



두 원형실린더의 유동유발진동 현상을 이용하는 해양신재생에너지 변환기의 발전 효율에 발전기의 감쇠비가 미치는 영향에 관한 연구

김은수¹⁾ · 박홍래^{2)*} · 김동휘³⁾ · 백형민³⁾ · Michael M. Bernitsas⁴⁾

Effects of the Damping Ratios of Power Generators on Power Efficiency of an Ocean Renewable Energy Converter Utilizing Flow Induced Vibrations of Two Circular Cylinders

Eun Soo Kim¹⁾ · Hongrae Park^{2)*} · Dong Hwi Kim³⁾ · Hyung-min Baek³⁾ · Michael M. Bernitsas⁴⁾

Received 26 September 2019 Revised 24 December 2019 Accepted 28 January 2020

ABSTRACT Most countries in the world are trying to reduce the use of fossil fuels in the production of electricity and replace them with renewable energy technologies. In Korea, there are abundant ocean renewable energy sources that will play an important role in power generation in the future. This paper introduces a new tidal energy converter utilizing flow induced vibration (FIV), which can work efficiently, even in the currents slower than 1.0m/s. All tests were conducted at the Marine Renewable Energy Laboratory at the University of Michigan to examine the effects of the damping ratio of the electric generators on the power outputs and power efficiencies. In these tests, two identical circular cylinders were used, and passive turbulence controllers were applied to the surface of the cylinders to enhance the FIV. The experimental results showed that by using the two cylinders in the FIV, the power output and efficiency reached up to 31 W and 36%, respectively. In particular, the results showed that the power efficiency was higher at the relatively low flow speed ($4 < U^* < U$ or $0.45 < U < 0.9$ m/s). This indicates that this tidal converter can work efficiently, even at low flow speeds, and will enable the use of more tidal energy.

Key words Tidal current energy converter(조류에너지 변환기), Flow induced vibration(유동유발진동), Power output(발전량), Power efficiency(발전효율)

- 1) Assistant Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University
- 2) Researcher, Research Center of Ship and Offshore Structure, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering
- 3) Ph.D. Candidate, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University
- 4) Professor, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan

*Corresponding author: bblwith@gmail.com

Tel: +82-2-2129-3723

Fax: +82-2-2129-3725

Nomenclature

- A : amplitude, m
 B : distance between the center of cylinders, m
 $C_{harness}$: harness damping coefficient, Ns/m
 $C_{structure}$: structural damping coefficient, Ns/m
 C_{total} : total system damping coefficient, Ns/m
 D : diameter of the cylinder, m

- F_{fluid} : fluid force, N
- f_{osc} : natural frequency in water, Hz
- f_{osc} : oscillating frequency, Hz
- K : spring stiffness, N/m
- k : average particle size of a roughness strip, μm
- L : length of the cylinder, m
- m_{osc} : oscillating mass, kg
- m_a : ideal added mass, kg
- m_d : fluid mass displaced by cylinder, kg
- $m^* = m_{osc}/m_d$: mass ratio
- p : thickness of backup paper and double-sided tape of the roughness strip, μm
- P_{mech} : converted mechanical power, W
- $P_{harness}$: harness power, W
- P_{fluid} : power in fluid in the area swept by cylinders, W
- Re_D : reynolds number
- T_{osc} : period of oscillation, sec
- t : time, sec
- U : flow speed, m/s
- U^* : reduced velocity
- y : displacement of the cylinder, m
- \dot{y} : velocity of the cylinder, m/s
- \ddot{y} : velocity of the cylinder, m/s^2
- ζ_{srt} : structural damping ratio
- $\zeta_{harness}$: harness damping ratio
- η_{mech} : mechanical power efficiency
- $\eta_{harness}$: power harness efficiency
- ρ : density of a fluid, kg/m^3

Subscript

- VIVACE : vortex induced vibration for aquatic clean energy converter
- MRELab : marine renewable energy laboratory
- PTC : passive turbulence controller
- Vck : virtual-damper-spring
- VIV : vortex induced vibration

1. 서론

기존의 화석연료 사용으로 인한 환경오염과 지구 온난화 문제를 극복하기 위해 신재생에너지를 이용한 발전기술이 중요해지고 있다^[1]. 한국에너지공단의 ‘글로벌 내연기관 자동차 판매 금지 동향 보고서’^[2]에 따르면 노르웨이와 네덜란드는 2025년부터, 영국과 프랑스는 2040년부터 그리고 인도는 2030년부터 내연기관 차량의 판매를 금지하는 정책을 발표하였고 중국도 내연기관 자동차의 판매 중단 계획안을 마련 중이다. 이에 따라 가까운 미래에 내연기관 자동차를 대신하여 전기자동차와 수소연료 자동차의 수요가 급증할 것으로 예상된다^[3]. 근본적으로 화석연료의 사용을 줄이기 위해서는 전기자동차의 충전과 수소연료 생산을 위해 필요한 전기 발전 기술도 신재생에너지 자원을 이용한 친환경기술로 대체되어야 한다.

3면이 바다로 형성된 우리나라는 풍부한 해양신재생에너지 자원을 보유하고 있으며, 특히 서남해안에는 조류의 속도가 빠른 해협이 많아 조류에너지 발전에 유리한 여건을 가지고 있다^[4]. 날씨와 계절의 영향을 많이 받는 태양광 에너지나 풍력 에너지와^[5] 비교하여 조류에너지는 상대적으로 연중 일정하게 유지되어 발전량을 예측하기 용이하다. 또한, 공기와 비교하여 밀도가 대략 850배 높은 해수를 이용하므로 상대적으로 낮은 유속에서 높은 에너지밀도를 가지고 있는 것이 장점이다.

기존의 조류에너지를 이용한 발전기술에 관한 연구는 수평축 터빈이나 수직축 터빈을 이용한 기술에 관한 연구가 대부분이었다. 본 논문에서는 유동유발진동 현상을 이용하여 조류의 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 발전기술을 소개하고자 한다. 또한, 두 개의 원형실린더에서 발생하는 유동유발진동 현상을 이용한 발전기술의 발전량과 발전효율에 전기발전기의 감쇠비가 미치는 영향을 실험적으로 규명하고자 한다. 이 연구의 모든 실험은 University of Michigan의 Marine Renewable Energy Laboratory (MRELab)에서 진행되었다. 유속에 따라 터빈형 발전기술과 유동유발진동 발전기술을 병행하여 사용한다면 우리나라 해안의 조류에너지를 효율적으로 이용할 수 있을 것이며, 신재생에너지 전력자원으로 조류에너지가 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 유동유발진동을 이용한 조류에너지 발전

유동유발진동 현상은 유동에 놓인 대부분의 구조물에서 발생한다. 유동장의 압력변화에 의해 발생하는 변동하중은 구조물에 장기간 피로 하중을 일으켜 구조물의 안전성을 저해한다. 특히, 강한 바람이나 조류에 놓인 구조물의 경우 강한 진동이 발생하여 구조물이 파괴되기도 한다. 이 때문에 유동유발진동의 현상에 관한 대부분의 연구는 이를 예측하고 억제하기 위한 방법을 찾는 것이 목적이 있었다. 하지만, 반대로 생각했을 경우 유동유발진동 현상은 유체의 운동에너지를 매우 효과적으로 구조물의 기계적 에너지로 변환시키는 과정으로도 볼 수 있다. 이와 같은 생각의 전환으로 2006년 University of Michigan의 MRELab에서는 유동유발진동 현상을 이용하여 강과 해안의 유동이나 조류의 운동에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 Vortex Induced Vibration for Aquatic Clean Energy Converter (VIVACE)를 발명하였다^[6~8]. Fig. 1은 원형실린더의 주변에서 발생하는 유동 현상과 VIVACE가 전력을 생산하는 원리 보여준다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 이 기술은 원형실린더에서 발생하는 유동유발진동을 이용한다. 실린더가 유동 방향의 수직으로 진동하게 함으로써 유동에너지를 기계적 에너지로 흡수한 후 이를 전기발전기를 통해 전력을 생산한다. 터빈형 발전기는 한 방향으로 작용하는 양력을 이용하여 회전 날개가 한 방향으로 회전하며 전력을 생산하는 반면, 유동

유발진동을 이용한 발전기술은 주기적으로 상하 또는 좌우로 변화하는 양력을 이용한 기술이다. 선행연구들을 통해 다중의 실린더를 유동방향으로 직렬로 근접하게 배열하였을 때 특정 유속영역에서 유동간섭현상이 유동유발진동 현상을 강화시켜 총 기계적 에너지 변환량이 각각의 실린더를 개별적으로 운용할 때 발생하는 총 에너지 변환량과 비교해 대략 2배까지 증가할 수 있다는 사실을 실험적으로 보여주었다^[9,10]. 또한, 유동간섭현상을 이용할 경우 발전효율도 최대 44.3%까지 달성할 수 있을 것으로 예측되었다^[10]. 터빈형 조류발전기술은 대부분 유속이 1.5 m/s의 해안에서 35~45%에 이르는 높은 효율을 보이므로 서남해안의 유속이 빠른 해협에서 유리하다^[4,11]. 반면, 선행연구 결과들에 따르면 유동유발진동 현상을 이용한 발전기술은 유동 속도가 저속인 영역에서 상대적으로 높은 발전효율을 보인다^[9,10]. 강이나 조류의 속도가 낮은 해안에 이 기술을 적용할 경우 더 많은 조류에너지를 이용하여 전력을 생산할 수 있을 것이다. 이처럼 유속에 따라 터빈형 발전기술과 유동유발진동을 이용한 발전기술을 적절히 적용할 경우 우리나라 해안의 조류에너지 이용률을 획기적으로 높일 수 있을 것으로 기대된다.

선행연구^[10]에서는 유동에너지를 기계적 에너지 변환량만을 측정하였고 전력변환량은 이론적으로 예측한 값을 제시하였다. 본 연구는 전기발전기가 전력 생산을 위해 시스템에 추가하는 감쇠비를 변화시켜 가면서 실제 전력변환량과 변환효율을 측정된 결과를 제시한다.

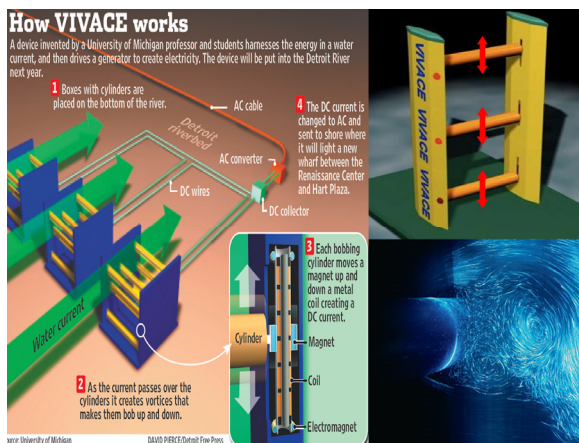


Fig. 1. Concept design of VIVACE (courtesy of Vortex Hydro Energy Inc. and Detroit Press)

3. 실험적 연구방법

본 연구에서는 직렬로 배열된 두 개의 동일한 원형실린더를 이용하여 23개의 다른 유속과 6개의 전기발전기의 감쇠비를 이용하여, 총 138개의 다른 조건에서 실험을 진행하였다. 스프링 상수 K 와 중심 간의 거리비 B/D 는 각각 755 N/m와 2.57로 고정되었다. 여기에서, B 와 D 는 각각 실린더의 중심 간의 거리와 실린더의 직경을 의미한다. 각 실험 조건에서 데이터는 60초씩 측정하였다. 모든 실험은 공동연구를 진행한 University of Michigan의 MRELab에서 수행되었으며, 실험에는 Fig. 2에 보이는 회류구조와

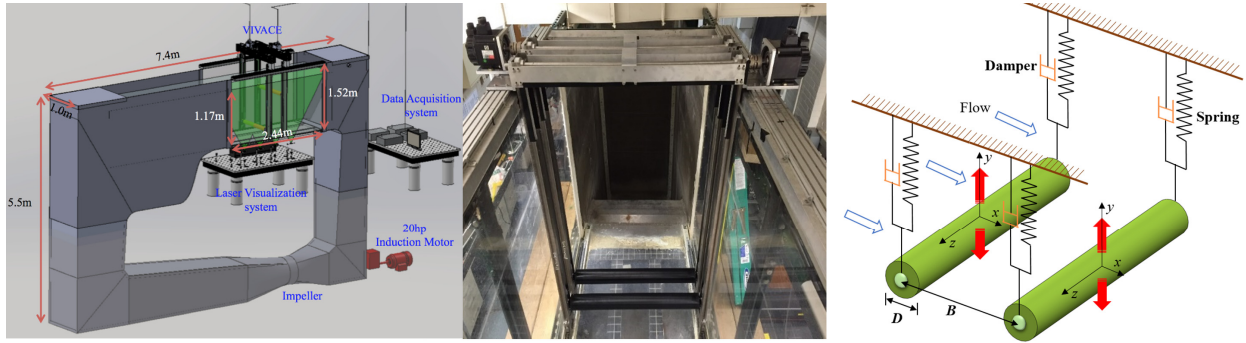


Fig. 2. Schematic of the recirculating water channel (left), two lab-scale converters (center) and, schematic of the converters (right)

Table 1. Details of experimental conditions

	Symbol	1st Device	2nd Device
Diameter (m)	D	0.089	0.089
Length (m)	L	0.902	0.902
Oscillating mass (kg)	m_{osc}	7.286	7.302
Fluid mass displaced by cylinder (kg)	m_d	5.432	5.432
Ideal added mass (kg)	m_a	5.432	5.432
Mass ratio ($m^* = m_{osc} / m_d$)	m^*	1.341	1.344
Spring stiffness (N/m)	K	755	755
Natural frequency in water (Hz)	$f_{n, water}$	1.226	1.225
Structural damping ratio	ζ_{str}	0.02	0.02
Damping ratios induced by generators	$\zeta_{harness}$	0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.20, 0.24	
Horizontal spacing between the centers of two cylinders	B/D	2.57	
Temperature of water ($^{\circ}C$)		20.5	
Flow speeds (m/s)	U	0.350~1.320()	

실험실 스케일로 제작된 두 대의 유동유발 발전기가 이용되었다. 실험 조건에 관한 자세한 정보는 Table 1에서 확인할 수 있다. 유체부가질량을 포함한 고유진동수 $f_{n, water}$ 와 레이놀즈수는 식 (1)과 (2)로 정의된다.

$$f_{n, water} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_{osc} + m_a}} \quad [Hz] \quad (1)$$

$$Re_D = \frac{UD}{\nu} \quad (2)$$

여기서 ν 는 물의 동점성도이다.

VIVACE에 설치된 원형실린더는 유동 방향에 대해 수직으로만 움직일 수 있으며, Fig. 3과 같이 두 개의 passive turbulent controller (PTC)를 실린더의 표면에는 대칭으

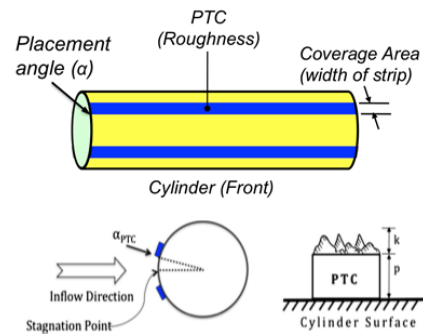


Fig. 3. Configuration of Passive Turbulent Controller

로 부착하였다. PTC의 세부 정보는 Table 2에서 확인할 수 있다. 선행연구들은 PTC를 부착한 실린더에서 더 강한 유동유발진동이 발생하며 원형실린더에서도 Galloping이 발생할 수 있다는 사실을 보여주었다^[8,9]. 이는 결과적으로

Table 2. Details of Passive Turbulent Controller

ISO/FEPA Grit designation	P60
Average particle diameter of roughness (k)	269 μm
Thickness of paper and double-sided tape (p)	578 μm
k/D	$3.02 \cdot 10^{-3}$
$(k+p)/D$	$9.51 \cdot 10^{-3}$
Width of PTC (16° for $D=8.9$ cm)	12.7 mm
Angle of PTC	20°

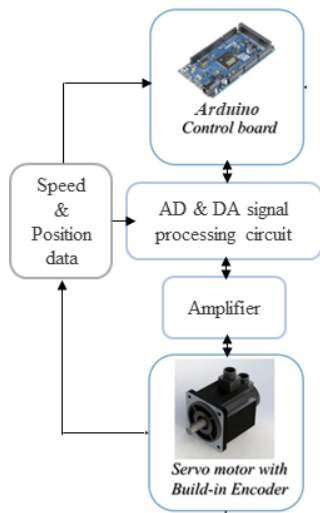


Fig. 4. Schematic of Virtual-damper-spring system (reproduced from Sun et al, 2015^[11])

더 많은 유동에너지를 기계적 에너지로 변환할 수 있다는 사실을 의미한다.

본 연구에서는 Virtual-damper-spring(Vck) 시스템 (Fig. 4)을 이용하여 감쇠비를 유속에 따라 조절하면서 실험을 진행하였다. MRELab에서 6년의 연구를 통해서 개발한 Vck 시스템은 실시간으로 측정된 실린더의 위치와 속도 정보를 바탕으로 스프링 힘과 전력생산을 위해 전기발전기가 시스템에 추가하는 감쇠력을 서보모터의 토크로 실시간으로 피드백하는 시스템이다^[13].

4. 실험결과

두 개의 실린더에서 측정된 위치와 속도 데이터를 이용

하여 유체동력이 시스템의 기계적 동력으로 변환된 총량, 전기발전기를 통해 발전된 전력량 그리고 기계적 효율과 발전효율을 계산하였다.

유동유발진동에 의해 가진이 된 실린더의 운동방정식은 식 (3)과 같으며 각 실린더의 동적반응은 일부 구간을 제외하고 대부분의 유속구간에서 조화응답으로 볼 수 있다^[9].

$$m_{osc}\ddot{y} + c_{total}\dot{y} + Ky = F_{fluid} \quad (3)$$

여기에서, c_{total} 은 구조물의 감쇠상수와 전기발전기에 의한 감쇠상수를 합한 시스템 전체 감쇠상수를 나타낸다. c_{total} 은 기계적 구조물에 의해 발생된 감쇠비 ζ_{str} 와 전력생산을 위해 전기발전기에 의해 시스템에 추가된 감쇠비 $\zeta_{hariness}$ 를 이용하여 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$c_{total} = 2(\zeta_{str} + \zeta_{hariness})\sqrt{m_{osc}K} \text{ [Ns/m]} \quad (4)$$

그리고, F_{fluid} 는 유체력으로 원형실린더의 운동을 발생시킨다.

Fig. 5와 6은 각 유속에서 직렬로 배열된 두 실린더의 감쇠비의 변화에 따른 진폭비와 진동수비를 측정된 결과를 보여준다. 데이터를 측정하는 60초 동안 60회 이상의 진동주기가 반복된다. 진폭비 A/D 는 양의 진폭과 음의 진폭의 절대값 각 상위 60개를 취한 평균값을 실린더의 직경으로 나눈 값이다. 60개 진폭값의 표준편차를 실린더의 직경으로 나눈 값은 오차막대를 이용하여 그래프에 표기되었다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 진폭비의 표준편차는 대부분의 구간에서 진폭비와 비교해 매우 작은 것을 확인할 수 있다.

Vortex Induced Vibration(VIV)는 실린더 주변에서 Vortex shedding이 주기적으로 발생되어 야기되는 현상으로 Reduced velocity가 일반적으로 $4 < U^* < 10$ 유속영역에서 발생한다^[8,9]. 여기서 Reduced velocity는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$U^* = \frac{U}{f_{n,w}D} \quad (5)$$

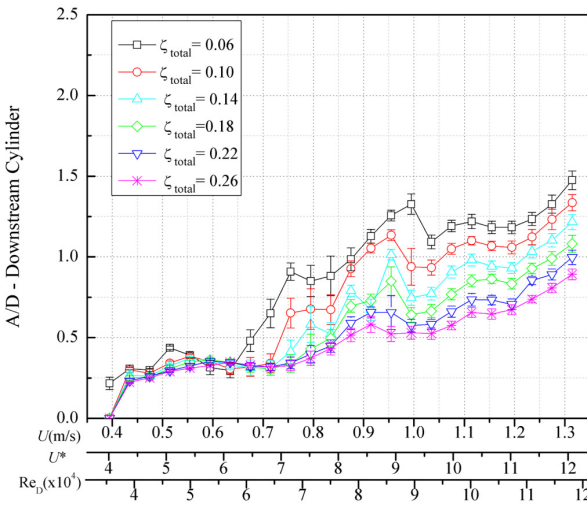
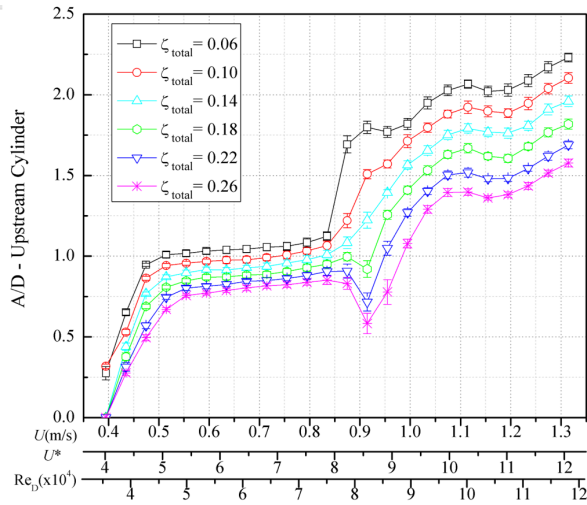


Fig. 5. Amplitude responses of two cylinders in tandem array for various damping ratios

진폭비의 동적응답에서 볼 수 있듯이 VIV 영역에서 상류에 위치한 실린더의 진폭비는 감쇠비가 증가함에 따라 지속적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 반면, 하류에 위치한 실린더는 상류 실린더에서 발생한 후류의 영향으로 하류 실린더의 Vortex shedding이 억제되어 진폭비가 상대적으로 매우 낮아진다. 또한, Fig. 5를 통해 $4 < U^* < 6$ 영역에서 감쇠비에 따른 하류 실린더의 진폭비의 차이가 매우 작음을 알 수 있다. Galloping은 VIV와 다르게 물체와 shear layer 사이의 상대운동에 의한 유체역학적 불안정성에 기인한다. 원형실린더에 PTC를 부착함으로써 $U^* > 8$ 영역에서 Galloping이 발생되었다. Galloping영역에서 두 실린더의 진폭비는 모두 VIV영역과 비교해 2배 이상 증가하는

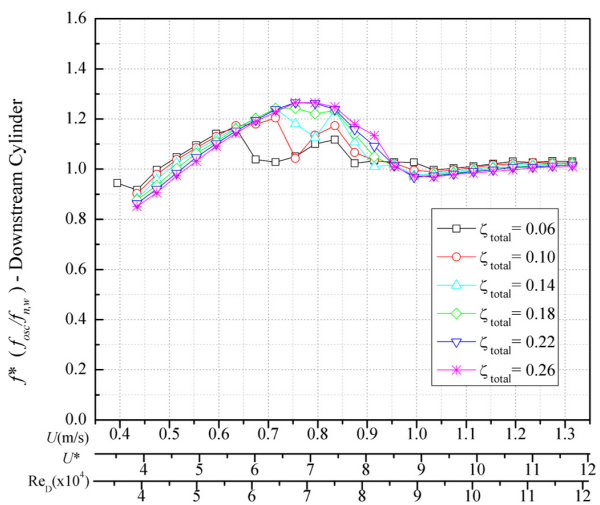
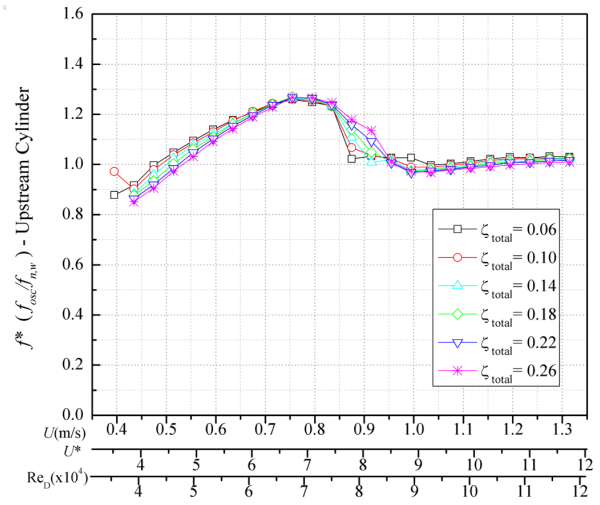


Fig. 6. Frequency responses of two cylinders in tandem array for various damping ratios

것을 확인할 수 있다. 전기발전기의 감쇠비가 증가함에 따라 Galloping영역에서도 두 실린더 모두 진폭비가 감소하지만 유속이 증가할수록 진폭비는 꾸준히 증가하는 경향을 보여준다. 실험실의 안전문제 상 $U=1.31$ m/s 초과하는 유속에서는 실험이 제한되었지만, Galloping이 유체역학적 불안정성 현상이므로 유속의 증가와 함께 진폭비도 증가할 것으로 예상된다.

진동수비 f^* 는 실제 진동수와 고유진동수의 비로 정의된다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 상류에 위치한 실린더의 진동수비는 감쇠비에 크게 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있다. 반면, 하류에 위치한 실린더는 유속이 $6 < U^* < 8$ 영역사이에서 감쇠비가 작을수록 진동수비가 급격히 낮아

지는 현상을 보여준다. 이 현상은 상류 실린더에서 발생한 Vortex shedding 주기와 하류에 위치한 실린더에서 진동 주기의 불일치가 발생하면서 나타나는 현상이다^[9,14]. VIV 영역에서는 유속에 따라 Vortex shedding 하는 주기가 짧아지므로 지속적으로 진동수비가 증가하는 반면, Galloping 영역에서는 시스템의 고유진동수에서 가진이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5와 6의 실험결과는 다중실린더의 선행연구의^[9,14] 실험결과와 동일한 경향을 보임을 확인할 수 있다.

측정한 진폭, 진동수, 그리고 Table 1에 제시된 시스템의 물리적 특성 값과 식 (6)을 이용하여 유체동력이 시스템의 기계적 동력으로 변환된 총량을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{mech} &= \frac{1}{nT_{osc}} \int_0^{nT_{osc}} F_{fluid} \dot{y} dt \\
 &= \frac{1}{nT_{osc}} \int_0^{nT_{osc}} (m_{osc} \ddot{y} + c_{total} \dot{y} + Ky) \dot{y} dt \\
 &= 4\pi^2 \zeta_{total} \sqrt{m_{osc} K} A^2 f_{osc}^2 \quad [W] \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기에서, A 는 실린더의 진폭을 의미하고, ζ_{total} 은 다음과 같이 정의된다.

$$\zeta_{total} = \zeta_{str} + \zeta_{harness} \quad (7)$$

발전된 전력량은 총 기계적 동력에서 기계적 구조물에 의해 소실된 동력량을 제외한 값으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{harness} = 4\pi^2 \zeta_{harness} \sqrt{m_{osc} K} A^2 f_{osc}^2 \quad [W] \quad (8)$$

Fig. 7은 각 유속에 따라 측정된 두 실린더의 총 기계적 동력과 총 발전된 전력량을 나타낸 그래프이다. 동력과 전력량의 표준편차는 오차막대를 이용하여 표시하였다. VIV 영역에서는 감쇠비가 증가함에 따라 발전된 전력량이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 유속이 증가함에 따라 발전량도 대체적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 유속이 $7.5 < U^* < 9$ ($0.85 < U < 1.0$ m/s) 구간에서 기계적 동력과 발전량이 급격히 감소하는 이유는 유동유발진동의 원인이 VIV에서 Galloping로 변환되는 천이구간이기 때문이다^[8,9].

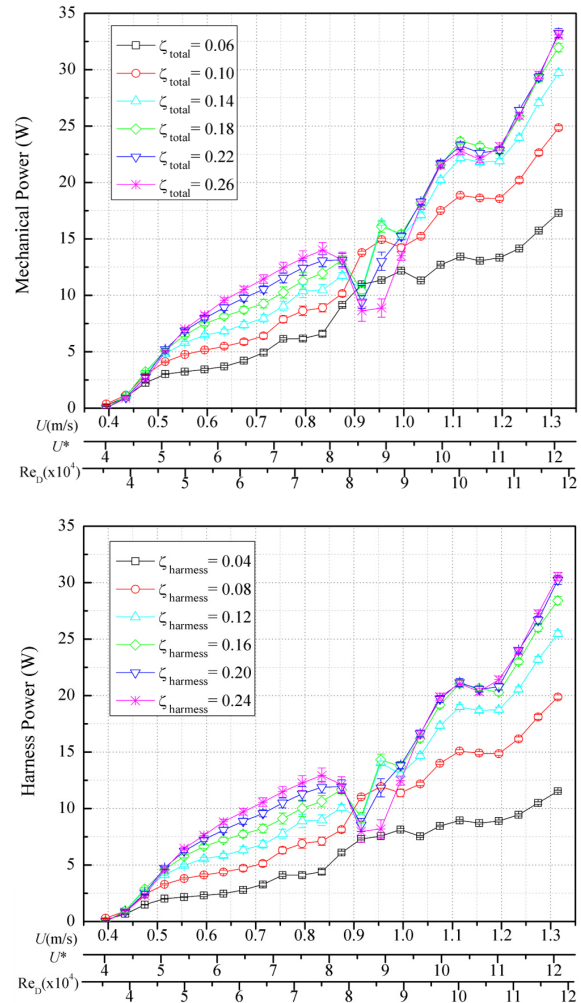


Fig. 7. Mechanical and harness power outputs by two circular cylinders with PTC for different damping ratios

낮은 감쇠비에서는 VIV와 Galloping 영역 사이의 구분이 불분명한 반면에 감쇠비가 높아짐에 따라 두 영역이 뚜렷하게 구분되는 것을 확인할 수 있다. 실험 결과는 이 천이 구간에서는 낮은 감쇠비를 이용하는 것이 발전에 유리하다는 사실을 보여준다.

Galloping이 발생하는 $9 < U^* (U > 1.0$ m/s) 영역에서는 Galloping의 특성상 진폭이 급격히 증가하여 기계적 동력과 전력발생량이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 유체역학적 불안정성에서 기인한 Galloping의 특성상 유속이 증가할수록 전력발생량도 지속적으로 증가할 것으로 예측된다.

유체 단면적 A_{cross} 는 실린더가 진동하면서 끌고 지나간 전체 면적을 의미하며, 이 단면적을 통과하는 유체동력은

다음과 같이 정의된다.

$$P_{fluid} = \frac{1}{2} \rho U^3 A_{cross} \quad [W] \quad (9)$$

기계적 효율과 발전효율은 각각 식 (10)과 (11)로 정의된다.

$$\eta_{mech} = \frac{P_{mech}}{P_{fluid}} \quad (10)$$

$$\eta_{harnessh} = \frac{P_{harnessh}}{P_{fluid}} \quad (11)$$

Fig. 8은 실험 측정값을 바탕으로 각 유속에서 다양한 감쇠비에 따른 기계적 동력변환효율과 발전효율을 계산한 결과를 보여준다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 절대적 기계적 동력과 전력 발생량은 유속에 따라 전체적으로 증가하는 경향을 보인다. 이와 달리 기계적 변환효율은 상대적으로 낮은 유속에서 높은 효율을 보이며, $U^*=5$ 에서 최고 42%에 도달한 후 지속적으로 감소하여 Galloping 영역에서는 10% 미만에 머무는 것을 확인할 수 있다. 이는 효율을 정의하는 유체동력이 유속의 제곱에 비례하여 증가하며, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 VIV영역에 비해 Galloping 영역에서는 진폭 A 가 모든 감쇠비에 대해 2배 이상 증가하고 결과적으로 A_{cross} 는 4배 이상 증가하기 때문에 유체동력, P_{fluid} 의 증가율이 기계적 동력, P_{mech} 의 증가율보다 높아 발전효율은 유속의 증가와 함께 낮아지는 경향을 보인다.

Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 유속이 상대적으로 낮은 $4.5 < U^* < 8$ ($45,000 < Re_D < 55,000$) 영역에서 발전효율이 모든 감쇠비에서 최대값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이 유동영역은 VIV 발생영역으로 Galloping에 비해 실린더의 진폭이 1/2이므로 같은 단면적에 더 많은 실린더를 설치할 수 있어 전체 발전량 또한 증가시킬 수 있다. 이 결과는 서남해안의 일부 해협을 제외한 우리나라 해안의 유속이 대부분 1 m/s 이하인 점을 고려했을 때, 유동유발진동 현상을 이용한 발전기술의 적용 가능성을 보여준다.

Fig. 9는 스프링 상수, $K=755$ N/m로 고정되었을 때, 유속에 따라 최적 감쇠비에 따른 단일 원형 실린더와 직렬

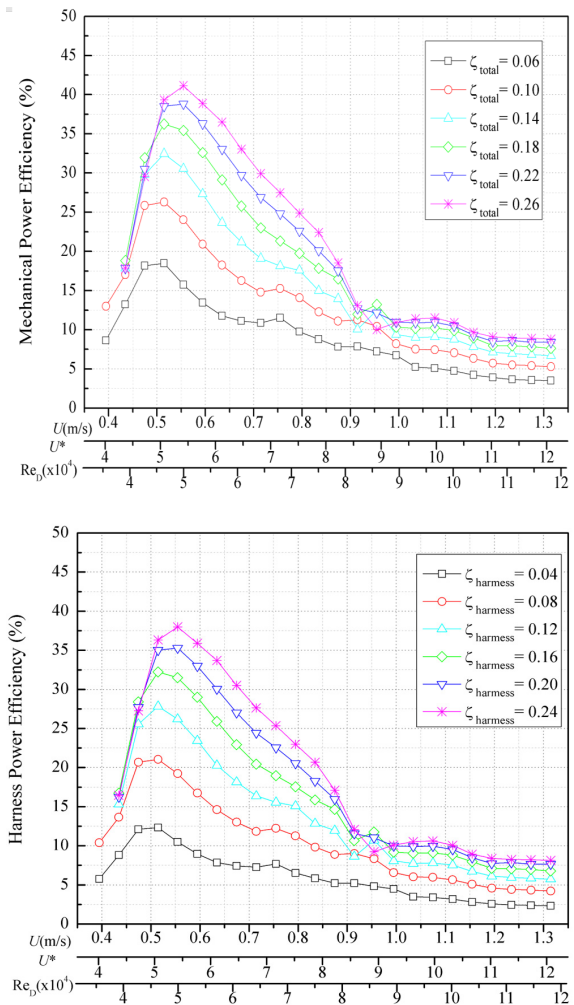


Fig. 8. Mechanical and harness power efficiencies by two circular cylinder with PTC for various damping ratios

로 배열된 두 원형실린더의 전력발생량과 변환효율을 나타낸 그래프다. 선행연구의 결과[12]에서 확인할 수 있듯이 단일 실린더를 사용하였을 경우 VIV와 Galloping의 천이영역인 $7.0 < U^* < 8.5$ ($66,000 < Re_D < 83,000$)에서 전력발생량이 급격하게 감소함을 알 수 있다. 하지만, 두 실린더를 이용한 경우 이 천이영역에서 상류에 위치한 실린더의 영향으로 후류에서 난류의 강도가 증가하고, 두 실린더 사이를 지나는 유동의 속도 증가로 상대적으로 낮은 유속에서 Galloping이 발생하게 된다. 이 때문에 두 실린더를 이용할 경우 단일 실린더에서 전력발생량이 급격하게 감소하는 영역에서도 지속적으로 전력 생산이 가능하게 된다. 또한, 변환효율 측면에서도 같은 단면을 지나는 유체에서 단일 실린더를 이용할 경우와 비교해 두 실린더를 이용할 경우 최

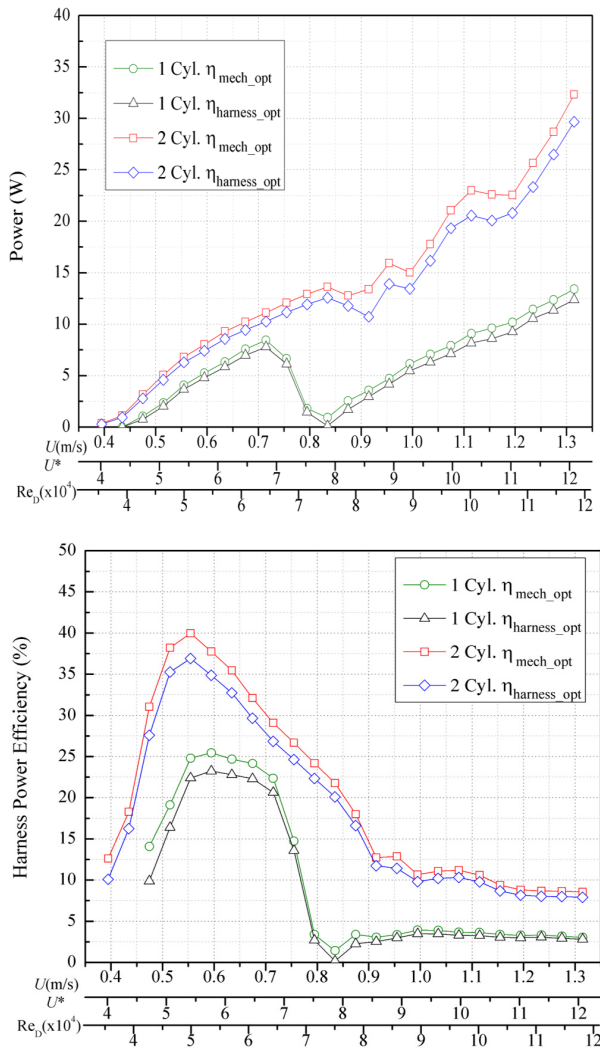


Fig. 9. Optimal power curves and efficiency curves by a single cylinder^[8] and two circular cylinder with PTC for various damping ratios; (K=755 N/m)

대 변환효율은 약 60%정도 증가하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 다중실린더에서 발생하는 유동간섭현상을 이용할 경우 전체 발생전력량과 발전효율을 효과적으로 증가시킬 수 있다는 사실 보여준다.

결과적으로, 다중실린더를 이용한 유동유발진동 조류발전 기술은 상대적으로 낮은 유속에서 높은 효율을 얻을 수 있으므로 유속이 1 m/s 내외의 우리나라 많은 해안에 적용이 가능하며, 높은 유속에서 효율이 높은 터빈형 조류발전 기술을 병행하여 사용할 경우 우리나라 해안에 잠재된 조류에너지 이용량을 더욱 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

전기에너지원으로 화석연료 사용에 따른 환경오염과 지구 온난화의 문제를 해결하기 위해 신재생에너지 발전 기술에 대한 중요성이 부각되고 있다. 본 연구는 유발진동 현상을 이용하여 우리나라 해안에 풍부한 신재생에너지 자원인 조류에너지를 전력 생산에 이용할 수 있는 기술을 하였다. 또한, 실험적 연구를 통해 전기 발전기의 감쇠비가 전력 발생량과 발전효율에 미치는 영향을 확인하였다. 연구결과에서 볼 수 있듯이 절대적 전력발전량은 Galloping이 발생하는 $U^* \approx 8$ 의 유동영역에서 높은 것을 확인하였다. 또한, 다중 실린더의 유동간섭현상을 이용하여 전체 전력발전량과 변환효율도 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

변환효율 측면에서는, VIV가 발생하는 상대적으로 낮은 유속영역($4 < U^* < 8$)에서 높은 효율을 보였으며, 최고 42%에 달하는 높은 기계적 변환효율을 보였다. 이는 실린더의 직경과 스프링 상수를 최적화하여 주어진 유속에서 $4 < U^* < 8$ 의 영역에 놓이도록 시스템을 설계할 경우 단위 면적을 지나는 같은 양의 유동에서 Galloping 보다 효율적으로 조류에너지를 전기에너지로 변환할 수 있음을 의미한다. 또한, Galloping 영역에 비해 VIV 영역에서 실린더의 진폭도 작으므로 단위 면적당 더 많은 실린더를 배치함으로써 총 에너지 변환량도 증가시킬 수 있다는 결론에 도달한다. 실제 서남해안의 일부 해협을 제외하고 대부분의 해안에서 조류의 유속이 1 m/s 이하인 점을 감안하면 높은 유속영역에서 발생하는 Galloping을 이용하기보다는 VIV를 이용한 발전방식이 우리나라 해안에서 더 실용적일 것으로 판단된다.

본 연구는 두 원형실린더에 연결된 스프링 상수와 두 실린더 사이의 간격을 고정한 상태로 전기 발전기의 다양한 감쇠비가 전력 발생량을 측정하여 발전효율에 미치는 영향을 평가하였다. 이번 연구에서 확인하지 못한 스프링 상수와 실린더 사이의 간격, 그리고 실린더의 개수 등을 포함한 다양한 조건에 대해 지속적인 실험을 진행하여 유속에 따른 시스템의 물리적 특성을 최적화함으로써 더 넓은 유속영역에서 더 높은 발전효율을 달성할 수 있도록 지속적인 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Byun, Y.H., and Park, N., 2018, "Analysis of international joint research into new and renewable energy technology", *New. Renew. Energy*, **14**(1), 4-11.
- [2] Korea Energy Agency, 2018, "Global trend of car sales ban on internal combustion Engines", http://www.energy.or.kr/web/kem_home_new/energy_issue/mail_vol71/pdf/issue_174_01_02.pdf
- [3] Yun, S., Kim, Y., Moon, H., Im, H., and Kwon, P., 2019, "Study on utilizing electric vehicles for the variability of renewable energy", *New. Renew. Energy*, **15**(2), 74-80.
- [4] Byun, D.S., Hart, D.E., and Jeong, W.J., 2013, "Tidal current energy resource off the south and west coasts of Korea: preliminary observation- derived estimates", *Energies*, **6**(2), 566-578.
- [5] Jeon, W., Cho, S., and Cho, I., 2019, "Estimating the uncertainty of net load of 2030 renewable generation", *New. Renew. Energy*, **15**(4), 28-38.
- [6] Bernitsas, M.M., Ben-Simon, Y., Raghavan, K., and Garcia, E.M.H., 2009, "The VIVACE converter: model tests at high damping and Reynolds number around 105,000", *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, **131**(1), 011102.
- [7] Bernitsas, M.M., and Raghavan, K., 2009, "Fluid motion energy converter", US Patent No. 7,493,759, February 24, 2009.
- [8] Bernitsas, M.M., and Raghavan, K., 2011, "Enhancement of vortex induced forces and motion through surface roughness control", US Patent No. 8,042,232, November 1, 2011.
- [9] Kim, E.S., Bernitsas, M.M., and Kumar, A.R., 2013, "Multi-cylinder flow induced motions: Enhancement by passive turbulence control at $28,000 < Re < 120,000$ ", *J. Offshore Mech. Arct.Eng.*, **135**(2), 021802.
- [10] Kim, E.S., and Bernitsas, M.M., 2016, "Performance prediction of horizontal hydrokinetic energy converter using multiple-cylinder synergy in flow induced motion", *Appl. Energy*, **170**, 92-100
- [11] Yuce, M.I., and Muratoglu, A., 2015, "Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **43**, 72-82.
- [12] Sun, H., Kim, E.S., Nowakowski, G., Mauer, E., and Bernitsas, M.M., "Effect of mass-ratio, damping, and stiffness on optimal hydrokinetic energy conversion of a single, rough cylinder in flow induced motions", *Renew. Energy*, **99**, 936-959.
- [13] Sun, H., Kim, E.S., Bernitsas, P.M., and Bernitsas, M.M., 2015, "Virtual spring-damping system for flow-induced motion experiments", *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, **137**(6), 061801.
- [14] Sun, H., Kim, E.S., Nowakowski, G., Mauer, E., and Bernitsas, M.M., 2019, "Flow-induced vibration of tandem circular cylinders with selective roughness: Effect of spacing, damping, and stiffness", *Eur. J. Mech. B Fluids*, **74**, 219-241.