

한국 해안에서 유동유발진동 현상을 이용한 조류에너지 발전기술의 이론적 연간 발전량 산정연구

김은수 · 오광명* · 박홍래**†

부산대학교 조선해양공학과, *인제대학교 디자인엔지니어링학과, **대우조선해양 선박해양연구소
(2019년 1월 4일 접수, 2019년 1월 25일 수정, 2019년 2월 11일 채택)

Assessment of Theoretical Annual Energy Production in the Coast of South Korea Using Tidal Current Energy Converters Utilizing Flow Induced Vibration

Eun Soo Kim · Kwang Myung Oh* · Hongrae Park**†

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University,

*Department of Design Engineering, Inje University

**Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering, Research Center of Ship and Offshore Structure

(Received 4 January 2019, Revised 25 January 2019, Accepted 11 February 2019)

요 약

한국정부는 재생에너지를 이용한 발전량 비중을 2030년까지 총 발전량의 20%까지 높이겠다는 목표를 제시하였다. 풍부한 해양 신재생에너지 자원은 한국정부가 이 목표를 달성하는데 중요한 역할을 할 수 있을 것이다. 이 논문은 1.0 m/s의 낮은 유속에서도 높은 효율을 달성할 수 있는 유동유발진동 현상을 이용한 조류에너지 발전기술을 소개하고 한국 7개 해안의 평균유속을 바탕으로 높은 효율을 달성할 수 있는 유동유발진동 발전기의 최적설계를 제안하고자 한다. 또한, 이를 바탕으로 각 해안에서 발전할 수 있는 이론적 잠재량을 산정하고자 한다. 유동유발 발전기술을 이용한 연간 이론적 최대발전량은 221.77 TWh로 예측되었고 이는 2013년 한국의 총 전력소비량의 42.3%에 해당한다. 본 연구결과는 유동유발진동을 이용한 발전기술을 이용한 조류발전기술이 한국 정부가 제시한 목표를 달성하는데 중요한 역할을 할 수 있음을 보여준다.

주요어 : 신재생에너지, 조류발전기, 유동유발진동, 최적설계, 연간발전량

Abstract - The Korean government is aiming to produce 20% of the electricity using renewable energy sources by 2030. Ocean renewable energy sources which are abundant in South Korea can do an important role to achieve the goal. This paper introduces a tidal current energy converter utilizing flow induced vibrations which can efficiently work even in the currents slower than 1.0m/s and suggests optimal designs of the tidal energy converter based on speeds of the tidal currents in seven different coastal regions in South Korea. Moreover, the theoretical annual energy production by the tidal converter is estimated at these coastal areas. The total amount of the annual energy production by the tidal energy converter is predicted as 221.77 TWh which is equivalent to 42.3% of the electric consumption of South Korea in 2013. The result shows that the tidal current energy converter can be an important role to achieve the goal of the Korean government.

Key words : Renewable Energy, Tidal current energy converter, Flow Induced Vibration, Optimal design, Annual Energy Production

†To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-2-2129-3723 E-mail : bblwith@gmail.com

1. 서론

산업통상자원부는 최근 발표한 “재생에너지 3020 이행계획” 보도자료에서 2030년까지 우리나라 재생에너지 설비용량을 63.8 GW까지 증가시켜 재생에너지 발전 비중을 20%까지 높이겠다는 목표를 제시하였다. 장기적인 관점에서 재생에너지 발전 비중의 지속적인 증가를 위해서는 이 계획안의 핵심 개발 에너지원인 태양광과 풍력 외에도 다양한 재생에너지원을 발굴하고 이와 관련 연구에 투자함으로써 다양한 재생에너지원을 이용한 발전기술을 확보하는 것이 중요하다.

우리나라는 3면이 바다로 둘러싸여 있어 해양 신재생에너지원이 풍부하다. 특히, 서남해안을 포함한 일부 해협은 조류의 속도가 빨라 조류에너지 발전에 적합한 여건을 가지고 있다.[1] 공기에 비해 밀도가 약 850배나 큰 해수를 이용하는 조류에너지는 풍력에너지에 비해 에너지 밀도가 높고 날씨와 계절의 영향을 많이 받지 않아 발전량 예측에 용이하기 때문에 풍력과 태양광 에너지원의 간헐성 문제 또한 극복할 수 있다.

현재까지 조류에너지를 이용한 다양한 발전기술이 연구되고 있지만 대부분 풍력발전에 사용되는 수평축 터빈이나 수직축 터빈을 바다나 강에 적용하기 위한 연구가 주를 이루었다. 본 연구에서는 원형실린더에서 발생하는 유동유발진동을 이용하여 조류의 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 기술을 소개하고자 한다. 또한, 우리나라 7개 해양영역의 이론적 조류에너지 잠재량과 평균유속을 바탕으로 유속이 1.0 m/s 이하인 해안에서 조류에너지 변환효율을 최대화할 수 있는 유동유발진동(Flow Induced Vibration) 발전설비의 설계안을 제안하고

연간발전량을 예측하고자 한다.

2. 유동유발진동을 이용한 조류에너지 발전

유동유발진동은 구조물을 지나가는 유동이 구조물에 주기적인 힘을 작용하여 발생하는 현상으로 이 과정에서 유동에너지가 구조물의 진동에너지로 변환된다. 구조물의 진동에너지가 충분히 소산되지 않을 경우 1940년 바람에 의해 붕괴된 미국의 Tacoma Narrows Bridge 사례와 같이 구조물을 파괴에 이르게도 할 수 있다. 그래서 지금까지 유동유발진동과 관련된 연구의 대부분은 이 현상을 억제하는데 초점이 맞춰져 있었다.

하지만 2006년 미국 미시간대의 Marine Renewable Energy Laboratory(MRELab) 연구팀은 역발상을 통해 유동유발진동 현상을 강화하여 조류에너지를 전기에너지로 변환시키는 Vortex Induced Vibration for Aquatic Clean Energy Converter(VIVACE)로 명명된 기술을 발명하였다.[2-4] 이 기술은 단순한 원형실린더를 이용하기 때문에 같은 조류에너지를 이용하는 터빈의 회전날개와 비교해 구조가 간단한 것이 특징이다. 유속이 $70,000 < Re_D < 90,000$ 영역에서는 여러 개의 실린더를 근접 배열하였을 시 유동간섭현상에 의해 후류에 위치한 실린더들에서 발생하는 유동유발진동이 강화된다.[4] 이로 인하여 한 개의 실린더를 독립적으로 설치했을 경우와 비교하여 3개 또는 4개의 실린더를 근접하게 설치했을 경우에 각각의 실린더에서 조류에너지가 진동에너지로 변환되는 에너지량이 평균적으로 약 2배정도 증가하게 된다.[5] 이를 바탕으로 계산된 발전설비의 최대 효율은 44.3%에 이르며, 이는 매우 잘 설계된 터빈형 조류발전기의 최대 효율이 35~45%인

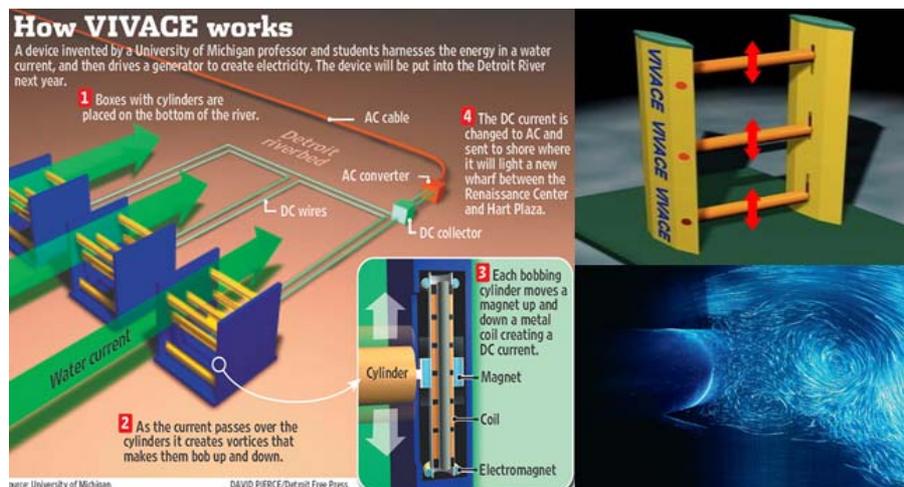


Fig. 1. Concept design of VIVACE (courtesy of Vortex Hydro Energy Inc.)

점을 감안하면 높은 편이라고 할 수 있다.[7] 또한, 터빈의 경우 회전날개의 날카로운 면에 의해 수중생물이 피해를 입는 경우가 있는 반면, VIVACE의 원형실린더는 모든 면이 부드러워 그와 같은 피해가 발생하지 않는다. 미국 하버드와 MIT에서 공동으로 10년간 진행한 연구 결과는 오히려 유발유동진동현상에 의해 발생한 와류가 수중생물에게 긍정적인 영향을 줄 수 있음을 보여준다.[8] 이처럼 유발유동진동을 이용한 조류에너지 발전기술이 수중생물에게 미치는 부정적 영향도 작다.

많은 연구가 진행되어온 터빈형 조류발전기술은 일반적으로 유속이 1.5 m/s 이상인 해안에서 높은 효율을 확보할 수 있다. 반면, 유동유발진동을 이용한 발전기술은 유속이 1.0 m/s보다 낮은 유속에도 높은 효율을 유지할 수 있다.[5] 두 발전방식 중 해안의 유속에 따라 적합한 발전기술을 적용하면 조류에너지 이용률을 획기적으로 높일 수 있을 것이다.

조류에너지 발전기술은 태양광이나 풍력발전의 간헐성 문제를 극복하고 안정적으로 전력을 생산할 수 있으므로 재생에너지 발전비중을 높이는 데 중요한 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 국내 지역별 평균 조류일률밀도와 평균 유속 산정

본 연구에서 사용된 국내 지역별 평균 조류일률밀도와 평균 유속 산정은 국내해양조사원의 조류관측자료와 해수유동 수치모의자료를 이용하여 서남해안 조류에너지 잠재량을 산정한 선행연구의 연구결과를 바탕으로 계산하였다.[9-11] 선행연구에서는 행정구역을 기반으로 Fig. 2와 같이 총 10개의 해양

영역으로 구분하였고, 유속이 매우 낮고 수심이 깊어 조류에너지 이용에 한계가 있는 Region 8-10을 제외한 서남해안의 총 7개 지역에 대해 터빈의 평균추출출력(\overline{API} , Averaged Power Intercepted)을 산정하였다. 이 결과를 바탕으로 Region 1-7의 평균일률밀도(\overline{PD} , Averaged Power Density)와 평균유속(\overline{U})을 식(1) 과 (2)를 이용하여 계산할 수 있으며, 그 결과는 Table 1에서 확인할 수 있다.

$$\overline{PD} = \overline{API} \times \frac{A_{occupied}}{A_{swept}} = \frac{1}{2} \rho \overline{U}^3 \quad [MW/km^2] \quad (1)$$

$$\overline{U} = \sqrt[3]{\frac{2\overline{PD}}{\rho}} \quad [m/s] \quad (2)$$

A_{swept} 와 $A_{occupied}$ 는 Fig. 2와 같이 각각 직경이 D_{eff} 인 조류터빈이 회전하는 가상의 원형 단면적과 터빈 간 이격거리를 포함한 단일 발전장치의 점유면적을 타나낸다. 바닷물의 밀도 $\rho = 1,026 \text{ kg/m}^3$ 로 가정하였다.

서남해안에는 경기도의 교동과 전라남도의 울돌목, 장죽 등 평균유속이 1.5 m/s 이상 되는 수로들이 존재한다. 이와 같은 유속이 높은 수로에서는 조류터빈형 발전방식이 유리할 것이다.[1] 하지만 Table1에서 확인 할 수 있듯이 특정 수로를 제외한다면 대부분의 지역에서 평균유속이 1.0 m/s 이하로 낮다. 본문의 2절에서 논의되었듯이 유속이 70,000 $< Re_D < 90,000$ 영역에서 유동유발진동을 이용한 발전방식은 유동간섭현상으로 인한 유발유동현상이 강화되어 효율이 최대 44.3%에 이를 수 있다는 선행연구 결과들을[4, 5] 바탕으로 유속이 낮은 지역에서는 유동유발진동을 이용한 발전방식을 적용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

Table 1. Averaged power density and averaged flow velocity by regions

Region	\overline{API} [MW/km ²]	\overline{PD} [MW/km ²]	\overline{U} [m/s]
1	7.0	133.69	0.64
2	4.9	93.58	0.57
3	1.6	30.56	0.39
4	3.7	70.66	0.52
5	2.8	53.48	0.47
6	1.4	26.74	0.37
7	1.7	32.47	0.40
All areas	5.1	97.40	0.57

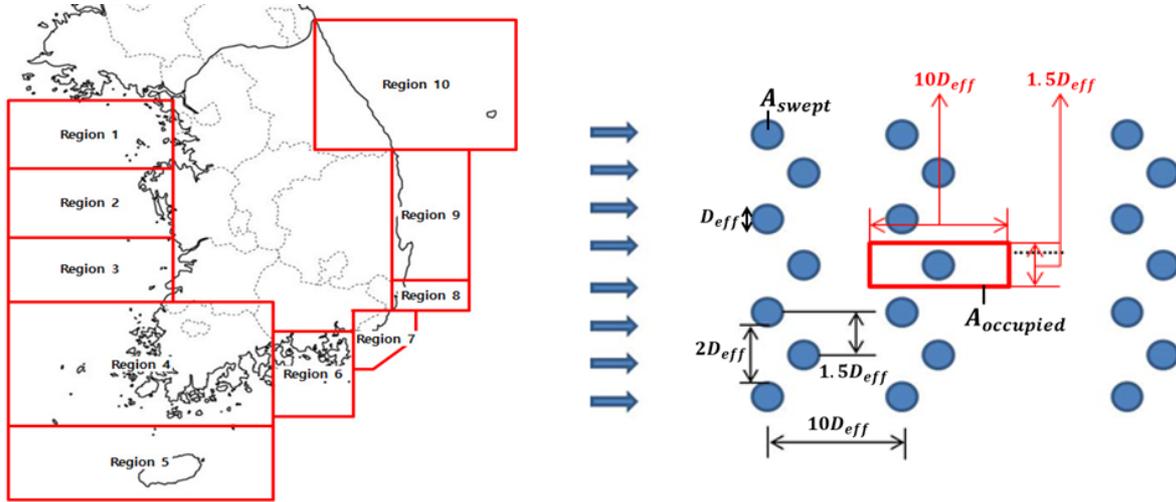


Fig. 2. Division of South Korean coasts (left) and distribution of devices and an area occupied by each device (reproduced from Jo et al., 2016[11])

4. 국내 지역별 최적화된 유동유발진동 발전설비 설계안

미국 미시간대학 MRELab의 연구진은 유동유발진동을 이용하여 조류에너지 변환효율을 높일 수 있는 방법에 관한 많은 선행연구를 진행하여 왔다. 이를 통해 낮은 유속에서도 높은 효율을 올릴 수 있는 방법을 개발하였다.[5, 6, 12] 유동유발진동을 이용한 발전기술은 시스템의 용수철 계수와 진동하는 시스템 전체의 질량 그리고 발전기의 제어방법 등도 효율에 중요한 영향을 미치지만, 이에 선행하여 유동유발진동 현상을 극대화할 수 있는 원형실린더의 설계와 실린더들의 배열의 최적화가 이뤄져야한다. 그래서 본 연구에서는 유동유발진동에 관한 선행연구결과와 국내 지역별 평균유속을 바탕으로 유동유발진동 발전설비에 사용될 원형실린더의 직경과 길이 그리고 실린더 배열에 관한 최적설계를 진행하였다.

Fig. 3 왼쪽 그래프는 유동방향에 대해 직렬로 설치된 원형실린더의 수와 원형실린더 중심 간의 거리에 따른 발전효율을 레이놀즈수에 대해 산정한 그래프이다. 원형실린더가 진동하면서 유체를 끌고 지나가는 전체 단면적을 A_{cross} 라고 정의했을 때, 이 단면적을 지나가는 유체일률 P_{fluid} 는 다음과 같이 정의된다.

$$P_{fluid} = \frac{1}{2} \rho \overline{U}^3 A_{cross} \quad (3)$$

또한, 유동유발진동 발전기의 이론적 효율 η_h 은

식 (4)와 같이 정의되어진다.

$$\eta_h = \frac{P_{harness}}{P_{fluid}} \quad (4)$$

여기서 $P_{harness}$ 는 전기발전기(electric generator)의 효율을 100%로 가정하여 계산된 이론적 전력의 의미이다.

Fig. 3 왼쪽의 발전효율 그래프를 바탕으로 높은 효율을 달성할 수 있는 레이놀즈수를 결정할 수 있고 Fig. 3 오른쪽과 같이 원형실린더의 배열을 결정할 수 있다. Fig. 4는 Fig.2와 Fig.3를 바탕으로 제작한 유동유발진동 발전기의 가상도다. 레이놀즈수는 다음과 같이 정의된다.

$$Re_D = \frac{\overline{U}D}{\nu} \quad (5)$$

원형실린더의 직경 D 는 레이놀즈상사를 이용하여 평균유속에 따라 결정할 수 있다. 유동유발진동 현상 중 하나인 Vortex induced vibration(VIV)의 경우 Vortex shedding의 특성을 결정하는 실린더의 경계층과 박리층에 큰 영향을 받으며, 이 둘은 Re_D 에 대한 의존도가 매우 높다. 선행연구에서도[4] $Re_D < 100,000$ 유동영역에서 VIV를 이용한 발전에 어려움이 있었으며, 이를 극복하기 위한 방법으로 Passive turbulence control을 이용하여 $Re_D < 100,000$ 유동영역에서 galloping을 발생시키는 기술을 개발하였다. 하지만, 에너지변환 효율측면에서는 $70,000 < Re_D < 90,000$ 의 유동영역에서 VIV를 이용한 경우 더 높은 에너지변환 효율을 달성할 수 있음을

Table 2. Optimal diameter and length of a circular cylinder by regions

Region	D [m]	L [m]	A_{unit} [m^2]	D_{eff} [m]	$A_{occupied}$ [m^2]
1	0.164	3.270	23.40	5.46	81.87
2	0.184	3.683	29.68	6.15	92.20
3	0.267	5.349	62.58	8.93	133.90
4	0.202	4.045	35.79	6.75	101.25
5	0.222	4.438	43.09	7.41	111.11
6	0.280	5.592	68.41	9.33	139.99
7	0.262	5.242	60.10	8.75	131.22
All areas	0.182	3.634	28.89	6.07	90.98

선행연구 결과를 통해 확인할 수 있다.[6] 이 결과를 바탕으로 본 연구에서는 유속의 변동성을 고려하여 설계 기준 레이놀즈수를 $Re_D = 76,000$ 로 결정하였다. 설계 기준 레이놀즈수와 Table 1에서 산정한 지역별 평균유속을 이용하여 지역별 유속에 최적화된 원형실린더의 직경 D 를 식 (5)을 이용하여 결정하였다. 원형실린더의 길이 L 은 실린더 양 끝에서 발생하는 난류의 영향을 최소화하고 양력을 최대화할 수 있는 $7 < \frac{L}{D} < 45$ 범위에서 결정하는 것이 좋다.[13, 14]. 본 연구에서는 구조적 안정성을 고려하여 원형실린더의 길이를 $L = 20D$ 로 결정하였다. Table 2는 지역별 평균유속에 따른 최적화된 원형실린더 직경과 길이를 계산한 결과를 보여준다. Fig. 3 오른쪽 배치도와 같이 4개의 원형실린더가 $5D$ 간격으로 직렬로 배열되도록 하였으며, $Re_D = 76,000$ 에서의 진동폭 $y_{max} < 1.5D$ [6, 12]를 고려하여 총 40개의 원형실린더가 단일 발전기에 포함되도록 설계하였다.

Fig. 3과 같이 단일 발전기의 평면면적은 식 (6)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$A_{unit} = 25D \times 35D = 875D^2 \tag{6}$$

직사각형의 단면을 갖는 단일 유동유발진동 발전기가 차지하는 면적을 단일 조류터빈의 등가 원형 단면적으로 환산하기 위해 유효직경(D_{eff})은 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$D_{eff} = \sqrt{\frac{A_{unit}}{\pi/4}} \tag{7}$$

그리고 Fig. 2의 터빈배치도와 동일한 방식으로 발전기를 배열할 경우 발전기간 이격거리를 포함한 단일 발전기의 점유면적은 식 (8)을 이용하여 계산하였다.

$$A_{occupied} = 15D_{eff}^2 \tag{8}$$

지역별로 최적 설계된 단일 유동유발진동 발전기의 점유면적은 Table 2에서 확인할 수 있다.

5. 지역별 연간 발전량 예측

지역별 평균유속에 따라 최적 설계된 원형실린더를 적용한 유동유발진동 발전기의 연간 생산 가능한 발전량을 예측하였다.

Fig. 3의 그래프와 같이 레이놀즈수 $Re_D = 76,000$ 을 기준으로 최적 설계된 유동유발진동 발전기의 전기 발전기의 이론적 발전효율은 43%이다. 식 (4)을 이용해 계산된 이론적 효율 η_h 은 전기발전기의 효율을 100%로 가정하였으며, 원형실린더가 진동하면서 실제 쓸고 지나간 면적(약 $2.5DL$)의 유체의 일률만을 고려하였다. 본 연구에서는 발전량 예측의 정확성을 높이기 위해 전기발전기의 일반적 효율인 85%를 적용하였고, Fig. 3과 같이 원형실린더 실제적 이격간격을 바탕으로 면적($3.0DL$) 유체의 일률을 적용하여 기대효율 η_a 을 산정하였다.

$$\eta_a = \eta_h \times 0.85 \times \frac{2.5DL}{3.0DL} \tag{9}$$

식 (9)을 이용하여 레이놀즈수 $Re_D = 76,000$ 에서 산정한 기대효율 η_a 은 30.5%이다.

서남해안의 Region 1-7에 대해 Fig. 2와 같이 유

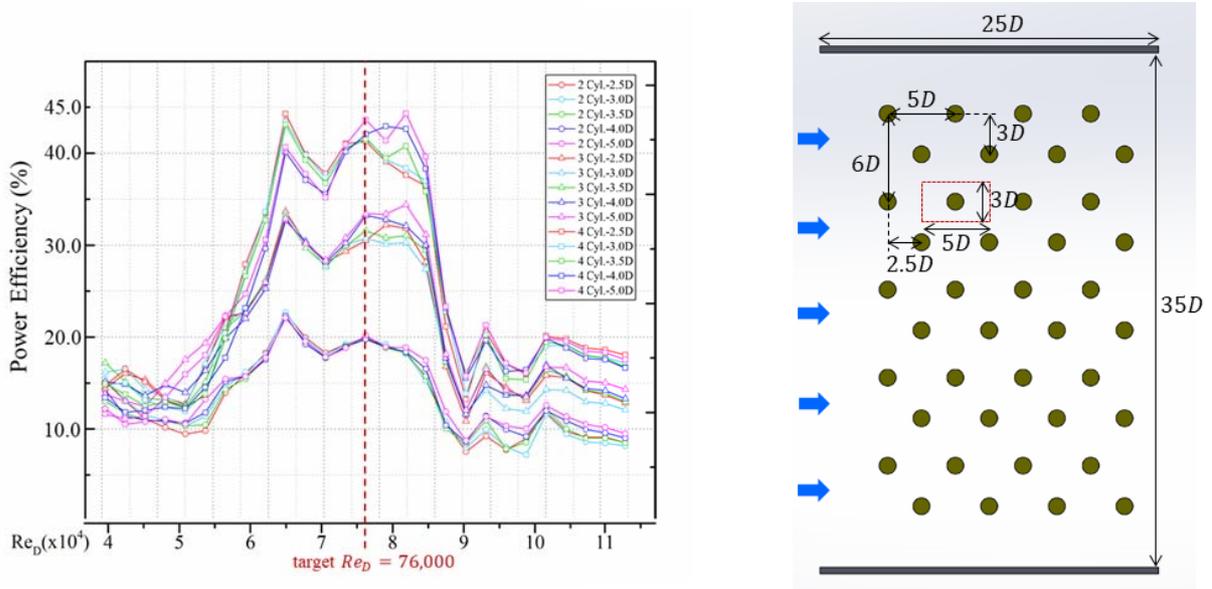


Fig. 3. Power efficiency curve (left, reproduced from Kim and Bernitsas, 2016[6]) and top view of configuration of cylinder array (right)

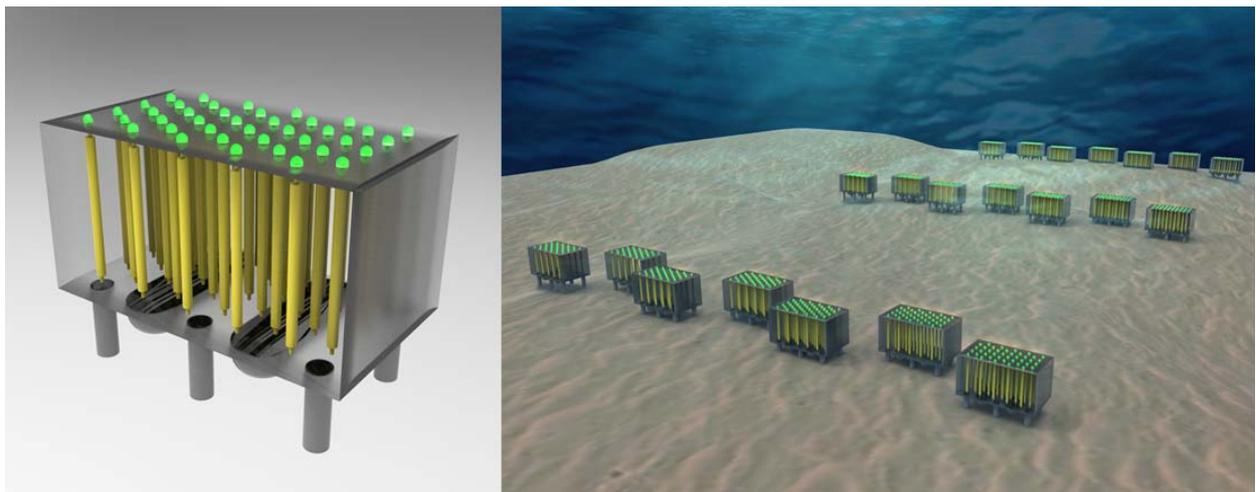


Fig. 4. Artist's renditions of a tidal current energy converter utilizing flow induced vibration

동유발진동 발전기가 배열되었을 때 지역별 설비용량(IGC, Installed Generating Capacity)와 연간발전량(AEP: Annual Energy Production)은 각각 식 (10)와 (11)을 이용하여 산정하였다.

$$IGC = \frac{\overline{API} \times A_{install}}{10^3} \times \eta_a \quad [GW] \quad (10)$$

$$AEP = \frac{IGC \times 365 \times 24}{10^3} \times \kappa_u \quad [TWh/y] \quad (11)$$

여기서 $A_{install}$ 은 발전설비의 전체 설치면적이다.

우리나라 해안에서 운하, 군사작전지역, 어업지역, 해안보존지역, 해상케이블 설치지역 등을 포함한 발전설비가 설치 제한된 이론적 면적비율은 전체 해안면적의 56%이다.[9] 본 연구에서는 이론적 최대 연간발전 잠재량 산정을 위해 지역별 설치가능 면적을 이론적 설치가능 면적비율 44%를 일괄적으로 적용하였다. 발전설비의 연간 이용률 κ_u 또한 터빈형 조류발전기의 연간발전량에 관한 선행연구[9]에서 제시한 30%로 동일하게 가정하였다.

원유 대체 효과 지표를 나타내는 연간발전량에 대한 석유환산톤(TOE:: Tonne of Oil Equivalent) 식 (12)을 이용하여 계산할 수 있다.

Table 3. Estimation of theoretical potential of the annual energy production by regions

Region	Area [km ²]	$A_{install}$ [km ²]	IGC [GW]	AEP [TWh/y]	TOE [Mtoe/y]
1	15,248	6,709	14.30	37.59	3.23
2	17,754	7,812	11.66	30.64	2.63
3	11,093	4,881	2.38	6.25	0.54
4	31,784	13,985	15.76	41.42	3.56
5	34,507	15,183	12.95	34.03	2.93
6	4,791	2,108	0.90	2.36	0.20
7	3,280	1,443	0.75	1.96	0.17
All areas	118,457	52,121	80.96	221.77	18.30

$$T.O.E = \frac{AEP}{f} \text{ [Mtoe/y]} \quad (12)$$

에너지환산계수 f 는 International Energy Agency와 Statistical Office of the European Communities의 정의에 따라 11.63을 적용하였다.

Table 3은 유동유발진동 발전기의 기대효율($\eta_u = 30.5\%$), 연간 이용률($k_u = 30\%$), 그리고 설치면적($A_{install} = Area \times 44\%$)을 고려하여 7개 해안지역에 대한 이론적 설비용량(IGC), 연간발전량(AEP) 그리고 석유환산톤(TOE)의 잠재량을 산정한 결과이다. 이 결과를 바탕으로 한국 해안 전체 대한 이론적 최대 설비용량은 80.96 GW이다. 7개 해안지역에서 유동유발 발전기술을 이용한 연간 이론적 최대 발전 예상량은 221.77 TWh이며, 선행연구에서 산정한 한국 전체 해안에서 조류에너지를 이용하여 이론적으로 연간 최대 발전할 수 있는 3,845 TWh[9]의 약 5.77%에 해당한다. 또한, 이는 2013년 우리나라 총 전력소비량 524 TWh의[15] 42.3%에 해당하는 높은 발전량이다.

6. 결론

본 연구에서는 조류의 유속이 1.0 m/s로 낮은 해안에서도 기대효율 30% 정도의 발전효율을 달성할 수 있는 유동유발진동을 이용한 조류에너지 발전기술을 소개하였다. 또한, 이 발전기술을 우리나라 7개 해안지역에 적용하였을 경우 지역별로 발전효율을 최대화 할 수 있는 유동유발 발전기의 최적설계를 제안하였다. 최적화된 유동유발진동을 이용한 발전설비를 이용하여 7개 해안지역에 기대되는 이론적 최대 설비용량은 80.96 GW이며, 연간 최대 발

전량은 221.77 TWh로 예측되었다. 이는 2013년의 우리나라 총 소비전력의 42.3%에 달한다. 유속에 따라 우리나라 해안에 터빈형 조류발전기술과 유동유발진동 조류발전기술을 유속과 해안의 지형적 특성에 따라 적절하게 적용한다면 조류에너지는 우리나라 신재생에너지의 발전비중 증가에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 이번 연구에서는 기술의 경제적 관점에 관한 고려가 되지 않은 한계가 있다. 유동유발진동 조류발전기술과 다른 신재생에너지 기술의 경제성 측면에서 비교가 이루어질 수 있도록 추가 연구를 진행할 예정이다.

Acknowledgement

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Byun, D. S., Hart, E. D., Jeong, W. J., 2013, "Tidal current energy resource off the south and west coasts of Korea: Preliminary observation-derived estimates", *Energies*, 6, 566-578.
2. Bernitsas MM, Ben-Simon Y, Raghavan K, Garcia EMH., 2006, The VIVACE converter: model tests at high damping and Reynolds number around 105,000, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Trans ASME 131: 011102.
3. Bernitsas MM, Raghavan K., Fluid motion energy converter. United States Patent and Trademark Office, Patent# 7,493,759 B2. Issued on February

- 24; 2009.
4. Bernitsas MM, Raghavan K., Enhancement of vortex induced forces and motion through surface roughness control.” United States Patent and Trademark Office. Patent# 8,042,232 B2. Issued on November 1; 2011.
 5. Kim E.S., Bernitsas MM, Kumar AR., 2013, Multi-cylinder flow induced motions: Enhancement by passive turbulence control at $28,000 < \text{Re} < 120,000$.” *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Trans ASME* 135:021802.
 6. Kim E.S., Bernitsas M.M., 2016, Performance prediction of horizontal hydrokinetic energy converter using multiple-cylinder synergy in flow induced motion, *Applied Energy*, 170, 92-100
 7. Yuce MI, Muratoglu A., 2015, “Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 72-82.
 8. Liao , J.C., Beal, D.N., Lauder, G.V., Triantafyllou, M.S., 2003, Fish exploiting vortices decrease muscle activity, *Science* 302, 1566-1569
 9. Jo, C. H., Lee, K. H., Hwang, S. J., 2015, Tidal current energy resource assessment technique and procedure applied in western coastal region, South Korea, *Journal of Energy and Power Engineering*, 9, 358-366.
 10. Jo, C. H., Lee, K. H., Cho, B. K., Hwang, S. J., 2016, Resource assessment of tidal current energy using API in Korea”, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 36, No. 1, 75-81.
 11. Jo, C. H., Lee, K. H., Cho, B. K., Hwang, S. J., 2016, Tidal current resource assessment using Simulation of water circulation in Korea, *New & Renewable Energy*, 12(2), 71-76.
 12. Sun, H., Ma, C., Kim, E.S., Nowakowski, G., Mauer, E., Bernitsas, M.M., 2017, Hydrokinetic energy conversion by two rough tandem-cylinders in flow induced motions: Effect of spacing and stiffness, 107, 61-80.
 13. Fox, T.A. & West, G.S. 1990, On the use of end plates with circular cylinders, *Experiments in Fluids* 9, 237-239.
 14. Lee, T. and Budwig R., 1991. A study of the effect of aspect ratio on vortex shedding behind circular cylinders, *Journal of Physics of Fluids* 3, 309-315.
 15. 2016 New and Renewable Energy White Paper, Korea Ministry of Trade, Industry and Energy

and Korean Energy Agency, 56-57