

In-vitro 유동장에서 진동형 폐 보조장치를 이용한 산소전달 효율의 향상

권대규*(전북대 MRC), 김기범(전북대 화학공학과), 이삼철(한려대 신소재공학과),
정경락(전북대 화학공학과), 이성철(전북대 기계공학부, 공업기술연구센터)

Enhancement of Oxygen Transfer Efficiency Using Vibrating lung Assist Device in *In-Vitro* Fluid Flow

T. K. Kwon(MRC, CNU), G. B. Kim(Dept. Chem. Eng., CNU), S. C. Lee(Dept. Advan. Mat. Eng., HLU),
G. R. Jheong(Dept. Chem. Eng., CNU), and S. C. Lee(Dept. Mech. Eng. CNU, RIIT)

ABSTRACT

This paper presents the enhancement of oxygen transfer efficiency using the vibrating intravascular lung assist device (VIVLAD) in *in-vitro* experiments for patients having chronic respiratory problems. The test section was a cylinder duct with the inner diameter of 30 mm. The flow rate was controlled by the pump and monitored by a built-in flow meter. The vibration apparatus was composed of a piezo-vibrator, a function generator, and a power amplifier. The direction of vibration was radial to the fluid flow. Gas flow rates of up to 6 l/min through the 120-cm-long hollow fibers have been achieved by exciting a piezo-vibrator. The output of PVDF sensor were investigated by various frequencies in VIVLAD. The experimental results showed that VIVLAD would be enhance oxygen transfer efficiency.

Key Words : Lung assistant device(폐 보조장치), Hollow fiber membrane(중공사 막), PVDF sensor(압전필름 센서), PZT actuator(PZT 액추에이터), Pressure drop(압력강하), Membrane oxygenator(막 산화기)

1. 서 론

최근 폐 보조장치에 적용하기 위해서 압전재료로 이용한 진동형 보조장치가 연구되고 있을 뿐만 아니라¹, 인공생체 기기의 거동을 분석하고 이를 적용하기 위한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 폐 보조장치의 경우, 현재 폐의 기체교환 장애로 인한 ARDS 환자에게 장기간 호흡을 보조하기 위하여 체외순환 막형 인공 폐(extra-corporeal membrane oxygenator, ECMO)라는 체외순환 장치에 관한 연구가 진행되고 있다. 최근에는 체내 삽입 기체 교환장치^{2,3}가 부분적인 호흡보조에 사용하기 위하여 활발하게 연구가 진행 중이다. 이제까지 막산화기의 산소전달 능력을 향상하는 것에 대하여 가장 성공적인 것은 유체의 압력 맥동을 적용한 Hattler와 Federspiel, 등^{4,5}이 개발한 Hattler Respiratory Support Catheter이다. 이는 혈관내 중공사막(hollow fiber membrane: HFM) 폐 보조장치

장치로 동물 시험에 적용하였다. 그러나, 이는 체내 삽입시 Ballon 타입으로 압력강하가 크게 발생하며 높은 주파수까지 진동특성을 분석할 수 없는 단점을 가지고 있다.

본 연구는 압전 지능재료(piezoelectric intelligent materials)를 이용하여 폐 보조장치의 산소전달 효율을 향상시키기 위한 진동모듈(vibration module)을 제안하여 기체 전달 효율을 극대화하는 능동적인 물질 전달 향상 방법으로 개발된 폐 보조장치의 산소전달 효율 향상시켰다. 이에 유동실험으로 신뢰성을 평가하고 축방향 유동장에서의 진동형 폐 보조장치 In-vitro 진동계측을 수행하였다.

2. 기초방정식과 모델링

압전재료(piezoelectric materials)는 인공 생체 기기에서 센서와 액추에이터(actuator)로 작용하므로 부

가적인 액추에이터와 센서(sensor)를 사용하지 않고도 직접 인공 생체장기에 부착하여 미세한 진동을 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 압전 재료는 센서와 액추에이터로 작용하므로 부가적인 액추에이터와 센서를 사용하지 않고도 직접 생체재료에 부착하여 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Table 1. Properties of materials

Property,	PVDF	PZT
ρ (kg/m ³)	1.78($\times 10^3$)	1.48
d31(pC/N)	23	-
g31(10 ⁻³)Vm/N	216	-
E(GPa)	2	5.0
ν 12	-	0.31

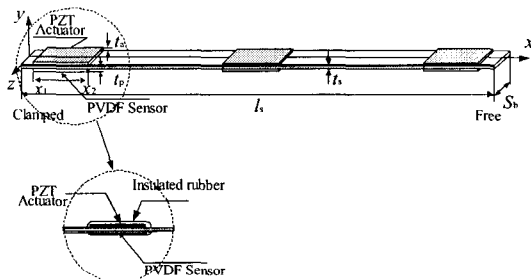


Fig. 1 Configuration of a cantilevered composite beam with piezo-film sensors and piezo-ceramic actuators.

본 연구의 테스트모듈은 단순지지 보에 압전 감지기로써 PVDF, 작동기로써 PZT 세라믹을 사용하였으며, 전체 개략도는 Fig. 1과 같다. 유체가 흐르거나 잠겨져 있을 경우에 유체의 방수효과를 위해서 실리콘으로 압전재료를 피복하고 절연 고무를 이용하여 절연하였다. 이러한 혈관내 폐 보조장치에서 중공사 모듈에 삽입된 압전재료의 구성방정식은 압전체의 압전효과를 정식화한 것을 이용하여 압전재료 식으로부터 전하량을 구하고 그에 따른 PVDF 센서 출력으로부터 검출신호를 유도할 수 있다. 즉, 압전재료는 등방성, 그리고 복합재 보는 순수 균형을 받는 Bernoulli-Euler 보로 가정하면, PVDF의 순방향 압전 효과에 의하여 전하량에 관한 식 (1)를 구할 수 있다.

$$q(t) = \int_A D_m; aA = \int_{x_1}^{x_2} Y_p d_{31} b \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} dx = Y_p d_{31} b [y'(x_2) - y'(x_1)] \quad (1)$$

여기서, b 는 압전재료의 폭이며 $y'(x)$ 는 정규화된 빔의 모달함수이다. 식 (1)을 이용하여 전압에 관한 식을 유도하면,

$$v_p(t) = \frac{q(t)}{C_p^s} = K_s [y'(t, x_2) - y'(t, x_1)] \quad (2)$$

이 된다. 여기서, $K_s = Y_p d_{31} b y_c / C_p^s$ $v_p(t)$ 는 감지기 출력전압이며, C_p^s 는 감지기의 정전용량이다.

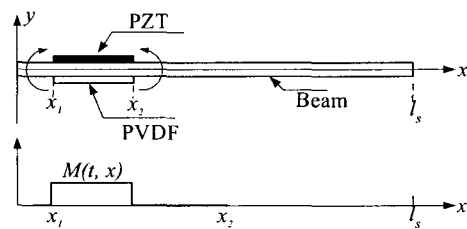


Fig. 2 Moment applied through PZT actuator

다음으로 유동장 상태에서 장착되어 있는 단순지지된 보로 구성된 폐 보조장치 작동기에 관한 식을 유도하면 작동기가 보 구조물 일부에 부착될 때, 인가된 전압 $V_a(t)$ 에 관한 보 전체의 전압분포 $V(x, t)$ 는 식 (3)과 같다.

$$V(x, t) = [H(x-x_1) - H(x-x_2)] V_a(t) \quad (3)$$

여기서, $H(\cdot)$ 는 Heaviside함수이다. 굽힘 중심축부터 거리의 계산에서 구조물의 일부분에 부착된 압전체의 영향은 무시하였다. 전압이 보에 작용할 때 Fig. 2의 발생 모멘트는 식(4)와 같다.

$$M(x, t) = \int_{x_1}^{x_2} \sigma_1 b z dz \quad (4)$$

작동기에 의하여 발생하는 모멘트는 또한, 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$M(t, x) = K_a v_p(t) [y'(x_2) - y'(x_1)] \quad (5)$$

여기서, $K_a = \frac{1}{2} b d_{31} Y_p (l_a + l_b)$ 이다. 이러한 PZT 액추에이터에 전압 인가는 압전 재료를 이용한 가진 장치의 작동기에 부착된 PZT 액추에이터로부터 모멘트가 발생하여 유동장 상태에서 중공사로 묶여진 보를 가진시킬 수 있다. PZT 액추에이터에 DC 전압을 인가하고 각각의 인가전압의 증폭과 주파수를 변화시키면서 유동장 상태에서 나오는 PVDF 센서로부터의 출력신호를 검출하고 그에 따른 주파수 해석이 가능하며, 적용 가능한 폐 보조장치의 산소전달 효율에 대한 유동효율을 평가할 수 있다.

3. 실험장치

3.1 실험장치 소개

Fig. 3은 압전재료를 이용한 진동형 가진 장치가 삽입된 폐 보조장치의 테스트 모듈의 개략도를 표시하고 있다. 새롭게 개발한 압전형(piezoelectric-type) 폐 보조장치는 압전세라믹(piezoceramic)과 압전센서(piezosensor)가 부착된 단순 지지된 보(beam)에 중공사가 연결되어 있는 모듈이다. 모듈은 30 mm의 아크릴 관에 중공사를 U자 형태로 되도록 하였으며, 단순지지 보에 묶여진 상태로 구성된 중공사의 총 길이는 120cm가 되도록 설계하였다. Table 1은 적용된 중공사막 모듈의 형태 및 사양을 표시하고 있다.

Fig. 4는 *In-vitro* 유동장 실험으로써 고정된 가진 장치의 일부분을 구성하여 수행한 진동형 폐 보조장치의 블록선도이다. 실험 장치는 아크릴 수지 액체 저장조에서부터 액체가 흘러 Biopump Model(COBE Perfusion System)를 사용하여 흐름속도를 조절하였고 실험하는 동안의 온도는 순환항온조와 열교환기를 사용하여 36±1 °C로 유지하였다. 또한 사용된 용액은 3차 증류수 및 소 혈액을 사용하였다.

본 연구에서는 이러한 신호검출 가진 전압을 인가하기 위해서 dSPACE사의 DSP시스템(DSP TMS 320C 40)을 이용하여 가진 입력 전압을 생성하였고, 진압증폭기를 이용하여 감지기/작동기가 독립적으로 인가할 수 있도록 구성하였다.

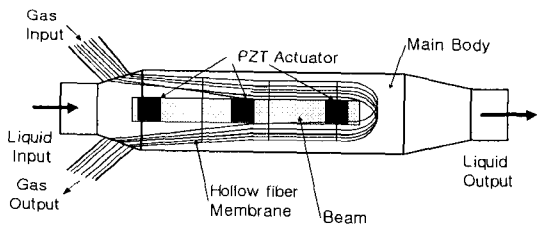


Fig. 3 Detail of the test module.

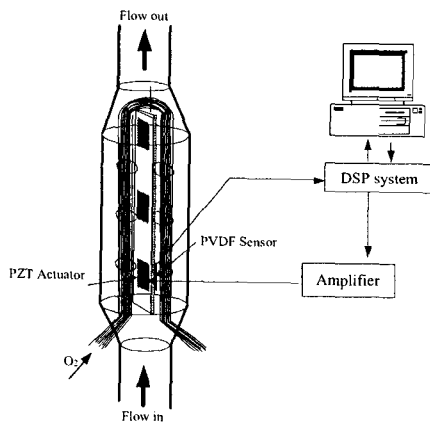


Fig. 4 Experimental set-up of test module with magnitude system

Table 1. Dimensions of hollow fiber modules

	No. of hollow fiber membrane	Packing density	Frontal area (cm ²)
Type 1	100	0.03	6.84
Type 2	200	0.06	6.61
Type 3	300	0.10	6.39
Type 4	450	0.14	6.05
Type 5	675	0.22	5.54

4. 결과 및 고찰

Fig. 6은 중공사 모듈이 중공사 225개 있을 경우의 액체 흐름에 따른 압력강하를 표시하고 있다. 본 연구는 원통형 셀 안의 중공사 축을 결합한 보의 고유진동수의 변화를 고찰하고, 유체가 포함되어 있는 지능형 폐 보조장치의 다양한 형태의 진동 발생기를 설계하여 유체의 유동장 상태에서의 중공사의 가진 형태 평가 및 유체의 흐름을 고려한 중공사의 진동특성 평가를 수행한 것이다. 중공사 모듈이 중공사를 225개 함유되었을 경우 예측한 값과 실험값을 비교 분석하였을 경우, 잘 일치하고 있으며 6 l/min의 흐름 속도에서 14.5 mmHg의 압력 강하를 나타내고 있다. 본 혈액의 압력 강하의 양이 대정맥에 VIVLAD를 적용하기 위하여 15mmHg의 이하로 유지되어야 한다는 조건을 만족함을 확인하였다. Fig. 7은 가진 주파수와 전달 유량에 따른 혈관내 폐 보조 장치의 산소기체 전달효율을 표시하고 있다.

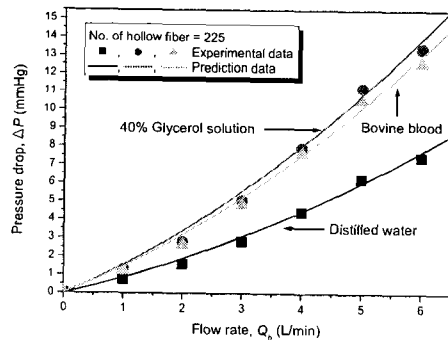


Fig. 6 Relationship between pressure drop and flow-rate characteristics

각각 압전세라믹과 압전센서가 부착된 단순지지된 보에 정현파 DC전압을 가진할 경우, 가진을 안할 경우보다 기체전달 효율이 35%정도 향상됨을 알 수 있다. 이 결과로부터 새롭게 설계했던 압전형 가진 장치에 의한 폐 보조장치의 신뢰성을 얻을 수 있었다.

Fig. 8은 최대 산소전달속도를 나타내는 모듈 Type 5 경우, 주파수 응답함수에서 가진 주파수에 따른 PVDF 센서의 출력전압의 진폭을 표시하고 있다. 그림에서 가진 주파수가 7Hz 영역의 주파수에서 최대 흔들림을 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 혈액에 대한 산소전달속도 향상을 위하여 가진 장치를 활용하는 것은 효과적인 방법이라 판단된다.

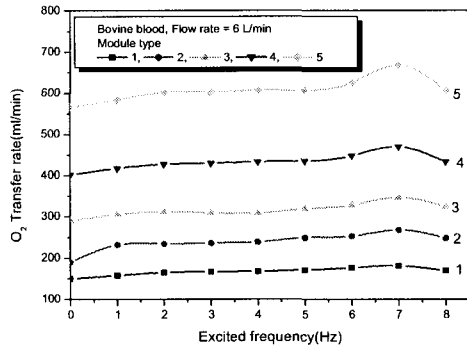


Fig. 7 Oxygen transfer rate for VIVLAD using bovine blood at various excited frequencies.

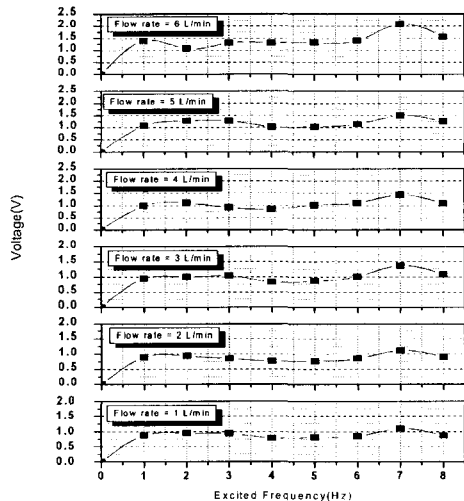


Fig. 8 Amplitude of PVDF sensor output at the system for various excited frequencies using bovine blood.

4. 결론

본 연구는 원통형 관 안의 중공사 막과 얽어진 보의 고유진동수 변화를 고찰하였고, 유체가 포함되어 있는 지능형 폐 보조장치의 유동장 상태에서의 중공사의 가진 형태 평가 및 유체의 흐름을 고려한 중공사의 진동특성 평가를 수행하였다. 6 lpm 유동속도의 유체 유동장에서 중공사에 연결되어 있는 보에 정현파 7Hz 영역의 주파수로 가진을 인가함으로써 중공사의 최대 산소전달 효율을 얻었고, 시간응답 및 주파수 해석으로 개발한 새로운 폐 보조장치의 특성은 신뢰성을 얻었다.

후 기

본 연구는 보건복지부 의료공학융합기술개발사업(02-PJ3-PG3-31401-0009)지원으로 수행되었음. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. S. C Lee, et al., "Designing a Vibrating Intravascular Lung Assist Device(VIVLAD)," ASAIO J., Vol. 48, No. 2, pp. 132, 2002.
2. Vaslef S. N. et al, "'Development of an Intravascular Lung Assist Device,'" ASAIO J., Vol.35, pp. 660-664, 1989.
3. Imai H, et al. "Rate of Thrombus Accumulation on Intravenacaval IVOX Devices Explanted from Human Clinical Trial Patients with Acute Respiratory Failure," Artificial Organs, Vol. 18, No. 11, pp.818-821, 1994.
4. Hattler B. G. et al., "'A Respiratory Gas Exchange Catheter: In-vitro and In-vivo Tests in Large Animals,'" The J. of Thoracic and Cardiovascular Surgery, Vol. 124, No. 3, pp. 520-530, 2002.
5. Federspiel W. J. et al., "Ex-vivo Testing of the Intravenous Membrane Oxygenator(IMO), ASAIO, J., Vol. 46, pp. 261-267, 2000.