



원형 실린더를 이용한 웨이크 갤로핑 기반 전자기 에너지 수확 시스템

Electromagnetic Energy Harvesting System based on Wake Galloping Using Circular Cylinders

김인호* · 전해민† · 무하마드 우스만** · 정형조***
In-Ho Kim*, Haemin Jeon†, Muhammad Usman** and Hyung-Jo Jung

(Received March 15, 2018 ; Revised June 28, 2018 ; Accepted June 28, 2018)

Key Words : Wake Galloping(웨이크 갤로핑), Energy Harvesting(에너지 하베스팅), Electromagnetic Induction(전자기 유도), Vision Sensor(비전 센서), Displacement(변위)

ABSTRACT

Circular cylinders in various arrangements cause the wake galloping phenomenon during aerodynamic instability. In this paper, a wake-galloping-based electromagnetic energy harvester is proposed and investigated. A front cylinder is fixed, and a downstream cylinder is connected to the cantilever beam in order to increase the amplitude of the system. To conduct the performance evaluation of the system, wind tunnel tests are carried out considering the design parameters, i.e., the gap between the two cylinder and wind speed. The test results verified the performance of the energy harvester system.

기 호 설 명

D : 실린더 직경
 L : 실린더 중심 간격

1. 서 론

교량 및 초고층 빌딩과 같은 대형 구조물은 풍하중의 영향을 받으며, 정적뿐만 아니라 동적 풍하중인 공기력 불안정 현상에 의해서도 영향을 받는다. 이에 토목공학 및 기계항공 분야에서는 이러한 공기력 불안정 현상을 피하거나 버틸 수 있도록 설계한다.

에너지 하베스팅 분야에서는 이러한 공기력 불안정 현상으로부터 진동 기반 에너지를 수확한다. Duncan⁽¹⁾은 가장 먼저 풍력 발전기 대신에 공기력 불안정 현상을 적용하고자 하였으며, 그 후 에어포일 단면의 플러터를 이용한 시스템들을 제안하고, 연구하였다. 또한 평면, 박막 등과 같은 다양한 형상의 단면을 활용한 비-에어포일 기반의 플러터를 이용한 시스템들을 제안하였다. 그 외에도 다른 공기력 불안정 현상을 이용한 에너지 하베스팅 시스템 연구 사례들이 발표되었다.

에너지 하베스팅 시스템은 안정적이고 효과적인 전력 생산이 필수적이기 때문에 최적의 공기력 불안정 현상의 메커니즘을 이해하고, 어떤 현상을 이용

† Corresponding Author; Member, Dept. of Civil and Environmental Engineering Hanbat National University
E-mail : hjeon@hanbat.ac.kr

* Applied Science Research Institute, KAIST

** School of Civil and Environmental Engineering, National University of Science and Technology (NUST), Pakistan

*** Member, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

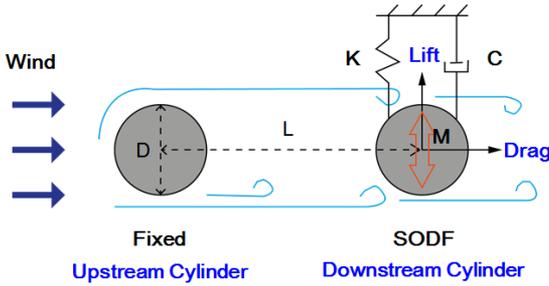


Fig. 1 Simple model of proposed energy harvester

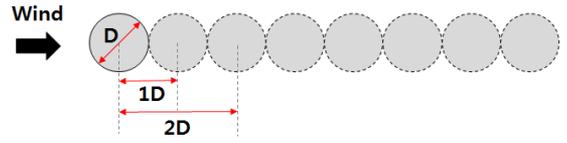


Fig. 2 Simple model of proposed energy harvester

할 것인지 결정해야한다. 이에 정형조와 이승우⁽²⁾는 공기력 불안정 현상을 활용하기 위한 몇 가지 조건들을 제시하였다. 다양한 풍속 조건에서 에너지 수확이 가능해야하고, 태풍 및 돌풍과 같은 극한의 조건에서도 안정적으로 거동해야함을 언급하였다. 그리고 다양한 공기력 불안정 현상에 대해 분석하고, 조건을 만족하는 웨이크 꺾로핑 현상을 선정하였다. 제안한 시스템은 전자기 에너지 수확 시스템으로 가로 방향으로 두 개의 실린더를 설치하여 인공적인 웨이크 꺾로핑을 생성할 수 있도록 하였다. 그러나 풍상측 실린더와 풍하측 실린더가 동시에 진동함에 따라 풍하측에 설치되어 있는 에너지 하베스팅 장치의 거동이 불안정해지는 결과를 얻었다. 게다가 같은 사이즈의 실린더를 사용하고, 외부에 스프링으로 고정된 형태를 지니고 있어 강성 요소를 설계하는데 어려움이 있다는 한계가 있다.

이 논문에서는 풍상측 실린더를 고정시키고 풍하측 실린더를 외팔보와 연결하여 진폭을 늘릴 수 있는 에너지 수확 시스템을 제안하였다. Fig. 1은 제안 시스템의 개요도를 나타낸다. 풍하측 실린더는 풍상측의 고정된 실린더에 의해 공기력이 불안정하게 되면 진동하며, 질량과 스프링으로 되어있는 단자유도의 응답을 가진다.

2. 웨이크 꺾로핑 현상

유체 유동 방향으로 배열된 실린더에서 풍하측에 위치한 구조물은 공기력에 의해 진동이 발생하게 된다. 이 연구에서는 다양한 공기력 진동 현상 중 비교적 낮은 풍속에서 발현이 가능하고 높은 풍속에서 발산하지 않는 웨이크 꺾로핑 현상을 고려하였다. 웨이크 꺾로핑 현상은 실린더의 고유진동수 및 지

름, 감쇠비, 질량 등 다양한 변수에 따라 발현된다. 하지만, 가장 중요한 것은 두 실린더 사이의 중심 간격이다^(3,4). 중심 간격은 동일한 직경을 가진 두 개의 실린더가 있을 때 각 실린더의 중심축 사이의 거리를 말하며, 두 실린더 사이의 중심간격(D)은 Fig. 2에 나타나 있다⁽⁵⁾.

바람이 실린더와 같은 원형 구조물을 통과하게 되면 주기적인 와류(vortex)가 발생하여 구조물은 일정한 주기를 갖는 양력을 받는다⁽⁶⁾. 원형 실린더가 유체 유동 방향으로 배열되어 있을 때 풍하측 실린더는 양력뿐 아니라 풍상측 구조물에 의해 발생하는 후류가 버퍼팅(buffeting)이 되어 응답하게 된다. 이는 풍상측 실린더로부터 발생된 전단층 외부에 풍하측 실린더가 있을 경우 전단층 중심 방향으로 추가적인 공기력에 의해 일어난다. 이러한 메커니즘은 구조물의 고유진동수의 영향을 받아 공진하기 때문에 작은 공기력으로도 큰 진동을 일으킬 수 있다. 후류에 의한 응답은 중심 간격이 넓어짐에 따라 줄어든다. 일반적으로 웨이크 꺾로핑은 실린더의 중심 간격이 실린더 지름의 4~6배 사이로 배치될 때 발현되는 것으로 보고되었다.

Fig. 1과 같이 배치된 후류측 실린더에 작용하는 공기력은 다음과 같다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_D \tag{1}$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_L \tag{2}$$

여기서, U 는 실린더에 접근하는 순간 풍속, ρ 는 공기중의 밀도, A 는 실린더에 작용하는 투영 면적, C_D 는 항력 계수, 그리고 C_L 은 양력 계수를 나타낸다. 풍하측 실린더는 1자유도로 구성된 운동방정식을 통해 불안정 현상을 확인할 수 있다⁽⁵⁾.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_L - F_{em} \tag{3}$$

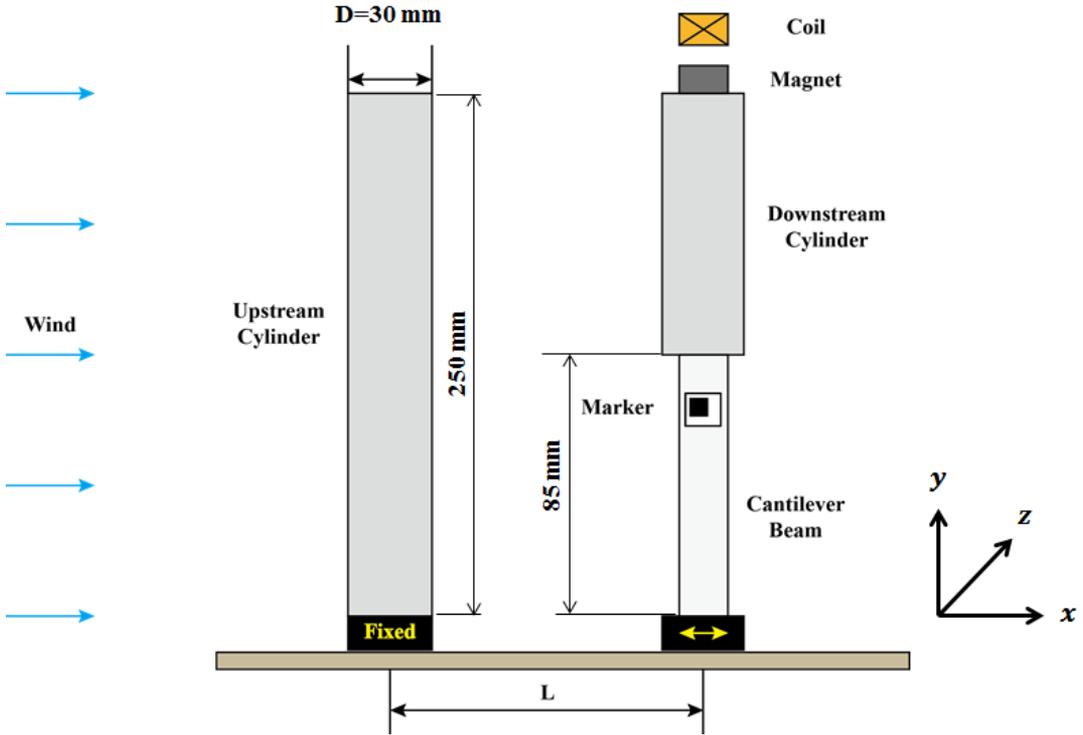


Fig. 3 Schematic of the proposed energy harvester

여기서, F_{em} 은 전자기력으로 전자기계 결합계수와 코일 속을 흐르는 전류의 곱으로 표현될 수 있다.

일반적으로 풍상측 실린더의 압력은 이론과 거의 일치하지만 풍하측 실린더의 압력은 분리점과 와류의 영향으로 레이놀드(Re) 수의 영향을 받게 된다. 한 개의 실린더로는 흐름 방향으로 경계층을 위한 대칭 중심선이 없어 웨이크 갈로핑 현상이 일어나지 않기 때문에 두 개의 실린더가 고려되지만 항상 웨이크 갈로핑 현상이 발생하는 것은 아니며 유체 유동 방향으로 배열된 원주는 공간적인 배치에 따라 다양한 메커니즘이 존재한다. Zdravkovich⁽⁷⁾는 병렬 원주의 공간적인 배치에 따라 발생하는 메커니즘을 4개로 구분하였다. 일반적으로 웨이크 갈로핑은 gap flow switch와 wake displacement 메커니즘에 의한 진동 현상을 말한다. 원주의 중심 간격이 직경의 3.5~4배 이내일 경우에는 gap flow switch 메커니즘이, 이상일 경우에는 wake displacement 메커니즘에 의한 가진이 발생한다. Gap flow switch에 의해 진동이 발생할 때는 특정 풍속에서 진폭이 급격하게 커지며, 풍속이 변동할 경우 불안정 궤도 응답을 보

인다. 그러나 wake displacement에 의한 진동은 풍속에 따라 진폭이 점증적으로 증가하는 안정적인 거동을 보이기 때문에 에너지 수확 시스템을 위한 공기력으로 적합함을 알 수 있다.

3. 웨이크 갈로핑 기반 에너지 하베스팅 시스템

3.1 개요

웨이크 갈로핑은 실린더 사이의 중심 간격과 풍속의 영향을 가장 많이 받기 때문에 중심 간격을 조절할 수 있도록 시스템을 구현하였다. Fig. 3은 제안된 에너지 수확 시스템의 개요도를 나타낸 것이다. 직경이 같은 두 개의 실린더를 고려하였으며, 풍상측 실린더는 중심 간격이 넓어질 경우 버퍼팅에 의한 응답 감소를 최소화하기 위해 고정하였으며, 풍하측 실린더는 에너지 수확을 위해 질량-강성의 단자유도 시스템으로 구성하였다. 또한 에너지 수확부를 포함한 풍하측 실린더의 공진주파수는 5.322 Hz로 설계하였다.

3.2 전자기 유도 시스템

이 연구에서는 에너지를 수확하는 방법으로 전자기 유도 메커니즘을 이용하였다. 풍상측 실린더는 고정하고 풍하측 실린더는 중심 간격을 조절할 수 있도록 지그를 고려하였으며, 풍하측 실린더는 단자 유도 시스템 구성을 위해 수직으로 세워진 외팔보 위에 실린더를 연결하고, 상부에 자석을 부착하였다. 이와 같이 외팔보를 강성으로 고려할 경우 제작 및 시스템 해석이 용이해지는 장점이 있다.

에너지 수확부는 전자기 유도 시스템을 이용할 수 있도록 풍하측 실린더에 자석을 설치하였고, 추가 지그를 연결하여 코일을 부착하였다. 전자기 유도 기반의 에너지 수확 시스템은 자속밀도(B), 자속의 접선 방향 길이(ω), 코일 턴수(N), 그리고 자석과 코일의 상대속도 (dx/dt)에 비례하며, 유도되는 전압(emf)은 식 (4)와 같다. 시스템에서 사용한 자석은 0.5 T 네오디뮴을 이용하였고, 실린더의 움직임에 따라 함께 거동한다. 코일은 0.45 mm의 에나

멜선을 1370턴하여 제작되었다.

$$emf = NB\omega \frac{dx}{dt} \tag{4}$$

4. 풍동 실험 및 결과 분석

4.1 풍동 장치

제안 시스템의 성능 검증을 위해 이 연구에서는 Fig. 4와 같은 30(W) × 30(H) × 200(L) cm의 소형 풍동을 활용하였다. 풍력발전기는 시험부, 1.5 kW급 웬모터(220V, 단상), 컨트롤 박스, 열선타입 풍속계(Kanomax, 일본)로 구성되어 있으며, 시험부 유속은 최대 15 m/s이다. 웬모터의 회전에 의해 발생하는 바람은 정류되어 시험부까지 흐르며, 별도의 확산부는 고려하지 않았다. 풍속은 컨트롤러를 통해 점진적으로 원하는 속도까지 높아지며, 이 연구에서는 열선 풍속계의 수치를 확인하고 안정화시킨 후 실험을 수행하였다.

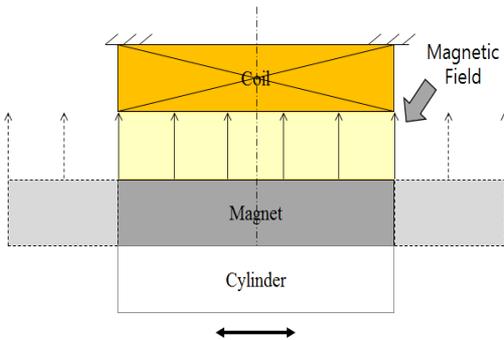


Fig. 4 Electromagnetic system

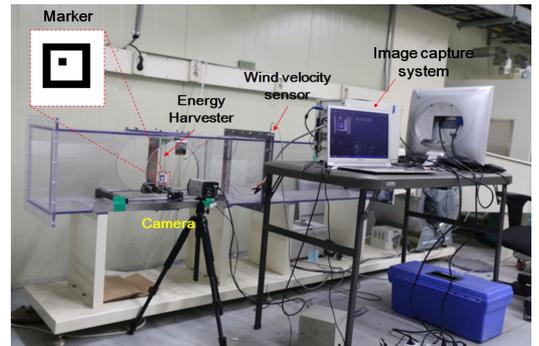


Fig. 6 Experimental setup

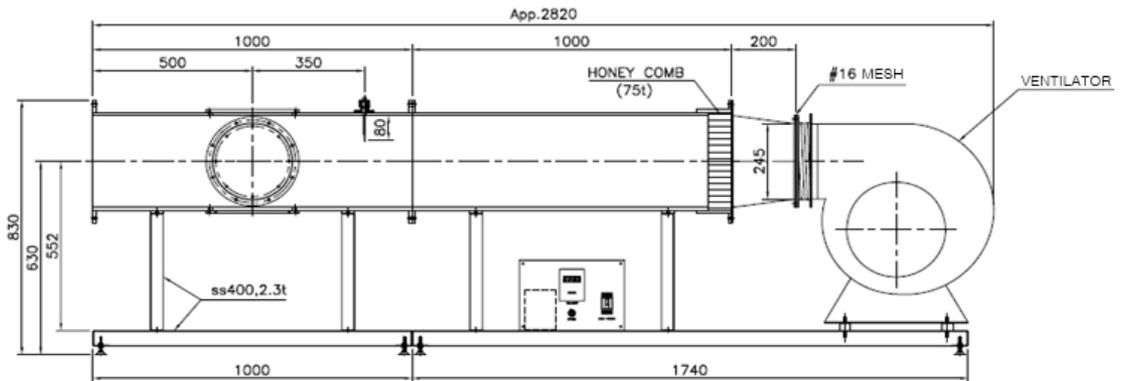


Fig. 5 Wind tunnel

4.2 실험 Setup

이 연구에서는 제안 시스템의 성능을 평가하기 위해 풍동 실험을 수행하였다. 시스템은 웬모터에 의해 발생하는 바람이 정류된 후 열선 풍속계를 통해 실험 풍속을 확인할 수 있도록 시험부에 설치하였다. 시스템은 질량-스프링 형태의 전자기 유도 시스템으로 소형 가속도계를 설치하더라도 질량에 영향을 주고, 일반적인 레이저 변위계는 1축 변위만 측정하기 때문에 이 연구에서는 마커 기반의 변위 측정 시스템을 구축하였다. 마커는 외팔보에 부착하였으며, 시험부를 통해 마커를 볼 수 있도록 Fig. 6과 같이 카메라를 설치하였다. 영상 획득 과정에서 발생할 수 있는 카메라 흔들림을 억제하기 위해 이 연구에서는 video in/out 케이블을 활용하여 컴퓨터로 영상을 획득할 수 있도록 하였다. 이 연구는 활용 가능성을 확인하는 연구로 전압만을 측정하였으며, 열린 회로(open circuit)를 고려하여 데이터를 획득하였다.

4.3 비전 센서를 이용한 변위 측정

시스템의 거동은 다양한 센서를 부착하여 확인이 가능하다. 하지만 질량-강성 모델로 구성된 시스템에서 질량이 작을 경우 센서의 무게가 영향을 주기 때문에 부착하는데 어려움이 있다. 특히, 에너지 하베스팅 시스템의 경우 질량이 매우 작기 때문에 거동을 확인하기 위해 부착형 센서가 아닌 새로운 대안이 필요하다. 기존에는 레이저 기반 비접촉식 변위 측정 시스템이 활용되었지만 단방향 측정이 주를 이루고, 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 이 연구에서는 비전 센서 및 마커를 활용한 6자유도 변위 측정 시스템을 활용하였다. 호모그래피 기반 6자유도 변위 측정 시스템을 통해 회전 및 선형 변위를 측정하였다⁽⁸⁾. 비전 기반 변위 측정의 절차는 크게 사전 단계 및 계측 단계로 구분할 수 있다. 먼저, 사전 단계에서는 계측 장비인 카메라를 고정시키고, 포커싱을 수동으로 설정한다. 그리고 카메라 보정을 위해 체커보드를 다양한 거리, 각도로 조정하여 영상을 확보하고 이를 바탕으로 영상의 왜곡을 보정한다. 계측 단계에서는 Fig. 3과 같은 마커를 대상 구조물에 부착하고 영상을 획득하며 실제 마커 코너점의 위치 및 획득된 영상 내의 코너점의 위치를 통해 마커의 6자유도 움직임을 계산한다.

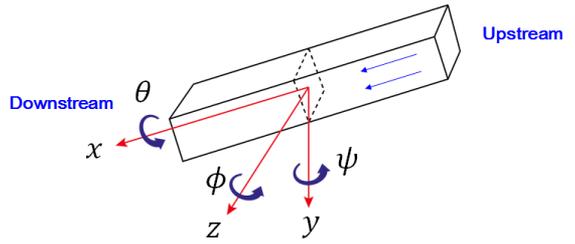


Fig. 7 6-DOF coordinates

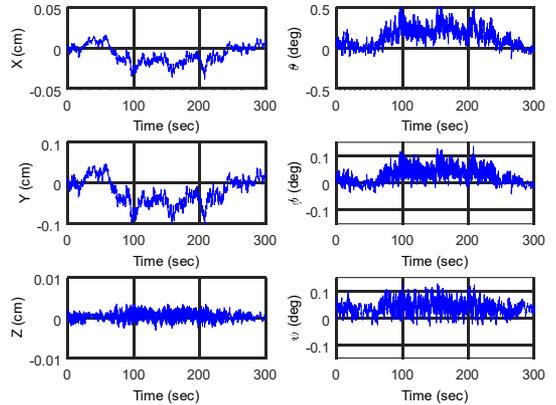


Fig. 8 6DOF displacement (3D case)

이 연구에서 비전 센서와 마커 시스템을 이용하여 측정된 선형 및 회전변위는 Fig. 7과 같다. x 방향은 풍하측 방향, y 방향은 수직 방향, 그리고 z 방향은 비전 카메라와 마커가 일직선으로 놓여있는 방향이다. 그리고 각 방향에 대한 회전이 있다.

비전 센서를 이용하여 중심 간격별 6자유도 변위를 확인한 결과는 Fig. 8과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 기류 방향인 x축을 기준으로 하는 회전(θ)이 가장 크게 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 풍하측 실린더가 외팔보를 포함하여 전체적으로 움직이기 보다는 풍상측에서 발생하는 공기력의 영향을 받아 실린더가 움직이는 것으로 볼 수 있다. 즉, 풍하측의 실린더는 공기력을 받을 수 있도록 크기를 고려해야 한다.

4.4 에너지 수확 결과

이 연구에서 제안한 에너지 수확 시스템은 웨이크 갤로핑 기반의 전자기 유도 시스템으로 영구자석과 솔레노이드 코일로 구성된 기본적인 형태를 지니고 있다⁽⁹⁾. 따라서, 제안 시스템을 통해 발생하는 전

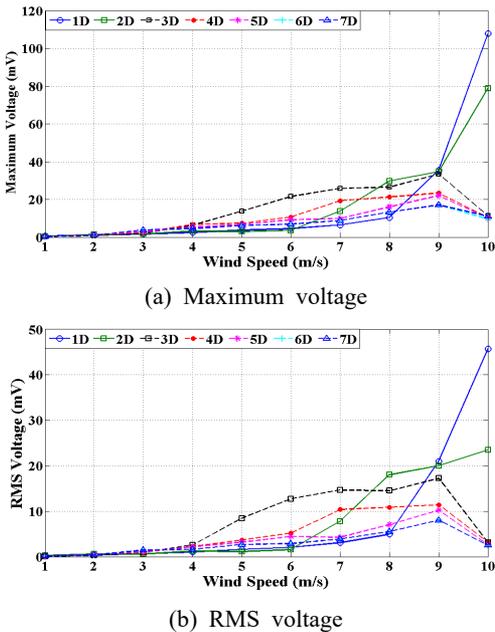


Fig. 9 Output voltage generated energy harvester

압은 페리데이의 전자기 유도법칙을 따르고, 자석과 코일의 속도에 비례한다⁽¹⁰⁾.

Fig. 9는 제안 시스템의 풍동 실험 결과를 나타낸다. 2.1절에서 언급한 바와 같이 1D와 2D는 gap flow switch에 의한 진동이 발생하여 특정 풍속에서 진폭이 급격하게 커지는 응답을 확인할 수 있다. 반면 3~7D는 풍속이 증가하여도 안정적으로 전력 생산이 가능한 것을 확인할 수 있다. 이는 과도한 풍속이 불 경우에도 제안 시스템의 안정성이 확보되는 것을 보여준다. 또한 발현 풍속을 낮추기 위해 실린더의 단위 길이당 질량 및 감쇠를 최소화하면 도시 공간의 낮은 풍속에서도 발전이 가능할 것으로 판단된다. 이는 도시 공간에서 IoT 센서의 전력원으로 활용 가능성을 시사한다⁽¹¹⁾.

5. 결 론

이 연구에서는 공기력 불안정 현상중 하나인 웨이크 갤로핑 현상을 발현할 수 있는 에너지 하베스팅을 제안하고, 풍동 실험을 통해 성능을 확인하였다. 제안 시스템은 풍상측의 실린더 하부를 지그에 고정시키고 풍하측의 실린더를 외팔보와 연결하여 진동이 되도록 설계하였다. 웨이크 갤로핑에 의한

시스템의 진동 특성은 비전 카메라와 마커를 이용한 6자유도 변위를 계측을 통해 수행하였다. 제안 시스템의 경우 병진 운동보다는 기류 방향으로의 회전이 주로 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 풍상측에서 발생하는 공기력이 풍하측 실린더에 작용하여 발생하는 것으로 볼 수 있으며, 충분한 공기력을 받을 수 있도록 시스템을 설계하는 것이 중요함을 보여준다. 그리고 에너지 수확 결과에서 1D와 2D는 특정 풍속에서 진폭이 급격하게 증가하는 gap flow switch가 발생하고, 3~7D에서는 풍속이 증가하여도 안정적으로 전력 생산이 가능함을 확인하였다. 따라서, 이 제안 시스템은 IoT 센서 등의 전력원으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 추후 연구에서는 시스템의 현장 적용을 위해 대상지의 풍하중 조건에 대한 분석, 시스템의 방향성, 부하 저항을 고려한 출력 성능 검증, 그리고 센서 시스템과의 연계 등이 고려되어야 할 것이다.

References

- (1) Duncan, J. W., 1948, The Fundamentals of Flutter, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 17, No. 2, pp. 32~38.
- (2) Jung, H. J. and Lee, S. W., 2011, The Experimental Validation of a New Energy Harvesting System based on the Wake Galloping Phenomenon, Smart Materials and Structures, Vol. 20, No. 5, 055022.
- (3) Kim, I. H., Usman, M., Park, J. C. and Jung, H. J., 2016, Piezoelectric based Energy Harvesting System Using Wake Galloping, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 653~654.
- (4) Lee, S. W., Jung, H. J., Kim, J. M. and Kim, Y. S., 2010, Feasibility Tests of Energy Harvesting Devices based on Aerodynamic Instability Phenomena, Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 14, No. 1, pp. 59~65.
- (5) Lee, S. W., 2013, Energy Harvesting System based on Wake Galloping Phenomenon, Ph.D. Dissertation, KAIST.
- (6) Park, S. M. and Song, O., 2018, Experimental Tests to Identify the Condition for Galloping of Ice Accreted Transmission Conductors with Attack Angle Variation, Transactions of the Korean Society for Noise

and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 92~101.

(7) Zdravkovich, M. M., 1987, The Effects of Interference between Circular Cylinders in Cross Flow, Journal of Fluids and Structures, Vol. 1, No. 2, pp. 239~261.

(8) Jeon, H. M., Kim, Y. J., Lee, D. H. and Myung, H., 2014, Vision-based Remote 6-DOF Structural Displacement Monitoring System Using a Unique Marker, Smart Structures and Systems, Vol. 13, No. 6, pp. 927~942.

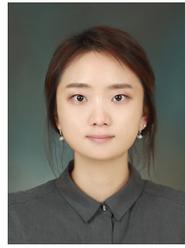
(9) Kim, S. J., 2012, Evaluation of Characteristics of Wake Galloping for Parallel Cylinders by Two Dimensional Wind Tunnel Tests, Master's Thesis, Seoul National University.

(10) Beeby, S. P., Wang, L., Zhu, D., Weddell, A. S., Merrett, G. V., Stark, B., Szarka, G. and Al-Hashimi, B. M., 2013, A Comparison of Power Output from Linear and Nonlinear Kinetic Energy Harvesters Using Real Vibration Data, Smart Materials and Structures, Vol. 22, No. 7, 075022.

(11) Jung, H. J., Kim, I. H. and Jang, S. J., 2011, An Energy Harvesting System using the Wind-induced Vibration of a Stay Cable for Powering a Wireless Sensor Node, Smart Materials and Structures, Vol. 20, No. 7, 075001.



In-Ho Kim received the Ph.D. degree in Civil Engineering from KAIST in 2016. He is currently Post-Doctoral Researcher of Applied Science Research Institute in KAIST. His research interests are structural control using smart materials, vibrational energy harvesting and UAV based bridge inspection using image processing and deep learning.



Haemin Jeon received the B.S. degree in Spatial Environmental System Engineering from Handong Global University, Pohang, Korea, in 2008, and the M.S. and Ph.D degrees in Civil and Environmental Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea, in 2010 and 2014, respectively. She was a senior researcher with Agency for Defence Development (ADD) from 2014 to 2016. Since 2016, she is an assistant professor in Department of Civil and Environmental Engineering at Hanbat National University. Her research interests include structural health monitoring using robotics, soft computing, and sensor fusion.



Muhammad Usman received the B.S. degree in Civil Engineering from NUST Pakistan in 2007, MS and Ph.D. degrees in Civil Engineering from KAIST in 2010 and 2016, respectively. He is currently Assistant Professor at School of Civil and Environmental Engineering in NUST. His research interests are structural dynamics and energy harvesting



Hyung-Jo Jung received the B.S. degree in Mechanical Engineering from KAIST in 1993, MS and Ph.D. degrees in Civil Engineering from KAIST in 1995 and 1999, respectively. He is currently Professor of Department of Civil Engineering and Environmental Engineering in KAIST. His research interests are structural control using smart materials, structural health monitoring, energy harvesting and bridge inspection using UAV.