

압전섬유를 이용한 파이프 내 유속 측정과 에너지 수확 Velocity measurement of in-pipe flows and energy harvesting using macro fiber composite

*김성호¹, 이경수¹, #민병권¹, 이상조¹

*S. H. Kim, K. S. Lee, #B. -K. Min(bkmin@yonsei.ac.kr), S. J. Lee,

¹ 연세대학교 기계공학과

Key words : Flowmeter, Macro fiber composite, Cantilever, Piezoelectric element

1. 서론

압전섬유(macro fiber composite, MFC)는 다른 압전소자에 비해 큰 구동 범위와 높은 민감도로 인하여 액추에이터(actuator) 및 센서 적용에 장점을 지니고 있다. 최근에는 압전섬유를 이용한 에너지 수확(energy harvesting) 기술에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 압전섬유를 이용하여 파이프 내부의 유속을 측정하고, 동시에 유속에 의해 생성되는 에너지를 수확하고자 한다. 장애물과 압전섬유가 부착된 외팔보(cantilever)를 이용하여 실험기기를 개발하고, 유속 측정 및 에너지 수확의 가능성을 확인해 보고자 한다. 또한 유속-에너지 수확에 대한 이론적 모델을 실험을 통해서 평가해 보고자 한다.

2. 이론

2.1 유속 측정

파이프 내의 유체 유동 중에 장애물이 있으면, 그 장애물 뒤쪽으로 와류가 생성되는데, 이 때 와류의 생성 주파수는 유속에 비례한다.

와류 생성 주파수 f 는

$$f = \frac{St \cdot v}{D} \quad (1)$$

로 표현되고, St 는 Strouhal 수, D 는 장애물의 폭, v 는 장애물에 충돌하는 유속을 나타낸다. St 는 약 0.2로 거의 일정하다.¹ ($Re < 5 \times 10^5$)

Fig. 1에서와 같이, 장애물에 의해 발생된 와류는 압전섬유가 부착된 외팔보를 가진지게 된다. 이때 외팔보에 작용되는 가진력은 유속에 의해 결정된다. 장애물에 의해 생성되는 와류는 카르만 와열(Karman vortex street)을 이

루고, 각 와류는 랭킨 와류 (Rankine vortex)를 이루며, 외팔보에 접촉하는 와류의 속도 v_{rot} 는 유속의 0.6배로 가정한다.² 베르누이 방정식 (Bernoulli's equation)을 이용하여 속도차에 의한 외팔보 양면의 압력차를 구한다. 이 때 압력차는 유속의 제곱에 비례한다. 따라서 가진력은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$F = kb\rho DL \left(\frac{4R-D}{8R^2} \right) v^2 \quad (2)$$

F 는 가진력, b 는 외팔보의 너비, ρ 는 유체의 밀도, L 은 외팔보의 길이, R 은 와류 중심에서부터 외팔보까지의 거리, k 는 비례상수를 나타낸다.

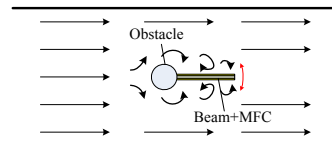


Fig. 1 Schematic diagram of device concept

2.2 에너지 수확

압전섬유는 외팔보에 부착되어 유체의 와류 흐름에 의해 외팔보가 진동할 때 생기는 응력으로 전기 에너지를 생성한다.

외팔보는 1st 모드(mode)로 진동하는 것으로 가정한다. 압전소자가 부착된 외팔보의 진동 지배 방정식은³

$$M\ddot{r}(t) + K r(t) + C\dot{r}(t) + \Theta V_p(t) = F(t) \quad (3)$$

$$-\Theta \dot{r}(t) + C_p \dot{V}_p(t) = -I(t) \quad (4)$$

이고, M 은 질량, K 는 강성계수, C 는 감쇠계수를 표현하고, Θ 는 커플링 계수, F 는 가진력, C_p 는 피에조 캐패시턴스, V_p 는 압전전압, $r(t)$ 는 시간

에 따른 외팔보 끝단 변위를 나타낸다. 사용된 각 계수는 선행연구자료⁴을 참고하여 결정한다. 와류에 의한 압전전압은 싸인파형으로 형성되고 최대 전압과 전력은 다음과 같다. ω 는 가진 주파수를 나타낸다.

$$V_{\max} = \frac{2\omega\Theta R}{2\omega C_p R + \pi} \times \quad (5)$$

$$P = \frac{V_{\max}^2}{2R} = \frac{\left(\frac{2\omega\Theta R}{2\omega C_p R + \pi}\right)^2}{2R} \times \frac{F_0^2}{\left\{K - M\omega^2 - \frac{2\omega\Theta^2 R}{2\omega C_p R + \pi}\right\}^2 + \left\{C\omega + \frac{4\omega\Theta^2 R}{(2\omega C_p R + \pi)^2}\right\}^2} \quad (6)$$

3. 실험 및 결과

압전전압은 Fig. 2와 같은 장치를 구성하여 측정하였다. 직경 50mm의 원형 장애물을 설치하여 46.7g의 끝단질량이 부착된 외팔보에 와류를 발생시켰고, 유속과 부하저항을 변화시키며 전압을 측정하였다. 실험에 사용한 장치의 파라미터는 Table 1과 같다.

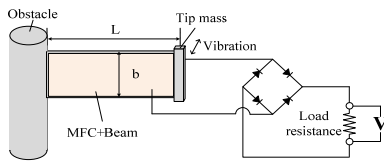


Fig.2 Schematic diagram of electric circuit

Table 1 Properties of piezoelectric device

	Beam	MFC
Length(L)	113mm	85mm
Width(b)	40mm	28mm
Thickness(h)	1mm	0.3mm
Young's modulus	190GPa	29.4GPa

실험결과, Fig. 3에서 보듯이 유속이 증가할수록 압전전압이 증가하였고, 최대 전력은 유속 2.5m/s, 부하저항 1MΩ에서 25μW를 얻었다.

4. 결론

본 연구에서는 압전섬유를 이용하여 유속 측정과 에너지 수확을 동시에 수행하는 기기를

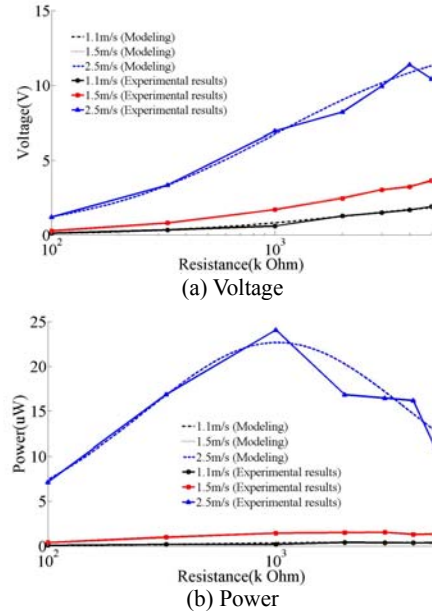


Fig.3 Comparison of the predicted and measured data

개발하고, 개발된 기기를 통하여 유속-에너지 수확모델을 평가하였다. 그 결과 와류에 의해 생성되는 가진력을 통하여 유속측정 및 에너지 수확이 가능함을 확인하였고, 이론적 모델의 실제 실험값과의 오차가 10%미만임을 알 수 있었다. 따라서 본 시스템은 파이프 내의 자가 발전 유속센서 등으로 적용이 가능할 것으로 보인다.

참고문헌

1. Uwe F., Michael K., Helmut E., "A new Strouhal-Reynolds-number relationship for the circular cylinder in the range $47 < Re < 23 \times 10^5$," Physics fluids, Vol. 10, No. 7, 1998
2. Muk C. O., Torbjørn U., Lars E. Hol-medal, Dag M., Bjørnar P., "Numerical simulation of flow around a circular cylinder close to a flat seabed at high Reynolds numbers using a k-ε model," Coastal Engineering 57, 931-947, 2010
3. Shu, I C Lien, "Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems," Smart Mater. Struct. 15, 1499-1512, 2006
4. Sodano H. A., Park G., Inman D. J., "Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting," Strain 40, 49-58, 2004