물받이를 이용한 유수발전장치의 설계 및 구현

논 문

61-3-10

Design and Implementation of Fluid Flow Generation System by using Water Captures

손 영 대* · 정 현 석†
(Young-Dae Son · Hyun-Seok Jung)

Abstract - This paper proposes the design and implementation of fluid flow generation system by using polypropylene(PP) water capture, which harvests electric energy from the kinetic energy of tidal current or water flow and drives the desired load, and applies it to the discharge drain of Hadong thermal power plant. This experimental system is composed of water captures, driving wheel, gear trains, 10[kW] synchronous generator, and three phase rectifying circuit which drives lamp load for test. The proposed water capturing system which is composed of water captures, rope and driving wheel, rotates as caterpillar according to water flow. This system is very easy to manufacture and more economical than another type of tidal current turbines such as conventional propeller and helical type. Also, we estimated the available fluid flow energy that can be extracted from the cooling water in discharge drain based on drain's cross-sectional area. Therefore, this paper confirms the validity of proposed fluid flow generation system with water captures and the possibility of its application for renewable energy generation in discharge drain of thermal power plant, from the obtained performance characteristic of this energy conversion system.

Key Words : Tidal current, Water capture, Fluid flow generation system, Hadong thermal power plant, Discharge drain

1. 서 론

최근, 육상의 화석연료 고갈과 환경오염 문제에 직면하여 자연환경에서 손쉽게 얻을 수 있는 다양한 재생에너지원을 찾는 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있으며, 그 중 청정에너지인 해양에너지 개발에 국제적 관심 또한 증폭되고 있다. 해양은 지구상의 마지막 에너지의 보고로서 그 가치가 점차 높아지고 있으며, 또한 지구 환경오염 문제에 효과적으로 대처할 수 있는 방안의 하나로서 그 중요성이 인식되고 있다. 해양에너지는 해양의 조력, 파력, 조류, 온도차, 해양 풍력 등을 변환시켜 전기 또는 열을 생산하는데 이용할 수 있는데, 우리나라를 포함한 몇몇 선진국에 의해 일부 실용화 단계까지 기술이 개발되고 있는 실정이나, 지속적인 장기적인 연구개발 노력이 필요한 분야이다. 해양에너지는 무한정, 무공해 청정에너지라는 장점이 있는 반면에 석유, 석탄, 원자력 등의 현재 사용 중인 에너지원에 비해 에너지 추출비용이 상대적으로 높고 또 전력을 생산할 경우 출력 변동과 육상으로의 송전비용 등의 문제로 인해 실용화를 위해서는 경제적 측면에서 개발 비용의 저렴화와 이용 측면에서 안전성과 신뢰성 확보가 요구되고 있다. 한편, 해양 재생에너지원 중 조류에너지는 비교적 다른 재생에너지

원에 비해 친환경적이며 에너지 밀도가 높아 에너지 발전효율이 높고 변환이 용이할 뿐만 아니라, 1년 365일 동안 지속되고 변덕스런 날씨의 영향을 받지 않는 예측가능한 매력적인 에너지 자원이다. 이러한 대규모 에너지원은, 큰 강의 어귀나 만과 같은 독특한 지형특성에서 댐으로 물을 가두고 댐 양측 사이의 수위차가 적절할 때 종래의 수력터빈을 통해 가워진 물을 내보내면서 발전하는 조력발전시스템에 활용되는 것을 제외하고는, 아직 국내외적으로 상용화 예를 찾아보기 힘들다. 그러나, 막대한 재생에너지원을 찾기 위한 필요성과 부합하여 해양공학과 전력전자 기술의 진보로 인해, 조류에너지가 점점 기술적으로 가능하고 경제적으로 실용적인 해양에너지가 되고 있다. 조류에너지를 전력으로 변환하여 활용하기 위해, 풍력발전을 위해 적용해 온 다양한 형태의 이동유체 활용기술 즉, 수평축 또는 수직축 터빈 기술을 해양부하의 변화, 잠수 깊이, 정지 특성 및 진공 발생, 해수부식 등을 고려한 조류터빈 설계기술로 개선하여 적용하고 있다[3]. 특히, 국내에서 가장 많이 시험되고 있는 수평축이나 수직축의 헬리컬 터빈방식은 수면위에 발전 및 전기장치가 있어서 수중체의 수밀을 고려할 필요는 없으나, 이물질 부착 등에 따른 심한 진동 및 유지보수 문제가 있으며, 구조상 해저면과 해수면을 연결하는 수직 회전축의 비틀림 변형, 축정렬 문제, 베어링/커플링 및 베벨기어 파손 등에 대비한 설계가 요구되고, 또한 이를 지지하기 위한 대형 구조물이 필수적이므로 지지 파일이 많고 클 수밖에 없어서 경제성 면에서 다소 불리하다. 본 논문에서는 물의 흐름에 따라 물받이에 가해지는 유체 압력에 의해 회전하는 무한궤도의 장력을 이용하여, 기어트레이너로 동기발전기에 연결되

* 정 회 원 : 동서대학교 전자공학과 부교수

† 교신저자, 비회원 : 동서대학교 산업경영공학과 부교수

E-mail : hsjung@gdsu.dongseo.ac.kr

접수일자 : 2012년 1월 31일

최종완료 : 2012년 2월 27일

는 회전체(구동휠)를 구동하여 전력을 발생하는 유수발전 시스템을 제안하며, 이를 하동화력발전소의 냉각수 방수로에 적용하여 그 기본 특성을 도출하고 새로운 재생에너지원으로서의 경제성을 확인한다. 특히, 물받이, 로프, 구동휠로 구성된 제안한 유수에너지 포집시스템은 종래의 프로펠러나 헬리컬 터빈을 대신하여 무한궤도 형태로 회전하면서 발전기를 구동하며, 로프와 물받이를 제외한 모든 부품은 육상 또는 부채 위에 설치할 수 있고 적당한 수심을 가진 강, 하천 및 조류가 있는 어느 수역이나 손쉽게 설치 가능하다. 즉, 구조가 간단하고 유지보수가 용이하여 발전용량 대비 제작과 설치비용이 저렴한 장점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 방수로의 평균 단면적에 기초하여 냉각수의 흐름으로부터 도출할 수 있는 최대 유수에너지를 평가하고, 제안한 물받이를 갖는 유수발전시스템의 실증시험을 통한 성능특성 등을 통해 발전 타당성과 재생에너지원으로서의 적용가능성을 확인한다.

2. 물받이를 이용한 유수발전 시스템

2.1 조류 에너지원

지구상의 물은 육상 빙하, 지하수, 호수와 강 등이 차지하는 3% 미만의 담수를 제외하고, 97% 이상은 바다에 있으며 지구표면의 약 71%를 덮고 있다[1]. 이러한 막대한 양의 해수를 이용한 재생에너지 자원개발에 전 세계가 관심을 갖는 것은 자명한 사실이다. 해수는 공기보다 밀도면에서 약 837 배 높으며, 태양과 지구 그리고 달 사이의 일정한 규칙성을 갖는 인력에 의해 천문조석을 가지므로, 이에 수반된 조류흐름은 부분적인 기상영향을 받지만 근본적으로 높은 정확성을 갖는 예측가능한 자원이다. 즉, 조류발전은 풍력과 태양광과 같은 타 재생에너지 발전시스템에 영향을 주는 바람, 안개, 비, 구름과 같은 기상조건에 거의 무관한 예측가능성을 가지므로 성공적인 전력망 연계를 위해 적합한 재생에너지원이다. 조류는 조석에 의한 해면의 상승과 하강에 수반된 해수의 흐름이며, 하루에 두 번씩 창조류와 낙조류가 발생하는 약 12시간 24분 주기의 고조와 저조를 가지는 반일주조와 하루에 한 번씩 약 24시간 48분 주기로 발생하는 전일주조, 그리고 잇달은 고·저조의 수위가 차이가 많은 혼합조로 구분되며, 전 세계의 분포로 볼 때 반일주조형이 가장 많다. 특히, 우리나라의 서해안과 남해안은 반일주조형, 동해안은 혼합조형에 속한다. 조류의 세기는 지구에 대한 달과 태양의 근접도에 따라 변화하며, 질량과 거리로 결정되는 기조력의 크기는 달이 약 68%이고 태양은 약 32%이므로, 태양의 기조력은 달의 기조력의 약 46%에 지나지 않는다. 또한, 본 연구의 시험이 진행된 반일주조가 지배적인 하동화력 방수로의 인근해역에서는 이러한 태양조석과 태음조석이 합해져서 매일의 시간대별로 해역의 수위가 변동하며 또한, 조승과 보름에 약 2주 간격으로 고고조와 저저조가 나타나는 대조(사리)와, 대조 후 일주일 즉 상현과 하현에 약 2주 간격으로 저고조와 고저조가 나타나는 소조(조금)를 유발한다. 즉, 이러한 조수간만의 영향으로 발생하는 조류는 대조에서 가장 빠르고, 소조에서 가장 느린 조류가 발생한다고 볼 수 있으며, 나머지 시기에서도 그 최대 속도크기의 변화만 있을

뿐 전반적으로 유사한 근사적인 정현변동 추세를 보이며, 고조(만조)와 저조(간조)의 중간 시점에서 최대 속도를 갖는다. 또한, 약최저저조면(기본 수면)을 조석 기준점으로 하는 해수면 수위도 주기별 그 크기 차이가 있지만 대체로 정현적인 형태로 변화한다. 그림 1은 본 논문의 유수발전시스템을 설치한 하동화력 방수로의 유속변동을 보여주는 그래프이다. 본 논문의 주안점은 조류 속도를 이용한 발전시스템 구축이 아닌 방수로 유속 활용에 있으며, 속도변동 폭이 큰 조류발전 보다 상대적으로 유속이 일정한 방수로의 유수발전시스템 구축에 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 방수로 유속은 조류속도가 아닌 방수로 인근 해역의 해수면 수위에 직접 영향을 받으며, 상호간에 위상이 뒤집힌 변동 형태를 가진다. 즉, 고조시에 최저 유속, 저조시에 최고 유속을 가지게 되므로 발전시스템 설계 시에 이를 고려할 필요가 있다.

그림 1 시간대별 조류속도, 수위 및 방수로 유속변동추세
Fig. 1 Tidal current velocity, water level, and speed of water flow in discharge drain

2.2 방수로 가용 유수에너지 분석

하동화력발전소 냉각수의 동절기 방수량은 하절기의 반 정도인 약 $102[m^3/s]$ 이며, 방수로를 통해 대부분 연안으로 방류되고 있으므로 어떠한 방식이든 유수에너지를 이용한 발전시스템을 구축하여 재생에너지로 사용되는 것이 바람직하다. 그 중 소수력 발전설비는, 약 2[m] 내외의 낮은 평균 조차를 갖는 이 지역의 특성상 유효낙차가 최대 3.34[m]이므로 댐식 소수력 발전에 유리한 입지가 아니며, 제방축조 공사비 등의 문제로 인해 경제성이 떨어진다. 또한, 비교적 일정한 유속을 갖는 방수로의 특성상, 댐식 소수력 발전방식보다 수평축(횡축) 헬리컬 터빈방식의 조류발전설비가 다소 유리하나 서론에서 언급했듯이 경제성 면에서 다소 불리하다. 따라서, 본 절에서는 다음 절에서 언급되는 물받이를 이용한 유수발전시스템의 타당성 검토를 위해 방수로의 가용 유수에너지를 확인한다. 유수에너지는 유속과 직접 관계되며, 방수로 시작부의 우안(그림 2의 < 부> 부분)으로 7~8호기의 방류수가 유입되어 1~6호기의 방류수와 합류되면서 상당한 와류가 발생되므로 방수로 시작부에서 약 50미터까지는 유속의 변동이 심하므로 측정에 어려움이 있다. 따라서, 2003년 10월에 측정된 표면유속 데이터[5]를 기초로 하여 유속 추세를 확인하여 유수에너지의 발생전력 추산에 이용한다.

다. 그림 3은 방수로의 평면도로서, 유속을 측정한 각 지점의 위치를 나타내고 있다. 본 유수발전시스템을 적용하여 전력을 발생할 수 있는 유효구간 길이는 방수로 시작부로부터 약 20~190미터까지의 170미터이며, 그 이후 구간도 유수에너지를 추적해서 포집할 수 있다. 그림 4는 방수로 시작부로부터 약 69미터 지점의 방수로 단면도로서 방수로 전체에 걸쳐 거의 균일하며, 약 3미터의 수심을 유지하고 있고 조수간만에 따른 수위 변동폭을 참고하여 본 연구의 물받이 설계시에 고려할 필요가 있다.

그림 2 하동화력 방수로 시작부

Fig. 2 The outset of discharge drain in Hadong thermal power plant

그림 3 방수로 평면도

Fig. 3 A plane figure of discharge drain

그림 4 방수로 단면도

Fig. 4 A cross section diagram of discharge drain

표 1에 나타난 유속 데이터는 2003년 10월 4일에 측정한 데이터이며, 측정 당일(음력 9/9)의 고조/저조시간 및 해수면 수위는 각각 03:21(222cm, ▲), 09:51(145cm, ▼), 17:24(285cm, ▲), 23:55(147cm, ▼)이다. 그림 1에서도 언급했지만, 표면유속계로 측정한 방수로 유속은 조수간만에 따라 변동(고조시에 낮은 유속, 저조시에 높은 유속)을 보이며, 같은 위치라도 방수로의 좌안, 중앙, 우안에 따라 차이를 보이며

로, 일률적으로 정확한 값을 알 수 없으나 4회 측정한 평균 유속을 나타내었다.

표 1 방수로 규격 및 유속

Table 1 Discharge drain specification and water flow speed

조사지점	20	68.9	120	190	290
측정항목	미터	미터	미터	미터	미터
수면높이 [m]	0.73	0.67	0.62	0.52	
하상높이 [m]	-2.35	-2.35	-2.35	-2.35	
수심 [m]	3.08	3.02	2.97	2.87	
수면경사	0.0012	0.0010	0.0014		
평균유속[m/s] (오전10:40~11:40)	3.2	3.49	3.29		6.42
평균유속 [m/s] (오후17:20~18:00)	1.4	1.25	1.42		1.01

따라서, 방수로 유효구간 내의 유속차가 최대 2.8배 정도임을 알 수 있으며 또한, 최소 유속값이 약 1.4[m/s] 정도는 항상 보장되므로 발전장치가 상시 운전하는 데는 별 문제가 없다. 표 1과 고조시간대의 그림 4에서 알 수 있듯이, 해수면은 0.67[m] 정도이고 하상은 기본 수면보다 2.35[m] 낮으므로 조수간만의 영향을 받는 구조로서, 방수로 수심은 약 3.02[m]를 유지하고 있다. 이 경우, 방수로가 갖는 수심 단면적은 유효부분이 약 46.2[m²]이고 경사부분은 약 13.72[m²]으로서 전체 수심 단면적이 약 59.92[m²]임을 알 수 있으며, 이 단면적에 일정 유속으로 가해지는 냉각수의 압력이 전력발생에 직접 관계된다. 질량 m [kg]인 유체가 속도 v [m/s]로 이동할 때의 운동에너지는 다음 식과 같다.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

여기서, $m = \rho v A \Delta t$ 이며, ρ 는 해수밀도(=1,025[kg/m³]), A 는 물받이의 유체 단면적[m²]을 나타낸다. 그러므로, 물받이로 입사하는 유수로 인한 발생전력은 다음 식과 같다[2].

$$P_f = \frac{d}{dt}E_k = \frac{1}{2}\rho A v^3 \quad (2)$$

전체적인 유수발전시스템의 손실을 고려하면 식 (2)의 일부분이 전력발생에 관계하므로, 유수로 인한 발생전력은 다음 식과 같이 수정된다[4].

$$P_f[W] = \frac{1}{2}C_p \rho A v^3 \quad (3)$$

여기서, C_p 는 전력계수이며, 물받이 및 구동휠, 기어트레인, 발전기, 전력변환장치의 효율을 고려한 값($\eta_{\text{물받이}} \times \eta_{\text{gear_train}} \times \eta_{\text{gen}} \times \eta_{\text{power_con}}$)이다. 또한, 물받이의 단면적에 입사하는 유수의 순시 전력밀도[W/m²]는 다음 식과 같다.

$$\left(\frac{P_f}{A}\right)_{water} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (4)$$

따라서, 전력밀도는 유속의 3승에 비례하여 급변하므로 유속은 유수발전시스템 설계 시에 고려해야 할 중요한 변수이며, 그림 5에 단위면적당 전력밀도를 유속에 대해 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있듯이, 유속이 1.5~3.4[m/s]로 변화할 때 전력밀도는 1.7~20.1[kW/m²]의 큰 변동범위를 나타낸다. 즉, 해수보다 훨씬 낮은 밀도(1.225[kg/m³])를 갖는 풍속을 활용하는 해상 풍력발전 시에, 유수발전과 같은 전력밀도를 발생하기 위해서는 14~32[m/s]의 강한 풍속이 필요하게 된다. 따라서, 그림 4의 하동화력 방수로 유효 단면적(약 46.2[m²])이 가지는 잠재적인 발생전력은 유속이 2~3[m/s]일 때 약 189.4~639.3[kW]이다.

그림 5 유속 대 유수 전력밀도

Fig. 5 Incident power density as a function of flow speed

2.3 유수발전장치의 기본동작

본 논문에서 제안한 유수발전장치의 기본 동작원리를 나타내는 개념도를 그림 6에 나타내었다. 이는 유수의 압력을 받는 다수개의 물받이가 무한케도 로프에 결속되어 하나의 유니트로 구성되어 구동휠에 감긴 구조를 갖는다. 무한케도 로프는 하나의 루프를 이루고 있으므로 좌에서 우로 흐르는 유수의 압력을 받는 물받이들로부터 장력을 받아 구동휠을 회전시키는 힘을 얻게 된다. 즉, 무한케도 로프는 구동휠을 당기면서 멀어지는 로프부분과 복귀하는 로프부분으로 구분되며, 각 로프부분의 길이 비율은 대략 1/2씩이 된다. 또한, 무한케도 로프의 전체 길이의 반에 결속된 물받이들은 수중에 잠겨서 유수의 압력을 받게 되며, 나머지 반은 수면 또는 공중에 매달린 채 유수의 압력없이 구동휠로 복귀하게 된다. 본 유수발전장치에 사용된 물받이와 로프는 해수로 인한 부식을 막고 유수압력으로 인한 물받이의 장력을 감당하기 위해 내구성과 인장강도를 높인 폴리프로필렌과 폴리에틸렌 소재의 중량이 가벼운 합성섬유를 사용해야 한다. 그림 7은 그림 6의 개념도를 실제 작동 메커니즘 확인과 구현을 위한 시스템 구성도로 나타낸 것이며, 설계에 사용한 툴은 Solid Edge ST 3이다. 본 연구에서 제안한 유수발전장치는 그림 7의 부체 위에 설치하였으며, 부체를 사용하는 이유는 방수로 냉각수 표면과 가장 가까운 상태에서 무한케도

로프를 작동시키기 위함이며, 이 경우 수중에 잠기는 물받이의 개수가 늘어나므로 발생전력이 높아지게 된다. 그림 7의 좌상방향에서 유입되는 유수에 잠긴 물받이가 장력을 얻어 반시계 방향으로 회전하게 되며, 이와 함께 회전하는 무한케도 로프는 가이드를 통과하여 구동휠에 복귀한 후 이를 회전시킨다. 이 회전력은 기어트레인을 통해 원하는 속도로 증속되어 3상 동기발전기를 구동하며, 적용한 물받이의 입사 유수 단면적과 유속에 따라 달라진다. 또한, 본 유수발전장치는 스티로폼을 충전한 부체를 이용하여 유수상에 띄워서 특정 구조물에 로프로 결박하여 설치가능 하므로 설치환경에 큰 영향을 받지 않으며 시공비도 타 방식에 비해 매우 낮은 장점이 있다. 물론, 시공비가 큰 문제가 되지 않는다면 인공 구조물에 장착·설치하여 이용할 수도 있다.

그림 6 유수발전장치의 개념도

Fig. 6 Conceptual diagram of fluid flow generation system

그림 7 유수발전장치의 구성도

Fig. 7 The configuration of fluid flow generation system

3. 실험시스템 구성 및 결과검토

식 (3)에서 알 수 있듯이, 유수발전장치의 발생전력은 유수가 입사하는 설계된 물받이의 단면적에 비례하므로 주어진 조건하에서 가능하면 물받이의 단면적을 늘리는 것이 중요하다. 또한, 복귀하는 물받이는 유수의 압력을 적게 받아야 하며 제작 및 유지보수에 어려움이 없어야 한다. 본 연구에서 제안한 물받이의 형상을 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 정사각형 형태의 펼쳐진 상태의 물받이를, 그림 8(b)는 무한케도 로프에 연결되기 전의 결속된 상태를 나타낸다. 펼쳐진 물받이의 가로×세로 길이가 각각 1[m]인 경우 그림 8(b)와 같이 결속했을 때, 유수와 맞닿는 부분의 단면적이 약 1/4로 줄어서 네 군데의 단면적 총합이 0.25[m²] 정도가 된다. 유속이 3[m/s]이고, 전력계수 $C_p(\eta_{물받이} \times \eta_{gear_train} \times \eta_{gen} \times \eta_{power_con}) = 0.47 \times 0.95 \times 0.9 \times 0.9 = 0.36$ 을 적용

할 경우, 식 (3)에 의해 발생전력을 계산하면 $P_f = 0.5 \times 0.36 \times 1,025 \times 0.25 \times 3^3 = 1.245[\text{kW}]$ 가 된다. 또한, 펼친 상태의 물받이 가로×세로 길이가 각각 2미터인 경우 이를 결속하면 약 4.98[kW]의 전력을 발생할 수 있다. 따라서, 물받이의 형상이나 결속방법에 따라서 단면적이 달라지며, 발생전력을 증가시키기 위해서는 단면적을 늘릴 수 있는 물받이의 형상설계와 결속방법 설정 등이 필요하다.

(a)

(b)

그림 8 물받이 형상 (a) 펼친 상태 (b) 결속 후 상태

Fig. 8 An appearance of water capture

(a) Unfolded state (b) Binded state

또한, 실제로 전력을 발생시킬 경우 복수개의 물받이를 사용해야 하는데, 발생가능한 전력에 영향을 미치는 또 다른 요인은 물받이간의 이격거리이다. 즉, 물받이의 단면적 대비 어느 정도의 이격거리가 최적의 장력을 형성하는지를 알아볼 필요가 있는데 이 장력이 구동휠을 회전시키는 원동력이 되기 때문이다. 본 연구에서는 2종류의 실험을 수행하였다. 하나는 해석 툴을 이용한 해석 실험이고, 또 하나는 실증실험이다. 이 2가지 실험에서, 유속이나 물받이 단면적 등이 정확히 일치하지 않으므로 2개의 실험을 직접 비교하기에는 무리가 있다. 따라서 유속과 물받이 이격거리가 로프에 발생시키는 장력의 변화 추이만 살펴보기로 한다.

3.1 물받이 형상 및 이격거리의 영향 시뮬레이션 실험

본 연구의 물받이 설계와 관련한 시뮬레이션을 위해, 유

체의 유동상태는 위치에 따른 유속의 변화가 없는 정상유동으로 가정한다. 시뮬레이션에 적용한 물받이의 형상은 그림 9와 같이 입구 직경 350[mm], 물받이 깊이 500[mm]를 갖는 원뿔 형태이며, 2가지 변수 즉, 물받이 이격거리 및 유속에 대해 시뮬레이션을 행하고 그 결과를 표 2에 나타내었다. 시뮬레이션 툴은 ANSYS CFX 13.0을 활용하였으며, 시뮬레이션 방법으로는, 첫 번째 변수인 물받이간의 이격 거리를 1[m], 2[m], 3[m]로 변화시키면서 두 번째 변수인 유속을 1.7[m/s], 3.2[m/s]로 변화시킬 때 물받이가 받는 힘을 각각 계산한다. 여기서, 고조시의 유속을 1.7[m/s]로, 저조시의 유속을 3.2[m/s]로 두었다. 유속이 동일하다면 물받이 갯수나 이격거리에 관계없이 첫 번째 물받이가 받는 힘은 동일해야 한다. 그러나 표 2에서 알 수 있듯이 시뮬레이션 결과는 약간의 편차가 있음을 보여주고 있다. 그래서 물받이 갯수나 이격거리에 따른 발생 장력의 증가율을 계산하기 위한 기준 장력을 유속 1.7m/s인 경우 700[N], 유속 3.2m/s인 경우 2,400[N]으로 설정하였다. 표 2에서 알 수 있듯이, 첫 번째 물받이는 물받이 간격에 관계없이 일정한 힘을 받는 것으로 계산되어야 하겠지만, 시뮬레이션 결과는 약간의 편차가 있음을 보여주고 있다. 그래서 모든 계산에서 사용한 기준 장력은 유속 1.7m/s인 경우 700[N], 유속 3.2m/s인 경우 2,400[N]이다. 표 2에서 유속이 3.2[m/s]인 경우의 결과는 다음과 같다. ① 이격 거리가 1[m]인 경우 : 2번째 물받이가 받는 힘이 8.5[N]으로 급격히 떨어진다. 즉, 시뮬레이션에 활용한 물받이 단면적과 이격거리 그리고 유속에 의해 2번째 물받이는 거의 장력을 발생시키지 못하고 있음을 알 수 있다. 그러나 그 이후의 물받이는 첫 번째 물받이 대비 36%(875[N]), 23.8%(572[N])의 장력을 발생시키고 있음을 알 수 있다. ② 이격 거리가 2[m]인 경우 : 2번째 물받이가 944[N]으로 39.3%, 3번째 물받이가 1,052[N]으로 43.8%, 4번째 물받이가 982[N]으로 40.9%의 장력을 받는 것으로 분석되었다. ③ 이격 거리가 3[m]인 경우 : 2번째 물받이가 1,265[N]으로 52.7%, 3번째 물받이가 1,213[N]으로 50.5%, 4번째 물받이가 1,169[N]으로 48.7%의 장력을 발생시킴을 알 수 있었다. 시뮬레이션 결과를 종합해 보면, 물받이 단면적과 유속에 따라 최적의 이격거리가 존재함을 확인할 수 있었다. 실제 상황에서는 방수로 측면과 바닥이 평탄하지 않음으로써 발생하는 와류들이 존재할 것이므로 실증시험을 할 필요가 있다.

그림 9 시뮬레이션을 위한 물받이 형상 및 이격거리

Fig. 9 An appearance and space of water captures for simulation

표 2 이격 거리별 발생 장력

Table 2 Tensions according to spaces between water captures

발생장력 유속	이격 거리 [m]	Cone1 [N]	Cone2 [N]	Cone3 [N]	Cone4 [N]
$v = 1.7$ [m/s]	1	667	5	249 (35.5%)	162 (23.1%)
	2	702 (평균 700)	267 (38.1%)	297 (42.4%)	277 (39.5%)
	3	707	357 (51%)	341 (48.7%)	330 (47.1%)
$v = 3.2$ [m/s]	1	2,363	8.5	875 (36%)	572 (23.8%)
	2	2,491 (평균 2,400)	944 (39.3%)	1,052 (43.8%)	982 (40.9%)
	3	2,507	1,265 (52.7%)	1,213 (50.5%)	1,169 (48.7%)

3.2 물받이 형상 및 이격거리의 영향 실증시험

3.1절에서 제시한 시뮬레이션 결과의 검증 및 분석을 위해 하동화력발전소 방수로 현장에서 2회의 실험을 행하였다. 공통 시험조건은 유수입사 물받이 단면적이 $0.36[m^2]$ 이고, 움지도르레 2개와 장력계를 사용하여 측정영역($500[kg]$)의 4배까지 장력을 측정할 수 있도록 하였다. 1차 시험[2011년 12월 7일(수) 오후 12시 12분경, 고조/저조시간 및 해수면 수위는 각각 00:43(81cm,▼), 07:18(283cm,▲), 13:18(112cm,▼), 19:08(257cm,▲)]의 목적은 물받이 개수 증가에 따른 장력 증가비율 확인이며, 2차 시험[2011년 12월 8일(목) 오후 6시 48분경, 고조/저조시간 및 해수면 수위는 각각 01:22(68cm,▼), 07:56(301cm,▲), 13:59(99cm,▼), 19:48(267cm,▲)]의 목적은 물받이가 2개인 경우 물받이 간격에 따른 장력 증가비율을 확인하는 것이다. 2회의 장력 시험결과를 표 3에 나타내었다. 표 3의 1차 시험 결과에서 알 수 있듯이, 저조시간 1시간 전 유속이 $3.5[m/s]$ 인 경우, 1[m] 간격으로 물받이를 설치하더라도 3개까지 연결하면 첫 번째 물받이가 생성하는 장력의 2배를 얻을 수 있었으며, 물받이 간격을 2미터로 조정하여 측정해 보았으나 현장 여건상 과도한 장력발생으로 더 이상의 시험은 불가능하였다. 표 3의 2차 시험에서는 2개의 물받이를 이용하여 설치간격을 조정하면서 총 발생 장력을 측정하였다. 그 결과, 1미터 간격으로 2개를 설치한 경우를 기준으로, 2미터 간격일 경우 12.5% 증가, 3미터 간격일 경우 25% 증가, 4미터 간격일 경우 31.2% 증가, 5미터 간격일 경우 43.7%가 증가함을 알 수 있다. 즉, 동일한 개수의 물받이를 사용할 경우 적절한 이격거리가 존재함을 확인할 수 있으며, 또한 인장강도가 더 높은 로프를 사용할 경우, 발전기를 정격 속도로 회전시키기 위한 필요 토크에 해당하는 물받이 개수 및 이격거리를 산정하는 개략적인 지침을 확보할 수 있다.

표 3 장력시험 결과

Table 3 Tension measurement results

1차 시험 $v=$ 3.5 [m/s]	<div>물받이 개수</div> <div>장력</div>	물 받이 1개	물 받이 2개		물 받이 3개	
	물 받이 간격 1[m]	360 [kg]	480[kg] (33% 증가)		720[kg] (100% 증가)	
2차 시험 $v=$ 2[m/s]	<div>물받이 간격</div> <div>장력</div>	1 [m]	2 [m]	3 [m]	4 [m]	5 [m]
	2개 연결시 장력[kg]	280~ 360	320~ 400	360~ 440	360~ 480	400~ 520
	평균값	320	360 (12.5 %)	400 (25 %)	420 (31.2 %)	460 (43.7 %)

3.3 유수발전 실험 및 결과

본 연구에서 제안한 유수발전장치의 발전실험을 위해 그림 10과 같은 실험시스템을 구성하였다. 전체적으로 보면, 5[m] 간격으로 약 10개가 입수된 가로×세로 각 1.2[m]인 물받이, 직경 1.2[m]의 구동휠, 3단으로 구성된 증속용 기어트레인, 영구자석형 3상 동기발전기, 3상 정류기 및 부하 등으로 구성하여 발전기 선간전압 및 부하로 공급되는 전력을 측정하였다. 동기발전기는 10[kW]급과 1[kW]급의 두 개의 발전기를 사용하였는데, 1[kW]급은 주 시험 대상이 아니며 필요시 보조로 사용하였다. 유속이 최대가 되는 저조시, 물받이 이동속도가 유속보다 조금 작은 약 $3[m/s]$ 로 되고 구동휠의 회전속도는 약 47.75rpm이 되므로 1[kW] 및 10[kW] 발전기의 정격속도인 400[rpm]과 1800[rpm]에 맞추기 위해서는 기어트레인의 증속비를 각각 9배속과 38배속 정도로 설계해야 한다. 실제, 물받이의 속도는 유속보다 다소 느리며, 특히 부하시에 그 정도가 심해지므로 이를 고려하여 1[kW] 발전기측은 12배속으로, 10[kW] 발전기측은 40배속 정도로 설계하는 것이 좋다. 현재는 여건상 각각 12배속($4 \times 3 \times 1$)과 36배속($4 \times 3 \times 3$)의 기어트레인을 적용하였다. 또한, 기어트레인의 기어비를 설계할 때, 고조시의 유속에 맞추는 것이 좋으나 과도한 증속비로 인해 본 연구의 유수발전 가능성에 초점을 둔 기본 시험에서는 저조시의 유속에 맞춰 설계하였다. 그림 11은 제작된 유수발전장치를 하동화력발전소 방수로에 하강 및 안착시켜 수면에 떠온 상태를 보여준다. 표 4는 시간대별 10[kW] 발전기의 동작상황 즉, 부하에 공급되는 직류출력전압과 발전기 회전수를 나타낸다. 시험일시 및 조건은 2011년 12월 6일(화) 오후 2시 50분, 0.9[kW] 램프부하 상태이며, 고조/저조시간 및 해수면 수위는 각각 06:33(263cm,▲), 12:29(126cm,▼), 18:24(249cm,▲)이다. 즉, 저조시간에서 2시간 20분이 경과한 시간부터 고조시간까지의 측정값이며 전반적으로 160~210[V]의 변동범위를 가지며, 저조시간을 고려하면 경부하시에는 160~230[V]의 출력전압 변동범위를 가질 것으로 추측된다. 또한, 저조시간 고려시 회전수도 약 1,280~1,800[rpm] 범위에서 변화함을 알 수 있으며, 저조시의 유속에 맞춰 설계한 36배속의 기어트레

그림 10 실험시스템 구성도

Fig. 10 The configuration of experimental system

(a)

(b)

그림 11 유수발전장치 설치 장면

Fig. 11 The system's descending and reaching to water surface

인의 적용에 따른 결과와 거의 일치한다. 그림 12(a)는 표 4에서 오후 6시 30분(고조)에 측정한 발전기 선간전압 파형이다. 또한, 이 상황에서 고조 직후 오후 7시에 약 10[kW]의 램프부하를 접속하여 전부하 특성을 확인하였으며, 이때의 발전기 출력선간전압 파형을 그림 12(b)에 나타내었다. 이때 공급되는 부하측 직류전압은 85[V], 직류전류는 27[A], 부하공급전력은 약 2.3[kW]이다. 적용 물받이의 가로×세로 길이가 각각 1.2[m](면적은 1.44[m²])이고 해수와 맞닿는 단면적은 약 1/4인 0.36[m²]이므로 이 경우의 이론적 발전전력은 식 (3)으로부터 2.24[kW]가 되며, 실제로 부하에 공급된 전력값인 2.3[kW]와 거의 일치한다.

표 4 시간대별 발전기 동작상황

Table 4 Operating status of synchronous generator in time intervals

출력 시간	부하전압[V]	회전수[rpm]	부하조건 [kW]
PM 2:50	210	1,650	0.9
PM 4:00	180	1,460	0.9
PM 5:00	170	1,370	0.9
PM 6:00	165	1,300	0.9
PM 6:30	160	1,280	0.9

(a)

(b)

그림 12 발전기 출력선간전압 파형 (a) 경부하 (b) 전부하

Fig. 12 Output line voltages of synchronous generator

(a) light load (b) full load

그림 13은 전부하시 발전기 출력선간전압의 조수간만에 의한 영향을 보여준다. 시험일시는 2011년 12월 7일(수) 오후 3시 50분이며, 조건은 그림 12와 동일하다. 또한, 고조/저조시간 및 해수면 수위는 00:43(81cm, ▼), 07:18(283cm, ▲), 13:18(112cm, ▼), 19:08(257cm, ▲)이다. 그림 13(a)는 고조 2시간 전의 경우이며, 부하측에 공급되는 직류전압 및 전류가 120[V], 29[A]이고 부하공급전력이 3.5[kW], 발전기 출력선간전압 주파수가 250[Hz]로 측정되었으며, 그림 13(b)는 고조 30분 전인 경우로서, 부하측에 공급되는 직류전압 및 전류가 100[V], 25[A]이고 부하공급전력이 2.45[kW], 발전기 출력선간전압 주파수가 190[Hz]로 측정되었다.

(a)

(b)

그림 13 발전기 출력 선간전압 파형

(a) 오후5시 (b) 오후6시 41분

Fig. 13 Output line voltages of synchronous generator

(a) PM 5:00 (b) PM 6:41

마지막으로, 유속이 가장 빨라지는 저조시각에서의 전부 하시 출력을 확인하기 위해 2011년 12월 8일(목) 오후 1시 17분에 물받이 5개만 입수시켰으며, 적용 물받이의 가로×세로 길이는 각각 1[m]이고 해수와 맞닿는 단면적은 약 1/4인 0.25[m²]이다. 또한, 이 날의 고조/저조시간 및 해수면 수위는 01:22(68cm, ▼), 07:56(301cm, ▲), 13:59(99cm, ▼), 19:48(267cm, ▲)이다. 현장여건상, 출력선간전압의 파형은 측정하지 못했으며, 발전기 회전속도는 1,350[rpm], 전력분석기로 측정한 부하공급 직류전압 및 전류가 170[V], 38[A], 부하공급전력은 6.5~6.8[kW]이었으며, 안전문제로 인해 물받이 5개만 설치한 것을 감안하면 현재 설계된 시스템으로 충분히 10[kW] 전력을 공급할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문은 합성섬유 소재의 물받이 및 무한케도 로프, 구동휠, 기어트레인, 동기발전기 및 부체 등으로 구성된 새로운 유수발전시스템을 제안하고 이의 설계 및 제작, 그리고 그 특성에 대해 중점적으로 기술하였다. 본 유수발전장치는 조류나 유수의 흐름에 기인한 유체의 운동에너지를 전력으로 변환하여 특정 부하에 공급하는 기본 시스템이며, 조류속도보다 상대적으로 그 유속 변화폭이 적은 하동화력발전소의 방수로에 적용하여 기본 특성을 분석하였다. 설계된 구

동휠과 기어트레인은 동기발전기와 함께 소형선 형태의 부체위에 설치되어 방수로 수면에 띄워서 설치되며, 구동휠 외주면을 돌아서 설치된 무한케도 로프와 물받이는 유수의 흐름에 따라 회전력을 안정적으로 발생시켜 필요한 전력을 공급할 수 있음을 확인하였다. 또한, 기존의 조류발전시스템에 사용되는 프로펠러나 헬리컬 터빈 방식과는 달리, 무한케도 로프를 길게 구성하여 유수가 흐르는 방향으로 물받이 개수를 늘리면 유수에너지를 효율적으로 포집할 수 있게 되며, 하나의 시스템에 구동휠 및 무한케도 로프를 여러 개 설치하여 병렬로도 구성할 수도 있다. 즉, 시스템 제작 및 설치의 용이성과 융통성이 높은 방식이며, 제작 및 시공비 측면에서도 우수함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 방수로의 평균 단면적에 기초하여 냉각수의 흐름으로부터 도출할 수 있는 최대 유수에너지를 평가하였으며, 제안한 물받이를 갖는 유수발전시스템의 실증시험을 통한 성능특성 분석을 통해 안정적이고 지속적인 발전 타당성과 재생에너지원으로서의 적용가능성을 확인하였다. 본 연구를 토대로, 다양한 형태의 방수로를 갖는 국내외 화력발전소 및 원자력 발전소에 본 유수발전시스템을 적용할 수 있는 추가적인 연구를 진행할 예정이며, 특히, 유속변동을 고려한 최대전력추종 제어 기능을 갖는 전력변환장치의 연구도 아울러 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구의 실증실험을 위해 방수로 및 주변 시설의 사용을 허가해 주시고 많은 자료를 제공해 주신 한국남부발전(주) 하동화력본부 관계자 여러분들에게 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 이상룡 외, 해양의 이해(Essentials of Oceanography), 제 3판, 시그마프레스, 2007.
- [2] Seif Eddine Ben Elghali, Remi Balme, Karine Le Saux, Mohamed El Hachemi Benbouzid, Jean Frederic Charpentier, and Frederic Hauville, "A Simulation Model for the Evaluation of the Electrical Power Potential Harvested by a Marine Current Turbine," *IEEE Journal of Ocean Eng.*, Vol. 32, No. 4, pp.786~797, Oct. 2007.
- [3] S. Benelghali, M.E.H. Benbouzid and J.F. Charpentier, "Comparison of PMSG and DFIG for Marine Current Turbine Applications," *ICEM 2010*, Rome, pp.1~6, 2010.
- [4] You Jiang, Meng Fan Rong and Luo Yao Hua, "Variable Speed Constant Frequency Tidal Current Energy Generation and Control Strategy for Maximum Power Point Tracking and Grid Connection," *SUPERGEN'09*, pp.1~9, 2009.
- [5] 한국남부발전(주) 하동화력본부, 발전소 방류구 발생거품의 효과적 수거방안 연구(최종보고서), 2003. 11.

저 자 소 개

손 영 대 (孫 永 大)

1985년 한양대 전기공학과 졸업(학사).
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
2003년~2004년 미국 Univ. of South Carolina 전기공학과 방문연구교수.
2012년 현재 당 학회 당연직 이사, 동서대학교 전자공학과 부교수.

정 현 식 (鄭 鉉 錫)

1983년 부산대 기계설계공학과 졸업(학사).
1989년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사).
1993년 일본 대판부립대학 경영공학과 졸업(박사).
2003년~2004년 미국 Purdue대학 산업공학과 방문교수,
2012년 현재, 동서대학교 산업경영공학과 부교수.