

수조를 이용한 조력발전량산정에 관한 실험적 연구 The Experimental Study on the Evaluation of Tidal Power Generation Output Using Water Tank

정신탉* · 김정대* · 고동휘* · 최우정* · 오남선**

Shin Taek Jeong*, Jeong Dae Kim*, Dong Hui Ko*, Woo Jung Choi* and Nam Sun Oh**

요 지 : 소규모 수조를 이용한 조력발전시스템에 대하여 검토하였다. 이를 위하여 소규모 수조를 제작하고 시간에 따른 수위의 변화를 관측한 후 이를 이론적인 계산값과 비교하였다. 수조는 내부수조와 외부수조로 제작하여 창조발전과 낙조발전의 개념을 재현할 수 있도록 하였다. 또한 내부수조와 외부수조의 연결관을 두 곳에 설치하여 유량을 변화시키며 실험을 하였다. 관측된 수위의 변화를 계산값과 비교하여 유량계수를 산출하였다. 수위의 관측치와 이론적인 계산치는 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타나 이론식이 실제의 수위를 잘 모의하는 것으로 나타났다. 프로펠러의 유무, 밸브의 유무, 창조 발전, 낙조 발전 등에 따라 유량계수가 큰 변화를 보이는 것으로 나타나 실제 발전시스템을 제작할 때 실험을 통한 유량계수 등의 산정이 반드시 필요한 것으로 나타났다. 또한 이론적인 식에 의한 총에너지와 실험유량으로부터 계산된 총에너지를 비교한 결과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 본 수조에 대하여 계산된 발전량은 크지 않으나 충분한 조차가 있는 곳에 적정 규모의 수조를 설치할 경우 소규모의 조력발전이 가능하여 신재생에너지 생산에 기여할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수조, 창조발전, 낙조발전, 유량계수, 신재생에너지

Abstract : A method to generate electric power from small scale water tank. For this purpose, manufacturing tank is investigated, measuring water level change at any time, and finally comparing experimental and theoretical value, are performed. Inner and outer tank are made to simulate flood and ebb generation. Two sets of pipe are connected between tanks, and experiments are performed under varying flowrate. Coefficients of flowrate are calculated comparing water level change data and theoretical value. Measured and theoretical water levels are highly correlated, and this ascertains that analytical equation simulates real water level changes well. Flowrate change depending on the existence of propeller and valve, on flood and ebb generation, shows the necessity of experiments in the process of manufacturing electric power system. Moreover, total energy calculated from experimental data agrees well with that of theoretical equation. In spite of small tidal power output, this generating system with optimum water tank can be applied to any place where high water level change occurs, and can make a contribution to producing new and renewable energy consequently.

Keywords : water tank, flood generation, ebb generation, coefficient of flowrate, new and renewable energy

1. 서 론

Hubbert peak 이론에 의하면 화석연료의 생산은 21세기부터 줄어들 것으로 예측되고 있다. 조력발전은 인류의

에너지 수요를 만족시킬 수 있는 화석연료에 대한 대안 중의 하나이다. 조력에너지는 지구상의 모든 에너지원 가운데 일정하고 지속적으로 에너지를 공급받을 수 있는 에너지원으로(McVeigh, 1984), 지구 전체적으로 3×10^{12} W

*원광대학교 토목환경공학과(School of Civil, Environment and Urban Engineering, Wonkwang University, 344-2, Shinyong-dong, Iksan, 570-749, Korea. stjeong@wonkwang.ac.kr)

**목포해양대학교 해양토목공학과(Corresponding author: Nam Sun Oh, Div. of Ocean Civil Eng, Mokpo National Maritime University, 571, Jukko-dong, Mokpo, 530-729, Korea. sun@mmu.ac.kr)

의 부존량을 가지고 있는 것으로 추정된다(Hubbert, 1971).

그러나 조력댐을 이용한 발전방식은 많은 공사비를 필요로 하나 운영비용은 저렴한 방식이다. 이러한 이유로 건설비에 대한 보상을 받는데 오랜 시간이 필요하기 때문에 조력발전은 민간자본의 유치가 힘들고 정부의 적극적인 투자를 필요로 한다. 따라서 세계 각국은 화석연료의 사용을 줄이기 위한 교토 의정서에 부합하기 위하여 조력발전과 같은 신재생에너지의 사용을 적극 지원하고 있다. 최근에는 화석연료가 거의 없는 우리나라의 경우에도 화석연료를 대체하고 온실가스의 배출을 줄일 수 있는 신재생에너지에 대한 연구 및 건설을 적극 지원하고 있다.

조력발전은 처음으로 프랑스 Rance 지역에 1960년부터 1966년에 걸쳐 건설되었으며 240 MW의 시설 용량을 가지고 있다. 북미지역 최초의 조력발전은 1984년 캐나다 Fundy만 입구에 건설된 Annapolis Royal 발전소로 18 MW의 시설용량을 가지고 있다. 러시아는 Barents해의 Kislaya Guba 지역에 소규모의 조력발전소를 건설하였으며 0.5 MW의 시설용량을 가지고 있다. 또한 중국에서도 몇 개의 소규모 조력발전소를 계획 중이다.

우리나라의 서해안 중부, 경기만 일대는 조력에너지 개발 적지로 경제성 확보가 가능한 조력에너지가 약 2,400 MW 정도로 추정된다(이광수, 2005; 오명학 등, 2007). 본격적인 조력에너지 개발을 위한 타당성조사는 1970년대 후반부터 가로림만을 중심으로 여러 차례 수행되었으며(한국해양연구소, 1993; 한국수자원공사, 2002), 현재 경기도 시화호에 2009년 완공을 목표로 시설용량 254 MW 급의 조력발전소가 건설되고 있어서 가까운 장래에 조력 발전을 통한 전력 생산이 현실화될 전망이다이며 이외에 우수영에 조류발전시스템을 건설중이다.

조력발전 방식에는 일정중량의 부체가 받는 부력을 이용하는 부체식, 수위의 상승 하강에 따라 밀실에 공기를 압축시키는 압축공기식, 방조제를 축조하여 조지를 형성하여 발전하는 조지식이 있다(해양수산부, 2001). 조지식은 조차가 큰 하구나 만에 방조제를 설치하여 조지를 형성하고 외해와 조지 간의 수위차를 이용하여 발전을 하게 된다. 지금까지 계획되고 건설된 조력발전시스템은 조력댐을 이용한 조지식으로 막대한 건설비용 이외에도 생태계를 대규모로 변화시켜 댐이 건설되는 지역에 환경문제를 유발하게 된다. 이러한 환경문제는 세계 각국으로 하여금 조력발전의 건설을 꺼리게 하는 큰 요인의 하나이다. 그러나 Rance 발전소의 경우 건설이후 대부분의 생태계가 유지되는 것으로 나타났으며, 건설이전보다 더 많

은 조류와 어류가 출현하게 되었고 해양 레저 활동이 증가한 것으로 나타났다(Boyle, 1996). 또한 조력발전은 그 자체로 산성비나 방사능 오염물질 등을 감소시킬 수 있는 환경친화적인 에너지이며, Rance 발전소의 경우 740 m 길이의 방조제만의 건설로 약 1,000 km²에 건설된 풍력발전과 같은 양의 에너지를 얻을 수 있는 것으로 나타났다(Baker, 1991).

Rance 발전소의 건설에 의한 부작용이 거의 없음에도 불구하고 조력댐의 건설에 서식지의 변화로 인한 생태계의 파괴, 갯벌의 손실 등과 같은 우려가 많은 것이 현실이다. 따라서 Robert Russell은 조력댐의 건설에 의한 부작용이 없도록 제방을 따라 울타리 또는 라군을 형성하는 방법에 의한 발전을 제안하였다. 또한 Tidal Electric of Connecticut 회사에서는 North Wales 근처의 바다에 400 MW의 발전용량을 가진 라군 형태의 구조물을 건설하려는 계획을 세우기도 하였다(Ross, 2001).

이광수 등(1994)은 조력발전 적정개발규모 결정을 위한 단순한 해석적 모형을 개발하여 초기단계에 조력발전건설의 타당성을 검토하기 위한 기초자료를 제공하였다. 한편, Yi(1998)은 낙조시 부력과 탱크의 무게를 이용한 발전방식을 제안하였다.

본 연구에서는 바다에 구조물 또는 인공적인 라군을 건설하는 것과 유사한 개념으로 수조를 이용한 발전시스템에 대하여 검토하고자 한다. 수조에 의한 소규모 발전 시스템은 대규모 조력댐의 건설에서 나타나는 생태계의 변화가 크지 않으며 건설형태에 따라 전력이 필요한 곳으로 이동할 수 있는 시스템이다. 따라서 본 연구에서는 수조에 의한 발전 시스템에 대한 연구를 위하여 소규모 수조를 제작하고 이에 대한 발전량을 산정한 후 이론적인 발전량과 비교함으로써 향후 수조를 이용한 최적의 발전 시스템 설계에 필요한 기본적인 자료를 얻고자 한다.

2. 실험장치의 제작

이 연구에서는 수조를 이용한 발전시스템에 필요한 수위와 유량에 관한 실험적인 자료를 구하여 향후 최적의 발전시스템 설계에 이용하고자 하였다. 창조발전(Flood Generation)과 낙조발전(Ebb Generation) 두가지 경우에 대하여 실험하기 위하여 수조는 Fig. 1과 같이 내부수조와 외부수조로 구성하였으며 두 수조는 관으로 연결하여 수위차에 따른 흐름이 가능하도록 하였다.

외부수조는 블록을 이용하여 4.30 m(W)×4.15 m(B)×

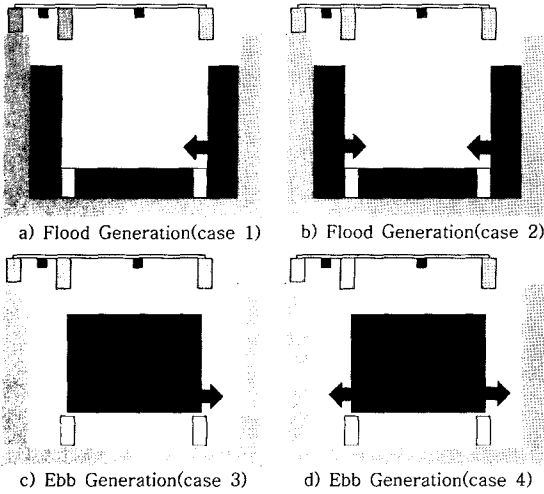


Fig. 1. Schematic diagram of experimental tank.

1.60 m(H)의 크기로 제작하였으며, 내부수조는 철제를 이용하여 1.21 m(W)×2.42 m(B)×1.21 m(H)의 크기로 제작하였다(Fig. 2). 내부수조의 중앙부는 아크릴로 제작하여 수위변화를 관찰할 수 있게 하였으며 연결관에는 프로펠러를 설치하여 회전 각속도를 측정하고자 하였다. 연

결관은 Fig. 1에서와 같이 유량을 달리하여 실험하기 위하여 내경 3.6 cm와 5.0 cm 두 개로 구성하였다. 향후 각속도 및 발전량의 측정 실험 등을 위하여 3.6 cm 관에는 프로펠러를 설치하였으며 5.0 cm관은 단순히 밸브만을 연결하였다. 내부수조와 외부수조의 상부에는 각각 초음파식 수위계(SLM-800C)를 설치하여 시간에 따른 수위변화를 자동으로 기록하였다(Fig. 3).

3. 실험결과 및 자료 분석

실험은 창조발전과 낙조발전의 개념을 재현하기 위하여 두 가지 경우로 나누어 실험하였다. 즉, 외부수조에만 물을 채운후 밸브를 개방하여 내부수조로 물을 들여보내는 창조발전과 내부수조에만 물을 채운후 밸브를 개방하여 외부수조로 물이 빠져나가는 낙조발전의 경우에 대하여 실험하면서 시간에 따른 수위의 변화를 측정하였다. 이때 Table 1에서와 같이 낙조발전과 창조발전 각각에 대하여 밸브를 하나 개방하였을 때와 두 개 개방하였을 때로 유량을 달리하여 실험을 실시한 후 그 결과를 분석하고자 하였다.

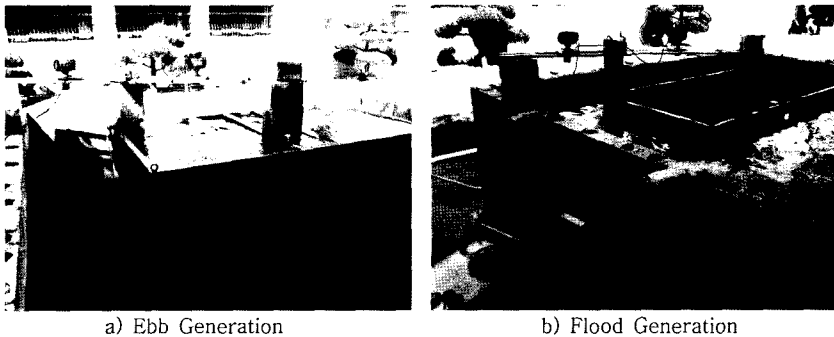


Fig. 2. Photograph of experimental tank.

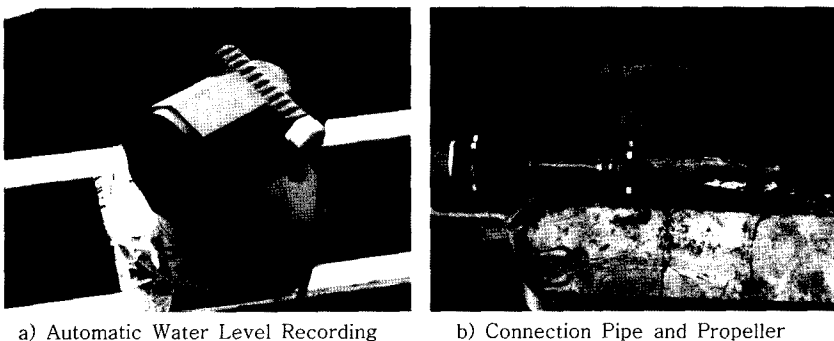


Fig. 3. Photograph of experiment.

Table 1. Case of experiment

Case	Generation method	Diameter of used pipe
Case 1	flood generation	0.036 m
Case 2	flood generation	0.036 m and 0.05 m
Case 3	ebb generation	0.036 m
Case 4	ebb generation	0.036 m and 0.05 m

각 실험에 따른 시간별 수위 변화의 관측치와 분석결과를 Fig. 4와 Table 2에 나타내었다. 또한 질량보존의 법칙을 이용하여 시간별 수위변화를 예측하여 그 결과를 관측치와 비교하였다. 시간별 수위변화의 예측에는 유속산정을 위하여 토리첼리의 법칙을 이용하였으며 관측치와 계산치의 오차가 최소가 되도록 유량계수를 결정하였다. 창조발전의 경우 Fig.4 (a), (b)에서 외부수조의 수위가 하강하면서 내부수조의 수위가 상승하는 방식으로 수위를 변화시켰으며 낙조발전의 경우 Fig. 4 (c)와 (d)에서 외부수조의 수위는 0으로 가정하고 내부수조의 수위만 하강하는 방식으로 실험을 실시하였다. Table 2에서 관측치와 계산치는 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났으며 그림에서도 계산치와 관측치가 거의 일치하는 것으로 나타났다.

프로펠러가 설치된 직경 3.6 cm의 관을 이용하여 실험한 Case 1과 Case 3의 실험의 경우 아주 낮은 유량계수가 산정되었으며 프로펠러가 없는 직경 5.0 cm의 관을 동시에 이용하여 실험한 Case 2와 Case 4의 실험에서는 비교적 높은 유량계수를 나타내었다. 그러나 Case 2와 Case 4의 경우에도 교과서 등에서 제시된 값보다 낮은 값을 나타내었는데 이는 밸브의 영향을 약간 받은 것으로 보인다. 창조발전(Case1과 Case2)과 낙조발전(Case 3와 Case 4)을 비교해보면 창조발전의 경우가 낙조발전의 경우에 비하여 현저히 높은 유량계수를 나타내었다. 이와 같이 각 경우에 따라 유량계수의 값이 큰 차이를 보이는 바 실제 발전시스템을 개발할 때 실험을 통한 정확한 유량계수의 산출과 그에 따른 최적의 발전시스템 구성이 필요할 것으로 판단된다.

4. 발전량 산정

수조를 이용한 발전시스템을 현장에 적용하기 위해서는 수조의 규모와 조차에 따른 이론적인 발전량이 계산

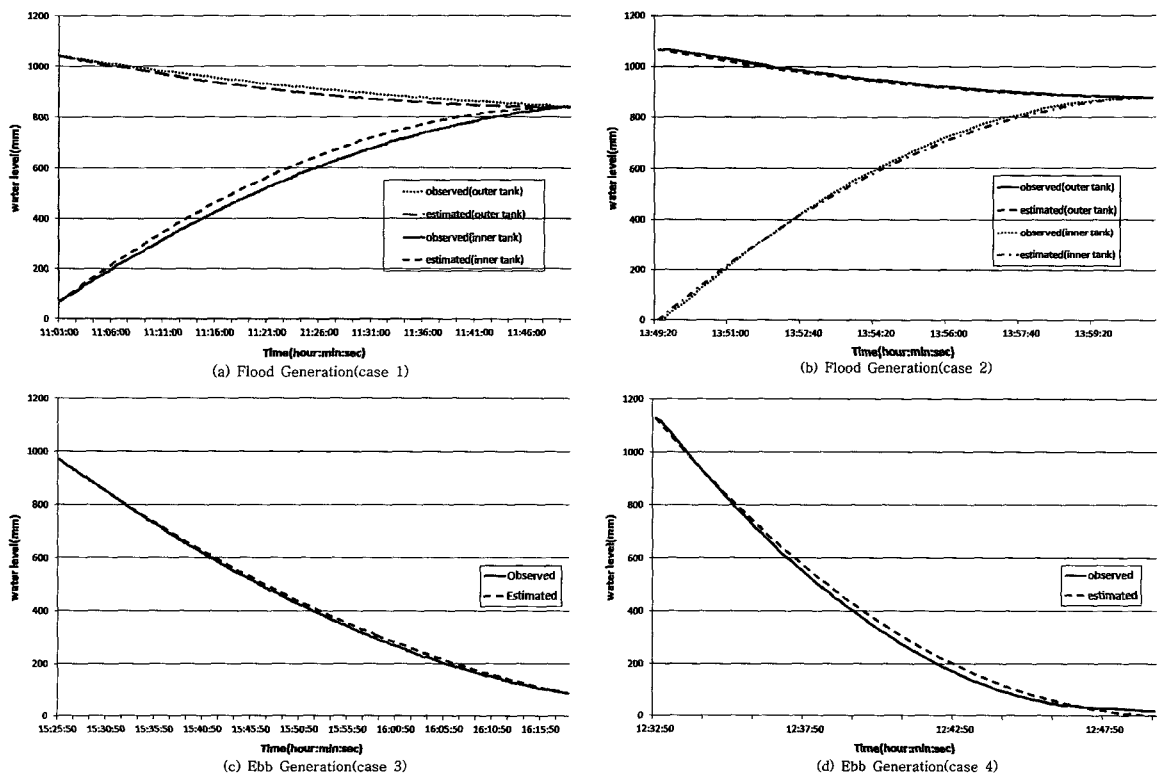


Fig. 4. Water level change of inner and outer tank.

Table 2. Analysis of experiment

Case	Time of Flow(s)	Coefficient of Flowrate	Correlation Coeff.
Case 1	2,950	0.340	0.9969
Case 2	670	0.529	0.9997
Case 3	3,170	0.282	0.9999
Case 4	1,050	0.418	0.9988

되어야 한다. 이렇게 계산된 발전량을 근거로 향후 수조 발전시스템을 적용할 지역에 필요한 수조의 규모와 개수 등을 결정함으로써 사업의 타당성 등을 결정할 수 있을 것이다. 따라서 이 절에서는 일반적으로 사용되는 이론적 조력부존량 산정식에 의한 계산값과 실험의 결과에 의한 시간별 유량과 수위로부터 산출된 발전량과 비교하고자 하였다.

이론적인 조력부존량은 조지내에 유입되는 총에너지와 같으며 다음 식으로 나타낼 수 있다(동부건설주식회사, 한국해양연구원, 1993).

$$E = \rho g \int_{Z=0}^{Z=R} ZA(Z)dZ \quad (1)$$

이 식에서 Z 는 조지수위, $A(Z)$ 는 조지면적, R 은 조차, ρ 는 해수밀도, 그리고 g 는 중력가속도이다. 여기서 본 실험에서와 같이 조지면적이 수위에 따라 변하지 않고 일정하다고 가정하면 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$E = \rho g A \int_{Z=0}^{Z=R} Z dZ = \frac{\rho g A R^2}{2} \quad (2)$$

또한 터빈에 의한 시간별 기계에너지는 중량유량과 단위중량당의 에너지의 곱으로 표시되며 이를 동력(kW)으로 표시할 경우 다음 식과 같다.

$$P = 9.8QH(kW) \quad (3)$$

여기서, Q 는 시간대별 유량, H 는 시간별 수두차를 나타

낸다. 식 (3)에 의해 계산된 동력은 발전시간을 곱하여 식 (2)와 같은 단위의 에너지로 환산할 수 있다. 식 (2)와 식 (3)은 이론적으로는 같은 식이나 이 논문에서는 식 (2)에 의하여 수조내의 수량이 가지는 전체에너지를 이론적으로 계산하였으며 그 값을 식 (3)을 통하여 계산된 시간대별 에너지의 합과 비교하였다.

식 (2)에 의하여 계산된 이론적인 총에너지와 실험유량으로부터 식 (3)에 의하여 산정된 총에너지를 실험에서 내부수위와 외부수위가 모두 변하는 상태에서 실험한 창조발전(case 1, case 2)과 내부수위만 변화하는 상태에서 실험한 낙조발전(case 3, case 4)에 대하여 계산하여 Table 3에 비교하였다. 분석 결과 이론적인 식에 의한 총에너지와 실험유량으로부터 계산된 총에너지 사이에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 식 (2)의 이론식에 의하여 조력에너지를 대략적으로 계산하는 것이 타당한 것으로 나타났으나 실제 현상에서는 조석현상의 정현파에 의하여 나타날 수 있는 오차를 감안한 해석이 필요할 것으로 판단된다.

수조를 이용한 발전의 타당성을 계산하기 위하여 수조의 규모를 확대하여 얻어질 수 있는 이론적 발전량을 식 (2)를 이용하여 대략적으로 계산하여 보았다. 조차를 5 m로 가정하고 수조의 규모를 10 m × 20 m로 가정 한 후 낙조시 1시간동안의 평균 수위차를 4 m로 가정하여 1시간동안 얻어질 수 있는 발전량은 4.36 kWh로 나타났다. 따라서 충분한 조차가 있는 곳에 수조를 설치하고 수조의 규모를 확대할 경우 소규모의 조력발전이 가능할 것으로 판단된다. 임의의 수조를 대상으로 발전량 산정결과를 Table 4에 나타내었다. 각 발전량은 조석 1 주기당 낙조시 1 시간동안 발전하는 것으로 가정하여 계산하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 소규모 수조를 이용한 발전시스템에 대하여 검토하고자 하였다. 이를 위하여 소규모 수조를 제

Table 3. The comparison of power generation between theoretical equation and experimental results

case	inner water level		outer water level		Eq.(2) (Wh)	Eq.(3) (Wh)	Relative Error(%)
	start	finish	start	finish			
case 1	0.070	0.842	1.042	0.842	3.071	3.080	0.003
case 2	0.001	0.879	1.067	0.879	3.824	3.896	0.018
case 3	0.971	0.088	0	0	3.820	3.821	0.000
case 4	1.128	0.034	0	0	5.193	5.198	0.001

Table 4. The example of tidal power generation output

Tidal range(m)	Water tank area(m ²)	Power output(kWh)	Tidal range(m)	Water tank area(m ²)	Power output(kWh)
5	200	6.81	4	900	19.60
5	600	20.42	4	1200	40.83
5	900	30.63	3	200	2.45
4	200	4.36	3	600	7.35
4	600	13.07	3	900	11.03

작하고 실험을 통하여 시간에 따른 수위의 변화를 관측한 후 이를 이론적인 계산값과 비교하였다. 수조는 내부수조와 외부수조로 제작하여 창조발전과 낙조발전의 개념을 재현할 수 있도록 하였다. 또한 내부수조와 외부수조의 연결관을 두 곳에 설치하여 유량을 달리하여 수위의 변화를 관측하였다. 관측된 수위의 변화를 계산값과 비교하여 유량계수를 산출하였다. 이러한 실험결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 실험에 의한 수위의 관측치와 이론적인 계산치는 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타나 이론식이 실제의 수위를 잘 모의하는 것으로 나타났다.

(2) 프로펠러의 유무, 밸브의 유무 등에 따라 유량계수가 큰 변화를 보이는 것으로 나타나 실제 발전시스템을 제작할 때 실험을 통한 유량계수 등의 산정이 반드시 필요한 것으로 나타났다.

(3) 창조발전과 낙조발전의 비교에서도 유량계수 값이 큰 차이를 보여 실험을 통하여 상황에 따른 최적의 발전시스템 구성이 필요한 것으로 나타났다.

(4) 이론적인 식에 의한 총에너지와 실험유량으로부터 계산된 총에너지 사이에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 이론식에 의하여 조력에너지를 대략적으로 계산하는 것이 타당한 것으로 나타났으나 실제 현상에서는 조석현상의 정현파에 의하여 나타날 수 있는 오차를 감안한 해석이 필요할 것으로 판단된다.

(5) 본 실험의 규모에 의하여 얻어질 수 있는 이론적인 발전량은 크지 않으나 충분한 조차가 있는 곳에 수조를 설치하고 수조의 규모를 확대할 경우 소규모의 조력발전이 가능할 것으로 판단된다.

학술동아리 지원사업에 의하여 수행한 결과입니다.

참고문헌

- 동부건설주식회사, 한국해양연구원 (1993). 조력에너지 개발 및 이용을 위한 최적발전량 산출기법 개발 연구보고서. 오명학, 박진순, 이광수 (2007). 우리나라의 조력에너지 개발 여건. 대한토목학회지, 55(12), 135-140.
- 이광수 (2005). 한반도 조력자원 개발타당성. 한국신재생에너지학회 학술대회는문집, 342-350.
- 이광수, 염기대, 송원오 (1994). 조력발전 적정개발규모 결정에 관한 해석적 모형. 해양연구, 16(2), 111-124.
- 한국수자원공사 (2002). 시화호 조력발전 건설사업 타당성 조사 및 기본계획 보고서.
- 한국해양연구소 (1993). 가로림 조력 개발 타당성 조사 보고서.
- 해양수산부 (2001). 해양에너지 실용화 기술개발(1): 조력조류에너지.
- Baker, A.C. (1991). Tidal Power. Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.
- Boyle, G (1996). Renewable energy, Open university in association with OUP.
- Hubbert, M.K. (1971). Scientific American, Sep.
- McVeigh, J.C. (1984). Energy around the world, Pergamon.
- Ross, D. (2001). Better than clockwork : Tidal power keeps to time, always, Refocus, 2(2), 40-42.
- Yi Jwo-Hwu (1998). Electric power generation at the ebb tide. Electric Power Systems Research, 48, 31-35.

Received April 5, 2008

Accepted April 17, 2008

사 사

본 논문은 원광대학교에서 수행중인 지방대학혁신역량 강화사업 신재생에너지융합기술인력양성사업팀의 산학연