

수중에서 퍼널형 macro fiber composite 에너지 하베스터의 에너지 수확 특성

A study on the underwater energy harvesting characteristics of a funnel type macro fiber composite energy harvester

이종길,[†] 안진효²

(Jongkil Lee^{1†} and Jinhyo An²)

¹안동대학교 기계교육과, ²안동대학교 대학원 정밀기계공학과
(Received 15 November, 2022; accepted 12 December, 2022)

초 록: 본 연구에서 제안한 에너지 하베스팅 장치는 입구가 넓고 출구가 좁은 퍼널형 에너지 하베스터(Funnel Type Energy Harvester, FTEH)에 Macro Fiber Composite(MFC)가 외팔보 형태로 장착되어 있는 구조로서 MFC의 구조를 변화시켰을 때 FTEH에 수확하는 에너지양의 특성을 이론과 실험을 통하여 분석하였다. MFC의 길이를 50% 증가시켰을 때 진동 변위는 3.5배 증가하였고, 두께를 75% 감소시 30.9배 증가하였다. 수조 실험에서 최대 전력량은 스파이럴 스크루가 장착된 상태의 유연한 지지대에 수직으로 설치된 MFC가 스파이럴 스크루가 없고 견고한 지지대에 수평으로 설치된 경우보다 약 5배 정도 높았다. FTEH에 최적저항 4,010 k Ω 을 적용하여 유속 0.24 m/s일 때 FTEH의 출력을 350 s 동안 커패시터에 에너지를 저장하면 4 $\mu\text{W}\cdot\text{s}$ 에 도달하였다. 빠른 유속으로 유연한 지지대에 수직으로 설치된 대면적 MFC의 커패시터 충전 시간을 길게 하면 충전 에너지를 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

핵심용어: 수중 에너지 수확 측정, 퍼널형 에너지 하베스터, Macro Fiber Composite (MFC), 유체 유기 진동

ABSTRACT: In this paper, it was investigated how the amount of energy harvesting will be varied from the FTEH which has inlet area is wider than outer area and attaching cantilever type MFC (Macro Fiber Composite) using by theoretical and experimental approaches. When MFC length increased 50% vibration displacement also increased 3.5 times. When thickness decreased vibration displacement increased 30.9 times. In underwater tank experiments FTEH with spiral screw, flexible support, vertical direction fabrication cases showed maximum energy harvesting more 5 times than the case of MFC installed horizontally without spiral screws and on rigid supports. When the flow speed of 0.24 m/s FTEH's optimal resistance applied 4,10 k Ω , energy storage in the capacitor was measured 4 $\mu\text{W}\cdot\text{s}$ during 350 seconds. It was confirmed that the charging energy can be increased by lengthening the capacitor charging time of the large-area MFC installed vertically on the flexible support at high flow speed.

Keywords: Underwater energy harvesting measurement, Funnel Type Energy Harvester (FTEH), Macro Fiber Composite (MFC), Flow induced vibration

PACS numbers: 43.58Gn, 43.58Bh

1. 서 론

수중 음향 센서는 음향을 탐지하는데 음향 신호의 송수신을 위하여 반영구적으로 안정적인 전원 공급

이 필요한데 이를 위하여 수중 에너지 하베스터의 개발 필요성이 대두되었다. 수중에서 유체 흐름을 이용한 에너지 하베스터는 주로 압전체의 진동을 이용하여 에너지 수확을 하고, 수중에서 원통형 혹은

[†]Corresponding author: Jongkil Lee (jlee@anu.ac.kr)

Mechanical Engineering Education, Mechanical Engineering Education, Andong National University, 1375, Gyeongdong-ro, Andong-si, Gyeongsangbuk-do 36729, Republic of Korea

(Tel: 82-54-820-5487, Fax: 82-54-820-6379)



Copyright©2023 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

케이블 주위를 지나는 유체는 유체 유기 진동을 일으키며 이를 이용한 에너지 수확 장치들이 많이 연구되었다.^[1-8] Lee *et al.*^[1]은 PVDF(polyvinylidene fluoride)를 이용한 퍼널형 에너지 하베스터(Funnel Type Energy Harvester, FTEH)를 고안하고 유속에 따른 FTEH의 에너지 수확량을 실험으로 검증하였다. Lee *et al.*^[1]이 고안한 FTEH는 유체 유입 입구 측의 단면적이 출구 측의 단면적보다 넓은 형태로 제작되어 출구 측에서의 유속을 빠르게 하는 효과를 가지고 있다. 실제 에너지 수확은 끝단에 설치된 외팔보 형태의 압전체의 진동에 의하여 발생되는데 압전체의 형태는 주로 PVDF 혹은 Macro Fiber Composite(MFC)가 주로 사용된다.^[2,7,8]

Mehmood *et al.*^[3]은 케이블에 고정된 원형 실린더를 수직하여 흐르는 유체에서 생기는 와류 유동을 이용하여 압전체에서 발생하는 에너지를 레이놀즈수에 따라 전력량을 계산하였다. Dai *et al.*^[4]은 와류 유기진동을 이용한 압전형 에너지 수확 장치를 연구하였는데 유속이 1.2 m/s 근처에서 최대 전력이 수확됨을 연구하였고, Grouthier *et al.*^[5]은 원형 케이블에서 와류 유기 진동으로 인한 최적 에너지 수확을 연구하여 긴 케이블을 활용한 에너지 수확 장치의 효율성을 증명하였다. Song *et al.*^[6]은 원통의 원주 방향에 수직으로 설치된 압전형 외팔보가 와류 진동에 의한 에너지 수확을 연구하였다. References [3] ~ [6]은 원통형 물체의 주위를 흐르는 유체의 와류 진동에 의한 에너지 수확을 제안하였고 압전 재료를 공통으로 이용하였다. 그러나 Erturk와 Delporte^[7]과 Shan *et al.*^[8]은 기존의 압전 재료를 사용하는 대신 MFC를 이용한 에너지 수확 장치를 제안하였다. Erturk와 Delporte^[7]은 수중 지느러미 형태의 얇은 MFC 외팔보 꼬리에서 20시간 동안 저장한 에너지는 2.5 mAh임을 도출하였다. Shan *et al.*^[8]은 유속 0.5 m/s에서 원통 주위를 맴돌아 와류 유동을 형성한 유체가 끝단이 고정된 외팔보형 MFC를 진동시켰을 때 1.32 μ W의 전력을 수확할 수 있음을 연구하였다.

본 연구에서는 Lee *et al.*^[1]의 FTEH 모형에서 압전 재료로 MFC를 독창적 방법으로 설치하고 MFC의 두께, 길이, 지지대의 유연성, 스파이럴 스크루의 유무, 유체 속도 등의 변화에 따른 에너지 수확 성능을 이

론과 실험을 통해 검증하였다. MFC형 FTEH의 에너지 수확을 향상시킬 수 있는 회로 설계를 통해 제안된 하베스터의 유용성을 검증하였다. 본 연구 결과는 수중 센서의 안정적인 전원 공급 장치 설계에 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

II. MFC를 이용한 FTEH의 에너지 수확 수치 해석

Lee *et al.*^[1]의 FTEH 모형은 Fig. 1에서와 같이 기본적으로 베르누이의 원리를 활용한 것이다. 단면적이 넓은 곳에서 단면적이 좁은 곳으로 유체가 흐르면 유체의 속도는 높아지나 압력은 낮아져서 유체가 빠른 속도로 출구를 빠져나가게 된다. 출구 쪽에서 빠져나간 유체는 단면적이 좁은 곳에서 이론적으로 단면적이 무한히 넓은 쪽으로 흐르면서 여기에 외팔보 형태로 장착 되어 있는 MFC에 와류 유동을 일으키게 된다. 와류 유동은 유체의 유동이 불규칙하여 MFC에 가진 진동으로 작용하게 되고, 이것으로 인하여 MFC의 진동을 더욱 많이 유발하여 진동 변위를 증가시켜 이에 비례하는 전압이 발생하게 되는 원리이다.

MFC의 변형률에 비례하여 FTEH의 에너지 수확량은 비례한다. MFC의 변형률은 와류 유동으로 인해 결정되며, 와류의 빈도는 Strouhal 수에 의해 결정된다. 일반적으로 압전체에 외부 유동에 의한 가진력이 가해질 때 발생하는 진동 변위와 발생 전압의 관계식은 다음과 같다.^[2-5]

$$\ddot{x} + a_1 u_r^{-1} \dot{x} + a_2 u_r^{-2} x - u_r^{-2} \ddot{v}_e = a_3, \quad (1)$$

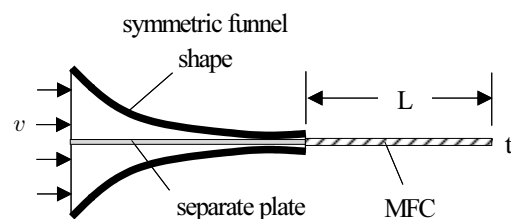
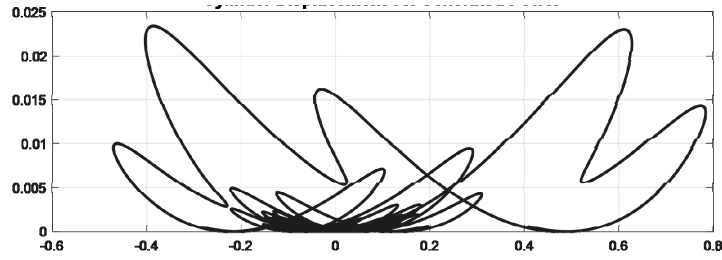
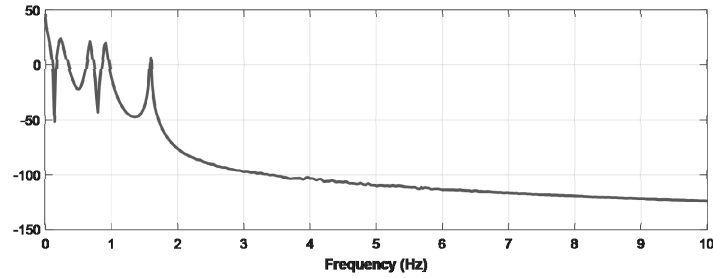


Fig. 1. Schematic diagram of the FTEH for numerical simulation (MFC length is L, thickness is t, flow velocity is v).



(a) Generated power (horizontal axis: non-dimensional displacement, vertical axis: non-dimensional generated power)



(b) Frequency spectrum of the generated power [horizontal axis: frequency (Hz), vertical axis: magnitude (dB)]

Fig. 2. Generated power and its frequency spectrum.

Table 1. Material physical properties for several MFC.

Physical properties	Material properties of the MFC
Young's modulus, E	31.20 GPa
Shear modulus, G	5.12 GPa
Possion's ratio, ν	0.303
Material density, ρ	5115.9 kg/m ³

$$\tilde{v}_e + \mu_1 \tilde{x} + \mu_2 u_r^{-1} \tilde{v}_e = 0. \quad (2)$$

Eqs. (1)과 (2)에서 \tilde{x} 는 MFC의 진동 변위, \tilde{v}_e 는 유기되는 전압을 나타내며, a_1, a_2, a_3 와 μ_r, μ_1, μ_2 는 주파수와 속도에 따라 정해지는 변수이다. Fig. 2에는 Eqs. (1)과 (2)에서 초기조건이 모두 0일 때 발생하는 MFC의 무차원 전력 발생량과 그것의 주파수 스펙트럼을 보였다. Fig. 2(a)에서와 같이 MFC의 진동 변위가 클수록 발생하는 전력량은 비례하여 커짐을 알 수 있다. Fig. 2(b)에서와 같이 무차원 전력 발생량의 변화 추이는 2 Hz 이하의 진동수에서 변화함을 알 수 있다.

FTEH에 발생하는 전기 에너지는 실제 Fig. 2에서와 같이 캔틸레버형의 MFC의 진동 변위에 비례하여 나타날 것이기 때문에 MFC를 FTEH에 Fig. 1과 같이 장착하고 유속과 MFC의 설계 변수를 변화시켰을 때 발생하는 진동 변위를 상용 프로그램(ANSYS)을 이

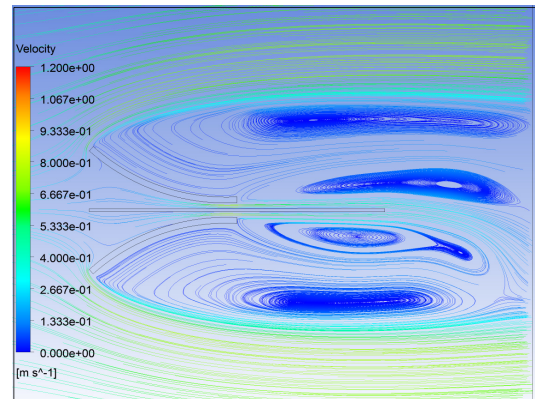


Fig. 3. (Color available online) Velocity distribution of the FTEH at the flow speed of 0.40 m/s.

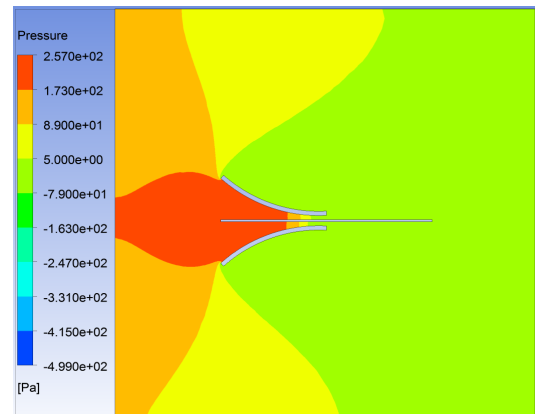
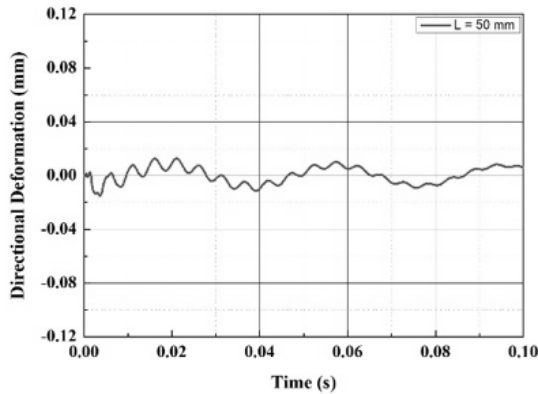
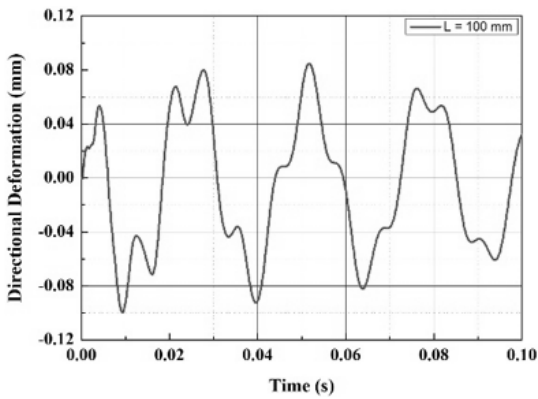


Fig. 4. (Color available online) Pressure distribution of the FTEH at the flow speed of 0.40 m/s.



(a) L = 50 mm case



(b) L = 100 mm case

Fig. 5. Directional deformation according to the MFC length, (a) L = 50 mm, (b) L = 100 mm.

용하여 수치해석 하였다. 수치해석을 위하여 사용한 MFC의 물성치를 Table 1에 나타내었다.

FTEH에 유체 유기 진동으로 인한 와류 형성을 보기 위하여 Fig. 3 및 Fig. 4에는 유속이 0.40 m/s일 때 MFC형 FTEH에 발생하는 속도 분포와 압력 분포를 보였다. Fig. 3에서와 같이 외팔보 상부와 하부에 와류 유동 현상이 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 4에는 FTEH의 입구 쪽에 압력이 높고 출구 쪽에 압력이 낮게 나타남을 알 수 있다. 이는 FTEH의 형상에 종속된다고 할 수 있는데 Figs. 3과 4에서의 속도 분포 변화와 압력 분포 변화가 심할수록 MFC의 변형률이 높아져 Eqs. (1), (2)처럼 높은 전압이 유도될 수 있다.

수중에서의 평균 해류 유속을 $v = 0.24$ m/s로 고정시킨 상태에서 MFC의 길이(L)를 50 mm, 75 mm, 100 mm로 변화시켰을 때 진동 변위의 변화를 알아보기 위해 Fig. 1의 모델을 시뮬레이션 하였다. Fig. 5의 (a)와 (b)는 각각 MFC의 길이가 50 mm, 100 mm일 때 발

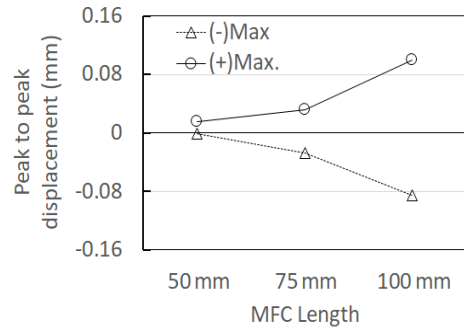
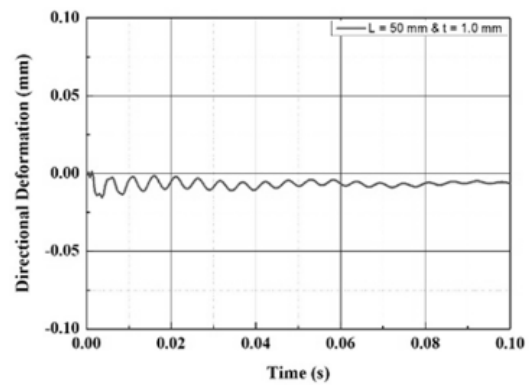
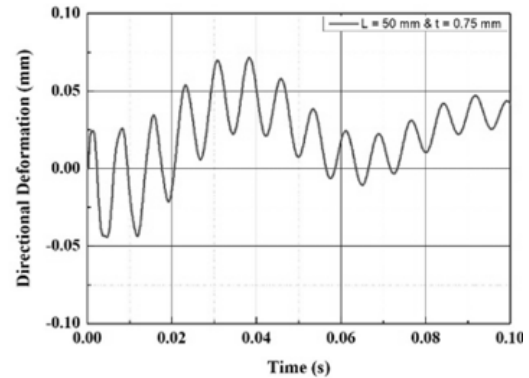


Fig. 6. Peak to peak directional deformation according to the MFC length.



(a) t = 1.0 mm case



(b) t = 0.75 mm case

Fig. 7. Directional deformation according to the MFC thickness, (a) t = 1.0 mm, (b) t = 0.75 mm.

생되는 진동 변위를 나타낸 것이다. 또한 Fig. 6은 이들 길이의 변화에 따른 진동 피크값의 변화를 보인 것인데 MFC의 길이가 길수록 진동 변위가 증가하여 더 많은 양의 에너지를 수확할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 평균 해류의 속도인 0.24 m/s에서 MFC의 경우 길이를 50 % 증가시켰을 때 진동 변위는 최대 변위차 기준으로 3.5배 증가하였고, 길이를 100 % 증가시킬

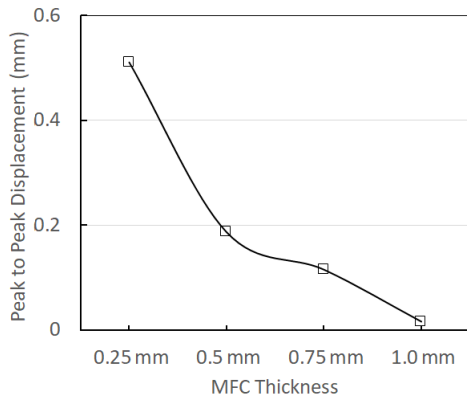


Fig. 8. Peak to peak directional deformation according to the MFC thickness.

에 따라 진동 변위는 11.1배 증가함을 알 수 있다.

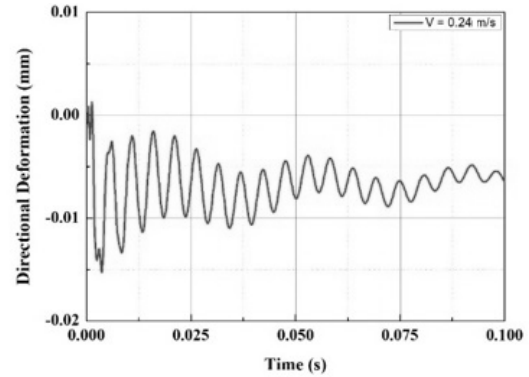
유속 0.24 m/s에서 Fig. 1에서 MFC의 두께(t)를 0.25 mm ~ 1.0 mm로 변화시켰을 때 진동 변위의 변화를 알아보았다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 MFC의 두께가 각각 1.0 mm, 0.75 mm일 때 발생하는 진동 변위를 나타낸 것이다. 또한 Fig. 8은 이들 두께의 변화에 따른 피크 값의 변화를 보인 것인데 MFC의 두께가 얇을수록 진동 변위가 증가하여 더 많은 양의 에너지를 수확할 수 있음을 알 수 있다.

MFC 압전 단결정의 경우 두께를 12.5% 감소시키면 따라 진동 변위는 최대 변위차(peak to peak) 기준으로 4.7배 증가하였고, 두께가 25% 감소함에 따라 최대 변위차 기준으로 7배 증가, 50% 감소시 11.3배 증가, 75% 감소시 30.9배 증가라는 매우 큰 진동 변위 변화 추세가 나타났다. 물리적으로 두께가 두꺼운 외팔보는 얇은 박판의 형태보다 와류 진동에 둔감하여 전압 발생량이 적음을 확인할 수 있을 것이다.

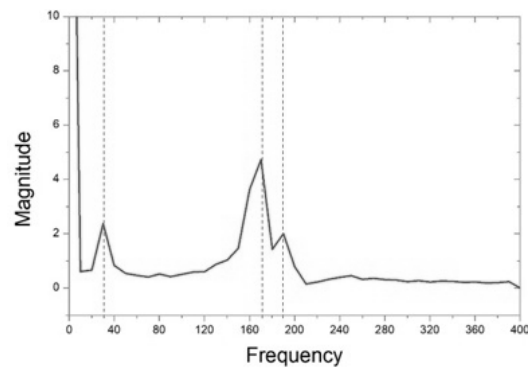
MFC의 길이 및 두께의 변화에 따른 진동 변위량은 외팔보에 하중 P 가 주어질 때의 처짐량 계산과 유사하게 예측할 수 있다. 탄성계수가 E , 길이가 L , 두께가 t , 폭이 b 인 MFC에 외력 P 가 작용할 때 최대 처짐량, δ_{\max} 는 다음 Eq. (3)과 같이 표현된다.

$$\delta_{\max} = \frac{4P}{Eb} \left(\frac{L}{t} \right)^3, \quad (3)$$

여기서 길이 L 이 1.5배 증가하면 δ_{\max} 는 3.34배 증가하여 진동 변위가 약 3.5배 증가한다는 수치해석 결



(a) Direction deformation of the MFC at the flow velocity of 0.24 m/s.



(b) Frequency spectrum

Fig. 9. Direction deformation and frequency spectrum of the MFC at the flow velocity of 0.24 m/s (unit: dB).

과와 일치한다. 두께가 변화하면 δ_{\max} 는 t^3 에 반비례한다. Fig. 9에는 FTEH에 유입되는 유체 속도가 0.24 m/s일 때 MFC의 진동 변화량(a)과 이의 주파수 스펙트럼(b)을 각각 보인 것인데 진동 변위 주파수는 주로 30 Hz와 170 Hz에서 나타났다.

MFC의 길이 L , 강성계수 EI , 단위 길이당 질량 ξ 인 외팔보의 고유진동수 f_i 는 다음 Eq. (4)와 같이 표현된다.^[9]

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\xi}} \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (4)$$

여기서 $\lambda_1=1.875$, $\lambda_4=10.995$ 이므로 Fig. 9의 스펙트럼에서 나타난 30 Hz와 170 Hz는 λ_4/λ_1 가 5.864이므로 각각 첫 번째와 네 번째 모드(mode)임을 알 수 있다.

수중 유체의 유속을 증가시키면 따라 진동 변위량도 비례하여 증가함을 추가 해석을 통하여 확인할

수 있었다. Figs. 5~9에서의 결과를 이용하여 MFC에 발생하는 전력을 계산하였다. 일반적으로 압전효과 는 재료에 가해지는 응력(T), 전계(E), 변형(S), 전기적 변위(D), 탄성 유연 계수(s), 유전율(ϵ), 기계장과 전기장을 연결하는 압전계수(d)를 이용하여 전기적 구조방정식은 다음과 같이 표현된다.^[10]

$$S = s^E T + dE, D = dT + \epsilon^T E. \quad (5)$$

전기기계결합계수는 다음과 같이 표현된다.^[10]

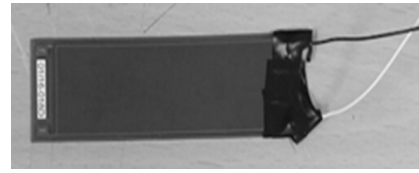
$$k^2 = \frac{E_c}{E_{\in pt-m}}, k = \sqrt{\frac{d^2}{\epsilon^T s^E}}, \quad (6)$$

여기서 E_c 는 전기적으로 축적된 에너지, $E_{\in pt-m}$ 은 기계적 입력에너지이다. 기계적 입력에너지는 에너지 하베스팅 장치에 가해지는 힘에 진동 변위를 곱하면 에너지가 산출된다. 따라서 Eq. (6)을 이용하여 전기적으로 축적된 에너지(Joule)를 전력(W)로 환산할 수 있는데, 전기기계결합계수를 0.25로 하는 MFC에서 압전소자의 길이($L = 100$ mm) 및 두께($t = 0.75$ mm)에 대하여 유체 유기 진동에 의한 에너지 저장은 약 0.598 mW로 계산된다. 이는 변형률이 압전성능에 관계가 있다는 원리를 이용한 단순 계산으로 실제는 이보다 적은 양의 에너지 수확이 될 것으로 예측된다.

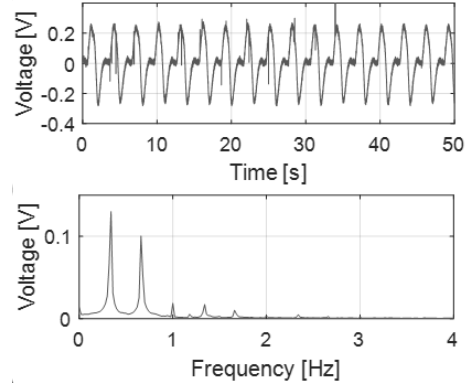
III. FTEH 성능 실험 및 결과 토의

실험에 사용된 단일 MFC는 Fig. 10에서와 같이 M-8528-P2 모델을 선정하였고 가로 8.5 cm, 세로 2.8 cm, 두께 0.3 cm로서 내장 정전용량은 1770.7 nF이다.

Fig. 10에는 MFC 센서 자체의 출력 파형을 보였는데 출력 전압은 Fig. 10(b)와 같이 출력되었고, 출력 전류는 최대 $25 \mu\text{A}$ 에서 최소 $-25 \mu\text{A}$ 로 사인파 형태로 출력되었다. Fig. 10(b)와 같이 하베스터의 출력 전압 주파수는 모터의 동작 주파수 0.33 Hz의 하모닉인 여러 주파수 성분을 포함함을 알 수 있다. 동작 주파수 0.33 Hz의 주요 하모닉 성분은 0.68 Hz이다. 동작 임피던스는 외부환경 주파수 0.33 Hz에 $1 \text{ M}\Omega \sim 2.1 \text{ M}\Omega$ 의 범위를 갖는다.



(a) Photograph of the MFC (M-8528-P2)



(b) Output voltage at the operation frequency of 0.33 Hz and its frequency spectrum

Fig. 10. Measurement of MFC (M-8528-P2) output voltage and frequency spectrum.

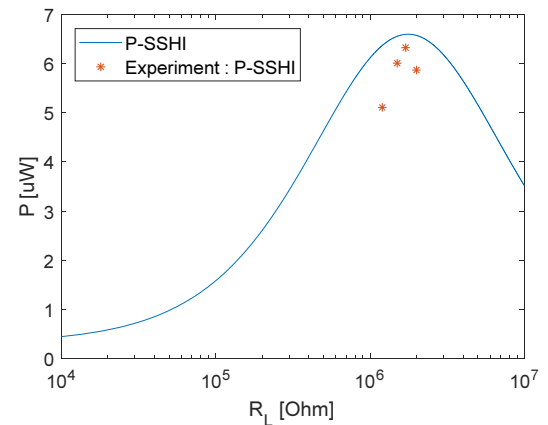


Fig. 11. (Color available online) Electric power of P-SSHI rectifier circuit using the MFC.

Fig. 11은 MFC에 대한 동기정류방식인 P-SSHI 회로^[11,12]의 모의실험과 실제 실험에서의 출력 전력을 나타낸 것이다. 모의실험에서는 $1.7 \text{ M}\Omega$ 일 때 최대 전력 $6.6 \mu\text{W}$ 를 출력하였으며, 실제 실험에서는 $1.7 \text{ M}\Omega$ 일 때 최대 전력 $6.33 \mu\text{W}$ 를 출력하였다.

다만, Fig. 12는 Fig. 10(a)의 MFC 단일 모델에 대한 결과로서 FTEH에 장착하여 수조에서 전력 수확량을 비교하면 그 값은 다소 차이가 있을 것으로 예측된다. MFC형 FTEH의 길이 및 두께 변화에 따라 에너

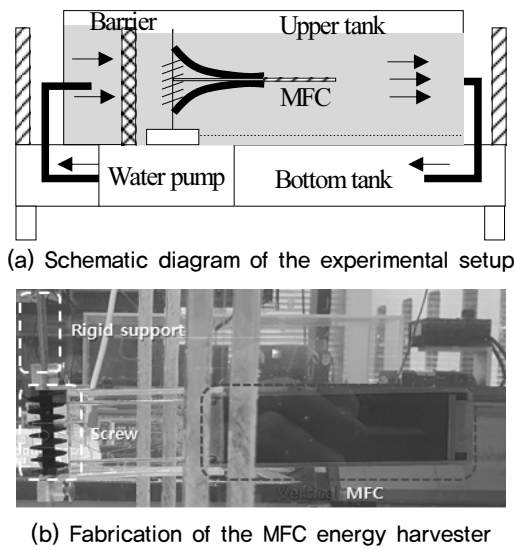


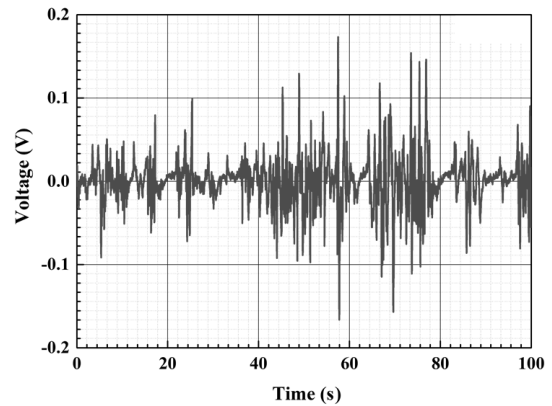
Fig. 12. Experimental setup of the MFC FTEH.

지 수확량을 이론적으로 확인하였고 이에 따라 MFC를 Table 1에서 표준형 MFC로 선택하여 이를 실험하였다. Fig. 10에는 실험장치의 구성도를 보였는데 FTEH의 주요 구성품은 퍼넬, MFC, 스파이럴 스크루, 지지대 등으로 이루어져 있다.

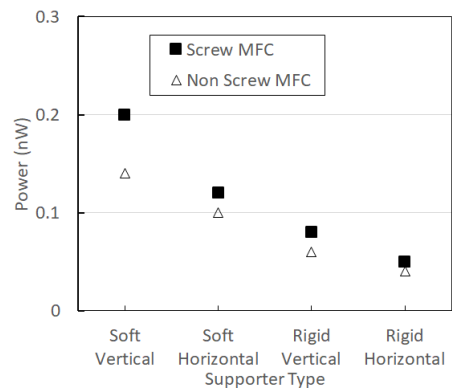
Fig. 12(a)에서와 같이 하부 수조에서 펌프를 이용하여 상부 수조로 유체를 공급하고 유속은 펌프의 송출량을 조절하면서 맞추었다. 입구 측에 격벽을 두어 유입 유체를 안정화 시켰으며, 일정한 유속을 유지하도록 출구측의 단면적을 유속에 맞게 조절하였다. 실험에 사용된 유체 유속은 우리나라 해양환경을 고려하여 0.24 m/s로 선정하였다.

Fig. 13에는 MFC형 FTEH에서 입구단에 스파이럴 스크루의 설치 유무에 따른 발생 전력량을 비교하였다.

Fig. 13에서와 같이 스파이럴 스크루를 장착한 모델이 그렇지 않은 경우보다 유연한 지지대의 경우 약 1.43배 높은 에너지를 수확함을 알 수 있다. 또한 최대 전력량의 차이는 스파이럴 스크루가 장착된 상태의 유연한 지지대에 수직으로 설치된 MFC가 스파이럴 스크루가 없고 견고한 지지대에 수평으로 설치된 MFC보다 약 5배 정도 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 13의 결과를 통해 스파이럴 스크루가 장착된 형태가 많은 양의 와류 유동을 일으켜 MFC의 진동 변위를 증가시키는 요인임을 확인하였다.



(a) Voltage measurement with time



(b) Generated power of the FTEH

Fig. 13. Experimental result of generated power with and without the spiral screw.

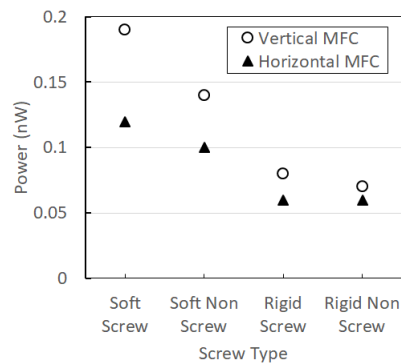


Fig. 14. Experimental result of generated power under the condition of MFC fabrication direction.

Fig. 14에는 MFC가 FTEH에 설치되는 방향(수직 혹은 수평)에 따른 발생 전력량을 비교하였다. Fig. 14에서와 같이 수직으로 설치된 MFC가 수평의 경우보다 스크루가 장착된 경우에서 약 1.58배 높은 에너지를 수확함을 알 수 있다. 동일한 조건에서 최대 전

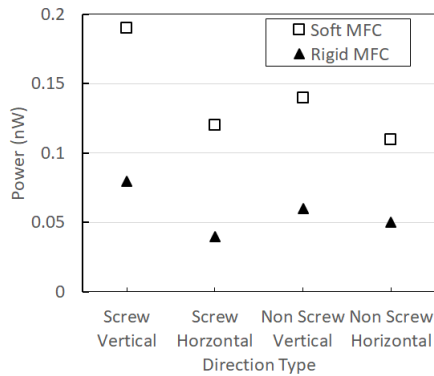


Fig. 15. Experimental result of generated power under the condition of soft or rigid supporter.

력량의 차이는 수평으로 설치된 MFC보다 약 2.7배 정도 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 14의 결과를 통해 MFC가 수평으로 설치된 경우보다 수직으로 설치된 형태가 MFC의 진동 변위를 증가시키는 요인임을 확인하였다.

Fig. 15에는 MFC가 FTEH 장착된 지지대의 유연성에 따른 발생 전력량 발생을 비교하였다. Fig. 15에서와 같이 유연한 지지대에 설치된 MFC가 강성이 높은 지지대에 설치된 경우보다 약 23.7배 높은 에너지를 수확함을 알 수 있다. 또한 동일한 조건에서 최대 전력량의 차이는 강성이 높은 지지대에 설치된 MFC보다 약 17.2배 정도 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 15의 결과를 통해 MFC형 FTEH가 설치되는 지지대의 강성에 따라 다른 변수들인 Figs. 13 및 14의 경우보다 전력량의 차이가 매우 큼을 알 수 있다. 최대 전력은 스파이럴 스크루가 장착되고 MFC가 수직으로 설치되어 유연한 지지대에 지지된 경우에서 1 M Ω 부하(오실로스코프) 기준 0.2 nW로 나타났다. 따라서 최대 전력을 수확하는 것은 에너지 하베스팅 장치를 설계하는 목적이므로 Fig. 16과 같이 Fig. 12의 장치를 통해 최적 저항을 도출하였다.

Fig. 16과 같이 최적 저항은 4,010 k Ω 으로 측정되었고 이때의 발생 전력량은 1.315 nW로 측정되었다. 유속 조건과 MFC의 설치 방향 등은 선행실험에서 최대 에너지를 발생시킨 경우와 동일하게 적용하였다.

수확된 전력량은 MFC가 수직으로 설치되고 스파이럴 스크루가 있는 상태에서 유연한 지지대에 설치된 FTEH의 경우에 대하여 Fig. 16의 결과인 최적저

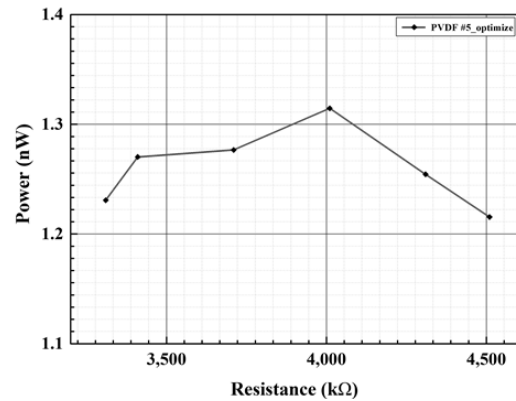


Fig. 16. Measurement of optimal resistance of the MFC energy harvester.

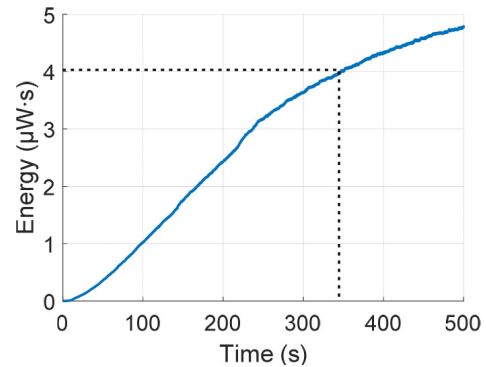


Fig. 17. (Color available online) Harvested power energy storage of the MFC FTEH at the capacitor using optimum resistance.

항을 회로에 적용하여 유속 0.24 m/s일 때 커패시터에 저장되는 에너지를 Fig. 17에 나타내었다. Fig. 17에서와 같이 FTEH의 출력을 350 s 동안 커패시터에 에너지를 저장하면 4 μ W·s에 도달함을 확인할 수 있다.

Fig. 17의 결과를 통해 MFC형 에너지 하베스터에서 수확되는 에너지는 충전 시간을 길게 할수록 증가하게 된다. 또한 충전 에너지를 높이는 방법은 MFC의 크기를 크게, 유속을 빠르게, 커패시터 충전 시간을 길게, FTEH의 지지대를 유연하게, MFC 설치 방향을 수직으로 하는 방법 등 매우 다양한 방법으로 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 일반적으로 1 bit의 정보를 송신하는데 60 μ W의 전력이 소모되어지며, 이렇게 수확된 에너지를 이용하여 산출하면 5.3 bit/s의 정보를 송신할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구를 통하여 MFC형 FTEH의 에너지 수확에 대한

유용성을 확인하였고 본 연구의 결과는 수중 통신 센서의 안정적인 전원 공급 문제에 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료 된다.

IV. 결 론

본 연구에서 제안한 에너지 하베스팅 장치는 Lee *et al.*^[1]의 FTEH에 MFC가 외팔보 형태로 장착되어 있는 독창적인 구조이다. FTEH에 발생하는 에너지는 캔틸레버형 MFC의 변형률에 비례하여 나타날 것이기 때문에 MFC를 FTEH에 장착하고 유속과 MFC의 설계 변수를 변화시켰을 때 발생하는 진동 변위를 시뮬레이션 하였다. 수중에서의 평균 해류 유속을 0.24 m/s로 고정시킨 상태에서 MFC의 길이를 50% 증가시켰을 때 진동 변위는 최대 변위차 기준으로 3.5배 증가하였고, 길이를 100% 증가시킴에 따라 진동 변위는 11.1배 증가함을 보였다. MFC의 두께를 75% 감소시 30.9배 증가라는 매우 큰 진동 변위 변화 추세가 나타났다. 전기기계결합계수를 0.25로 하는 MFC에서 압전소자의 길이 및 두께에 대하여 유체 유기 진동에 의한 에너지 저장은 약 0.598 mW로 계산되었다. 실험에 사용된 단일 MFC에 대한 동기정류방식인 P-SSHI 회로의 모의실험에서는 1.7 MΩ일 때 최대 전력 6.33 μW를 출력하였다. 수조 실험에서 최대 전력량의 차이는 스파이럴 스크루가 장착된 상태의 유연한 지지대에 수직으로 설치된 MFC가 스파이럴 스크루가 없고 견고한 지지대에 수평으로 설치된 MFC보다 약 5배 정도 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 유연한 지지대에 설치된 MFC가 강성이 높은 지지대에 설치된 경우보다 약 23.7배 높은 에너지를 수확함을 알 수 있다. MFC의 최적 저항은 4,010 kΩ으로 측정되었고 이때의 발생 전력량은 1.315 nW로 측정되었다. 수확된 전력량은 MFC가 수직으로 설치되고 스파이럴 스크루가 있는 상태에서 유연한 지지대에 설치된 FTEH의 경우에 대하여 최적 저항을 회로에 적용하여 유속 0.24 m/s일 때 FTEH의 출력을 350 s 동안 커패시터에 에너지를 저장하면 4 μW·s에 도달함을 확인할 수 있다. 충전 에너지를 높이는 방법은 MFC의 크기를 크게, 유속을 빠르게, 커패시터 충전 시간을 길게, FTEH의 지지대를 유연하게, MFC

설치 방향을 수직으로 하는 방법 등 매우 다양한 방법으로 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통하여 MFC형 FTEH의 에너지 수확에 대한 유용성을 확인하였고, 본 연구의 결과는 수중 통신 센서의 안정적인 전원 공급 문제에 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

References

1. J. Lee, J. Ahn, H. Jin, C. Lee, Y. Jeong, K. Lee, H. Seo, and Y. Cho, "A funnel type PVDF underwater energy harvester with spiral structure mounted on the harvester support," *Micromech.* **13**, 579 (2022).
2. A. Erturk and D. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting* (John Wiley & Sons, West Sussex, 2011), pp. 1-73.
3. A. Mehmood, A. Abdelkefi, M. R. Hajj, A. Nayfeh, I. Akhtar, and A. O. Nuhait, "Piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibrations of circular cylinder," *J. Sound Vib.* **332**, 4656-4667 (2013).
4. H. Dai, A. Abdelkefi, and L. Wang, "Theoretical modeling and nonlinear analysis of piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibrations," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **25**, 1-14 (2014).
5. C. Grouthier, S. Michelin, and E. de Langre, "Optimal energy harvesting by vortex-induced vibrations in cables," *Proc. ASME 35th Int. Conf. OMAE*, 1-9 (2016).
6. R. Song, X. Shan, F. Lv, and T. Xie, "A study of vortex-induced energy harvesting from water using PZT piezoelectric cantilever with cylindrical extension," *Ceram. Int.* **41**, S768-S773 (2015).
7. A. Erturk and G. Delporte, "Underwater thrust and power generation using flexible piezoelectric composites: an experimental investigation toward self-powered swimmer-sensor platforms," *Smart Mater. Struct.* **20**, 125013 (2011).
8. X. Shan, R. Song, B. Liu, and T. Xie, "Novel energy harvesting: a macro fiber composite piezoelectric energy harvester in the water vortex," *Ceram. Int.* **41**, S763-S767 (2015).
9. R. Blevins, *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape* (Krieger Publishing Co., Malabar, 2001), pp. 108-109.
10. K. Yoon and K. Oh, *Piezoelectric Electrostrictive*

Actuator (Pierson Education Korea, Co., Ltd., Seoul, 2001), pp. 136-138.

11. A. Tabesh and L. Fréchet, "A low-power stand-alone adaptive circuit for harvesting energy from a piezoelectric micropower generator," *IEEE Trans. Ind. Electron.* **57**, 840-849 (2009).
12. Y. Kushino and H. Koizumi, "Piezoelectric energy harvesting circuit using full-wave voltage doubler rectifier and switched inductor," *Proc. ECCE 2014*, 2310-2315 (2014).

저자 약력

▶ 이 종 길 (Jongkil Lee)



1984년 2월 : 부산대학교 기계설계학과
학사
1990년 12월 : The University of Utah 기계공
학과 석사
1993년 8월 : The University of Utah 기계공
학과 박사
1995년 1월 ~ 1998년 2월 : 국방과학연구
소 선임연구원
1998년 3월 ~ 현재 : 안동대학교 기계교육
과 교수

▶ 안 진 효 (Jinhyo An)



2004년 2월 : 경북대학교 기계공학과 학사
2011년 2월 : 경북대학교 기계공학과 석사
2017년 3월 ~ 현재 : 안동대학교 대학원 정
밀기계공학과 박사과정 재학