

API를 적용한 국내 조류에너지 잠재량 추정

Resource Assessment of Tidal Current Energy Using API in Korea

조철희* · 이강희* · 조봉근* · 황수진*†

Jo Chul-Hee*, Lee Kang-Hee*, Cho Bong-Kun* and Hwang Su-Jin*†

(Received 22 January 2016; accepted 26 February 2016)

Abstract : The west and south coastal regions of Korea are known to be of strong tidal current speed. With the increasing demand for renewable energies, the resource assessment has been a crucial issue which should be conducted before any detail planning and development of the potential sites for tidal current farm. Although there are several results of resource assessment of tidal current energy in Korea, the resource assessment method is not officially announced. This undefined methodology makes the results unreliable and useless. Recently new renewable energy potential definition has been announced by KIER (Korea Institute of Energy Research). This categorizes energy potential as four steps; theoretical, geographical, technical and market potentials. This paper describes the resource assessment of tidal current power in Korea based on API (Averaged Power Intercepted). The results show that the Incheon-Gyeonggi and Jeollanam-do are very promising areas for tidal current power in Korea.

Key Words : 조류에너지 잠재량(Tidal current energy potential), 평균추출출력(API, Averaged power intercepted), 일률밀도(PD, Power density), 자원평가(Resource assessment)

1. 서 론

정부는 신재생에너지 기본계획에서 2035년 까지 1차 에너지의 11.0%를 신재생에너지로 공급하겠다는 목표를 제시하였으며, 이를 위

해 국내 여건에 적합한 신규 에너지를 적극 발굴, 활성화한다는 계획을 발표하였다¹⁾. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 우리나라의 신재생에너지원 별 잠재량을 파악하고 이를 바탕으로 실현가능한 개발 목표를 설정해야

*조철희, 이강희, 조봉근 : 인하대학교 조선해양공학과
*† 황수진(교신저자) : 인하대학교 조선해양공학과
E-mail : sjhwang@inha.edu, Tel : 032-860-7342

*Jo Chul-Hee, Lee Kang-Hee, Cho Bong-Kun : Department of Nacal Architecture and Ocean Engineering, Inha University.
*† Hwang Su-Jin (corresponding author) : Department of Nacal Architecture and Ocean Engineering, Inha University.
E-mail : sjhwang@inha.edu, Tel : 032-860-7342

한다. 그동안 국내의 신재생에너지 잠재량 분석 연구는 정부의 핵심 개발 에너지원인 태양광 및 풍력을 대상으로 활발하게 이루어졌다.^{2),3),4),5),6),7)} 최근 신재생에너지 보급 목표를 달성하기 위해 신규 에너지원의 발굴에 대한 필요성이 대두되면서 해양에너지, 수력, 바이오매스, 지열 등 다양한 에너지원에 대한 잠재량 분석 연구가 수행되고 있다.

조류에너지는 해양에너지원 중 하나로 작동 유체인 해수의 밀도가 공기에 비해 약 850배 높아 에너지 밀도가 높고, 계절과 날씨에 무관하게 발전이 가능하며, 발전량을 예측할 수 있기 때문에 신뢰성이 매우 높은 에너지원이다. 우리나라의 서남해안은 큰 조석간만의 차와 섬과 섬 사이의 병목현상으로 인해 조류가 빠른 지역이 많아 세계적으로 조류에너지가 풍부하게 부존해 있다. 국내외의 몇몇 기관에서 우리나라의 조류에너지 자원 잠재량을 발표한 사례가 있으나, 조류에너지 자원 잠재량의 분석방안이 명확히 제시되지 않았으며 분석결과가 개발계획의 근거가 될 정도로 상세하게 보고되지 않아 자료의 신뢰성과 활용성을 보완할 필요가 있다.⁸⁾

본 연구에서는 한국에너지기술연구원에서 발표한 신재생에너지 잠재량 신규 정의에 따라 에너지 자원 잠재량을 이론적, 지리적, 기술적, 시장 잠재량으로 분류하고 일률밀도와 평균추출출력을 기반으로 하는 분석방안을 제안하였다. 전국 2,095개소에서 1주야 혹은 30주야 동안 관측된 표층 유속자료를 바탕으로 이론적 조류에너지 잠재량을 산정하였으며, 그 결과는 행정구역을 기준으로 8개 권역으로 구분하여 나타냈다. 유속이 매우 낮고 수심이 깊어 조류에너지 잠재량이 미미할 것으로 판단되는 경상북도 및 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, [W/m²])는 유체의 운동에너지를 평가하기 위해 널리 사용되는 개념으로 유체의 운동에너지 플럭스의 밀도를 나타내며 다음과 같이 유속과 밀도로 계산할 수 있다⁹⁾.

$$PD = \frac{1}{2} \rho U^3$$

일률밀도는 단위면적에 흐르는 에너지 플럭스를 유속만의 함수로 나타낼 수 있기 때문에 활용이 간편하다. 그러나 이를 3차원으로 확장하여 해당 지역의 조류에너지 부존량을 산정하기 위해서는 단위 조사면적에 대한 에너지플럭스를 나타내는 새로운 개념을 도입해야 한다.

본 연구에서는 풍력발전의 잠재량 산정에 사용되고 있는 평균추출출력 (API : Averaged Power Intercepted, [MW/km²])을 적용하여 조류에너지 부존량 분석방안을 정립하였다. 평균추출출력은 단위면적 당 이론적으로 추출 가능한 총 에너지이며, 일률밀도를 기반으로 다음과 같이 산정한다.

$$API = PD \times \frac{A_{swept}}{A_{occupied}}$$

여기에서 A_{swept} [m²]는 조류터빈이 회전하는 가상의 원형 단면적이며 다음과 같이 터빈의 직경의 함수로 나타낼 수 있다.

$$A_{swept} = \frac{\pi D^4}{4}$$

$A_{occupied}$ [km^2]는 단일 발전장치의 점유면적이며 최근의 조류터빈 간섭연구 결과를 바탕으로 산정하였다.

Fig. 1은 조류터빈을 대각으로 배치하였을 때, 전방 터빈의 이격거리에 따른 후류의 유속 변화를 나타낸 것이다.¹⁰⁾ 전방 터빈의 이격거리가 $2D$ 일 때 전방터빈을 지나며 증폭된 유속은 약 $10D$ 가 지나서도 유지되며 $1.5D$ 의 경우보다 2배 이상의 지속거리를 나타낸다.

또한 수조실험을 통해 조류터빈의 후류를 관측한 결과에 따르면 터빈을 통과한 유동이 약 $15D$ 를 흐르면 감소된 유속의 90% 이상이 회복된다고 알려져 있으며 난류가 강한 실제 해양 환경에서는 더 빨리 회복되는 경향을 보인다¹¹⁾.

이러한 선행연구 결과들을 바탕으로 본 연구에서는 전방 터빈의 이격거리를 $2D$, 후방 터빈의 이격거리를 $15D$ 로 산정하여 Fig. 2와 같이 단일 터빈의 차지면적을 $22.5D^2$ ($15D \times 1.5D$)로 산정하였다.

$$A_{occupied} = 22.5D^2$$

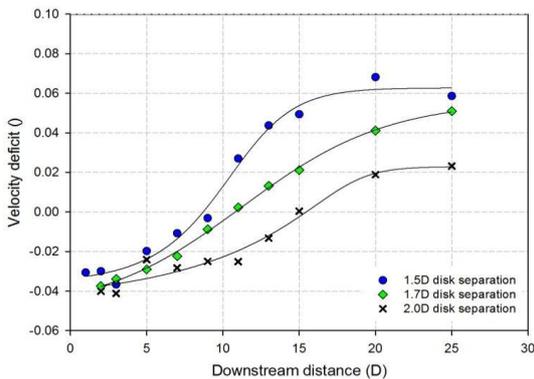


Fig. 1 Comparison of centerline velocity deficit for varying disk separation¹⁰⁾

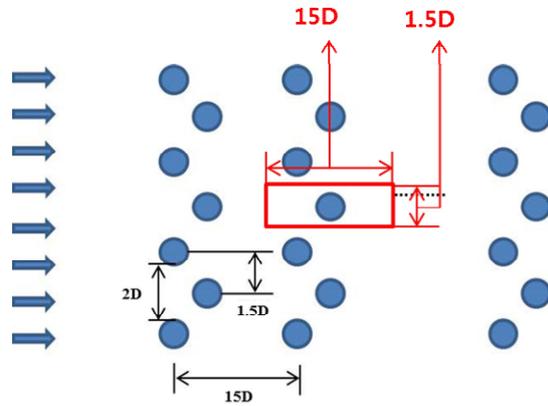


Fig. 2 Occupied area per tidal current device

단일 발전장치의 점유면적에서의 이론적 조류에너지 자원 잠재량은 해당 터빈의 단면적을 지나는 조류의 운동에너지 플럭스라고 가정하면 다음과 같이 일률밀도를 단위 조사면적에 대한 밀도로 표현되는 평균추출출력으로 변환할 수 있다.

$$API = PD \times \frac{\pi}{60}$$

2.2 잠재량 분석방안

신재생에너지의 잠재량은 설비용량 (IGC : Installed Generating Capacity, [GW]), 연간 발전량 (AEP : Annual Energy Production, [TWh/y]), 석유환산톤 (TOE : Tonne of Oil Equivalent, [ktoe/y])으로 평가할 수 있다⁸⁾.

설비용량은 해당 지역에 적용 가능한 발전설비의 최대용량이며 평균추출출력의 대푯값 (\overline{API}), 해당 지역의 면적 (A , [km^2]), 발전설비의 효율 (η)을 사용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$IGC = \frac{\overline{API} \times A}{10^3} \times \eta$$

연간발전량은 해당 지역에 일정 시설용량의 발전설비를 적용했을 때 연간 생산 가능한 발전량을 의미하며 설비용량에 연간 발전시간 및 이용률 (k_u , [%])을 곱하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$AEP = \frac{IGC \times 24 \times 365 \times k_u}{10^5}$$

석유환산톤은 에너지를 원유 1톤에 해당하는 칼로리를 기준으로 표준화한 단위로써 해당 수치만큼의 원유 대체 효과가 있다고 판단할 수 있는 지표이다. IEA (International Energy Agency) 와 SOEC (Statistical Office of the European Communities)의 정의에 따라 조류발전의 에너지환산계수 (f)에 11.63 적용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$TOE = \frac{AEP \times 10^3}{f}$$

조류에너지 잠재량은 한국에너지기술연구원에서 발표한 신재생에너지 잠재량 신규 정의 (Fig. 3)에 의거하여 이론적, 지리적, 기술적, 시장 잠재량으로 구분하였다. 이러한 잠재량 정의는 이론적-기술적-경제적으로 이어지는 단계별 피라미드형 구조로 잠재량을 구분하여 연구하는 국제적 연구동향에 부합한다. 또한 에너지 부존량, 지리적 제약, 기술적 제약, 경제적 요건을 효과적으로 나타낼 수 있어 각 지역의 에너지 분포 특성을 구체적으로 파악할 수 있다.

이론적 잠재량은 해상에 아무런 제약 없이 조류발전 설비를 적용했을 때 추출 가능한 에너지 부존량이며, 발전설비의 효율 및 이용률은 100%이고 해당 지역의 면적은 해역의 총

면적을 적용하였다. 조류에너지 잠재량 분석은 일반적으로 유한개의 유속데이터를 기반으로 수행되기 때문에 평균추출출력의 대푯값은 각 유속데이터로 산정한 평균추출출력의 평균값을 사용하였다.

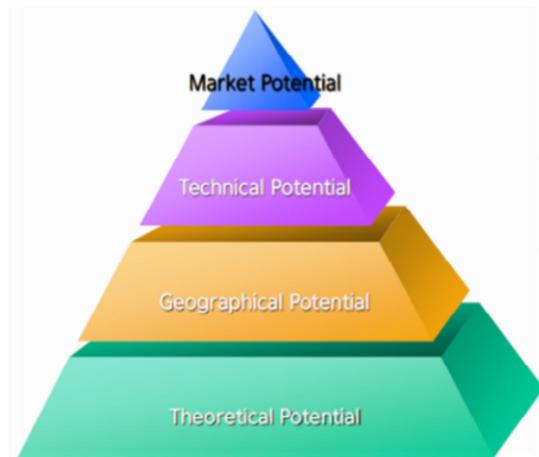


Fig. 3 New renewable energy potential definition (KIER : Korea Institute of Energy Research)

지리적 잠재량은 환경규제, 항로, 군사지역, 발전장치 설치 수심 제한, 해저 케이블 및 해저 파이프라인, 어초 및 어장지 등 조류발전설비의 적용이 불가능한 지리적 제약조건을 고려하여 산정된 이론적 잠재량이다. 따라서 이론적 잠재량과 동일하게 발전설비의 효율 및 이용률은 100%이고 평균추출출력의 평균값을 대푯값으로 사용하나, 해당 지역의 면적은 지리적 배제지역을 제외한 해역의 면적을 적용한다.

기술적 부존량은 조류발전 터빈 및 발전 효율, 이용률, 기술적 제한요소 등 현재의 기술 수준을 고려하여 산정한 잠재량이다. 대표적인 기술적 제한요소로는 cut-in speed가 있으며, 최신 기술동향을 반영하여 적합한 수치를 적용해야 한다.

시장 잠재량은 보급확산을 위한 비용보조수단을 제외한 완전경쟁 시장환경에서 적용 가능한 잠재량으로 적용시점(현재 혹은 미래시점)에 대한 고려가 필요하다.

3. 조류에너지 잠재량 분석

3.1 조사구역 분류

본 연구에서는 행정구역을 기반으로 해양영역을 구분하여 Fig. 4와 같이 국내연안을 총 8개 지역으로 구분하여 조류분포의 조사 및 분석을 수행하였다. 해양영역에 대한 행정구역상 구분이 명확하게 발표되지 않았으며, 논란의 대상이 되기 때문에 해안의 경계를 기준으로 개략적으로 구분하였다. 또한 조류가 느리고 수심이 깊어 조류에너지 잠재량이 미미할 것으로 판단되며 가용한 조류데이터가 제한적인 동해안은 조사구역에서 제외하였다.

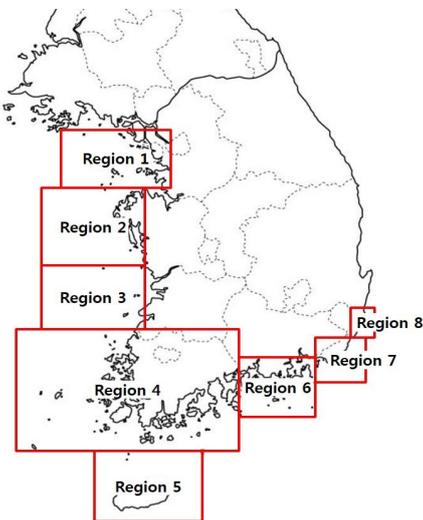


Fig. 4 Division of coastal region in Korea

3.2 조류데이터

조류에너지 분석을 위해 사용된 조류데이터

는 전국 2,095개소에서 1주야 혹은 30주야 동안 측정된 표층유속의 대조평균 최강유속을 사용하였다. 각 유속 데이터는 조사구역에 따라 분류하였으며, 각 지역의 평균추출출력의 대푯값 및 통계적 분석을 위해 사용하였다. Table 1은 인천·경기권 (Region 1)의 평균추출출력 평균값 산출 예시이다.

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	173.2	2,663	92.9
2	122.5	942	32.9
3	149.0	1,695	59.2
4	112.7	733	25.6
5	123.9	974.8	34.0
⋮	⋮	⋮	⋮
Averaged API (API)			53.2

4. 조류에너지 잠재량 분석 결과

우리나라의 이론적 조류에너지 평균추출출력의 평균값은 22.74 MW/km²로 나타났으며, 본 연구의 전체 조사면적은 78,170 km²이다. 이를 바탕으로 설비용량은 1,860 GW, 연간발전량은 16,294 TWh/y, 석유환산톤은 1,400,999 ktoe/y로 산정되었다.

일률밀도는 전국에서 인천·경기권 해역이 53.2 MW/km²로 가장 높았으며, 전라남도가 32.5 MW/km²로 두 번째로 높았다. 설비용량은 해양면적이 가장 넓은 전라남도에서 913 GW로 가장 높게 나타났으며 인천·경기권 해역이 386GW로 두 번째로 높았다. 기타 세부 지역은 일부 수로에서 빠른 조류가 발생하는 부분이 존재하였으나, 지역 전체의 잠재량은 비교적 적

은 분포를 보였다.

본 연구에서는 관측유속을 사용하여 잠재량 분석을 수행하였다. 조류에너지는 유속의 세제곱에 비례하기 때문에 유속분포의 정확성은 잠재량 산정에 매우 중요한 요소이나, 관측유속은 자료의 양에 한계가 있어 각 지역의 세부 유속을 정확하게 나타내지 못한다. 따라서 추후 해수유동 수치해석을 통해 해당 지역의 자세한 유속 분포를 파악하여 보다 정도 높은 조류에너지 부존량을 산정할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 풍력발전에서 잠재량 산정을 위해 사용된 일률밀도와 평균추출출력의 개념을 바탕으로 조류에너지 자원 잠재량 분석방안을 정립하였고, 이를 활용하여 국내 이론적 조류에너지 자원 잠재량을 분석하였다. 잠재량 분석을 위해 행정구역을 기준으로 전국을 8개 지역으로 분할하였으며, 전국 2,095개소에서 측정한 유속데이터를 사용하였다.

그 결과 국내의 조류에너지 밀도는 평균적으로 22.74 MW/km²으로 산정되었고 특히 인천·경기권 해역과 전라남도예 조류에너지가 풍부하게 부존되어있는 것으로 나타났다. 국내 이론적 조류에너지 부존량은 총 1,860 GW, 16,294 TWh/y, 1,400,999 ktoe/y로 산정되었으며, 추후 지리적, 기술적 잠재량 분석을 수행할 예정이다.

이러한 부존량 분석 결과는 가용한 조류데이터 및 유속기준에 따라 달라질 수 있으며, 관측자료와 해수유동 수치해석자료를 모두 사용하여 정도 높은 잠재량산정을 수행할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다(GP2014-0030).

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(20133030000260).

Reference

1. Ministry of Trade, Industry and Energy, Fourth Basic Plan for Technology Development, Application, and Deployment of New & Renewable Energy (2014-2035), Seoul, 20p, 2014.
2. Kim H. G., Hwang H. J. and Kang Y. H., Evaluation of Onshore Wind Resource Potential According to Environmental Conservation Value Assessment, Journal of Environmental Science International, Vol.22, No.6, pp. 717-721, 2013
3. Kim H. G. and Kang Y. H., The 2010 Wind Resource Map of the Korean Peninsular, Journal of the Wind Engineering institute of Korea, Vol. 16, No. 4, pp. 119-124, 2012
4. MOCIE, Precise Investigation on Domestic Wind Resources and Research on the Enhancement for the Windfarm Development Technology in KOREA(Final Report), Korea, 504p, 2005
5. Jeong J. C., The Analysis of a Potential Solar Energy Resource Map, Journal of Environmental Impact Assessment, Vol. 21, No. 4, pp. 573-579, 2012
6. Jo D. K. and Kang Y. H., A Detailed Survey of Solar Energy Resources for the Construction of Photovoltaic Power Generation Sites in East Asia Areas, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 26, No. 1, pp. 29-39, 2006
7. Jo D. K., Kang Y. H. and Auh C. M., A Survey of Direct Normal Insolation Resources for the Construction of Solar Thermal Power

- Generation Sites in Korea, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 25, No. 1, pp. 11-18, 2005
8. NOTIE, 2014 New & Renewable Energy White Paper, 626p, 2014
 9. Kabir, A., Lemongo, I. J. and Fernandez, A., 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, 2014
 10. Myers, L. E., Keogh, B. and Bahaj, A. S, Layout Optimisation of 1st-Generation Tidal Energy Arrays, Proc. of 9th European Wave and Tidal Energy Conference, 2011
 11. Mycek, P., Gaurier, B., Germain, G., Pinon, G., and Rivoalen, E., Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour. Part I: One single turbine, Renewable Energy, Vol. 66, pp. 729-746, 2014