

완도해역의 조류에너지 자원에 관한 연구 양 창 조†

(원고접수일 : 2010년 12월 21일, 원고수정일 : 2011년 1월 11일, 심사완료일 : 2011년 1월 21일)

A Study on Tidal Current Energy in the Sea near Wando

Chang-Jo Yang†

요 약 : 최근 기후변화를 초래하는 화석연료의 사용을 감축하는 세계적 추세와 함께 유엔기후협약으로 인한 에너지의 안정적 공급을 위해 많은 노력이 요구되고 있다. 따라서 조류에너지와 같은 해양자원의 이용이 주목을 받고 있으며, 이러한 조류자원은 집중된 중력에너지 형태로 존재하며, 이러한 조류에너지는 매우 크지만 제한된 지역에 분포하고 있으므로 조류에너지를 효과적으로 이용하기 위해서는 반드시 기술적, 경제적인 측면의 평가가 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 완도해역에서의 조류에너지를 평가하기 위해 수심, 조석, 조류 등을 조사하고, 관측 자료를 바탕으로 완도 해역의 부존 조류에너지를 추산하고, 이용 가능한 연평균 에너지를 계산하였다.

주제어 : 해양에너지, 조류, 조류에너지 변환장치, 초음파조류유속계, 에너지 밀도, 연간 에너지 생산량

Abstract: With the worldwide trend of controlling the utilization fossil fuels inducing global climate change, many efforts will have to be made on securing stable supply of the energy due to UNFCCC. Tidal currents are a concentrated form of gravitational energy. Tidal current resource is significant, but limited locations. Technical and economic feasibility demonstration is the next needed step in the technology development process. So, we investigated overview of tidal in-stream energy in the sea near Wando, and then analytically estimated tidal energy resources and annual energy output of TECS arrays.

Key words: Ocean energy, Tidal current, TECS(Tidal Energy Conversion System), ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler), Available energy density, Annual energy output

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈에 따른 대체에너지 개발이 강조되고 있으며, 또한 지구 온난화를 유발하는 온실가스 배출규제협약인 유엔 기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change)의 교토의정서(Kyoto Protocol, 1997)[1]의 발효로 온실가스의 발생 및 지구 온난화 문제 등으로 청정에너지의 개발이 요망되고 있다. 이와 같이 화석에너지

공급의 한계와 화석연료 사용에 따른 심각한 환경 문제 유발로 전 세계는 대체에너지 개발에 총력을 기울여야 할 입장이며, 특히 한국은 97% 이상의 에너지를 수입에 의존하고, 전체 석유 소비량의 75%를 중동에서 수입하고 있어 유가 상승에 따른 국제수지 악화 및 환경오염 등의 문제로 대체에너지 개발이 더욱 시급한 실정이다[2,3].

한편 조석, 조류, 파랑에너지등과 같은 해양에너지는 열에너지나 광에너지 등에 비하여 에너지 효

† 교신저자(목포해양대학교 기관시스템공학부, E-mail:cjyang@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7228)

율이 높고, 자연에너지 중에서 비교적 에너지 밀도가 높아 개발 시 저가로 에너지 취득이 가능하여 경제성 확보가 용이하다[4,5]. 그러나 우리나라 연안은 풍부한 해양에너지 자원이 부존하고 있음에도 불구하고 그 이용기술 개발에 대한 역사는 길지 않다. 가용한 해양에너지는 서해안의 조석에너지, 서남해안의 조류에너지, 동해의 파랑에너지와 온도차 에너지 등을 꼽을 수 있으며, 특히 전남 서남해안은 조류발전의 최적지로 평가되고 있다[6,7]. 조류발전이란 조류의 자연적인 흐름으로 수차발전기를 가동시켜 발전하는 방식을 말한다. 원리상 풍력발전과 같이 유체의 운동에너지로 수차를 회전시켜 발전하나 해수의 밀도가 공기의 밀도보다 840배 크기 때문에 같은 시설용량인 경우 조류수차의 크기가 훨씬 작다. 또한 단위시간당 조류에너지는 유속에 크게 좌우되므로 조류 발전의 경제성을 확보하고 실제 발전소 설치·운영을 위해서는 반드시 조류발전의 후보지에 대한 다각도의 자원 조사와 환경평가를 통한 타당성 평가가 수반되어야 한다[8,9].

특히, 조류자원의 밀도가 높은 것으로 알려진 완도 해역은 해수 유동이 인접 지역에 비해 매우 넓고 빠르며, 완도 해역 부근에서 해수 유동 관측 및 모델링 등에 관한 연구가 계속 수행되고 있다[10, 11]. 따라서 이 해역의 조류에너지를 효과적으로 이용하기 위해서는 해저에 설치되는 조류에너지 변환장치(이하 MECS)인 터빈 로터의 직경, 터빈 날개각의 변환 등을 잘 선정해야하며, 이를 위해서는 수심관측 및 수심변화에 따른 표·중·저층에서 ADCP와 같은 초음파 유속계를 사용한 연속적인 해수 유동의 현장관측이 매우 중요하다[12].

그러므로 본 연구에서는 완도군 해역의 주요 후보지에서 조류발전을 위한 기본설계 및 시험발전소 설치·운영을 목표로 기존문헌을 조사하고, 수심, 조석, 조류 등의 조사하여 이 자료를 바탕으로 완도 해역의 이용 가능한 에너지 밀도와 연간 에너지 생산량을 산정하고자 한다. 또한 본 연구를 통하여 향후 세계적인 조류에너지 개발 적합 해역인 서남해안의 수리 및 지형특성을 고려한 조류발전 핵심 기술을 개발하고, 한국형 조류발전 최적화 기법을 확보함으로써 조류발전 전력의 질적 향상 및 경제

성을 제고할 수 있게 되기를 기대한다.

2. 해양조사 방법

2.1 수심측량

수심자료는 TECS의 용량 및 설치 위치 선정시 필요하며, 향후 수치모형실험의 중요한 기본 입력 자료를 제공할 수 있으므로 수심측량을 실시하였다. 측량 작업 구역은 조력발전소 예정지인 흑일도~노화도 사이 완도 부근 해역으로 관측에는 음파 수심측정장치와 GPS로 구성된 관측장비가 사용되었다.

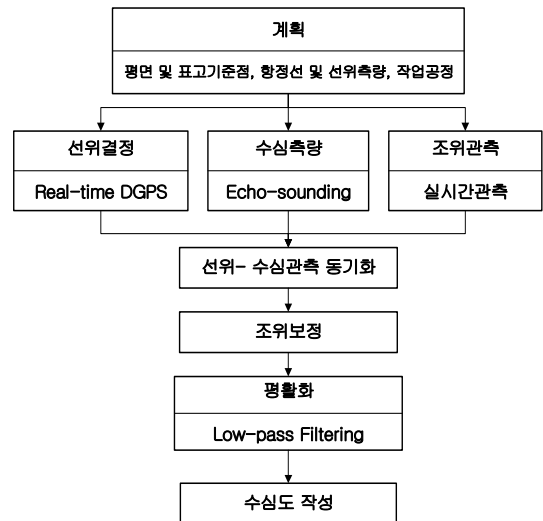


Figure 1: Flow chart for sea depth measurement.

수심측량 작업순서도는 그림 1과 같다. 일반적인 수심측량작업에는 평면기준점 설정을 위한 평면측량이 이루어져야 하며, 측량한 자료의 정량화를 위하여 측량전산화 시스템이 필요하다. 수역면적 변화가 예상되는 곳의 Pitch를 작게 잡았으며, 그 이외수역에 대해서는 수치실험의 기본자료 입력 조건을 위한 것이므로 Pitch를 충분히 넓게 설정하였다.

2.2 연속조류 관측

조류발전소 건설예정해역에서 조류에너지의 잠재력을 파악하기 위해서는 유속이 가장 빠를 것으로 예상되는 임의정점에 7일 이상 유속계를 설치한

후 여기서 얻어진 유동자료를 분석하여 조류발전소 설치에 따른 경제성을 평가할 필요가 있다[13]. 본 조사는 흑일도 남쪽, 노화도 북쪽 수로상 정점에 ADCP를 해저면상에 설치하여 15일 동안 해수유동 관측을 실시하였다. 관측 개요는 표 1과 같고, 관측 위치는 그림 2에 나타낸 바와 같다.

Table 1: Tidal velocity surveying information.

정점	관측 위치	수심 DL(-)m	관측기기	관측 간격
PC1	34° 15' 39.0" N 126° 33' 45.0" E	32	ADCP 600kHz	10분
PC2	34° 15' 43.0" N 126° 36' 21.0" E	32	ADCP 600kHz	10분

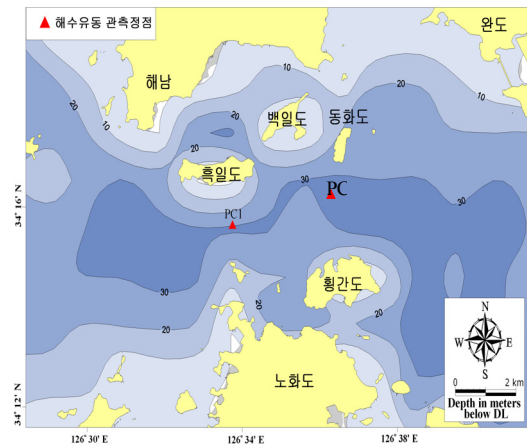


Figure 2: ADCP deployment point(pc1, pc2).

ADCP는 음파의 도플러 효과를 이용하여 수직 1 m 간격으로 층별 유속 및 유향을 측정할 수 있다. 또한 선박에 부착하여 수평, 수직적 유동 분포를 관측할 수도 있고, 상층 계류에 의한 관측도 가능해서 여러 가지 형태의 해조류 특성 정보를 취득할 수 있다. 본 관측에서는 기기유실 위험을 최소화하기 위하여 TRBM(Trawl Resistant Bottom Mount)을 이용하여 ADCP를 저층에 설치하였다. ADCP는 기울기가 20° 이상일 경우 관측 자료의 질이 저하된다. 이를 방지하기 위하여 TRBM 투하 후 잠수부가 TRBM의 안착 상태를 확인하였으며, TRBM이 기울어진 경우 인양하여 재설

치하였다. 유동자료 분석하기 위해 ADCP를 회수한 후 기기내부에 자기 기록된 자료를 컴퓨터로 내려 받아(Download) 자료처리 모듈을 사용하여 유동자료를 분석하였다. 조화분석에는 해수유동 수치모델을 구축할 경우, 수치실험결과의 보정 및 검증자료로 쉽게 활용할 수 있도록 하기 위하여 유속을 동방성분과 북방성분으로 나누어 TASK Package(Proudman Oceanographic Laboratory, UK)[14]를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수심관측결과

수심관측은 조사선을 이용하여 약 5시간 동안 수행되었다. 관측점 및 관측데이터는 각각 표 2와 같다. 부근해역에서 설치 운영되고 있는 국립해양조사원의 완도 및 진도 관측서의 성과를 이용하여 수심관측 동안의 조위를 후처리 보정하였다. 한편 수심은 조류발전용 로터의 직경을 결정하기 위해 매우 중요한 요소이며, 특히 발전 단지를 계획할 경우 TECS 설치 위치 주변의 수심 변화를 명확히 파악하여야 한다[12].

Table 2: Sea depth information

항목	관측성과
관측영역	34° 15.0' N ~ 34° 16.49' N 126° 32.0' E ~ 126° 39.16' E
총 관측데이터	674 포인트
관측 평균 수심	32.2m
관측 최대 수심	61.8m
관측 최소 수심	22.2m
평균관측간격	198.8m(동서방향), 62.1m(남북방향)

3.2 연속조류관측결과

3.2.1 유동자료 분석결과

관측된 BIN별 유속벡터 시계열 관측자료 (raw data), 1시간 이동평균자료(60min averaged) 및 1시간 간격 추출자료 (sub-sampled), 조류 조화분석을 통한 1시간 간격 예보값(predicted) 및 관측 자료와 예보값의 편차(deviation)를 구하고,

유동의 분산성 파악, 유동의 시간변화, 잔차류 분석, 통계분석 등을 통하여 유동자료를 분석하였다.

그림 3에 제시한 유속·유향 시계열은 유속의 증감과 왕복성 조류특성을 뚜렷이 나타내고 있음을 알 수 있다. 유동분산도는 창조류가 낙조류에 비해서 유향의 분산이 다소 크게 나타나지만, 전체적으로 왕복성이 강하며, 조류발전에 매우 용이한 흐름 특성을 나타내었다. 창조시 및 낙조시 최강유속과 평균유속의 수직분포는 그림 4에 제시한 바와 같이

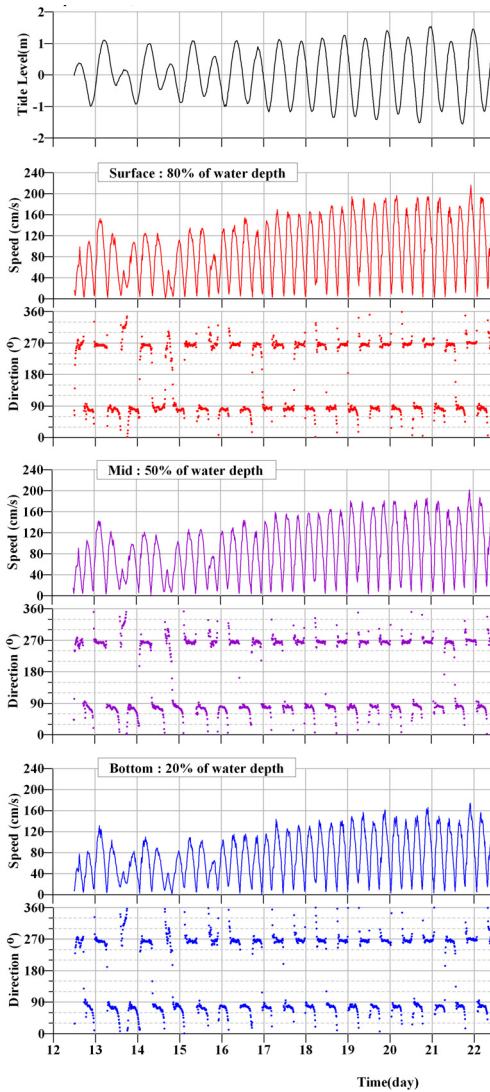


Figure 3: Time-series velocity and orientation at bottom, mid and surface layer.

표층에서 저층으로 갈수록 유속이 대수 함수적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, 최대유속 및 유향은 표 3에 나타낸 바와 같다.

Table 3: Peak tidal velocity and orientation.

구분	관측기간	조시	최강유속 (cm/s)	유향(°)
표층	월령15	창조	216.5	269.9
	월령14	낙조	197.1	82.3
중층	월령15	창조	201.9	269.1
	월령16	낙조	187.8	79.7
저층	월령15	창조	174.4	268.6
	월령17	낙조	157.8	80.7

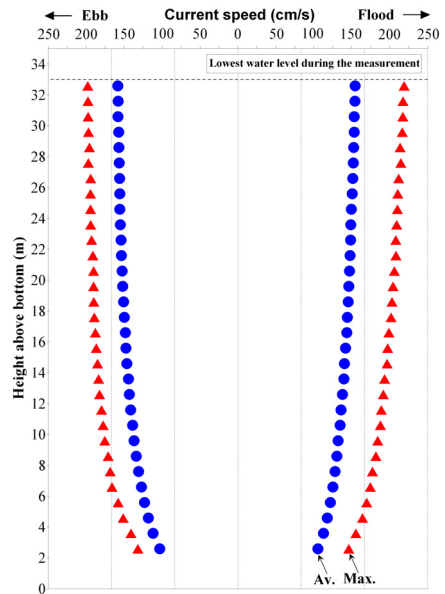


Figure 4: Tidal profiles at max. and average flood and ebb.

3.2.2 통계분석

유동자료를 통계분석하여, 창조류와 낙조류의 최강유속과 상위 5% 유속, 상위 10% 유속, 상위 50% 유속 그리고 평균유속을 표 4에 제시하고, 유향 유속 출현율을 분석하였다. 최강유속은 창조류 시에 표층에서 216.5 cm/s, 중층에서 201.9 cm/s, 저층에서 174.4 cm/s이고, 낙조류 시에 각각 197.1 cm/s와 187.8 cm/s, 157.8 cm/s로

Table 4: Tidal velocity statistical analysis.

구분	조시	유속 (cm/s)				
		최강 유속	상위 5% 평균 유속	상위 10% 평균 유속	상위 50% 평균 유속	평균 유속
표층	창조	216.5	177.7	162.9	90.5	91.8
	낙조	197.1	179.0	168.4	97.4	93.9
중층	창조	201.9	167.1	153.5	86.8	86.6
	낙조	187.8	167.9	159.5	92.5	89.2
저층	창조	174.4	145.3	132.8	73.2	74.7
	낙조	157.8	137.6	128.6	75.2	74.0

나타났다. 유향은 창조류 시에 W와 WSW, 낙조류 시에 E와 ENE 방향을 향하였다. 이러한 창·낙조 시 1m/s 이상의 평균 유속과 양방향성이 매우 강한 흐름은 완도 해역이 조류발전에 적지임을 나타낸다[12]. 잔차류는 장기적인 물질 분포를 결정하는 중요한 요인이며, 해류의 영향, 바람에 의한 풍성류의 영향, 급격한 지형변화 및 담수유입에 의한 경압력 등에 의하여 발생한다[15]. 정점별 잔차류의 유속 및 유향을 표 5에 제시하고, 해수유동의 진행벡터도를 분석하였다. 유향은 전체적으로 N~NE이고, 표층에서 41.2°, 중층에서 24.2°, 저층에서 357.3°로 나타났다. 표층의 유속은 5.2 cm/s로 중층유속 7.5 cm/s 및 저층유속 7.4 cm/s에 비해 다소 약하게 나타났다.

한편, 완도해역에서 조류에너지의 일반적인 현황을 파악하기 위해 원시자료의 특성 파악 및 이상자료 보완 과정을 거친 후 유동의 시간변화, 조류조화분석 등을 통하여 결과와 기존 문헌[10,16] 및 국립해양조사원의 자료[17]과 비교하였다.

Table 5: Velocity and orientation of tidal residual flow.

표층		중층		저층	
유속 (cm/s)	유향 (°)	유속 (cm/s)	유향 (°)	유속 (cm/s)	유향 (°)
5.2	41.2	7.5	24.2	7.4	357.3

3.3 조류에너지의 평가

3.3.1 조류에너지

조류의 힘, 동력(P)은 풍력 터빈과 유사하며, 다음 식으로 정의된다.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도, A는 터빈의 단면적, V는 조류속도이다. 그러나 손실 때문에 조류에너지 변환장치 또는 터빈은 이러한 힘의 일부만을 이용할 수 있으므로 다음의 식을 이용한다.

$$P = \frac{1}{2} C_P \rho A V^3 \quad (2)$$

C_P 는 동력계수이며, 유체 흐름으로부터 추출할 수 있지만, Betz의 법칙으로 인한 손실이나 변환장치 또는 터빈 내의 내부적 메커니즘에 부과된 손실 등이 고려되며, 통상 조류에너지 변환장치의 경우 0.35~0.5로 추정된다.

3.3.2 이용 가능한 조류에너지

에너지 생산량은 조류속도를 이용하는 특정 위치에서 생산되는 동력을 고려함으로써 일, 주, 년 단위로 평가된다. 터빈 단면적의 단위 면적당 조류에너지의 이용 가능한 에너지는 다음 식으로 평가될 수 있다.

$$\text{Available energy density} = 8760 \left[\frac{1}{2} \rho V^3 \right] \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (3)$$

여기서 $(1/2)\rho V^3$ 는 단위 면적당 동력밀도(kW/m^2), ρ 는 해수의 밀도(kg/m^3), V는 조류속도(m/s)이다.

3.2절에서 관측결과를 연간 자료를 추정하는데 이용되고, 식 (3)을 이용하여 에너지 밀도와 에너지 부존량을 산출하기 위해 변환된다. 완도 해역의 총 이용 가능한 연간 에너지 산출량은 위 식의 에너지 밀도, 동력계수, MECS 터빈의 단면적을 고려하여 결정될 수 있다. 에너지를 흡수하는 단면적은 사용될 터빈의 크기와 관련되고, 터빈의 크기는 해역의 규모와 관계된다. 완도 해역에서 에너지를 흡수할 수 있는 단면적은 세 매개 변수 즉, 해역의

수심, 폭, 길이에 의존한다. 먼저, 수심은 가장 큰 제한 조건이며, 해저면에서 가까운 낮은 속도의 흐름이 블레이드에 주기적 응력을 부가하지 않도록 피해야 한다. 두 번째 매개 변수는 폭이며, 조류발전 단지를 구성할 경우 MECS들 간 측면으로의 간격을 고려할 필요가 있다. 표 6의 두 번째 열은 인접한 로터 유닛 사이의 측면 간격을 나타낸다. 마지막 매개 변수는 해역이 길이 또는 세로방향으로는 MECS들 간의 간격이다. MECS들 간의 각 열의 간격은 10D로 가정한다[18].

표 6은 3장에서 관측한 자료를 기준으로 산정한 조류 발전용 로터 및 MECS의 설치 조건을 나타내며, 표 7은 완도 해역에 설치될 수 있는 MECS 단지를 설계하는 필요한 매개 변수를 나타낸다. 로터 크기는 해역 내에 MECS 단지 구성과 배치에 따라 결정되며, 로터의 직경은 해역의 수심에 맞게 선택되었다

Table 6: Estimated rotor dimensions and relative spacing of MECSs within the sea near Wando

Rotor diameter (m)	Lateral spacing between MECSs (m)	Downstream spacing between MECSs (m)
16	2.5D	10D

Table 7: Parameters used to design an MECS array that can be installed in the sea near Wando.

Rating of rotor (MW)	Number of arrays	Swept area (m ²)	Energy density (kWh/m ²)
0.5	5,000	1,004,800	8,751

3.3.3 TECS의 연간 에너지 생산량

완도 해역의 연간 에너지 생산량은 다음 식을 이용하여 결정된다.

$$Annual\ energy\ output\ (kW) = C_p \times Energy\ density\ (kWh/m^2) \times MECS\ swept\ area\ (m^2) \tag{4}$$

여기서 에너지 밀도는 식 (4)을 이용하여 결정되고, 단면적은 해역 내의 모든 MECS의 단면적의 합이며, C_p는 동력계수이다.

한편 조류에서 에너지를 추출하고, 이것을 전기로 변환하는 데는 몇 가지 손실이 존재한다[12]. 터빈의 전체 효율에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 변환될 수 있는 이용 가능한 운동에너지 최대치는 59%라고 하는 Betz 법칙이다. 또한 터빈 시스템에는 기계적, 전기적 손실이 더 있으며, 기어박스, 발전기 등에도 손실이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 C_p값을 0.3으로 모든 계산을 수행하였다. 관측 자료를 바탕으로 표 6 및 7의 값을 식(4)에 대입하여 계산하면 완도 해역에는 약 1.3TWh가 조류에너지가 부존하는 것으로 추산되며, 또한 이 값은 연평균 300MW에 해당하는 에너지이다. 그림 5는 완도 해역에서 MECS 단지의 레이아웃을 보인다.

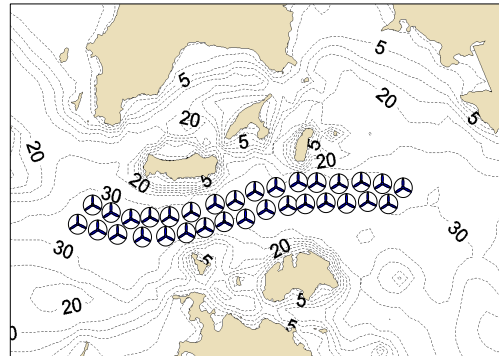


Figure 5: Layout of the Wando MECS array.

4. 결 론

해양에너지는 대규모로 개발이 가능한 무한한 재생에너지 자원으로써 오염문제가 없는 무공해 자원이며 미래의 유망에너지 자원이다. 본 연구에서는 완도군 해역의 주요 후보지에서 조류에너지 개발을 목표로 수심, 조석, 조류에너지 등의 조사를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 조류자원의 평가를 위해 완도군 해역에서 ADCP를 이용하여 관측한 결과 수심에 따른 유속 변화는 평균유속에 비해 상층과 하층의 유속차는 약 50cm/s이하로 비교적 일정한 유속특성을 보이는 것으로 나타났다.

2) 관측한 유속·유향의 시계열 데이터는 유속의

증감과 왕복성이 강한 조류특성을 뚜렷이 보이고 있으며, 표·중층에서 창·낙조 시 평균한 자료 중 1.5m/s이상의 유속 출현율이 약 15%를 차지하였다.

3) 완도 해역에 MECS 단지를 구성하면 관측 자료를 바탕으로 약 1.3TWh가 조류에너지가 부존하는 것으로 추산되며, 또한 이것은 연평균 300MW에 해당하는 에너지이다.

후 기

본 연구는 재단법인 전남테크노파크 과학기술진흥협력센터의 "전남 서남권 과학연구단지 기초·원천연구개발지원사업" 지원으로 이루어졌으며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] United Nation, Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, 1997.
- [2] IEA, World energy outlook, 2000.
- [3] BP Amoco, Statistical review of world energy, 2000.
- [4] 近藤俊郎, 上原春男, 木方靖二, 宮崎武晃, 谷野賢二, 海洋エネルギー利用技術, 森北出版, 1996.
- [5] 이창호, 전력산업 구조개편 후 대체에너지 발전전력 지원규모(안), 에너지절약시민연대 제3회 정책포럼, 2000.
- [6] 해양수산부, 해양에너지 실용화기술개발(I): 조력 조류 에너지, 2001.
- [7] 해양수산부, 해양에너지 실용화기술개발(II): 조력 조류 에너지, 2002.
- [8] J. Thake, Development, Installation and Testing of a Large-scale Tidal Current Turbine, Department of Trade and Industry, England, 2005.
- [9] 강석구, 염기대, 이광수, 박진순, "울돌목 조류 발전의 연안 물리적 관점에서의 고찰", 신재생학회지, 제1권, 제2호, pp. 77-78, 2005.
- [10] 장경일, 박경, 석문식, "한국 남해의 해수순환", 한국해양학회지, 제5권, 제4호, pp. 257-266, 2000.
- [11] 이문옥, 박일흠, "육수의 영향을 받는 완도 및 고금도 북부 해역의 해황 특성", 한국환경과학회지, 제15권, 제1호, pp. 45-58, 2006.
- [12] A. S. Bahaj and L. Myers, "Analytical estimates of the energy yield potential from the Alderney Race (Channel Islands) using marine current energy converters", Renewable Energy 29, 1931-1945, 2004.
- [13] EU Commission, The exploitation of tidal marine currents. Report EUR16683EN, 1996.
- [14] TASK Package, <http://www.psmsl.org>
- [15] T. Yanagi, "Fundamental study on the tidal residual circulation I", Journal of Oceanography Society, Vol. 32, pp. 199-208, 1976.
- [16] 조류도, 국립해양조사원, 2001.
- [17] [Http://info.khoa.go.kr](http://info.khoa.go.kr)
- [18] I. G. Bryden and S. J. Couch, "ME1 - marine energy extraction: tidal resource analysis", Renewable Energy, Vol. 31, Issue 2, pp. 133-139, 2006.

저 자 소 개



양창조(梁昌照)

1993년 2월 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1999년 2월 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 2004년 3월 규슈공업대학 대학원 졸업(공학박사), 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 조교수. 관심분야: 해양에너지, 유체기계, 유동가시화.