

곡면을 가진 외팔보형 PVDF 에너지 하베스터의 와류유기진동으로 인한 에너지 수확 특성

Energy harvesting characteristics on curvature based PVDF cantilever energy harvester due to vortex induced vibration

송우진,¹ 이종길^{2†}

(Woo-Jin Song¹ and Jongkil Lee^{2†})

¹현대자동차(주) 글로벌 러닝센터, ²국립안동대학교 사범대학 기계교육과
(Received December 20, 2023; accepted February 1, 2024)

초 록: 수중 압전 에너지 하베스터(Piezoelectric Energy Harvester, PEH) 설계시 곡률변화를 통해 외팔보형 전체의 와류유기진동(Vortex Induced Vibration, VIV)을 생성시키고, VIV의 생성으로 곡면형 외팔보 PEH에 진동 변위가 증가한다는 것은 실제 전력을 증대 시키는 데 중요한 요소이다. 해석 모델인 곡면형 PEH의 재질은 Polyvinylidene Di-Fluoride(PVDF) 압전 필름으로서 곡률이 다양한 50 mm, 130 mm, 210 mm 모델에 유속은 0.1 m/s ~ 0.50 m/s로 정하여 VIV에 의한 PEH의 스트레인 에너지 변화를 관찰하였다. 곡률 반경이 작을수록 큰 폭의 VIV가 나타났고, 유속이 증가할수록 VIV가 많이 나타났다. 작은 곡률로 인한 급격한 형상변환이 VIV의 생성에 효과적이었고 스트레인 에너지, 정규화 발생 전압, 평균 전력 등은 곡률이 증가할수록 감소하였다. PEH 자체의 전력을 증대시키기 위해 급경사의 곡률 개선뿐만 아니라 곡률형 PEH의 개수가 늘어남에 따라 평균 전력도 상승할 것으로 사료된다.

핵심용어: 수중 에너지 하베스터, 에너지 하베스팅 측정, 곡면 외팔보, 와류유기진동, Polyvinylidene Di-Fluoride (PVDF)

ABSTRACT: When designing an underwater Piezoelectric Energy Harvester (PEH), Vortex Induced Vibration (VIV) is generated throughout the cantilever through a change in curvature, and the generation of VIV increases the vibration displacement of the curved cantilever PEH, which is an important factor in increasing actual power. The material of the curved PEH selected a Polyvinylidene Di-Fluoride (PVDF) piezoelectric film, and the flow velocity is set at 0.1 m/s to 0.50 m/s for 50 mm, 130 mm, and 210 mm with various curvatures. The strain energy change of PEH by VIV was observed. The smaller the radius of curvature, the larger the VIV, and as the flow rate increased, more VIV appeared. Rapid shape transformation due to the small curvature was effective in generating VIV, and strain energy, normalized voltage, average power, etc. To increase the amount of power of the PEH, it is considered that the average power will increase as the number of curved PEHs increases as well as the steep curvature is improved.

Keywords: Underwater energy harvester, Energy harvesting measurement, Curvature based cantilever, Vortex induced vibration (VIV), Polyvinylidene Di-Fluoride (PVDF)

PACS numbers: 43.58Gn, 43.58Ta

1. 서 론

수중에서 전기 에너지 수확에 사용되는 진동 에너

지 하베스터(Underwater Vibration Energy Harvester, UWVEH)는 와류유기진동(Vortex Induced Vibration, VIV)의 발생으로 생긴 기계적 진동과 응력, 변형률

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

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

(Tel: 82-54-820-5487, Fax: 82-54-820-7655)



Copyright©2024 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.

등을 이용한 미소 에너지 하베스팅 기술로서 수확된 에너지는 대략 수 mW 혹은 수 μ W 정도이다. UWVEH의 성능 지표는 주로 출력(mW, μ W) 혹은 출력 밀도(mW/cm^3 , W/m^3) 등으로 나타내고 있으나 아직 이에 대한 표준화된 단위는 알려져 있지 않다. 다만, 출력 밀도는 UWVEH의 크기나 주파수의 변화에 따른 성능 변화는 덜 민감하나 출력은 크기가 커지짐에 따라 증가하고 주파수가 고주파로 갈수록 출력은 감소하는 경향이 있다.^[1-3] UWVEH의 핵심인 압전 에너지 하베스팅(Piezoelectric Energy Harvester, PEH)에 사용되는 석영, BTO, PZT, PMN-PT 등의 압전 재료는 기계적 진동을 전기 에너지로 비교적 간단한 구조를 이용하여 변환할 수 있기 때문에 무선센서 네트워크의 외부 전원 공급 없이 자체 전력원으로 사용하기 위해 이러한 UWVEH 기술이 많이 활용되고 있다.^[1-3]

Fig. 1에서와 같이 압전 세라믹을 이용한 UWVEH의 종류는 외팔보 형태를 이용한 것, 심벌 형태를 이용한 것, 박막형태를 이용한 것 등이 연구^[1-3]되었다.

Lee *et al.*^[4]은 PolyVinylidene Fluoride(PVDF)를 이용한 퍼널형 에너지 하베스터(Funnel Type Energy Harvester, FTEH)를 고안하고 유속에 따른 FTEH의 에너지 수확량을 실험으로 검증 하였다. Lee *et al.*^[4]이 고안한 FTEH는 유체 유입 입구측의 단면적이 출구측의 단면적보다 넓은 형태로 제작되어 출구측에서의 유속을 빠르게 하는 효과를 가지고 있다.

셸(shell) 구조가 평판 구조보다 큰 변형률을 발생 시키므로 압전 에너지 하베스팅의 효율을 개선할 수 있다. Yoon *et al.*^[5]은 휘어진 PZT-5A 피에조 세라믹을 이용하여 기계적 변형율로 인한 충전량을 증가시키는 연구를 하였다. 그러나 PZT 재질은 곡면 형상의 구조물에 사용하는 것은 제한되는 단점이 있다.

깃발 형태의 에너지 하베스터에 대한 연구는 Techet

et al.,^[6] Allen과 Smits,^[7] Giacomello와 Porfiri^[8] 등의 연구에서 찾아볼 수 있다. Techet *et al.*^[6]과 Allen과 Smits^[7]은 유속이 1.0 m/s일 때 사각형 돌출체 뒤에 설치된 장어 형태의 유연한 압전 박막의 와류 유동에 의한 에너지 수확을 연구하였다. 장어형 압전 박막의 간격은 7.6 cm이고 총 6개를 사용하였다. 이 때 사용한 압전 박막의 재료는 PolyEthylene Terephthalate Glycol(PETG)과 Polyvinylidene Di-Fluoride(PVDF)이며 폭이 15.25 cm, 길이가 1.2 m였다. PVDF의 탄성계수는 2.24×10^6 kPa이며 비중은 1.77이다. 무차원의 길이에 따른 스트레인 에너지를 계산하였는데 압전 박막의 길이가 길수록 높은 스트레인 에너지가 저장됨을 보였다. Giacomello와 Porfiri^[8]은 IOonic Polymer Metal Composite(IPMC)를 호스트 깃발에 부착하고 이를 수중에 잠겼을 때 발생하는 에너지 수확량을 실험으로 관찰하였다. 유체 가시화 장치를 이용하여 깃발의 진동 형상을 보았고 유체 평균 속도가 0.6 m/s ~ 1.1 m/s일 때 최적 저항을 달았을 경우 전력은 10^{-4} μ W로 측정되었다.

심벌 트랜스듀서(cymbal transducer)는 상하부의 금속 캡 속에 압전 디스크가 조립되어 있는 구조로서 상하부 캡의 변형에 의하여 압전체가 진동을 함으로써 전기를 발생시키는 원리이다. 심벌 트랜스듀서는 주로 수중에서의 음향 신호 송수신 센서로 이용되나 에너지 하베스터로서의 응용도 연구^[9-11]되고 있다. Ren *et al.*^[9]은 사각형 심벌 트랜스듀서의 에너지 하베스팅에 대하여 8.5 g의 질량을 가했을 때 57 k Ω 의 저항값으로 2.0 mW의 전력이 생산된다고 하였고, Kim *et al.*^[10]은 여러 환경에서의 심벌 트랜스듀서를 활용한 에너지 수확을 연구하였다. Bezanson과 Thornton^[11]은 Supply Utilizing Vortex Induced Vibration Energy (SURVIVE)라는 에너지 하베스터 연구에서 가는 막대 봉 형태의 외팔보가 심벌 트랜스듀서 위에 설치되어 있고 와류유기진동이 외팔보에 가해지면 심벌이 진동하여 에너지를 수확하는 원리를 이용함으로써 0.25 m/s의 유속에서 최소 6 mW의 전력이 생성됨을 보였다.

외팔보 형태의 UWVEH는 References [11] ~ [17]에 보인 것과 같이 비교적 활발히 연구되고 있으며, 대부분의 연구는 원통과 외팔보가 결합된 형태의 에너

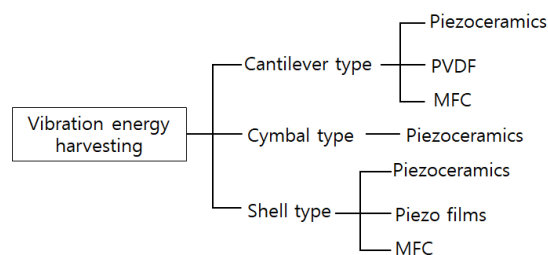


Fig. 1. Types of UWVEH with materials.

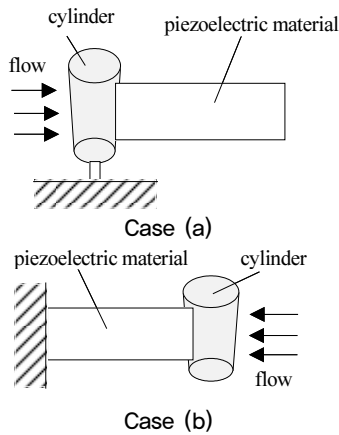


Fig. 2. Cantilever type of the UWVEH.

지 하베스터로서 Fig. 2와 같이 원통 주위를 지난 와류가 외팔보를 진동시키는 원리를 이용한 것으로 원통의 부착 위치에 따라 약간의 차이가 있을 뿐이다.

References [14] ~ [16]은 원통형 물체의 주위를 흐르는 유체의 와류 진동에 의한 에너지 수확을 제안하였고 압전 재료를 공통으로 이용하였다. 그러나 Erturk와 Delporte^[12]과 Shan *et al.*^[13]은 기존의 압전 재료를 사용하는 대신 Macro Fiber Composite(MFC)를 이용한 에너지 수확장치를 제안하였다. Erturk와 Delporte^[12]은 수중 지느러미 형태의 얇은 MFC 외팔보 꼬리에서 6 Hz, 19 mN의 평균 추력을 발생시키기 위한 평균 요구 가진력은 120 mW 정도로 측정하였다. Shan *et al.*^[13]은 MFC를 이용하여 Fig. 2(b)의 형상과 같이 제작하고 실린더의 지름(30 mm, 40 mm, 50 mm)과 유속(0.05 m/s ~ 0.5 m/s)을 변화시켰을 때 발생하는 전력을 이론과 실험으로 수행하였는데 실린더 지름 30 mm, 유속 0.5 m/s에서 최대 전력은 1.32 μ W, 전력 밀도는 1.1 mW/m²을 수확함을 보였다. Song *et al.*^[14]은 Shan *et al.*^[13]과 유사한 모델을 사용하였는데 이론과 실험을 통하여 유속 0.35 m/s에서 최대 출력 84.49 μ W, 에너지 밀도 60.35 mW/m²으로 압전형 외팔보의 와류 진동에 의한 에너지를 수확함을 보였다. Dai *et al.*^[15]은 Fig. 2(b)에 van der Pol 진동자를 양력으로 하는 외팔보형 압전 진동 하베스터의 에너지 수확을 해석하였다.

Mehmood *et al.*^[16]은 압전 트랜스듀서가 원형 실린더에 부착되고 이것에 수직하여 흐르는 유체에서 생기는 와류 유동을 이용하여 압전체에 발생하는 에너

지를 레이놀즈 수(Re , $96 \leq Re \leq 118$)에 따라 전력량을 계산하였다. 이 때 사용한 부하 저항 R 은 $500 \Omega \leq R \leq 5 M\Omega$ 이 적용되었고 연구 결과 부하 저항값이 500 k Ω 일 때 최대 전력이 수확되며 부하 저항의 변화에 따라 전력이 변화함을 확인함으로써 최적 부하 저항값을 찾는 것이 전력을 최대화하는데 유용하다고 보고하였다.

Singh *et al.*^[17]은 곡률 형상의 길고 유연한 원통에 축방향의 유체가 유입될 때 발생하는 플러터(flutter)의 불안정에 의한 에너지 하베스터의 변화를 이론해석하였다. Singh *et al.*^[17]은 곡률 변화에 따라 댐핑도 변화하는 Eqs. (1)과 (2)를 이용하여 곡면 좌표 s 에서 $\xi_0 = 0$, $\zeta_1 = 2$ 일 때 무차원 전력은 최대치로 됨을 확인하였다.

$$\xi(s) = \xi_0 [1 + \xi_1 (s - 1/2)]. \quad (1)$$

$$10^{-3} < \xi_0 < 10, -2 \leq \xi_1 \leq 2. \quad (2)$$

이 밖에 Grouthier *et al.*^[18]은 장력이 있는 긴 케이블에서 와류유기진동으로 인한 에너지 수확의 가능성에 대하여 연구하였다. UWVEH는 다르게 공기중에서 PVDF형 에너지 하베스터의 응답 특성을 수치해석한 결과도 Dung과 Sasaki^[19]에 의해 보고되었다.

UWVEH의 장점에도 불구하고 향후의 기술 개발은 주로 출력 밀도를 높이는 연구, 최적화설계 연구, 공진에 의존하지 않는 광대역화 기술 연구, 효율적인 에너지 저장장치회로^[20-22]의 연구에 집중되어야 할 것으로 사료된다. 특히 곡률이 변화하는 형태의 외팔보에서 PVDF를 이용한 에너지 하베스터에 대한 연구 결과는 아직 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 PEH에 곡률 형태의 외팔보형 PVDF를 설계하고 이를 수중에 적용하였을 때 와류 유동에 의한 스트레인 에너지를 계산하고 발생 전력량의 변화 추이를 관찰함으로써 보다 효율적인 UWEH 설계에 도움을 주고자 하였다.

II. 곡면을 가진 외팔보형 PEH 모델

곡면을 가진 외팔보형 Piezoelectric Energy Harvester (PEH)에 외부 응력을 가하는 방법은 주로 압전 재료

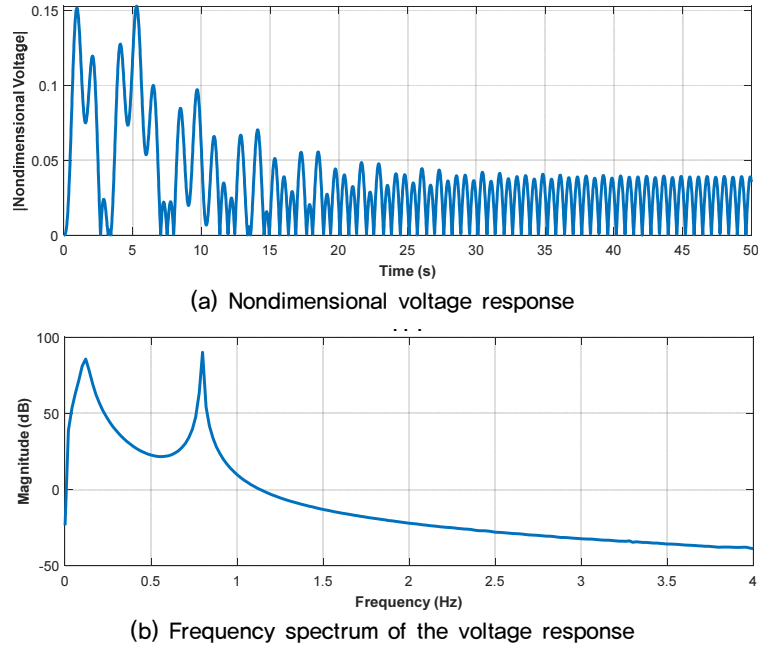


Fig. 3. (Color available online) Nondimensional voltage response (absolute value) of the PVDF with respect to time and its frequency spectrum.

를 박막의 외팔보로 제작한 다음 끝단에 질량을 달아 VIV를 발생하도록 한다. 곡률형 외팔보의 변위를 $y(x)$ 라고 할 때 보 내부에 발생하는 스트레인 에너지, U 는 다음과 같이 표현된다.^[6]

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^L \frac{(\partial^2 y / \partial x^2)^2}{[1 + (\partial y / \partial x)^2]^2} dx, \quad (3)$$

여기서 E 는 탄성계수, I 는 단면2차모멘트, L 은 PVDF 외팔보의 길이이다. Eq. (3)에서 스트레인 에너지는 외팔보 곡률의 제곱에 비례하고 강성계수 EI 에 비례한다. 굽힘 변형률 ϵ_b 는^[19]

$$\epsilon_b(x,t) = -\xi_{po} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \quad (4)$$

으로 표현되며 여기서 ξ_{po} 는 중립축에서부터 PVDF의 중심까지의 거리이다. 여기서 $y(x,t)$ 는 외팔보의 횡방향 변위를 나타내는데 다음과 같이 수렴급수로 표현된다.^[4,19]

$$y(x,t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \eta_r(t). \quad (5)$$

Eq. (5)에서 $\phi_r(x)$ 는 질량-정규화 고유함수, $\eta_r(t)$ 는 r 번째 진동 모드의 외팔보 모달(modal) 좌표이다. Eqs. (4)와 (5)를 이용하여 굽힘 변형율을 구할 수 있다. 또한, PVDF에 외부 유동에 의한 가진력이 가해질 때 발생하는 진동 변위와 발생 전압의 관계식은 다음과 같다.^[4,16]

$$\ddot{\tilde{y}} + \frac{\zeta_1}{\xi_r} \dot{\tilde{y}} + \frac{\zeta_2}{\xi_r^2} \tilde{y} - \frac{1}{\xi_r^2} \tilde{v} = \zeta_3, \quad (6)$$

$$\dot{\tilde{v}} + \xi_1 \dot{\tilde{y}} + \frac{\xi_2}{\xi_r} \tilde{v} = 0. \quad (7)$$

Eqs. (6)과 (7)에서 \tilde{y} 는 MFC의 진동 변위, \tilde{v} 는 유기되는 전압을 나타내며, $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ 와 ξ_r, ξ_1, ξ_2 는 주파수와 속도에 따라 정해지는 변수이다. Fig. 3에는 Eqs. (6)과 (7)에서 초기조건이 모두 0일 때 발생하는 PVDF의 무차원 전압의 절대값(a)과 그것의 주파수 스펙트럼(b)을 보였다. Fig. 3(b)에서와 같이 무차원 전압의 변화 추이는 0.2 Hz, 0.8 Hz의 진동수를 가짐을 알 수 있다.

Fig. 4에는 곡면을 가진 외팔보형 PVDF 에너지 하

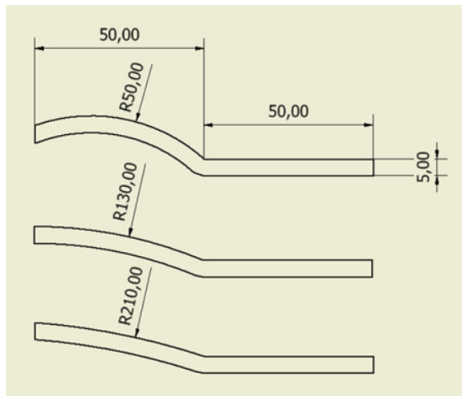


Fig. 4. (Color available online) Model of curved cantilever PVDF energy harvester (unit: mm) (from upper Model IV, Model III, and Model II, respectively).

Table 1. Model of the curvature based cantilever PVDF energy harvester.

Model name	Curvature	Length	Thickness
Model I	Flat plate	100 mm	5.0 mm
Model II	210.0 mm	100 mm	5.0 mm
Model III	130.0 mm	100 mm	5.0 mm
Model IV	50.0 mm	100 mm	5.0 mm

베스팅 장치인데 Table 1과 같이 곡면형 PEH의 길이는 100 mm, 두께는 5 mm인 판에 PVDF 압전 필름이 도포된 형태이다. 평판과 곡면을 핀 결합으로 연결하면 곡률 부분에서의 변형 에너지 변화가 미미할 것으로 예측된다.

해석 모델은 곡률에 따라 VIV 생성이 다를 것으로 예측하여 평판 형태인 Model I, 곡률이 210 mm인 Model II, 130 mm인 Model III, 50 mm인 Model IV로 선정하였고, Model I을 대조군으로 선정하였다.

III. 곡면형 PEH의 유속 변화에 따른 VIV 생성 특성 해석

외팔보의 곡률 변화로 PEH의 VIV를 생성시키고, 이것을 통해 낮은 유속에서 PEH의 형상변화를 극대화하여 효율적인 에너지 하베스터의 형태를 도출해 내는 것이 본 연구의 목적이다. 유한요소해석을 위하여 Fig. 5와 같이 모델링하고 3D 해석시 유체의 영향을 받을 외팔보와 스테인리스 안테나(왼쪽 기준선)의 접촉면을 유체-고체 연결로 설정하였다.

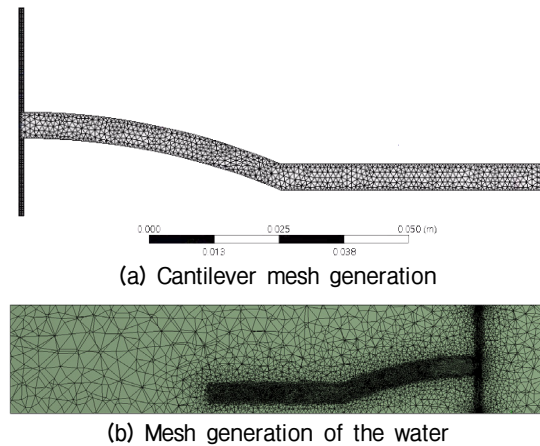


Fig. 5. (Color available online) Mesh generation of the PEH and its water interaction.

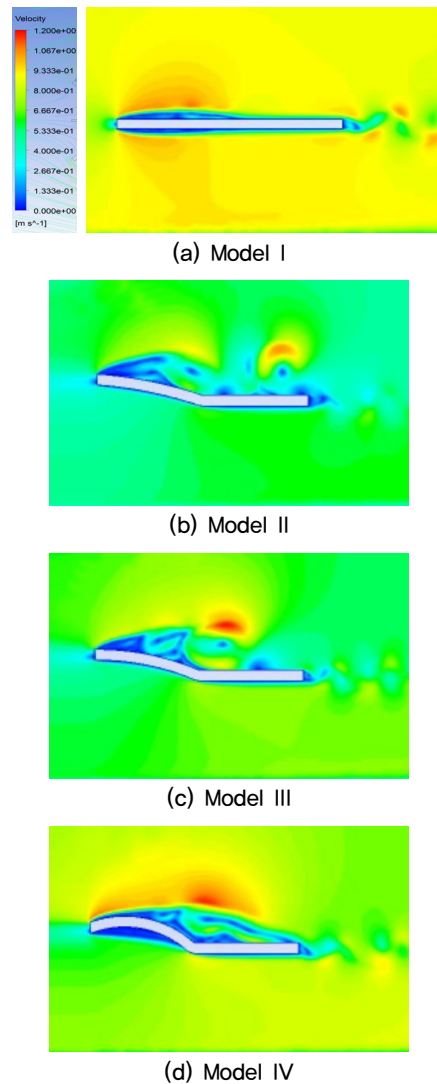


Fig. 6. (Color available online) Vortex induced velocity field of the PEH at the flow velocity of 0.1 m/s.

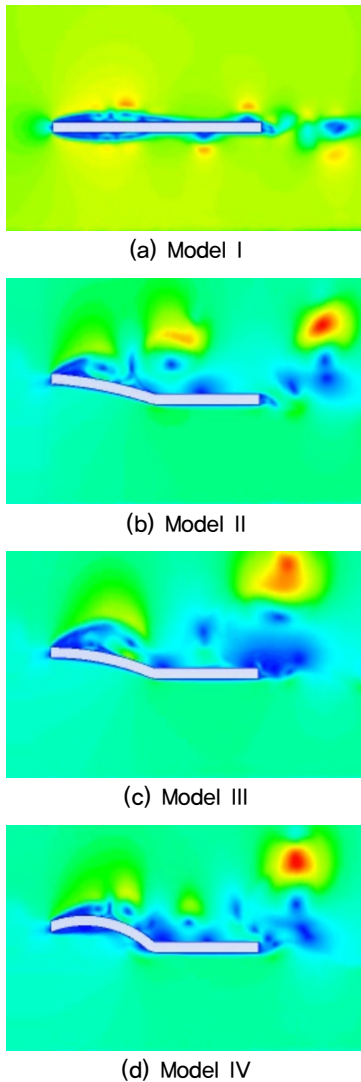


Fig. 7. (Color available online) Vortex induced velocity field of the PEH at the flow velocity of 0.24 m/s.

Figs. 6~8에는 외팔보 왼쪽 입구에서 유체가 유입되고 PEH를 거쳐 오른쪽으로 빠져 나가는 구조에서 VIV 분포를 나타낸 것이다. Model I은 곡선형상이 적용되지 않은 평판으로 가장 기본적인 형태의 모델이며 곡선형태의 존재 유무에 대한 유의미한 필요성을 확인하기 위한 대조군의 역할이다. Fig. 6은 유체 유입속도가 0.1 m/s일 때 와류 발생 현상을 비교한 것인데 Model I에서 Model IV로 갈수록 VIV가 많이 생성됨을 알 수 있다. 즉 급한 경사의 곡물을 가진 Model IV가 와류 진동을 많이 일으켜 PEH에 내장된 압전체에 더 많은 전압을 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

Figs. 7~8은 동해해류를 고려하여 각각 유체 유입

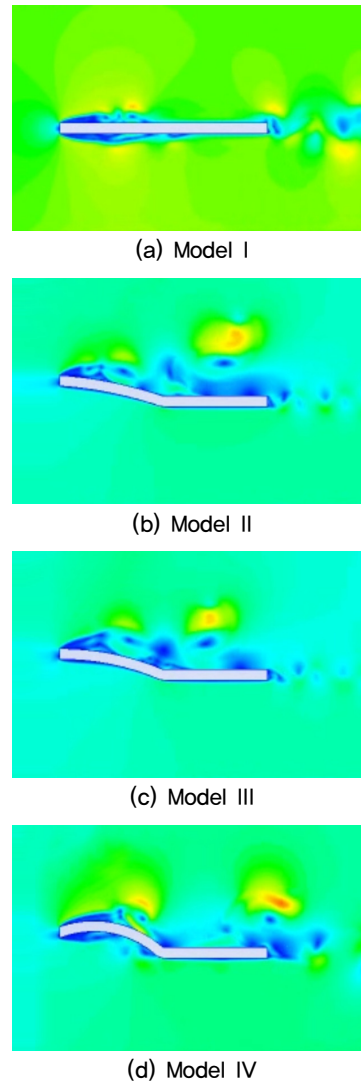


Fig. 8. (Color available online) Vortex induced velocity field of the PEH at the flow velocity of 0.50 m/s.

속도가 0.24 m/s와 0.50 m/s일 때 와류 발생 현상을 비교한 것인데 Fig. 6의 결과와 같이 Model I에서 Model IV로 갈수록 VIV가 많이 생성됨을 알 수 있다. Figs. 6~8의 Model IV의 경우만 비교하였을 때 유속이 증가할수록 VIV가 같이 증가하여 빠른 유속이 PEH의 에너지 수확량을 높이는 데 필요함을 알 수 있다.

Fig. 9는 외부 유속이 0.24 m/s일 때 VIV에 의한 외팔보 끝단의 진동 변위를 나타낸 것인데 Model III보다 Model II에서의 진동이 더 많음을 알 수 있다. Model II에서 22.9% 더 큰 진폭을 보이기 때문에 변위는 커지게 되어 많은 양의 전력을 수확할 수 있을 것으로 사료된다. Model III와 Model II는 좌측 곡면의

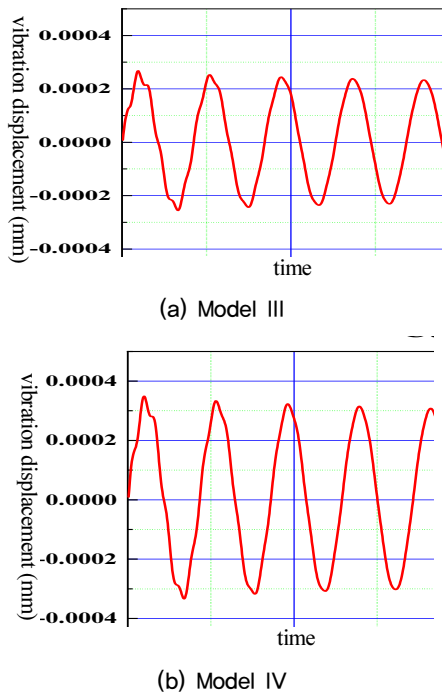


Fig. 9. (Color available online) PEH vibration displacement due to vortex induced velocity under the flow velocity of 0.24 m/s.

곡률이 각각 130 mm와 50 mm로서, Model II의 작은 곡률로 인한 급격한 형상변환이 VIV의 생성에 효과적임을 알 수 있다.

IV. VIV로 인한 PEH의 스트레인 에너지 특성

VIV의 생성으로 곡면형 외팔보 PEH에 진동 변위가 증가한다는 결과는 실제 전력을 증가 시키는데 중요한 요소로 작용하고 있다.

Fig. 10에는 시간(300 ms ~ 1,000 ms)에 따른 PEH의 스트레인 에너지를 보인 것이다. Fig. 10에서와 같이 R=50 mm인 Model IV가 유속 0.24 m/s에서 가장 높은 스트레인 에너지를 보이고 있고 시간에 따라 안정적인 스트레인 에너지가 생성됨을 알 수 있다. 상대적으로 같이 R=130 mm인 Model III가 유속 0.10 m/s에서 가장 낮은 스트레인 에너지를 나타내고 있다. 따라서 급한 경사의 곡률을 가진 Model IV가 VIV로 인한 높은 스트레인 에너지를 발생시킴을 확인할 수 있다.

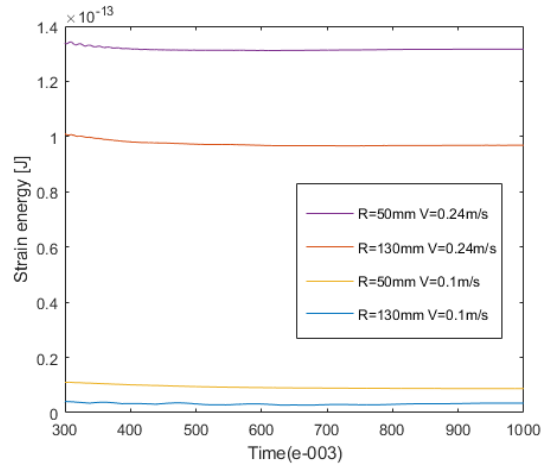


Fig. 10. (Color available online) PEH strain energy with respect to time (300 ms ~ 1,000 ms).

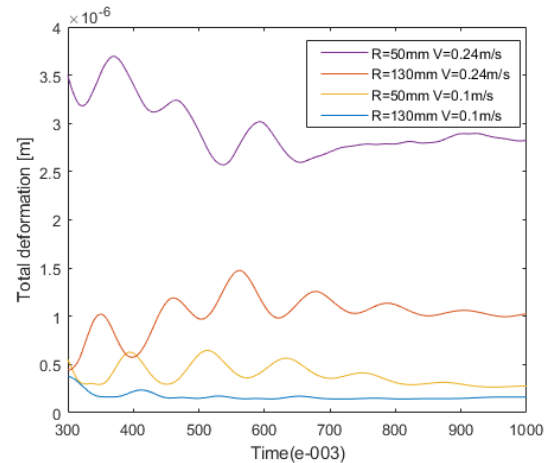


Fig. 11. (Color available online) PEH total deformation with respect to time (300 ms ~ 1,000 ms).

Fig. 11에는 시간에 따른 PEH의 총 변형량을 보인 것인데 Model IV에서 가장 크게 나타났다. Fig. 11에서와 같이 Model IV내에서 변형량의 피크를 비교하였을 때 최대 1.48배 정도 차이가 난다. 최댓값 기준으로 Model IV의 경우에서 Model II의 경우 보다 최대 37배 높게 나타났다. 이는 PEH가 시간에 따라 VIV로 인해 심한 진동을 일으킴을 의미한다. 이러한 Model IV와 같은 형태는 결국 PEH의 전력량을 크게 증가시키는 요인이 될 것이다.

Fig. 12는 유속과 라운드곡률에 따른 스트레인 에너지의 변화량을 보인 것이다. 유속이 0.24 m/s의 경우 곡률 반경이 2.6배 증가할 때 스트레인 에너지는 1.44배 감소하였다. Figs. 12 ~ 13에서와 같이 급한 경

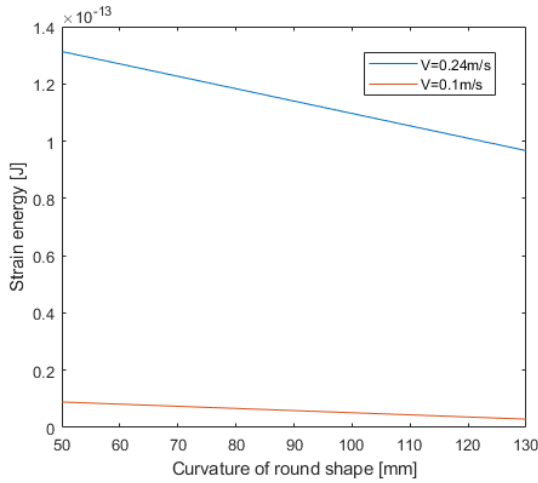


Fig. 12. (Color available online) PEH strain energy variation with respect to curvature of the round shape.

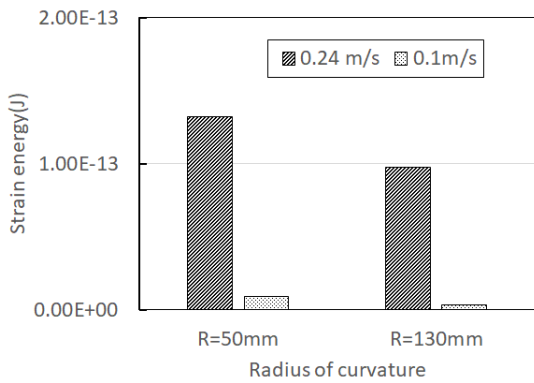


Fig. 13. Comparison of strain energy according to flow velocity and radius of curvature.

사의 곡률은 VIV의 생성을 높게 하여 PEH의 발생 전 력량을 증가 시킬 수 있음을 확인하였다. Table 2와 Fig. 13에는 유속과 곡률의 변화에 따라 발생하는 스트레인 에너지를 비교한 것이다.

Table 2에서와 같이 유속이 0.1 m/s, 곡률 반경이 130 mm인 경우를 기준으로 유속이 0.24 m/s, 곡률 반경이 50 mm인 경우에서 스트레인 에너지는 4,137% 정도 증가함을 알 수 있다. 이것으로 두 경우의 속도에서, 캔틸레버의 작은 곡률로 인한 급격한 형상변환이 스트레인 에너지의 생성에 효과적임을 알 수 있다.

탄성 영역에서는 후크의 법칙(Hooke's law)이 성립 하므로 압전 박막의 굽힘 응력에 의하여생기는 전 압, $V(t)$ 는³⁾

Table 2. Strain energy variation according to flow velocity and radius of curvature.

Flow velocity (m/s)	Radius of curvature (mm)	Strain energy [$\times 10^{-15}$ J]	Max. to min. ratio (%)
0.1	130.0	3.19	100
	50.0	9.27	290.6
0.24	130.0	97.3	3,050.2
	50.0	132.0	4,137.9

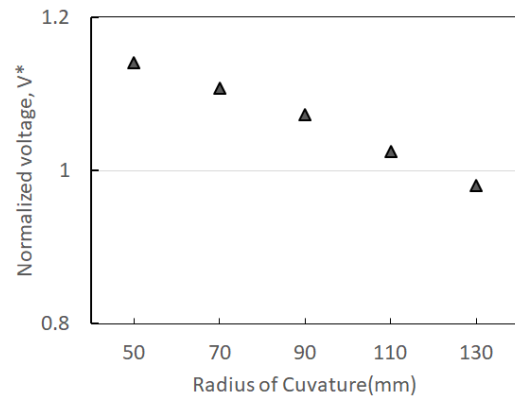


Fig. 14. Normalized voltage, V^* with respect to the radius of curvature under flow velocity of 0.24 m/s (Model IV).

$$V(t) = \frac{-d_{31}t_b}{\epsilon} \sigma(t) = \frac{-d_{31}t_b}{\epsilon} E \cdot \epsilon_b(t). \quad (8)$$

으로 표현되고 d_{31} 은 압전 변형율 계수, ϵ 은 유전 상 수, t_b 는 빔의 두께, $\sigma(t)$ 는 굽힘 응력을 나타낸다. 탄성 영역에서 탄성 계수(Young's modulus)가 E 이고, 변형 륵이 $\epsilon_b(t)$ 일 때 스트레인 에너지, $e_s(t)$ 는

$$e_s(t) = \frac{1}{2} E \times \epsilon_b^2(t). \quad (9)$$

$$V(t) = \frac{-d_{31}t_b}{\epsilon} 2\sqrt{E} \sqrt{e_s(t)}. \quad (10)$$

$$\beta^* = \frac{-d_{31}t_b}{\epsilon} 2\sqrt{E}. \quad (11)$$

외팔보 PVDF가 결정되면 β^* 가 일정한 값이므로 이 때 발생 전압, $V^*(t)$ 는 다음과 같이 스트레인 에너지 $e_s(t)$ 에 비례한다.

$$V^*(t) \propto \beta^* \sqrt{e_s^*(t)}. \quad (12)$$

유속 0.24 m/s일 때 Eq. (12)를 이용하여 곡률의 변화에 따른 정규화 발생 전압, $V^*(t)$ 를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14에서와 같이 곡률이 증가할수록 $V^*(t)$ 는 감소함을 알 수 있다.

$V^*(t)$ 를 이용하여 곡률형 PEH에 발생하는 평균 전력 P_{avg}^* [14]는

$$P_{avg}^* = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V^{*2}(t)}{R} dt \quad (13)$$

으로 표현되며 여기서 T는 주기, R은 저항이다. 평균 전력은 $V^*(t)$ 가 클수록 비례하여 높아짐을 알 수 있다. Fig. 14의 결과를 Eq. (13)에 적용하면 FEH가 발생하는 전력을 계산할 수 있다. 외팔보 자체의 전력량을 증대하기 위해서, 급한 경사의 곡률 개선뿐만 아니라 압전 외팔보의 개수가 늘어남에 따라 평균 전력도 상승할 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구에서는 다양한 곡면을 가진 외팔보형 에너지 하베스터의 와류유기진동(VIV)으로 인한 에너지 수확 특성을 해석하였다. 해석 모델인 곡면형 압전 에너지 하베스터(PEH)는 길이 100 mm, 두께 5 mm인 판에 PVDF 압전 필름이 도포된 형태로 설계하였다. 대조군인 평판(Model I)과 곡률이 다양한 50 mm(Model IV) 130 mm(Model III), 210 mm(Model II)로 변화시키고 유속은 0.1 m/s, 0.24 m/s, 0.50 m/s로 한정하여 VIV에 의한 PEH의 스트레인 에너지 변화를 관찰하였다.

Model I은 VIV가 거의 없으나 Model II에서 Model IV로 갈수록 큰 폭의 VIV가 나타났고 유속이 증가할수록 VIV가 많이 나타났다. 외부 유속이 0.24 m/s일 때 VIV에 의한 외팔보 끝단의 진동 변위는 Model II보다 Model IV에서 22.9% 더 큰 진폭을 보여 더 많은 양의 전력을 수확할 수 있을 것으로 사료된다. 이는 Model IV의 작은 곡률로 인한 급격한 형상변환이 VIV의 생성에 효과적임을 알 수 있다. R = 50 mm인

Model IV가 유속 0.24 m/s에서 가장 높은 스트레인 에너지를 보였고 시간에 따라 안정적인 스트레인 에너지가 생성됨을 알 수 있었다. 급한 경사의 곡률을 가진 Model IV가 VIV로 인한 높은 스트레인 에너지를 발생시킴을 확인할 수 있다. 변형량의 최댓값 기준으로 Model IV의 경우에서 Model II의 경우보다 최대 37배 높게 나타났다. 유속이 0.24 m/s의 경우 곡률 반경이 2.6배 증가할 때 스트레인 에너지는 1.44배 감소하였다. 유속이 0.1 m/s, 곡률 반경이 130 mm인 경우를 기준으로 유속이 0.24 m/s, 곡률 반경이 50 mm인 경우에서 스트레인 에너지는 4,137% 정도 증가함을 알 수 있다. 정규화 발생 전압, $V^*(t)$ 는 곡률이 증가할수록 $V^*(t)$ 는 감소하였고, 곡률형 PEH에 발생하는 평균 전력 P_{avg}^* [14]는 $V^*(t)$ 가 클수록 높아짐을 알 수 있었다.

PEH 자체의 전력량을 증대시키기 위해, 급한 경사의 곡률 개선뿐만 아니라 곡률형 PEH의 개수가 늘어남에 따라 평균 전력도 상승할 것으로 사료된다. 본 연구 결과는 외팔보를 이용한 수중 에너지 하베스터의 기초 연구에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구를 통하여 곡률형 외팔보 PEH의 에너지 수확에 대한 유용성을 확인하였고 무선센서 네트워크의 안정적인 전원 개발에 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (협약번호 KRIT-CT-23-026).

References

1. N. K. Singh and S. Datta, "Review of piezoelectric energy harvesting based on vibration," *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*, **1**, 74-78 (2014).
2. H. Kim, J.-H. Kim, and J. Kim, "A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration," *Int. J. of Precision Mech. Eng.* **12**, 1129-1141 (2011).
3. A. Erturk and D. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting* (John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, 2011),

- pp. 1-73.
4. 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," *Micromachines*, **13**, 579 (2022).
 5. H. S. Yoon, G. Washington, and A. Danak, "Modeling, optimization, and design of efficient for energy harvesting applications," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **16**, 877-888 (2005).
 6. A. H. Techet, J. J. Allen, and A. J. Smits, "Piezoelectric eels for energy harvesting in the ocean," *Proc. ISOPE*, 713-718 (2002).
 7. J. J. Allen and A. J. Smits, "Energy harvesting eel," *J. Fluids Struct.* **15**, 629-640. (2001).
 8. A. Giacomello and M. Porfiri, "Underwater energy harvesting from a heavy flag hosting ionic polymer metal composites," *J. Appl. Phys.* **109**, 084903 (2011).
 9. B. Ren, S. W. Or, X. Zhao, and H. Luo, "Energy harvesting using a modified rectangular cymbal transducer based on 0.71Pb(Mg1/3Nb2/3)O3-0.29PbTiO3 single crystal," *J. Appl. Phys.* **107**, 034501 (2010).
 10. H. Kim, A. Batra, S. Priya, K. Uchino, D. Markley, R. Newnham, and H. Hofmann, "Energy harvesting using a piezoelectric 'cymbal' transducer in dynamic environment," *J. Appl. Phys.* **43**, 6178-6183 (2004).
 11. L. Bezanson and J. Thornton, "Utilizing deep ocean currents to power extended duration sensors," *IEEE*, 1-8 (2010).
 12. 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).
 13. 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**, 5763-5767 (2015).
 14. 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).
 15. 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).
 16. A. Mehmood, A. Abdelkefi, A., M. Hajj, A. Nayfeh, I. Akhtar, and A. Nuhait, "Piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibrations of circular cylinder," *J. Sound Vib.* **332**, 4656-4667 (2013).
 17. K. Singh, S. Michelin, and E. de Langre, "Energy harvesting from axial flow induced instabilities in slender structures," *Proc. Int. Conf. FIV.* 735-742 (2012).
 18. C. Grouthier, S. Michelin, and E. de Langre, "Optimal energy harvesting by vortex-induced vibrations in cables," *Proc. Int. Conf. FIV.* 291-298 (2012).
 19. C. Dung and E. Sasaki, "Numerical simulation of output response of PVDF sensor attached on a cantilever beam subjected to impact loading," *Sensors*, **16**, 601 (2016).
 20. J. Qiu, H. Jiang, H. Ji, and K. Zhu, "Comparison between four piezoelectric energy harvesting circuits," *Front. Mech. Eng. China*, **4**, 153-159 (2009).
 21. A. Tabesh and L. Fréchette, "A low-power stand-alone adaptive circuit for harvesting energy from a piezoelectric micropower generator," *IEEE Trans. Ind. Electron.* **57**, 840-849 (2009).
 22. Y. Kushino and H. Koizumi, "Piezoelectric energy harvesting circuit using full-wave voltage doubler rectifier and switched inductor," *Proc. ECCE*, 2310-2315 (2014).

저자 약력

▶ 송 우 진 (Woo-jin Song)



2017년 8월 : 경북대 기계공학과 학사
 2019년 8월 : 국립안동대 교육대학원 기계교육전공 석사
 2022년 9월 ~ 현재 : 현대자동차 글로벌 러닝센터 하이테크 인재육성팀 매니저

▶ 이 종 길 (Jongkil Lee)



1984년 2월 : 부산대 기계설계학과 학사
 1990년 12월 : Univ. of Utah 기계공학과 석사
 1993년 08월 : Univ. of Utah 기계공학과 박사
 1995년 1월 ~ 1998년 2월 : 국방과학연구소 선임연구원
 1998년 3월 ~ 현재 : 국립안동대학교 사범대학 기계교육과 교수