



[2016-10-OE-010]

해수유동 수치모의를 활용한 조류에너지 잠재량 산정 연구

조철희¹⁾ · 이강희¹⁾ · 조봉근¹⁾ · 황수진^{1)*}

Tidal Current Resource Assessment Using a Numerical Simulation of Water Circulation in Korea

Chulhee Jo¹⁾ · Kanghee Lee¹⁾ · Bongkun Cho¹⁾ · Sujin Hwang^{1)*}

Received 27 June 2016 Revised 13 September 2016 Accepted 13 September 2016

ABSTRACT This paper describes the methodology and results of a tidal current resource assessment in Korea based on the mean surface velocities from tidal current observations and numerical simulations. The tidal current observation data from 1,938 measuring points was provided by the KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Agency). A numerical simulation of ocean flow circulation in Korea was conducted to explore the detailed distribution of tidal currents in Incheon-Gyeonggi and Jeollanam-do where there are very high tidal energy potentials and suitable sites for tidal energy farm development. The theoretical tidal current potential was calculated using the API (Averaged Power Intercepted) method which is generally applied in wind power potential estimation in Korea. A numerical simulation of the flow circulation through narrow passages between the islands is very important for resource assessment study.

Key words Tidal current energy potential(조류에너지 잠재량), API(Averaged Power Intercepted), PD(Power density, 일률밀도), Resource assessment(자원평가), Numerical simulation of Water Circulation(해수유동 수치모의)

Nomenclature

A : area, m²

AEP : annual energy production, TWh/y

API : averaged power intercepted, MW/km²

D : turbine diameter, m

f : energy conversion factor

IGC : installed generating capacity, GW

PD : power density, W/m²

TOE : tonne of oil equivalent, ktoe/y

U : upstream tidal current speed, m/s

 ρ : seawater density, kg/m³

subscript

swept : swept by a turbine

occupied : occupied by a device

1. 서론

정부는 제 4차 신재생에너지 기본계획에서 2035년까지 1차 에너지의 11%를 신재생에너지로 공급한다는 목표를 제시하였으며, 이를 위해 국내 여건에 적합한 신규 에너지원

1) Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,
Inha University E-mail: sjhwang@inha.edu
Tel: +82-32-860-7342 Fax: +82-32-864-5850

을 적극 발굴하고 활성화한다는 계획을 발표하였다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 우리나라의 신재생에너지원별 잠재량을 파악하고 이를 바탕으로 실현가능한 목표를 설정해야 한다.

조류발전은 해양에너지원 중 하나로 풍력발전에 비해 에너지밀도가 약 850배 이상 높고, 계절과 날씨에 무관하게 발전이 가능하며, 발전량을 예측할 수 있어 신뢰성이 매우 높은 에너지원이다.^[1] 우리나라의 서남해안은 조석간만의 차가 매우 크며, 섬과 섬 사이의 병목현상으로 인해 유속이 증폭되는 지역이 많아 세계적으로 조류에너지가 풍부하게 부존해있는 것으로 알려져 있다.

그러나 국내외의 몇몇 기관에서 우리나라의 조류에너지 잠재량을 조사한 사례가 있으나, 산정방법이 명확히 제시되지 않았으며 분석결과가 개발계획의 근거로 활용할 만큼 상세하지 않아 자료의 신뢰성 및 활용성 보완이 필요하다.

선행연구에서는 국립해양조사원의 국내 조류관측자료를 사용하여 국내 조류에너지 잠재량을 산정하였다.^[2] 관측유속 자료의 경우 관측 지점의 유속만을 제시하기 때문에 해당 지역의 세부 유속분포를 나타내기 위해서는 수많은 지점에서 관측을 수행해야 하며, 막대한 비용과 시간이 소요되어 현실적으로 불가능하다. 따라서 주요 지역의 상세 유속분포에 대한 자료를 확보하기 위해 해수유동 수치모의가 요구된다.

본 연구에서는 일률밀도(PD, Power density) 및 API (Averaged Power Intercepted)를 바탕으로 조류에너지 이론적 잠재량을 정의하였다. 선행연구를 통해 조류에너지가 풍부한 것으로 확인된 인천경기 및 전라남도 연안의 해수유동 수치모의를 수행하여 세부유속분포를 확인하였다. 관측자료와 수치모의자료를 바탕으로 국내 조류에너지 이론적 잠재량을 산정하였으며, 이를 위해 국내 해양영토를 행정구역에 따라 10개 지역으로 구분하였다. 단, 유속이 매우 낮고 수심이 깊어 조류에너지 잠재량이 미미할 것으로 판단되는 울산, 경상북도, 강원도는 조사구역에서 제외하였다.

2. 조류에너지 잠재량 분석방안

2.1 평균추출출력

조류발전은 조류의 운동에너지를 터빈의 회전에너지로

변환하여 전기를 생산하므로 조류에너지의 이론적 잠재량은 조류의 운동에너지를 의미한다. 일률밀도(PD, Power Density)는 유체의 운동에너지를 평가하기 위해 널리 사용되는 개념으로 유체의 운동에너지 플럭스를 의미하며, 식 (1)과 같이 유속과 유체의 밀도로 계산한다.^[3]

$$PD = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad [W/m^2] \quad (1)$$

일률밀도는 단위면적에 흐르는 에너지플럭스를 유속의 함수로 나타내기 때문에 에너지의 밀도를 나타내기 위해 유용한 개념이다. 그러나 일정 지역의 자원 부존량을 정량적으로 평가하기 위해서는 단위 조사면적 당 가용한 에너지플럭스를 나타내는 새로운 개념을 도입해야 한다.

본 연구에서는 풍력발전의 잠재량 산정에 사용되고 있는 평균추출출력(API, Averaged Power Intercepted)을 적용하여 조류에너지 부존량 분석방안을 정립하였다. 평균추출출력은 단위조사면적 당 이론적으로 추출 가능한 일률이며, 일률밀도를 기반으로 식 (2)와 같이 산정한다.

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

여기에서 A_{swept} 는 조류터빈이 회전하는 가상의 원형 단면적이며, 식 (3)과 같이 터빈의 직경으로 산정할 수 있다.

$$A_{swept} = \frac{\pi D^2}{4} \quad [m^2] \quad (3)$$

$A_{occupied}$ 는 단일 발전장치의 점유면적이며 조류터빈의 간섭을 고려하여 산정할 수 있다. Myers et al.은 수조실험을 통해 전방의 두 porous disk의 이격거리가 1.5D, 1.7D, 2D일 때의 후류를 관찰하여 2D인 경우에 전방터빈을 지나며 증폭된 유속이 가장 오래 유지되는 것을 확인하였다.^[4] 또한 Mycek et al.은 수조실험을 통해 난류강도에 따른 조류터빈 후류의 유속회복을 관측하여 난류강도가 15%인 경우 터빈을 통과한 유동이 약 10D를 흐르면 감소된 유속의 90% 이상이 회복되는 것을 확인하였다.^[5]

이러한 연구결과를 바탕으로 Fig. 1과 같이 전방터빈 간

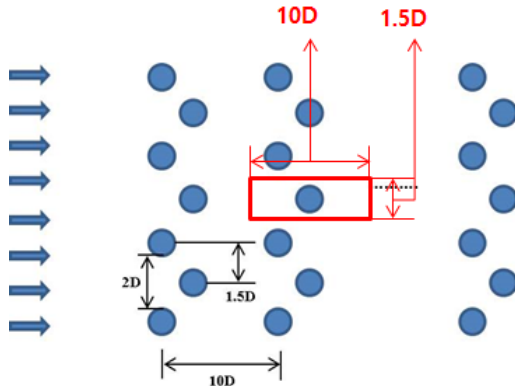


Fig. 1. Occupied area per tidal current device (view from above)

의 이격거리를 2D, 전방터빈과 후방터빈의 이격거리를 10D로 정의하여 식 (4)와 같이 단일 발전장치의 점유면적을 산정하였다.

$$A_{occupied} = 15D^2 \quad [m^2] \quad (4)$$

단일 발전장치의 점유면적에서 조류에너지 이론적 잠재량은 해당 조류터빈의 단면적을 지나는 조류의 운동에너지 플럭스라고 정의하면 식 (5)와 같이 일률밀도를 평균추출 출력으로 변환할 수 있다.

$$API = PD \times \frac{\pi}{60} \quad [MW/km^2] \quad (5)$$

2.2 이론적 잠재량 분석방법

조류에너지의 이론적 잠재량은 시설용량(IGC, Installed Generating Capacity), 연간발전량(AEP, Annual Energy Production), 석유환산톤(TOE, Tonne of Oil Equivalent)으로 평가할 수 있다.

시설용량은 해당 지역에 부존해있는 이론적 잠재량을 의미하며, 평균추출출력의 평균값과 해당 지역의 면적을 곱해 식 (6)과 같이 산정한다.

$$IGC = \frac{\overline{API} \times A}{10^3} \quad [GW] \quad (6)$$

연간발전량은 해당 지역의 시설용량에서 연간 생산 가능

한 발전량을 의미하며 시설용량에 연간발전시간을 곱하여 식 (7)과 같이 산정한다.

$$AEP = \frac{IGC \times 365 \times 24}{10^3} \quad [TWh/y] \quad (7)$$

석유환산톤은 연간발전량을 원유 1톤에 해당하는 칼로리를 기준으로 표준화한 단위로 해당 수치의 원유 대체 효과가 있다고 판단하는 지표이다. IEA(International Energy Agency)와 SOEC(Statistical Office of the European Communities)의 정의에 따라 에너지환산계수(f)에 11.63 (MWh /toe)을 적용하면 식 (8)을 이용하여 연간발전량으로부터 석유환산톤을 산정할 수 있다.

$$TOE = \frac{AEP \times 10^3}{f} \quad [ktoe/y] \quad (8)$$

3. 국내 조류에너지 이론적 잠재량

3.1 조사구역 분류

본 연구에서는 행정구역을 기반으로 해양영역을 구분하여 Fig. 2와 같이 총 10개 지역으로 구분하였다. 조사구역은 배타적 경제수역을 포함하도록 하였으며, 각 행정구역

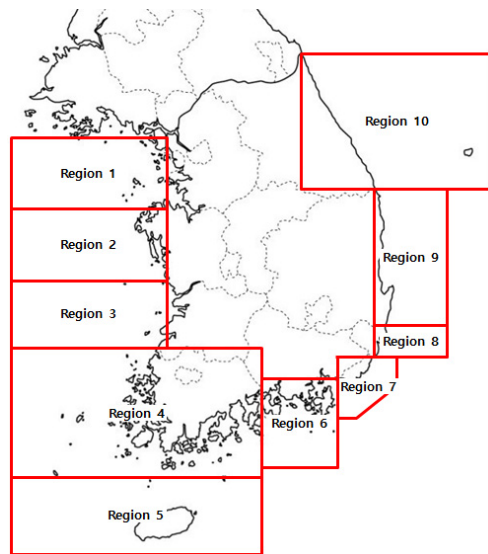


Fig. 2. Division of coastal region in Korea

의 해양영역이 명확하게 구분되어있지 않아 논란의 대상이 될 수 있기 때문에 해안의 경계를 기준으로 분할하였다.

본 연구에서는 조류가 느리고 수심이 깊어 조류에너지 잠재량이 미미할 것으로 판단되는 동해안의 강원도, 경상북도, 울산은 조사구역에서 제외하고 서해 및 남해에 대해서 조류에너지 잠재량을 분석하였다.

3.2 조류데이터

조류에너지 잠재량 분석을 위해 국립해양조사원에서 제공하는 1,902개소에서 1주야 또는 30주야 동안 관측한 조류자료를 수집하여 Fig. 3과 같이 표층평균유속을 산정하였다. 이러한 관측자료는 조류의 유속을 직접 측정하기 때문에 신뢰성이 매우 높다. 그러나 해당 관측지점에 대한 유속만을 나타내기 때문에 관측유속만으로는 조사구역의 세부 유속분포를 확인할 수 없다. 지형이 단순한 외해의 경우 유속분포에 변화가 적어 관측유속만으로도 유속분포를 나타낼 수 있다.

그러나 해안선이 복잡하며 크고 작은 섬이 많아 지형이 복잡한 인천경기와 전라남도의 경우 관측자료 만으로는 유속분포를 파악할 수 없다. 따라서 두 지역의 세부 유속분포를 파악하기 위해 해수유동 수치모의를 수행하여 Fig. 4와 같이 세부 유속자료를 확보하였다.

해수유동 수치모의는 미국 버지니아 해양연구소에서 개발하고 미국 환경청에서 인가한 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)를 사용하였으며, 해수유동 재현기간은 30일이다. 수평격자는 500m의 정격자를 사용하였고, 수

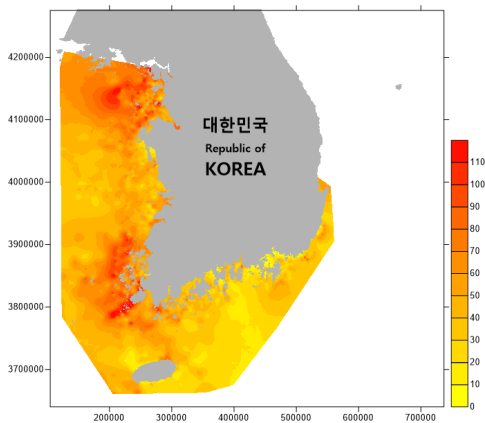


Fig. 3. Averaged surface velocity contour (Observation)

직격자는 sigma layer로 3층을 구성하였다. 수심 및 지형은 국립해양조사원에서 발간하는 수치해도를 사용하였다. 외해에는 NaoTidal 모델을, 연안은 국립해양조사원의 연안 조석관측 결과 중 주요 4대 분조를 사용하여 개방경계에 입력하였다. 인천경기의 유효격자수는 51,423개이며, 전라남도는 48,703개이다. 주요 정점에서 시계열 관측자료와 비교한 결과 85% 이상의 정확도를 나타내었다.

관측자료와 수치모의자료를 병합하여 Fig. 5와 같이 국내 조류유속분포를 나타내었으며, 이를 바탕으로 조류에너지 잠재량을 산정하였다.

3.3 분석결과

관측자료와 수치모의자료를 각 지역별로 분류하고 식 (5)를 사용하여 표층평균유속으로 평균추출출력을 산정하였

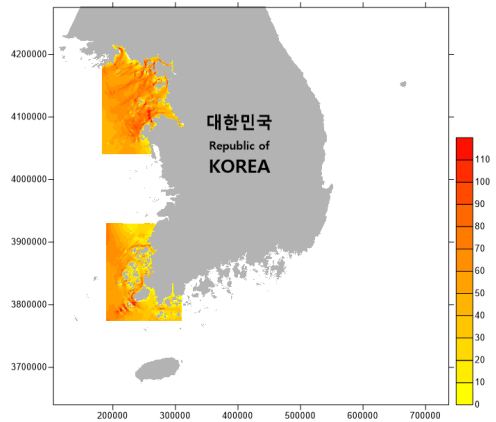


Fig. 4. Averaged surface velocity contour (Simulation)

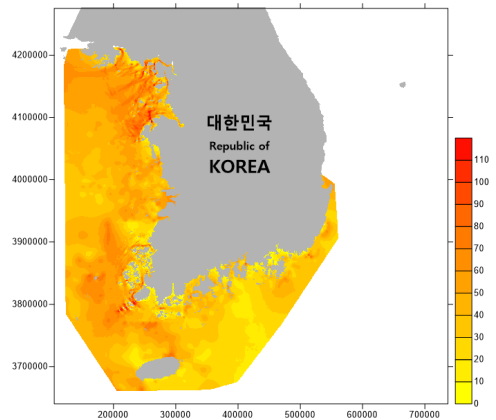


Fig. 5. Averaged surface velocity contour (Observation and simulation)

다. 평균추출출력을 지역별로 평균하여 각 지역의 조류에너지 밀도를 나타내는 평균추출출력의 평균을 Table 1과 같이 산정하였다.

각 지역의 해양면적과 평균추출출력의 평균을 식 (6), (7), (8)에 적용하여 Table 2와 같이 국내 조류에너지 이론적 잠재량을 계산하였다. 전체 조사면적은 118,457km²이며, 국내 평균추출출력의 평균은 5.1MW/km²으로 산정되었다. 국내 조류에너지 이론적 잠재량은 시설용량으로 439GW이고, 연간발전량으로 3,843TWh/y, 석유환산톤으로 330,481 ktoe이다.

지역별로 평균추출출력은 인천경기가 6.7MW/km²로 가장 높았으며, 부존량은 전라남도가 126GW로 가장 많았다.

Table 3은 관측자료만을 사용하여 산정한 국내 조류에너지 이론적 잠재량을 나타낸 것이다. 수치모의자료에 비해 관측자료는 조류의 세부 유속분포를 나타내지 못하기 때문에 수치모의자료를 함께 사용하여 산정한 조류에너지

이론적 잠재량 비해 과다 추정되는 경향을 보였다. 인천경기의 경우 시설용량 기준으로 약 59%, 전라남도의 경우 약 146% 과다 추정되었다.

따라서 해수유동 수치모의를 통해서 세부 유속분포를 반영하여 조류에너지 잠재량 산정 결과의 신뢰성을 높일 수 있으며, 특히 전라남도과 같이 섬이 많이 분포하여 수로가 복잡하게 분포하여 있는 경우에는 관측유속만으로는 신뢰성이 매우 낮을 수 있다.

이러한 결과는 해수유동 수치모의를 통해 모사되는 수로의 정도와 각 지역의 평균추출출력의 평균을 산정하기 위한 통계적 기법에 따라 변화할 수 있으며, 체계화된 간섭연구를 통해 조류터빈의 이론적 최적배치를 도출하여 단일발전장치의 점유면적 산정에 반영해야 한다.

4. 결론

본 논문에서는 일률밀도를 바탕으로 조류에너지 이론적 잠재량을 산정하기 위해 풍력발전에서 사용한 평균추출출력을 도입하였으며, 이를 활용하여 국내 이론적 조류에너지 잠재량을 분석하였다. 잠재량 분석을 위해 행정구역을 기준으로 해양영역을 10개 지역으로 구분하였으며, 이 중 조류에너지 이론적 잠재량이 미미할 것으로 판단되는 동해안의 강원도, 경상북도, 울산을 제외한 7개 지역을 조사구역으로 선정하였다.

국립해양조사원에서 제공하는 관측자료와 별도로 수행된 해수유동 수치모의자료를 바탕으로 전국의 표층평균유속을 산정하고 지역별로 분류하여 각 지역의 평균추출출력

Table 1. Example of averaged API calculation (Region 1)

Region 1			
No.	Velocity [cm/s]	Power Density [W/m ²]	API [MW/km ²]
1	114.5	769.3	40.3
2	95.8	450.6	23.6
3	110.7	695.2	36.4
4	123.5	965.4	50.5
5	66.1	148.0	7.7
∴	∴	∴	∴
Averaged API (\overline{API})			7.0

Table 2. Theoretical tidal energy potential in Korea (Observation and Simulation)

Region	\overline{API} [MW/km ²]	Area [km ²]	IGC [GW]	AEP [TWh/y]	TOE [ktoe/y]
Region 1	7.0	15,248	107	939	80,749
Region 2	4.9	17,754	87	761	65,463
Region 3	1.6	11,093	18	147	13,495
Region 4	3.7	31,784	119	1,041	89,520
Region 5	2.8	34,507	96	839	72,172
Region 6	1.4	4,791	7	58	5,013
Region 7	1.7	3,280	6	49	4,190
Korea	5.1	118,457	439	3,845	330,603

Table 3. Theoretical tidal energy potential in Korea (Observation)

Region	\overline{API} [MW/km ²]	Area [km ²]	IGC [GW]	AEP [TWh/y]	TOE [ktoe/y]
Region 1	11.1	15,248	170	1,487	127,859
Region 2	3.9	17,754	69	601	51,638
Region 3	2.7	11,093	30	262	22,492
Region 4	9.2	31,784	293	2,565	220,537
Region 5	2.4	34,507	83	731	62,839
Region 6	1.4	4,791	7	58	5,013
Region 7	1.7	3,280	6	49	4,190
Korea	5.8	118,457	657	5,752	494,569

의 평균을 계산하였다. 지역별 조사면적을 고려하여 잠재량을 산정하였으며, 그 결과 국내의 평균추출출력의 평균은 $5.1\text{MW}/\text{km}^2$ 으로 산정되었으며, 시설용량은 439GW이고, 연간발전량은 3,845TWh/y, 석유환산톤은 330,603ktoe로 산정되었다.

추후 해수유동 수치모의 및 통계적 기법을 보완하여 국내 조류에너지 잠재량 산정 결과의 정확성 및 신뢰성을 높일 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다(B6-2427).

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양에너지 융복합 인력양성).

References

- [1] 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", *Renewable Energies Offshore*, 153-159.
- [2] 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*, 36(1), 75-81.
- [3] Kabir, A., Lemongo, I. J. and Fernandez, A., 2014, "Hydrokinetic Energy Resource Assessment of the Gulf Stream Near Cape Hatteras, North Carolina", In *ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers.
- [4] Myers, L.E., Keogh, B. and Bahaj, A.S., 2011, "Layout Optimisation of 1st-Generation Tidal Energy Arrays", *Proc. of 9th European Wave and Tidal Energy Conference*.
- [5] Mycek, P., Gaurier, B., Germain, G., Pinon, G., and Rivoalen, E. (2014), "Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour. Part I: One single turbine", *Renewable Energy*, 66, 729-746.