소량을 공급하는 장점이 있다. 잠수함 등에서 사용되는 전기분해에 의한 산소 이용 방법은 필요한 산소발생을 위해 많은 에너지가 필요하며, 긴급한 사고 발생시 용존산소를 이용한 산소를 이용함으로써 저비용으로 안전성을 확보할 수 있다.

소요되는 에너지양을 최소화하면, 수중에 존재하는 산소를 이용함으로써 이론적으로 무한 시간동안 물속에서 산소 공급이 가능하므로, 인공아가미기술이 개발되면 막대한 경제적 효과가 기대된다. 인공아가미기술 개발을 위해서는 수중에서 산소를 분리하기 위해 나노/마이크로소자기술과 압력, 온도 특성을 고려하여야 한다. 이를 위해 기존에 보고된 최신 용존산소 분리기술의 분석과 물속에서 서식하며 살아온 생물들의 호흡방법을 공학적으로 분석함으로써 최적의 해법을 얻을 수 있다.

실제로 물속에는 자유롭게 호흡하며 서식하는 다양한 생물들이 존재하며, 물고기는 아가미를 이용하여 물속의 산소를 섭취하고, 물방개붙이와 같은 수서 곤충들은 붕괴되지 않는 두꺼운 공기층을 만들어 물이 들어오지 못하게 하는 강모들을 배부에 갖고 있으며, 일부 지하에 서식하는 거미 종들의 거미줄과 수많은 곤충들의 난각들 역시 이러한 공기 덮개를 만들 수 있다. 이들 공기층들은 마치 아가미처럼 기능할 수 있어서 물 속 산소를 들어올 수 있게 하고 공기 중으로 이산화탄소를 확산되도록 한다. 이와 같은 물속 생물들의 진화된 호흡 원리를 조사·분석하고 최신 기술을 분석하면 공학적으로 구현이 가능하고, 경제성이 있는 인공아가미기술의 개발이 가능하다.

이스라엘에서는 최근 원심분리기를 이용하여 압력을 낮춰 수중의 산소를 추출하여 호흡에 이용하는 기술의 가능성을 보고한 바 있으나<sup>[1]</sup>, 원심분리기와 이에 필요한 배터리 용량 그리고 용존산소 분리장치의 크기가 제약이 되고 있다. 일본에서는 캐리어 용액을 이용하여 수중의 산소를 추출하는 연구를 보고하고 있으며<sup>[2-3]</sup>, 사람이 호흡하는 데 소요되는 표면적에 대한 연구결과를 보고하였다. 국내에서는 생체모방형 수중 용존산소 분리기술 연구는 거의 없으



며, 물속의 기체분리에 대한 연구는 화학분야에서 많이 수행되고 있고, 아가미 등의 수중 생물의 호흡기 구조를 해부학적으로 측정하여 분석하는 연구는 일부에서 진행되고 있는 실정이다.

생체모방을 이용한 수중 호흡기술은 세계적으로도 초기 연구 단계이므로 원천 특허의 확보가 비교적 용이하며, 분리된 산소는 물속 에너지시스템의 연료로 사용될 뿐 아니라 물속에서 수중 탐사의 안전성과 편의성을 크게 신장시킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 인공아가미기술에 대한 기술동향을 분석하고, 제작된 용존산소 분리 실험장치와 그 기본특성을 제시하고자 한다.

## 2. 아가미 특성

그림 1과 같이 아가미는 아가미활(gill arch)로부터 생성되어 여러개의 아가미 필라멘트(gill filament)가 부착되어 있고, 아가미 필라멘트는 라멜라(lamella)를 포함하며, 각 라멜라에는 모세혈관망이 존재한다. 이산화탄소가 들어있는 혈액은 아가미활의 구심성 혈관으로부터 모세혈관의 얇은 막을 통해 아가미필라멘트로 유입한 후, 라멜라의 모세혈관망에서 가스교환이 일어나고, 이때 산소가 풍부해진 혈액은 원심성혈관으로 유입되어 배대동맥을 거쳐 온몸으로 전달된다.

가스교환을 용이하게 해주는 요인은 모세혈관과 필라멘트의 벽이 모두 얇아서 혈액과 물 사이 거리가 짧고, 각 라멜라 내의 혈액 흐름이 주변 물 흐름과 반대로 형성됨으로써 효율적인 역류교환체계가 형성되어 있다. 혈액이 라멜라를 통과하는 동안 산소는 확산기울기에 따라 안쪽으로 확산되고 이산화탄소는 바깥쪽으로 확산됨으로써 교환이 일어난다.

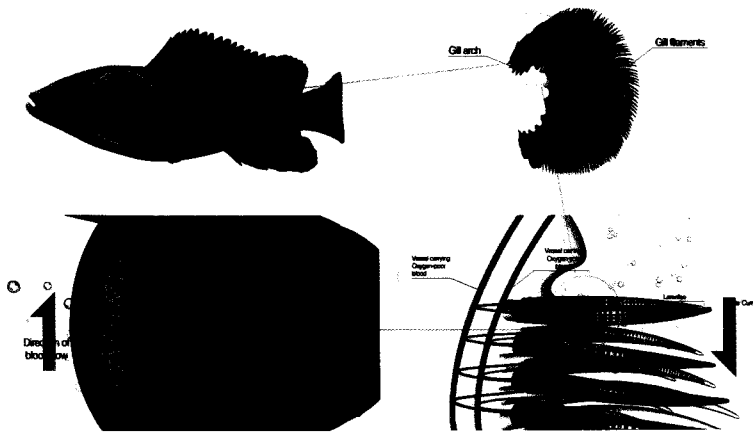
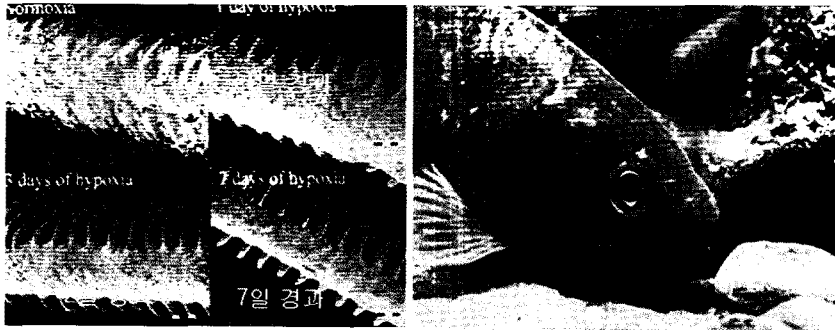


그림 1. 아가미 구조

그림 2는 물속에 사는 붕어가 산소가 부족하면 아가미의 표면적을 넓혀 산소의 흡수율을 높여 생존함을 보여준다. 그림에서 보통 때는 아가미의 표면적이 작지만 시간이 경과하면서 점차 아가미의 표면적을 증가시킴을 알 수 있다. 이것은 저 산소 상태에서 얼마나 빨리 아가미가 적응하는 가를 알 수 있다.



(a) 저산소 상태의 아가미 모습

(b) 저산소 상태의 붕어

그림 2. 저산소 상태의 아가미 특성

### 3. 잠수종

1690년에 영국의 과학자 에드먼 헬리는 그림 3과 같이 외부 공기를 넣은 상태에서 물 속에서 사용하는 잠수종을 고안하였다<sup>4)</sup>. 중모양의 용기를 뒤집어서 공기가 있는 상태로 수중에 가라앉히면서 한 사람이 내부에서 호스로 수중에 있는 다른 사람에게 공기를 공급하면 수중에서 필요한 일을 수행할 수 있다. 헬리는 반복적인 실험을 통해 수중 20m 깊이에서 1.5 시간동안 머물렀다.

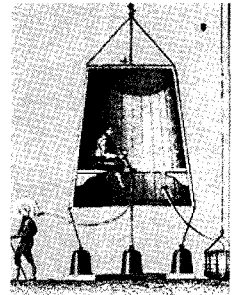


그림 3. 잠수종 개략도

### 4. 용존산소 분리 메커니즘 분석

#### 4.1 감압 분리

그림 4는 원심분리기를 이용하여 압력을 감소시켜 용존된 기체의 용해도를 감소시킴으로써 용존된 기체를 분리함을 보여준다. 헨리의 법칙에 따르면 기체의 용해도는 압력에 비례한다. 따라서 사이드 음료수 병의 뚜껑을 열면 고압상태에서 녹여진 탄산가스가 대기압을 만나 압력차이만큼 용존된 탄산가스가 빠져나가는 원리와 같다. 용존산소가 있는 유체가 펌프를 통해 기체 분리기에 공급되면 산소를 포함하는 기체만 분리되고 기체가 제거된 유체는 별도로 배출된다. 분리된 용존산소는 저장탱크에 저장되거나 사람이 호흡할 때 사용된다. 사람의 날숨에서 이산화탄소만

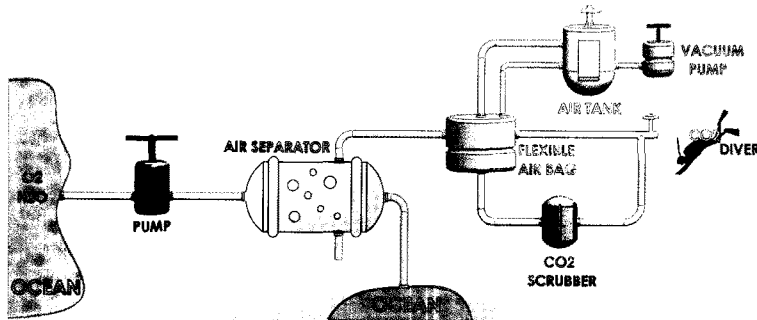


그림 4. 감압에 의한 용존산소 분리



제거하면 호흡에 재사용이 가능하다. 이러한 부분을 고려하면 한 사람이 호흡하기 위해서는 1 L/min의 산소량이 필요한 것으로 알려져 있다.

이스라엘의 Bodner는 LiKEAFiSH라는 회사를 차려서 그들이 제작한 그림 5와 같은 용존산소 분리장치를 이용하여 물속에 용존된 기체를 추출하여 호흡하는 장면을 보여주었다. 부가장치가 있어서 휴대하기에는 번거로운 점이 있지만 용존산소의 분리를 통한 수중 호흡이 가능함을 보여주고 있다.



그림 5. 용존산소 분리장치

## 4.2 캐리어 용액

### 4.2.1 고온 분리

그림 6은 산소에 친화적인 캐리어 용액을 산소가 포함된 물과 접촉하여 캐리어 용액의 산소 농도를 증가한 후 온도를 증가시켜 캐리어 용액에 용존산소를 분리한 후, 캐리어 용액의 온도를 감소시켜 용존된 물과 접촉함으로써 물에 용존된 산소의 양을 증가시키는 구조로 동작함을 보여준다. 적혈구가 포함된 캐리어 용액을 통해 용존산소의 양을 증가시킨 후 온도를 상승시켜 용존산소를 분리함으로써 용존산소의 분리량을 증가할 수 있다. 용존산소가 추출된 유체는 온도를 떨어뜨려 기체의 용해도 용량을 증가시킨 후 새로운 유체와 접촉시킨다. 이러한 과정을 주기적으로 반복함으로써 단위 시간당 분리되는 기체의 양을 증가시킬 수 있다. 연구결과에 따르면 한 사람의 호흡을 위해서는 225m<sup>2</sup>의 표면적이 필요한 것으로 보고됐다.

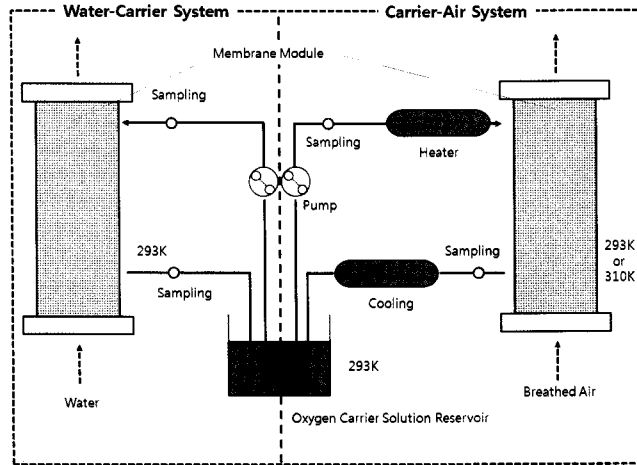


그림 6. 적혈구를 이용한 용존산소 분리장치 개략도

### 4.2.2 광원에 의한 분리

그림 7은 용존되는 산소의 양이 조사되는 빛의 양에 따라 달라지는 캐리어 용액을 물과 접촉하여 용존된 산소를 캐리어 용액에 농축한 후 광원을 조사하여 용존산소를 분리한 후, 다시 캐리어 용액을 산소가 용존된 물과 접촉하는 과정을 반복하는 동작을 수행하는 것을 보여준다. 캐리어 용액으로 폴리브덴 포르핀을 사용한다. 실험결과 한 사람의 호흡을 위해서는 123m<sup>2</sup>의 표면적이 필요함을 제시하였다. 적혈구를 이용한 방법보다 용존산소의 분리효율을 개선하였으나 아직도 많은 표면적을 필요로 한다.

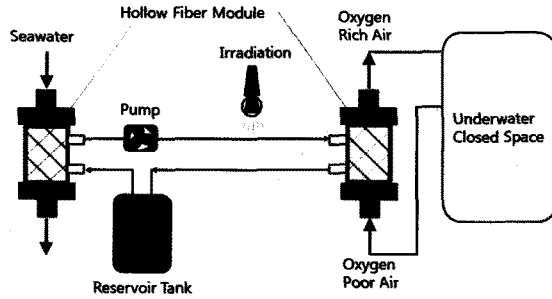


그림 7. 폴리비덴 포르핀을 이용한 용존산소 분리장치 개략도

### 4.3 Plastron

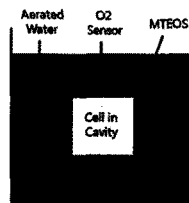
#### 4.3.1 Plastron 분리 특성

Plastron은 표면에 소수성 특성을 나타내는 털이 있는 생물들이 수중에서 공기층이 발생할 때 물과 공기의 경계층을 말한다. 공기층이 붕괴되지 않고 유지되면 이러한 공기층을 통해 물속의 기체를 공급받아 마치 폐처럼 동작한다.

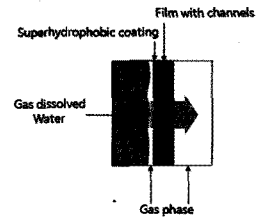
그림 8은 물밖에서 서식하는 물벌이(그림 8(a)) 갑작스런 사고로 익사되더라도 30분에서 수 시간동안 생존하는 것에 착안하여 MTEOS라는 소수성 물질을 통해 물속의 용존산소가 투과되는 특성을 조사하는 실험장치의 개략도(그림 8(b)) 그리고 이러한 특성을 나타내는 물질의 구조(그림 8(c))를 보여준다<sup>[5,6]</sup>.



(a) 수중의 물벌



(b) plastron을 이용한 실험장치 개략도



(c) plastron 구조

그림 8. 물벌을 모방한 plastron 특성

Methyltriethoxysilane(MTEOS)를 이용한 소수성 foam을 제작하는 과정을 살펴보면 먼저 0.12 M HCl 용액에 0.327mol(25ml)의 2-propanol을 첨가한 용액에 0.1255mol(25mL) MTEOS를 첨가 후 강하게 교반한다. Paraffin film으로 sealing후 22℃에서 1시간 동안 반응시킨다. 6ml의 polystyrene 용기에 위 용액 4ml와 암모니아 용액 1ml를 1분간 교반한다. Paraffin film으로 sealing후 상온에서 20시간 동안 반응시킨다. Paraffin film에 구멍을 내고 3일간 상온에서 건조한다. 가열로를 이용 300℃에서 1시간동안 열처리한다. 이때, 승온속도는 2.5℃/min 이고, 하강속도는 5℃/min 이다. 그림 9는 제작된 MTEOS를 나타내며 암모니아의 농도에 따라 형상이 달라진다.

그림 10에서 점선은 용존된 산소량의 변화를 나타내고, 점선은 cavity 내의 산소 양을 나타낸다. 용존된 산소량의 변화에 따라 cavity 내의 산소량이 비례하여 변화하는 것을 나타낸다. 그림 11에서 cavity 내의 산소를 소모시켰을 때, plastron을 사용할 때와 기체가 통과하지 않는 경우를 비교하였다. Plastron을 사용하면 용존된 산소가 보충됨으로써 cavity 내 산소의 양이 일정한 값으로 유지함을 나타낸 반면에 기체가 통과하지 않는 경우는 cavity 내의 산소량이 짧은 시간내에 소멸되는 것을 나타낸다. 이 실험을 통해 MTEOS를 이용함으로써 MTEOS내부에서 산소가 소모되더라도 동력을 사용하지 않는 상태에서 물에서 용존산소가 분리되어 투과되는 것을 알 수 있다.

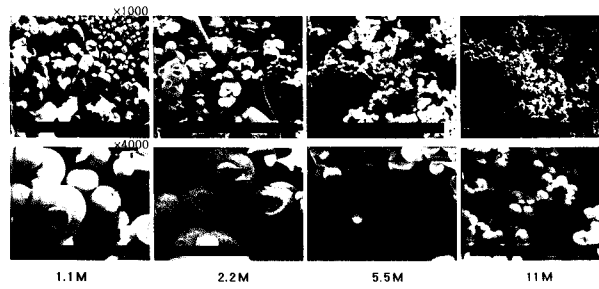


그림 9. 제작된 MTEOS

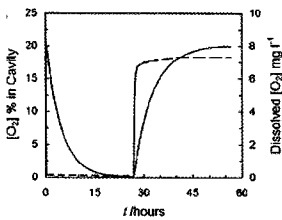


그림 10. 용존산소량과 cavity 내의 산소량

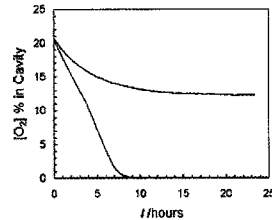


그림 11. MTEOS의 산소투과 특성

### 4.3.2 Plastron 메커니즘 분석

수중에서 호흡하는 절지동물들은 물속에 들어가면 몸의 외부 표면에 얇은 공기층을 유지하면서 몸 표면의 기공들을 통해 호흡한다. 이때, 몸의 외부 표면을 싸는 공기층은 주위 물과 산소 및 이산화탄소를 교환하면서 일종의 허파처럼 작용하는데 이 공기층의 유지에는 몸 표면의 털이 중요한 역할을 한다. Flynn과 Bush(2008)는 몸 표면의 털이 공기층 유지에 어떤 역할을 하는지 살피기 위해 통상적인 표면 털의 형상을 바탕으로 한 아래 그림 12와 같은 2차원 모델을 이용하였다<sup>[7]</sup>.

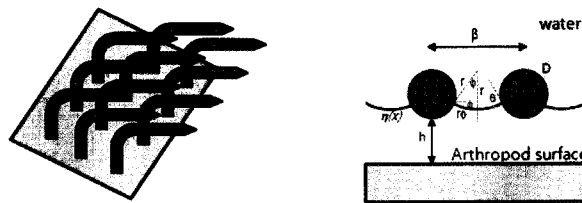


그림 12. Plastron 해석 모델

상기 그림 12의 기하학적인 관계를 통해, 공기-물 계면의 곡률 반경  $r$ 은 털의 중심 간 거리  $b$ , 털의 직경  $D$ , 계면이 털과 만나는 점에서 계면과 수평선이 이루는 각  $\phi$ , 털 표면의 접촉각  $\theta$ 와 다음과 같은 관계가 있음을 유도할 수 있다.

$$\frac{r}{\beta} = \frac{1}{2\sin\phi} \left[ 1 - \frac{D}{\beta} \sin(\theta - \phi) \right] \quad (1)$$

$\phi$ 의 최소값은 호흡이 이루어지기 위한 요건과 관련이 있다. 만약 공기-물 계면이 매우 작으면 계면을 통한 산소, 이산화탄소 교환이 어려워지기 때문에 결국은 호흡으로 공기층의 산소가 고갈되는 지경에 이르게 된다. 이를 위해 이웃한 털 사이의 공기-물 계면 길이를 털과 털의 중심 간 거리로 나눈 아래와 같은 변수가 도입되었으며 아래 그림

13(a)의 적색선이 호흡을 위한 한계값을 가리킨다. 이와 같이 결정된  $\phi$ 값의 최소값과 식(2)로 결정되는  $\phi$ 값의 최대값의 범위 안에서 계면의 곡률 반경을 계산하면 그림 13(b)와 같은 모양을 가진다.

$$\frac{\lambda}{\beta} = 2\phi \frac{r}{\beta} \quad (2)$$

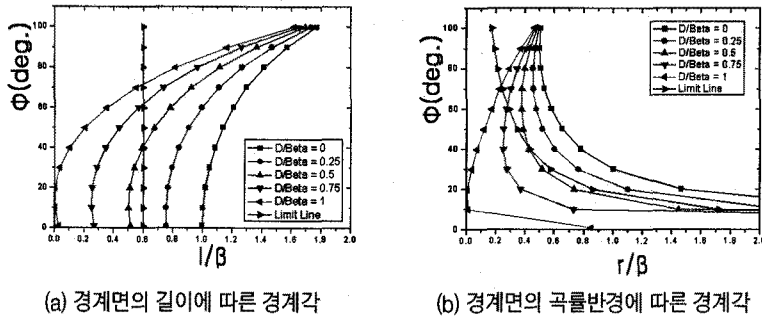


그림 13. Plastron 유지위한  $\beta$ 와  $\phi$  특성

## 5. 제작된 용존산소 분리 실험장치 특성

그림14, 그림 15와 같이 기초 실험 수행을 위한 용존산소 분리 실험 장치를 제작하였다. 본 실험은 중공사막을 사용하여 압력과 유속에 따른 기초적인 용존산소 분리 데이터를 확보하기 위해서 수행한다. 수중에 용존된 산소를 멤브레인을 통해 분리, 포집하여 수중 호흡에 이용할 수 있다. 그림 15는 파이버형 멤브레인을 사용한 용존산소 분리 실험장치를 나타낸다.

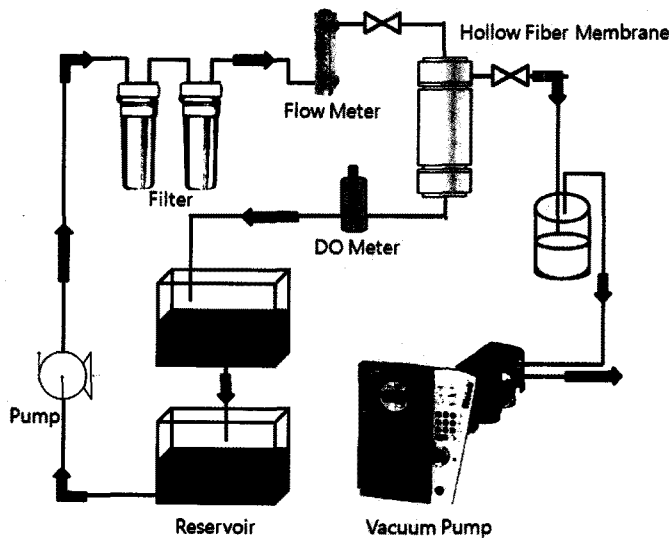


그림 14. 용존산소 분리 실험장치 개략도

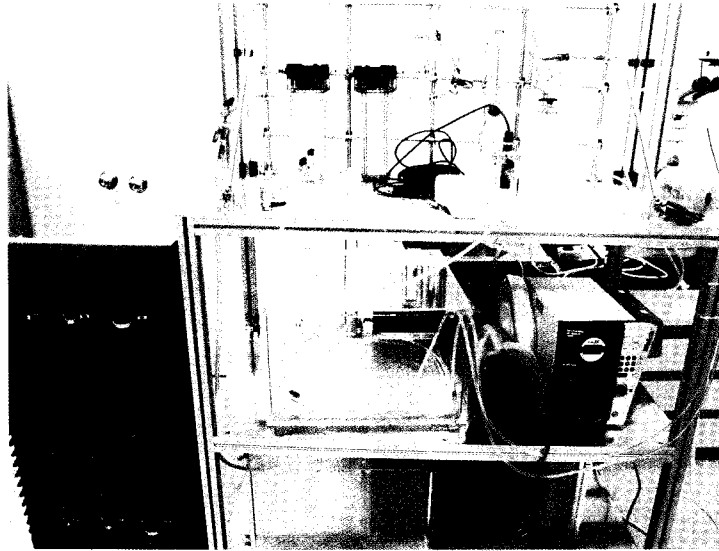


그림 15. 제작된 용존산소 분리 실험장치

수돗물을 사용하여 연속적으로 시료를 유입하였다. 유량과 진공펌프에 의한 진공도 변화에 따른 DO값의 영향을 그림 16에 나타내었다. 용존산소의 감소를 통해 산소가 분리됨을 알 수 있다. 유속이 각각 1, 1.5, 2L/min에서 진공 펌프에 의한 압력 감소에 따른 DO 측정 결과로 부터 압력이 감소함에 따라 DO가 감소하므로 압력 감소가 크면 분리 되는 산소의 양이 증가함을 알 수 있다. 유량이 증가할수록 DO값이 상대적으로 덜 줄어드는 것을 알 수 있었다. 유속이 증가하면서 체류시간이 줄어드는 영향으로 분석된다.

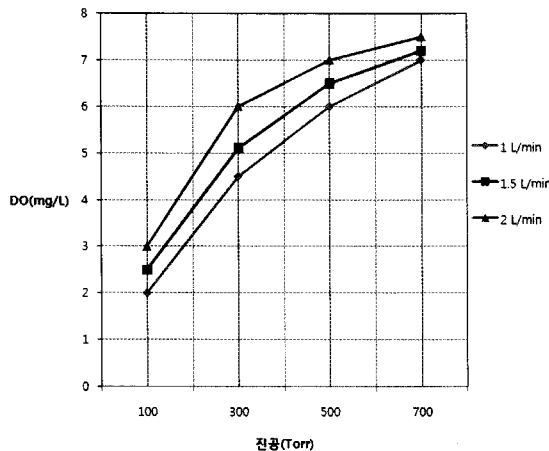


그림 16. 유량과 압력에 따른 DO변화

그림 17은 진공펌프를 이용하여 압력을 감소시켰을 때 분리되는 용존산소의 모습을 보여준다. 아크릴 저장조 내부를 물로 채우고 그 속에 밀면울 없앤 아크릴조를 넣고 상부에 고무마개를 끼운다. 그 고무마개에 튜브를 꽂아 넣은 후 진공펌프를 통해 압력을 감소시킨 후 용존산소가 분리되는 모습을 보여준다. 분리된 기체의 양을 측정할 수 있다.



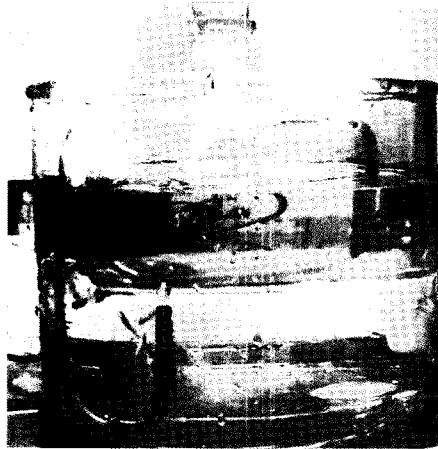


그림 17. 용존산소 분리

그림 18은 인공아가미모델을 보여준다. 측면의 중공사막을 통해 용존산소가 분리되어 인공아가미 모델의 내부로 유입되어 수중에서 호흡을 가능하게 한다. 측면의 중공사막을 통한 용존산소의 분리는 전술한 실험에서 확인되었으며 다만 그 양을 증가시키는 것이 향후 연구과제이다. 인공아가미기술이 개발되면 그림 19와 같이 다양한 응용이 가능하다. 휴대형 인공아가미기술이 개발되면 물놀이의 관련된 레저 활동의 안전도구로 활용이 가능하고, 수중 스쿠버다이버가 산소통 없이 수중에서 용존된 기체만으로 활동이 가능하다. 그 외 마이크로연료 전지<sup>[8]</sup>, 인공부레, 잠수함 그리고 인공 폐<sup>[9]</sup> 분야에 사용이 기대된다.

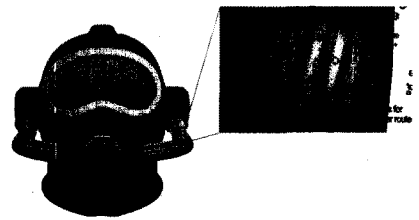


그림 18. 인공아가미 모델



그림 19. 인공아가미기술 응용분야

## 6. 결 론

본 논문에서는 인공아가미기술에 대해 기술하였다. 아가미의 구조와 기본 특성을 살펴 본 후 수중에서 용존산소를 분리하는 메커니즘을 분석하였다. 또한, 현재 진행 중인 용존산소 분리실험장치를 이용한 수중 용존산소의 감소특성



을 제시하였다. 압력이 감소함에 따라 용존산소량도 비례하여 감소함을 알 수 있었다. 중공사막에 공급되는 유량을 증가시키면 용존산소량의 감소가 둔화되는 특성을 나타낸다. 체류시간이 감소함에 따라 나타나는 현상으로 분석된다. 향후 용존산소의 분리량을 더 세밀하게 조사하고, 분리량을 증가하는 기술이 중요하게 연구되어야 할 것으로 고려된다. 또한, 분리막의 종류에 따른 분리특성을 잘 분석하여 휴대형으로 사용이 적합한 형태가 나올 것으로 기대된다. 휴대형 인공아가미기술이 개발되면 물놀이와 관련된 레저활동의 안전도구로 활용 가능하고, 수중 스쿠버다이이버가 산소통이 없이 수중에서 용존된 기체만으로 활동이 가능하다. 그 외 마이크로연료전지, 인공부레, 잠수함 그리드 인공 폐 분야에 사용이 기대된다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] <http://www.likeafish.biz/>
- [2] K. Nagase, F. Kohori, K. Sakai, "Development of a compact gill using concentrated hemoglobin solution as the oxygen carrier", J. of Membrane Science 215, pp. 281-292, 2003.
- [3] K. Nagase, U. Hasegawa, F. Kohori, "The photoresponse of a molybdenum porphyrin makes an artificial gill feasible", J. of Membrane Science 249, pp. 235-243, 2005.
- [4] <http://www.divingheritage.com/chambers.htm>
- [5] N.J. Shirtcliffe, G. McHale, M.I. Newton, C.C. Perry, and F.B. Pyatt, "Plastron properties of a superhydrophobic surface", Applied Physics Letters 89, pp. 104106-104107, 2006
- [6] N.J. Shirtcliffe, G. McHale, M.I. Newton, C.C. Perry, and F.B. Pyatt, "Intrinsically superhydrophobic organosilica sol-gel foams", Langmuir 19, pp. 5626-5631, 2003 MTEOS
- [7] M.R. Flynn and J.W.M. Bush, "Underwater breathing: the mechanics of plastron respiration", J. Fluid Mech. vol. 608, pp. 275-296, 2008
- [8] I. Ieropoulos, C. Melhuish and J. Greenman, "Artificial gills for robots: MFC behaviour in water", Bioinsp. Biomim. 2, S83-S93, 2007
- [9] G.B. Kim, S.J. Kim, M.H. Kim, C.U. Hong, H.S. Kang, "Development of a hollow fiber membrane module for using implantable artificial lung", J. of Membrane Science 326, pp. 130-136, 2009



허 필 우

· 한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부  
 선임연구원  
 · 관심분야 : 인공아가미기술, 마이크로유체소자기술  
 · E-mail : pwheo@kimm.re.kr