

조류자원의 평가에 관한 이론적 연구

양창조*

* 목포해양대학교 기관시스템공학부

Theoretical Study on Assessment of Tidal Stream Resources

Chang-Jo Yang*

* Division of Marine Engineering Systems, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 조류자원을 평가하기 위해 양쪽이 무한한 바다에 연결되어 있고, 수평한 바닥을 갖고 있는 수로를 가정하고, 수위의 시간변화에 따른 동적효과를 무시한 개수로 유동에서 양 끝단의 수두 차에 의해 구동되는 단순 수로에 대해 에너지 추출 모델을 제안하였다. 조류에너지는 그 단면을 지나는 유속의 3승에 비례하며, 수로 내에서의 에너지 추출은 반드시 유속의 감소를 초래하였다. 교란되지 않는 흐름의 수로에서 10%의 에너지 추출은 약 5.7%의 유속 감소를 초래하며, 20%가 추출되면 유속은 약 11.3%로 감소되었다. 또한, 수로 내에서 더 유속 감소가 가능하면 이용 가능한 에너지의 추출은 보다 높을 수 있음을 보였다.

핵심용어 : 조류, 에너지 추출, 조류에너지, 수력반경, 전단응력, 조류속 기법

Abstract : This paper outlines extraction potential of tidal stream resources from the simplified channel in which flow is driven by a head difference between inlet and outlet. Energy extraction alters the flow within a simple channel, and extraction of 10% energy flux in a natural channel would give rise to a flow speed reduction of about 5.7%. If 20% of the undisturbed energy flux is extracted, the flow speed is reduced by 11.3%. The simple channel also suggests that extractable energy might be higher if flow speed reductions are considered acceptable.

Key Words : Tidal stream, Energy extraction, Tidal kinetic energy flux, Hydraulic radius, Shear stress, Tidal flux method

1. 서 론

최근 CO₂ 가스 등과 같은 지구 온난화를 유발하는 온실가스 배출을 규제하는 유엔 기후변화협약의 발효로 온실가스의 발생을 최소화할 수 있는 청정에너지의 개발이 요구되고 있으며, 화석에너지의 고갈에 따른 대체에너지 개발이 강조되고 있다. 이와 같이 화석에너지 공급의 한계와 화석연료 사용에 따른 심각한 환경문제 유발로 전 세계는 대체에너지 개발에 총력을 기울이고 있으며, 특히 한국은 유가 상승에 따른 국제수지 악화 및 환경오염 등의 문제로 대체에너지 개발이 더욱 시급한 실정이다(IEA, 2000).

한편, 조석, 조류(Tidal stream), 파랑에너지 등과 같은 해양에너지는 청정한 대체 에너지이며, 그 가용량도 인류가 쓰기에 부족함이 없기 때문에 최근 주목을 받기 시작하고 있다. 이러한 해양에너지는 열이나 광에너지 등에 비하여 에너지 효율이 높고, 자연에너지 중에서 비교적 에너지 밀도가 높아 개발 시 저가로 에너지 취득이 가능하여 경제성 확보가 용이하다. 특히 우

리나라 연안은 풍부한 해양에너지 자원이 부존하고 있으며, 서남해안에는 조류발전의 최적지로 평가되고 있다(해양수산부, 2001).

조류발전이란 조류의 자연적인 흐름으로 수차를 가동시켜 발전하는 방식을 말하며, 원리상 풍력발전과 같이 유체의 운동에너지로 수차를 회전시켜 발전하나 해수의 밀도가 공기의 밀도보다 약 840 배 크기 때문에 같은 시설용량인 경우 조류수차의 크기가 훨씬 작게 된다. Fig. 1은 조류발전과 풍력발전에서 1MW의 전기를 생산하는데 필요한 터빈의 로터 크기를 비교하였다. 이와 같이 수중에서는 대기 중보다 밀도가 높아 발전에 유리하며, 조력발전과는 달리 조류발전은 댐을 필요로 하지 않으며 직접 조수의 흐름 속에서 지속적인 발전이 가능하므로 풍력발전에 비하여 효율이 좋고 경관에 영향을 주지 않는다는 장점이 있다. 전남 진도군에 소재하는 울돌목은 대조기의 최대유속이 약 7 m/s에 달하며, 이것은 약 175 kW/m²의 에너지(Kinetic energy flux)에 해당한다. 그러나 건설비용이 고가이므로 계통연계의 용이성과 함께 일정 규모이상의 발전단지를 운영해야하는 단점이 있다(Thake, 2005). 따라서 조류 발전의 경제성을 확보하고, 실제 발전소의 설치 및 운영을 위해서는 반드시

* 종신회원, cjiang@mmu.ac.kr, 061-240-7228

시 후보지의 조류자원에 대한 면밀한 평가가 수반되어야 한다.

조류자원의 평가에 대한 지금까지의 연구는 조류단지 기법(Tidal farm method)과 조류속 기법(Tidal flux method)으로 대별할 수 있다. 전자의 경우 후보지에 격자모양으로 설치 가능한 용량의 조류발전기를 배치하여 자원을 산정하는 방법으로 추출 가능한 에너지는 설치될 장치의 수에 의존하며, 장치의 크기, 효율, 설치 밀도 등의 함수로 정해진다(DTI, 1993). Bahaj and Myers(2004)는 이 기법으로 조류자원의 부존량을 산정하였다. 또 후자의 경우는 장치 수, 크기, 효율 그리고 설치 밀도 등에 관계없이 상류에서 흘러들어 오는 유속의 변화를 고려하여 사이트 내의 에너지를 산정하는 방법이다. 조류단지 기법은 상류의 운동 에너지의 변화를 고려하지 않고 발전단지에 배치 가능한 장치 수에 의해 산정하므로 실제 사이트 내에서 추출할 수 있는 에너지보다 과대평가될 우려가 있다. 따라서 추출 가능한 자원에 대해 최근 Black & Veatch(2005)와 Bryden and Couch(2006)와 같은 환경적 영향을 고려한 조류속 기법이 주목을 받고 있으며, 이에 대한 추가적인 연구가 매우 필요하다.

또한 실제 조류발전의 발전 능력을 검토하기 위해서는 수차의 로터 블레이드에 작용하는 양력과 항력의 효율성이나, 기타 기술적인 이용 가능성을 우선적으로 판단하는 것이 중요하지만, 본 연구에서는 조류자원 개발의 적합성을 평가하기 위해 수리학에 바탕을 두고 단순 수로에 대하여 조류속 기법을 적용하여 에너지 추출에 관해 조사하고, 에너지 추출의 영향과 추출 가능한 최대 동력에 대해 고찰하였다.



Fig. 1. Size comparison of 1MW turbines (MCT Ltd.).

2. 조류에너지 추출 모델링

2.1 조류에너지

조류에너지(Tidal kinetic energy) 추출을 위해 제안된 많은

기술은 풍력발전에 적용된 예와 매우 유사하며, 주로 수평축 터빈에 기반을 두고 있다. 또한 최근 수직축 터빈, 진동하는 베인, 벤츄리 관 등과 같은 색다른 개념을 이용한 조류발전 기술들(www.emec.org.uk)이 제안되고 있으며, 향후에도 조류에너지 이용기술에 대해 다각적으로 연구와 다양한 에너지 변환 시스템의 개발이 필요하다. 이러한 조류에너지(동력)는 그 수로의 단면을 지나는 유체의 속도와 관계가 있으며, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 [W] \quad (1)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도(kg/m^3), A 는 단면적(m^2), U 는 수로의 단면에 수직인 흐름의 속도(m/s)이다. Fig. 2는 유속 변화에 따른 조류에너지속(Kinetic energy flux)의 변화를 보인다. 3 m/s 에서 13.8 kW/m^2 의 값을 나타내며, 이것은 폭 1 km, 수심 40m의 수로의 경우 약 550 MW에 해당하는 에너지이다.

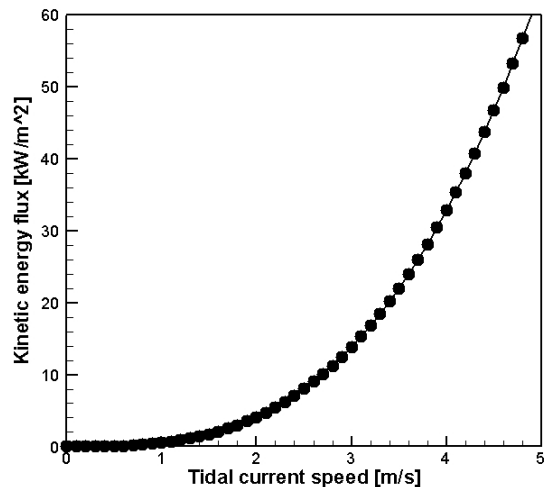


Fig. 2. Kinetic energy flux as a function of tidal velocity.

풍력터빈의 후류 발달에 관한 연구는 조류터빈의 경우 후류의 거동에도 적용될 수 있을 것으로 기대된다(MacLeod et al., 2002). 이러한 모델은 수로 내에서 간섭에 따른 성능의 저하를 막고 터빈의 최적 설치 장소를 결정하는 데 사용될 수 있다. 그러나 조류의 경우 에너지 추출의 영향을 풍력과 같은 방법으로 평가할 수는 없다. 왜냐하면 대기 유동과 다르게 조류는 해저와 해수면 사이로 제한되며, 수로의 형태에 따라 달라질 수 있기 때문이다. 이러한 유동은 수위의 동적효과를 무시할 수 있다면 개수로의 유동 모델로부터 에너지 추출에 따른 영향을 고찰할 수 있다.

2.2 단순 수로에서의 에너지 추출 모델링

조류에너지의 변화는 Fig. 3과 같이 유한한 길이와 폭을 갖는 수로가 양쪽의 무한한 바다를 연결하는 수로를 통하여 고려

될 수 있다. 만약 조위의 시간 변동으로부터의 동적효과를 무시한다면, 단순한 개수로 유동 모델이 에너지 추출의 영향을 조사하는데 이용될 수 있다(Bryden and Couch, 2006). 이 흐름은 수로 양 끝단의 수두 차이, dh 에 의해 구동되며, 이러한 수로에서 흐름의 거동은 질량보존법칙을 만족시키며 수로 내를 흘러가는 조류의 운동량 변화를 고려함으로써 평가될 수 있다.

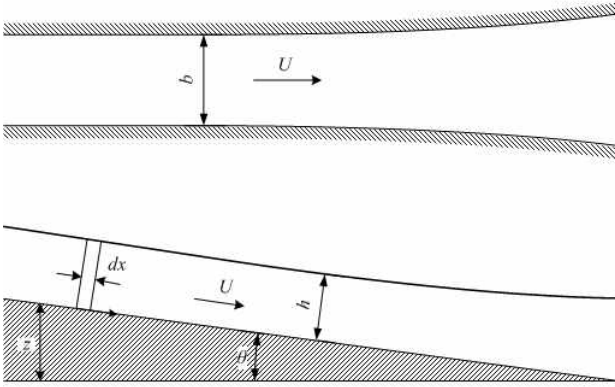


Fig. 3. Schematic of a channel with different tidal elevations.

일반적으로 미소한 경사 θ 를 갖는 사각단면에서 폭 b 와 깊이 y 가 점진적으로 변하는 정상유동에 대하여 수심을 h 로 표시하면, $A=bh$, $Q=bhU$ 이므로 연속방정식은 식(2)와 같이 주어진다.

$$\frac{dh}{h} + \frac{db}{b} + \frac{dU}{U} = 0 \quad (2)$$

또, 미소영역에 작용하는 힘의 평형관계로부터 운동량 보존법칙을 적용하면 식(3)과 같다.

$$-g \frac{dh}{dx} + g \sin \theta - \frac{gn^2}{R_h^{4/3}} U^2 = U \frac{dU}{dx} \quad (3)$$

단, n 은 매닝의 조도계수(Manning roughness factor)이고, 접수 길이(Wetted perimeter)에 대한 유동의 단면적의 비를 나타내는 수력반경(Hydraulic radius) R_h 는 식(4)이다.

$$R_h = \frac{bh}{b+2h} \quad (4)$$

식(2)과 식(3)을 연립시켜 dU 를 소거하면 다음과 같다.

$$\left(1 - \frac{U^2}{gh}\right) dy - \frac{U^2}{gb} = \left(\sin \theta - \frac{gn^2}{gR_h^{4/3}} U^2\right) dx \quad (5)$$

또, z 를 연직방향의 좌표라고 하면 정상유동에서 바닥면 경사 $\sin \theta = -dz/dx$ 이므로 식(6)을 얻는다.

$$\left(1 - \frac{Q^2}{gb^2h^3}\right) dh - \frac{U^2}{gb} db = -\left(\frac{dz}{dx} + \frac{n^2}{R_h^{4/3}} U^2\right) dx \quad (6)$$

이 식은 미소한 경사를 갖는 사각단면 유동에 대한 운동량 방정식이다.

한편, 경사가 없고, 폭이 b 인 정상유동의 사각수로의 단위 폭당 유량을 q , 수로바닥으로부터 자유표면까지의 높이를 h 라 할 때 x 와 h 사이의 관계를 유도하면(단, $x=x_0$ 일 때 $h=h_0$) 폭 b 가 일정하므로 식(7)과 식(8)은 다음과 같다.

$$\frac{dh}{h} + \frac{dU}{U} = 0 \quad (7)$$

$$\left(1 - \frac{Q^2}{gb^2h^3}\right) dh = -\frac{n^2}{R_h^{4/3}} U^2 dx \quad (8)$$

$q=Q/h$, $U=qh$ 을 식(8)에 적용하면 식(9)와 같다.

$$dx = \frac{1 - \frac{q^2}{gh^3}}{-\frac{n^2 q^2}{R_h^{4/3}} h^2} dh \quad (9)$$

수로에 작용하는 벽 전단응력(Wall shear stress) τ_w 는 식(10)과 같이 매닝의 조도계수(Manning roughness factor) n 과 체시의 마찰계수(Chezy friction coefficient) C 를 이용하여 구할 수 있다(Chin, 2000).

$$\tau_w = \rho \frac{g}{C^2} U^2 \quad \text{where, } C = R_h^{1/6}/n \quad (10)$$

조류터빈 등을 이용하여 수로 내에서 에너지를 추출하면 유동에 영향을 주어 흐름을 교란시키고, 이것은 추가적인 전단응력을 발생시킨다(Chanson, 2004). 만약 수로 내의 어떤 지점에서 길이 dx 에 P_{dx} 의 에너지가 추출되면, 그 단면을 통해 지나가는 유동에는 식(11)과 같은 전단응력 τ_t 가 작용한다.

$$\tau_t = \frac{P_{dx}}{U dx (b+2h)} \quad (11)$$

여기서, dx 는 에너지가 추출되는 거리, P_{dx} 는 dx 에서 추출된 동력[W]를 나타낸다. 따라서 식(10)과 식(11)을 식(9)에 대입하고 정리하면 식(12)와 같다.

$$dx = \frac{1 - q^2/gh^3}{-\tau/\rho g} dh \quad \text{where, } \tau = \tau_w + \tau_t \quad (12)$$

식(12)를 $x=x_0$ 에서 $x=x$ 까지 적분하면 식(13)이다.

$$x - x_0 = \int_{h_0}^h \frac{1 - q^2/gh^3}{-\tau/\rho g} dh \quad (13)$$

그러므로 q , b , τ 의 값을 알면 식(13)의 계산이 가능하므로 x 방향의 각 위치에서 수심과 유속을 차례로 계산할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

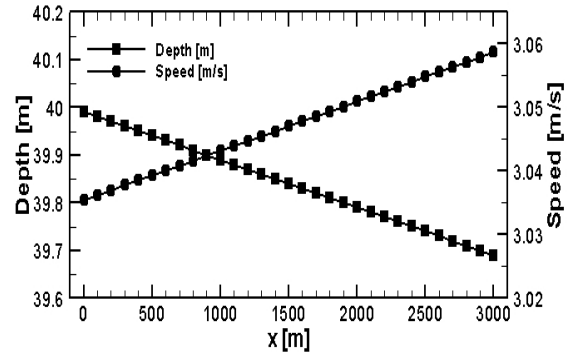
3.1 조류 에너지의 추출

수로 상류에서 유동의 가속으로 인한 수위의 초기 강하를 고려함으로써 개방 조건의 외해에서 수로 내로의 유동변화를 모델링할 수 있다. 이 수위의 강하는 주로 수로 입구 부근의 유속과 관계되며, 외해에서 수로 내로의 유동은 복잡한 거동을 보이며, 점차 상류에서 하류로 전달될 것이다. 또 하류에서는 수로로부터 다른 외해로 흐름이 배출되고 상류와는 다른 거동을 보이며, 여기서는 수로로부터의 흐름이 주위의 흐름과 급격히 혼합되지 않는다고 가정하기로 한다.

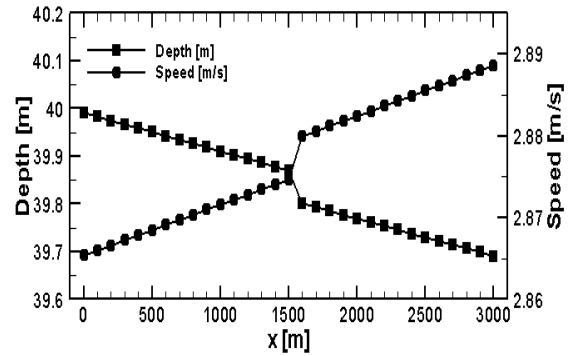
하류 수심 h_{out} 을 알면, 식(13)을 적분하여 상류 수심 h_{in} 을 구할 수 있다. 일단 h_{in} 이 구해지면, 유량 Q 를 반복법으로 계산할 수 있다. 또 유량 Q 가 결정되면 수로의 각 위치에서 수심과 유속을 계산할 수 있다. h_{in} 과 h_{out} 사이의 국부위치에서 수심을 구하기 위해 간단한 프로그램을 작성하였으며, 에너지 추출할 경우 수로 내의 유동 특성을 조사하는데 사용되었다.

Fig. 4(a)는 에너지 추출이 없는 경우 폭이 1,000 m로 일정하고, 길이 3,000 m, 입구 수심 40 m, 출구 수심 39.7 m의 수로에서 앞 장의 방법으로 구한 단면 평균 유속과 수심의 변동을 보인다. 식(9)에서 매닝의 조도계수(Manning roughness factor) n 은 해저면의 일반적인 값인 0.035이다. Fig. 4(a)와 같이 수로를 따라 수심은 일정하게 감소한 반면 유속은 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이것은 에너지 추출장치가 있는 경우 현저하게 달라진다. Fig. 4(b)는 수로 입구 1,500 m 지점에서 수로 단면의 10% 운동 에너지 속을 추출했을 경우 변화를 나타내며, 이 해석에서 에너지 추출은 수로의 100 m에 걸쳐 일어난다. 본 논문에서 10%의 동력은 약 57 MW의 에너지 추출에 해당한다. 이 경우 큰 수두의 강하가 에너지 추출 구역에서 나타나며, 이것은 국부적인 유속의 증가로 이어진다. 에너지를 추출하지 않은 경우와 비교하여 수로 내의 전반적인 유속은 감소하였으며, 에너지 추출 영역에서 유속은 약 5.6%까지 감소하였다. 이는 Brydon and Couch(2006)의 유동 모델과 매우 유사한 분포를 나타내었다.

또 Fig. 4와 같이 에너지 추출에 따른 평균 유속의 변화를 알아보기 위해 교란되지 않는 흐름에서 30%까지 에너지를 추출하였으며, Fig. 5는 이러한 에너지 추출에 따른 수로 내의 평균 유속의 변화를 보인다. 에너지를 추출할수록 수로 내의 유속이 점점 감소하는 것을 알 수 있으며, 이것은 에너지를 추출하는 과정이 실제로 이용 가능한 에너지를 감소시키기 때문이다.



(a) Natural channel



(b) Channel with 10% extraction

Fig. 4. Influence of energy extraction on flow in tidal channel.

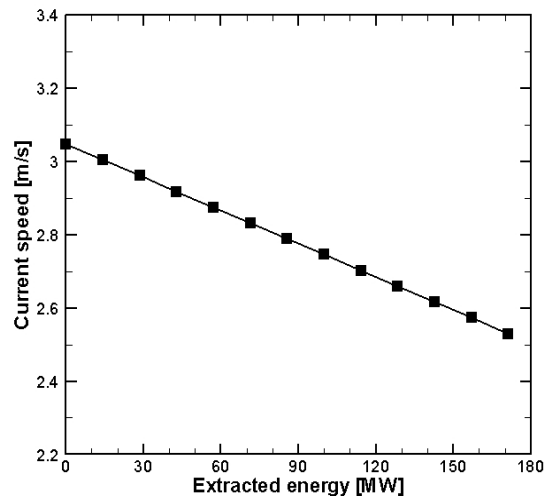


Fig. 5. Influence of energy extraction.

Fig. 6은 에너지가 추출되지 않은 경우와 비교하여 추출된 에너지 비율에 대한 유속의 감소비를 나타낸다. 앞서 기술한 바와 같이 에너지를 추출함에 따라 유속은 점점 느려지며, 본 연구에서는 교란되지 않는 흐름에서 30%의 에너지를 추출할 경우 약 17%의 유속의 감소를 가져왔다.

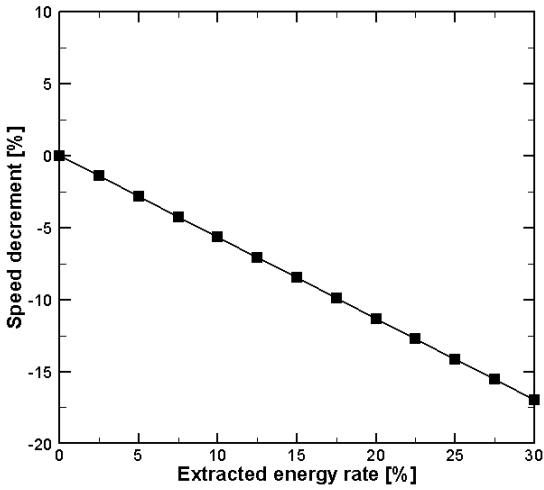


Fig. 6. Influence of proportional extraction on tidal speed.

3.2 이용 가능한 최대동력

영국에는 약 18 TWh/year의 조류자원이 부존하는 것으로 추정하고 있다(Black & Veatch, 2005). 이는 전 유럽 조류자원의 반 그리고 세계 조류자원의 10~15%에 해당하는 에너지이다. 그러나 이것은 주 흐름에 큰 영향을 주지 않고 추출할 수 있는 계수, 즉 유효지수(SIF)를 20%로 가정하고 계산한 것으로 경제 및 환경적 중요성을 함께 고려한다면 더 많은 에너지를 추출할 수도 있을 것이다. 본 절에서는 이와 같이 추출 가능한 최대동력에 대해 고찰한다.

먼저, 수로 내에서 수력반경과 유속이 크게 변하지 않는다면 2장에서 기술한 바와 같이 수로에 작용하는 평균전단응력 $\bar{\tau}$ 는 식(14)와 같다.

$$\bar{\tau} = \rho \frac{g}{C^2} \bar{U}^2 + \frac{P_{turbine}}{UX(b+2h)} \quad (14)$$

여기서, \bar{U} 는 수로 내의 대표속도, X는 수로의 길이, $P_{turbine}$ 는 수로 내에서 추출된 동력[W]를 나타낸다. 또 입구와 출구의 수두차는 식(14)을 이용하여 식(15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta h = \frac{\bar{\tau}X}{\rho g R_h} = \frac{\bar{U}^2 X}{C^2 R_h} + \frac{P_{turbine}}{\rho g A \bar{U}} \quad (15)$$

한편 에너지 추출이 없는 경우 식(15)으로부터 $U_0^2 = \Delta h C^2 / X R_h$ 이므로, 수로 내에서 추출되는 에너지는 식(16)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{turbine} = \rho A \bar{U} (U_0^2 - \bar{U}^2) \frac{g}{C^2 R_h} \quad (16)$$

식(16)은 수로 내에서 최대동력을 추출할 수 있는 유속이 존

재하는 것을 의미하며, 그 조건은 다음과 같다.

$$(\partial P_{turbine} / \partial \bar{U}) = 0 \quad (17)$$

위 조건이 만족하도록 식(16)을 계산하면 입구 유속의 58%에서 최대동력을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또 Fig. 7은 식(16)을 이용하여 3.1절에서 기술한 수로에 대해 계산한 유속 변화에 따른 동력의 변화를 나타낸다. 이것은 교란되지 않은 흐름에서 58%까지 유속의 감소가 가능하다면 추출 가능한 동력은 Black & Veatch(2005)가 제안한 값보다 높을 수 있음을 나타낸다. 그러나 일정 규모 이상의 에너지 추출이 구동류 자체의 특성을 바꾸므로 환경적 관점에서 에너지 추출의 한계에 대해 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

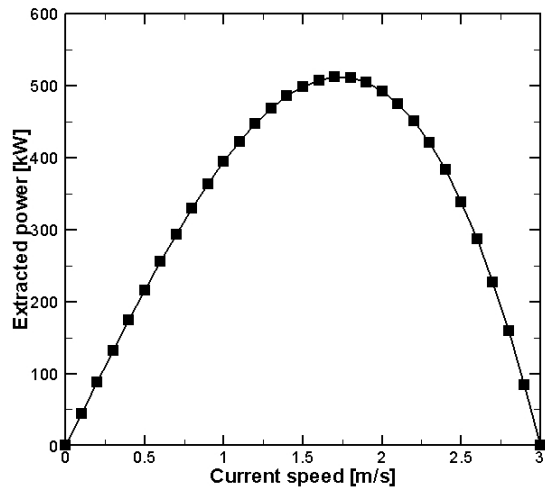


Fig. 7. Maximum power extraction from tidal speed.

4. 결론

본 연구에서는 조류자원의 평가하기 위해 수리학에 바탕을 둔 단순한 형태의 수로에 대하여 조류속 기법을 적용하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 양쪽이 무한한 바다에 연결되어 있고, 수평한 바닥을 갖는 단순 수로를 가정하고, 수위의 시간변화에 따른 동적효과를 무시한 개수로 유동에서 에너지 추출 모델을 제안하였다.
2. 에너지 추출은 반드시 유속의 감소를 초래하므로 순수하게 자연적인 흐름의 특성만으로 에너지 예측 및 산정하는 것은 적절하지 않다. 수로에서 에너지를 추출할 때 교란되지 않은 흐름에서 10% 에너지 추출은 약 5.7% 이하의 유속 감소를 초래하였다.
3. 이용 가능한 최대동력의 분석을 통하여 교란되지 않은 흐름에서 58%까지 유속 감소가 가능하다면 추출 가능한 에너지는 더 높일 수 있음을 보였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업의 일환(20093021070010)으로 수행되었습니다.

본 연구는 지식경제부 지역연고산업 육성사업 “신 성장을 위한 녹색해양기자재 산업 기반 활성화”(과제번호 B0012286)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 해양수산부(2001), 해양에너지 실용화기술개발(I) : 조력 조류 에너지, pp. 33-46.
- [2] Bahaj, A. S. and L. Myers(2004), Analytical estimates of the energy yield potential from the Alderney Race (Channel Islands) using marine current energy converters, *Renewable Energy* 29, pp. 1931-1945.
- [3] Black & Veatch(2005), UK tidal stream energy resource assessment, Carbon Trust, pp. 1-31.
- [4] Bryden, I. G. and S. J. Couch(2006), ME1-marine energy extraction : Tidal resource analysis, *Renewable energy*, Vol. 31, pp. 1333-1339.
- [5] Chanson, H.(2004), *Hydraulics of open channel flow*, Elsevier, pp. 94-96.
- [6] Chin, D. A.(2000), *Water resource engineering*, Prentice Hall, pp. 145-146.
- [7] DTI(1993), Tidal stream energy review, Technical report ETSU-T-05/00155/REP, pp. 36-45.
- [8] [Http://www.carbontrust.co.uk](http://www.carbontrust.co.uk)
- [9] [Http://www.emec.org.uk](http://www.emec.org.uk)
- [10] [Http://www.marineturbines.com](http://www.marineturbines.com)
- [11] IEA(2000), *World energy outlook*, pp. 1-125.
- [12] MacLeod, A. J., S. Barnes, K. G. Rados, I. G. Bryden (2002), Wake effects in tidal current turbine farms, *Marine renewable resources conference*, Newcastle, pp. 101-102.
- [13] Thake, J.(2005), Development, installation and testing of a large-scale tidal current turbine, DTI, England, pp. 1-35.

원고접수일 : 2011년 01월 20일

원고수정일 : 2011년 02월 17일 (1차)

: 2011년 03월 21일 (2차)

게재확정일 : 2011년 03월 24일