

진동형 중공사 모듈에서 증류수와 글리세롤용액의 압력손실과 산소전달의 특성

박재관, 김기범, 권대규*, 홍성출**, 정경락***, 이삼철****

전북대학교 화학공학과, 전북대학교 기계공학부*, 전북대학교 의대 미생물학교실**, 전북대학교 화학공학부·공학연구원 공업기술연구센터***, 한려대학교 신소재공학과****

Characteristics of Pressure drop and Oxygen Transfer in Actuate Hollow Fiber Membrane Modules

Jai-Koan Park, Gi-Beum Kim, Tae-Kyu Kwon*, Seong Tshool Hong**, Gyeong-Rak Jheong***, Sam-Cheol Lee****

School of Chemical Eng., Chonbuk National University, School of Mechanical Eng., Chonbuk National University*, Dept. of Microbiology, Medical School, Chonbuk National University**, School of Chemical Eng., Chonbuk National University · The Research Center of Institute of Technology, Engineering Research Institute***, Dept. of Advanced Materials Engineering, Hanlyo University****

서론

혈관 내 폐 보조장치(IVLAD)는 급성호흡부전(ARDS) 환자를 치료하는데 적용하기 위한 폐 보조장치이다. 이 장치는 자연적인 혈액흐름을 이용하여 부분적인 호흡보조에 사용하기 위한 장치이며 현재 많은 연구가 진행 중이다[1-3]. 이 장치가 충분한 산소공급을 하기 위해서는 많은 중공사가 혈관 내에 삽입되어야 한다. 그러나 사람의 혈관은 그 크기가 최대 3cm이므로 이 작은 직경의 공간에 많은 중공사를 삽입하게 되면 혈액의 흐름에 영향을 주기 때문에 심장에 무리를 주기 때문에 많은 중공사를 삽입할 수 없다. 그러므로 한정된 작용 공간에 혈액의 흐름에 큰 영향을 주지 않으며 산소전달을 향상 시킬 수 있는 방법을 연구할 필요가 있다. 그러나 아직까지 효과적인 기체교환을 충분히 하도록 설계되어진 보조장치는 없다. 그래서 본 연구에서는 중공사가 직경이 3cm의 관내에 삽입되었을 때 액체의 압력손실이 15mmHg이하의 최대 중공사 개수를 파악하고, 중공사와 용액이 접촉시 중공사의 표면과 용액사이에는 용액의 유속이 0이 되는 정체층이 형성되어 기체교환효율을 감소시키므로 정체층이 형성되지 않도록 하고 강제대류를 유도하기 위하여 중공사에 가진장치를 연결하였고, 중공사 모듈에서의 최대산소전달특성을 나타내는 가진주파수를 측정하여 장치의 특성을 평가하고자 하였다.

이론적 배경

압력손실(ΔP)와 유속(Q)의 관계는 2차식으로 나타낼 수 있으며, 다음 식과 같다.

$$\Delta P = a' \cdot Q^2 + b' \cdot Q \quad (1)$$

혈관 내 인공 폐에서 중공사가 삽입되어 있을 때, 용액(혈액)의 흐름을 나타내는 것은 Reynolds number(N_{Re})로 나타낸다. Reynolds number는 관성력과 점성력의 비로 나타낼 수 있다.

다공성 중공사막에 대하여 마찰손실(friction factor) f 는 다음과 같이 표현할 수 있다[4].

$$f = \frac{\tau_w}{\frac{\rho v^2}{2}} = \frac{4L}{\frac{\rho v^2}{2}} = \frac{d\Delta P}{2L\rho v^2} \quad (2)$$

여기서, v 는 자유흐름 영역에서의 평균속도, L 은 용액의 흐름 길이, d ($\frac{\epsilon}{1-\epsilon}d_0$)는 상당 직경, v 는 액체의 유속, D 는 확산계수, ν 는 액체의 운동점도, ϵ 는 장치의 기공도, d_0 는 중공사의 외경이다.

흐름 상태에서의 액체에 대한 산소전달 속도는 다음 식으로 설명할 수 있다[5,6].

$$N = K\Delta C \quad (3)$$

여기서 N 는 몰플럭스, ΔC 는 산소의 농도 차이이며, K 는 총괄물질전달계수이다. 총괄물질전달계수 K 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$K = \frac{Q}{A} \ln\left(\frac{[O_2]_{in}}{[O_2]_{out}}\right) \quad (4)$$

여기서 Q 는 액체의 유속, A 는 액체가 흐를 수 있는 단면적, $[O_2]_{in}$, $[O_2]_{out}$ 는 입구와 출구에서의 액체 내의 산소의 농도이다.

실험방법

자체 제작한 중공사막 모듈의 모형은 그림 1에 나타내었다. 모듈은 3cm의 아크릴관에 중공사 100개(type 1), 200개(type 2), 225(type 3), 300개(type 4), 450(type 5), 675개(type 6)를 U자 형태가 되도록 하였으며, 중공사의 총 길이는 120cm가 되도록 설계하였다. 중공사는 약 380 μm OD와 50 μm 두께의 미세다공성 폴리프로필렌 막(Oxyphane, Enka, Germany)을 사용하였다. 중공사의 기공은 약 4 μm 이며 중공사 표면의 약 45 %를 차지한다. 가진장치는 그림 1에서 나타낸 것과 같이 U자 형태의 중공사 가운데에 복합재료의 판을 연결하고 그 판에 가진장치를 연결하였다. 또 가진장치에서 발생하는 진동결과를 측정하기 위하여 압전센서를 부착하여 Dspace 사의 1104bard에서 신호를 얻어 컴퓨터 상에서 실시간으로 신호처리를 하여 가진 정도 및 주파수 특성 실시간으로 분석하였다. 또한 중공사 모듈에서의 압력손실을 측정하기 위하여 혈액과 유사한 점도를 나타내는 40% 글리세롤 용액[7]을 사용하였다. 모듈의 액체 입구와 출구에 Wet/Wet Differential Pressure Transmitter(Dwyer Instruments, Inc., Michigan City, IN, USA)를 연결하여 실시간 측정하였다. 진동형 중공사 모듈의 산소전달을 측정하기 위하여 그림 2와 같이 구성하였다. 사용된 용액은 3차 증류수를 사용하였으며 용액의 온도는 37°C를 유지하였으며 용액의 산소전달량은 DO meter(YSI Incorporated, Yellow Springs, Ohio, USA)를 이용하여 실시간 측정하였다. 용액의 유량은 3 ~ 6 ℓ/min 으로 하였으며 중공사는 0 ~ 40Hz의 주파수로 가진하였다.

결과 및 고찰

그림 3은 40% 글리세롤 용액의 유속에 따른 각각의 모듈에서의 압력차를 나타낸 그림이다. 직경이 3cm인 관 내에 삽입할 수 있는 중공사의 최대개수는 675개이었으며 중공사가 U자형태를 이루고 있으므로 실제 중공사의 개수는 1350개를 이루고 있다. 그리고 이 때의 압력차는 액체의 유속이 6L/min일 때 14.6mmHg이었다. 또한 그림에서 알 수 있듯이, 액체의 유속이 증가하면 압력차는 식 1에 의하여 2차 함수의 형태로 증가함을 보이고 있으며, 상수 a' 와 b' 는 type 1에서 0.17, 1.13, type 2에서 0.16, 1.31, type 3에서 0.16, 1.36, type 4에서 0.1, 1.78, type 5에서 0.06, 2.05, type 6에서 0.04, 2.3을 나타낸다.

그림 4는 글리세롤에 대하여 중공사 수의 변화에 따른 레이놀즈 수와 식 2에 의해 계산되어진 마찰손실과의 관계를 보여주고 있다. 각각의 모듈에서 레이놀즈 수가 증가하면 마찰손실은 선형적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 또한 일정한 레이놀즈 수에서 중공사의 개수가 증가하면 마찰손실

은 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그림에서의 직선의 기울기는 중공사 수의 변화에 따라 변하게 되고 중공사 모듈의 기하학적 구조의 차이에 의해 변하게 된다고 판단된다.

그림 5는 최대의 압력차가 15mmHg이하를 나타내는 type 6 모듈의 가진 주파수에 따른 증류수에 대한 산소의 전달속도를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 가진 주파수가 증가하면 산소전달 속도는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 가진 주파수가 35Hz까지는 증가하는 경향을 보이고 있으나, 35Hz 이후에는 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 이 주파수에서 최대 산소전달속도를 보여 주고 있다. 그러므로 이 주파수에서는 중공사에 연결된 가진 장치의 흔들림이 최대일 것이라 판단된다. 이와 같은 판단은 그림 6에서 확인할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 35Hz에서 검출되는 전압이 최대임을 보여주고 있으며, 각각의 유체 유동장 상태에서 고정판의 2차 고유진동수, 유체의 고유진동과 가진 주파수가 공진을 일으킴으로써 진폭이 크게 되고 그 진동 효율이 중공사 측에 전달됨으로써, 공진이 안 되었을 경우보다 기체 전달 효율이 크게 나타남을 알 수 있었다.

결론

본 실험에서 사용되어진 모듈 중, 15mmHg이하의 압력차를 유지하기 위하여, 직경이 3cm인 관내에 중공사는 U자형태로 관내에 1350개로 이루어져 있다. 각각의 모듈에 대한 마찰손실은 중공사의 개수가 증가하면 마찰손실은 감소함을 알 수 있었다. 실험결과 액체의 유속이 6L/min일 때 압력차가 14.6mmHg이었으며 4L/min일 때는 9.7mmHg의 압력차를 보여주고 있다.

진동에 의한 산소전달은 35Hz 영역에서 최대 산소전달속도를 보였다. 그 이유는 고정판의 고유진동, 액체의 유속에 따른 고유진동과 가진 주파수가 공진되는 영역이 35Hz이었으며 이 때 2차 진동이 발생하여 산소전달속도를 극대화한 결과라고 판단된다. 본 실험은 증류수에서 가진주파수에 따른 증류수에 대한 산소전달속도를 나타낸 결과이다. 실제 혈액에 응용하기 위해서는 실제 혈액에서 가진주파수의 변화에 따른 산소전달속도 효율의 추가연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2000-000-00385-0)지원으로 수행되었음. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Nodelman, V., Baskaran, H. and Ultman, J. S.: *Annals of Biomedical Engineering*, **26**, 1044(1998)
2. Federspiel, W. J., Lund, L. W., Bultman, J. A., Wanant, S., Matoney, J., Golob, J. F., Frankowski, B. J., Watach, M., Litwak, P. and Hattler, B. G.: *ASAIO J.*, **45**, 127(1999)
3. Zwischenberger, J. B., Anderson, C. M., Cook, K. E., Lick, S. D., Mockros, L. F. and Bartlett, R. H.: *ASAIO J.*, **47**, 316(2001)
4. Lee, D. R and Prak Simsoo : *Korean J. Chem. Eng.*, **18**(3), 277(2001)
5. Cussler, E. L. "Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems." Cambridge University: New York(1994)
6. Yang, M. C. and Cussler, E. L. : *AIChE J.*, **32**(11), 1910(1984)
7. Lee, S. C., Kim, K. B., Hong, S. C., Kim, M. H. and Jheong, G. R.: *J. Biomed. Eng. Res.*, **21**(3), 311(2000)

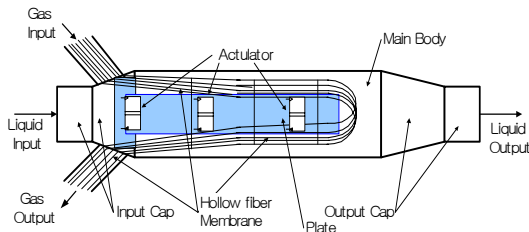


Fig. 1. Detail of the test module

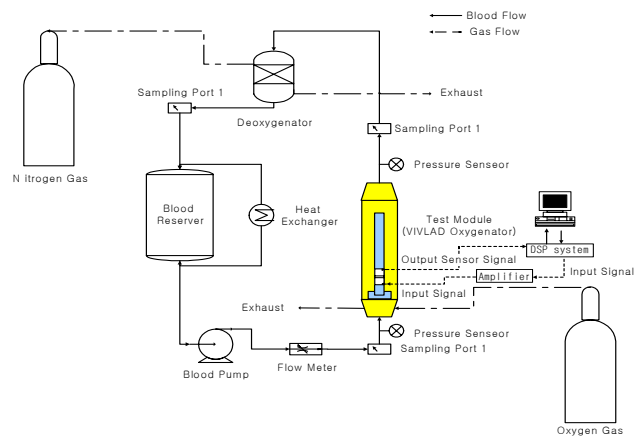


Fig. 2. The *in vitro* bench test system used for pressure drop and oxygen transfer of test modules.

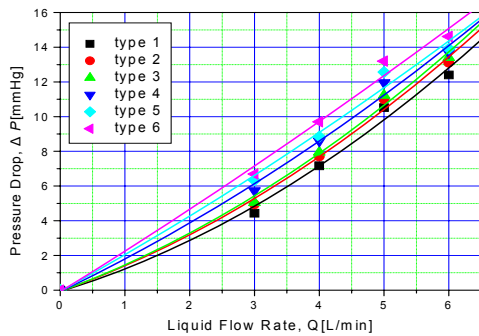


Fig. 3. Relation between of pressure drop to flow rate for the number of hollow fiber in 40% glycerol solution at 37°C

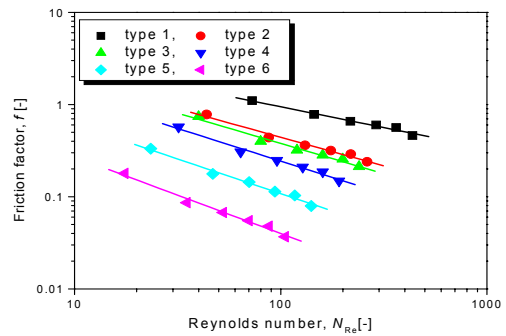


Fig. 4. Relation between $\log N_{Re}$ and $\log f$ for the number of hollow fiber in 40% glycerol solution at 37 °C

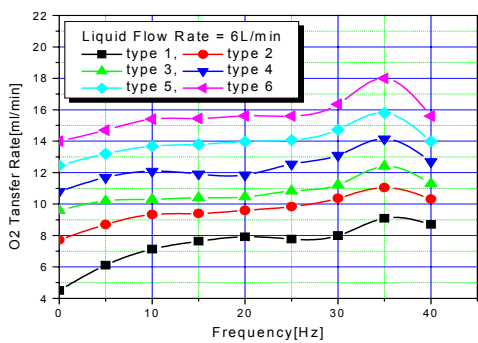


Fig. 5. Dependence of dissolved oxygen at various excited frequency. Liquid flow rate : 6L/min

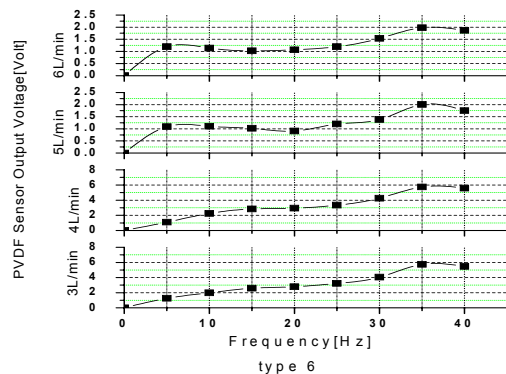


Fig. 6. PVDF Sensor Output Voltage at type 6