

해양에너지를 이용한 파력발전시스템

김정환* · 김유택** · 이영호***

1. 서론

20세기 말은 역사에서 물질문명이 가장 발달한 시대였으며, 그 문명을 발전시키고 유지시켰던 것은 석유, 석탄, 천연가스 등의 화석연료였다는 것도 명기하지 않으면 안된다. 지구상의 세계 각국들은 화석에너지를 충분히 사용하여 풍부한 물질 문명사회를 만들었지만 지구환경을 급속도로 악화시키는 결과를 초래하였다. 그리고 산유국은 지구상의 일부 지역에 편재해 있었기 때문에 20세기는 화석연료의 획득을 위한 전쟁이 끊이지 않았던 시대였기도 하였다. 세계 에너지 소비량은 1950년 이후부터 년 3.9%씩 급격히 증가하여 2000년에는 1950년 소비량의 4.7배로 증가하였으며 그 중에서 화석에너지의 사용량은 급격히 증가하였다. 그 원인으로서는 제2차 세계대전 후의 세계적인 공업화 추세와 인구 증가 때문으로 풀이 할 수 있다. 세계의 총인구는 현재 53억명으로써 년 1.7%씩 증가하고 있으며, 현재의 증가속도라면 40년 후에는 2배로 증가할 것으로 전망된다. 차후, 에너지 기기의 효율이 향상되고, 재활용(리사이클)에 의한 에너지 절약 성과가 계속 좋아진다 하더라도 이러한 인구증가와 개발도상국의 공업화에 의한 에너지 수요의 증대 추세는 피할 수 없을 것으로 생각된다.

Holdren(1990)은 21세기에 있어서의 전 세계 에너지 수요량이 2060년에는 현재의 2배에 이를 것으로 예측하였고, 2100년에는 선진국의 에너지 절약과 개발도상국에 있어서의 인구 억제정책이 순조롭게 추진된다고 하더라도 약 30 TW/Year에 달할 것으로 예측하고 있다. 그러므로 전세계적으로나 국내적으로도 유한자원인 화석연

료에만 더 이상 의존할 수 없다는 것은 자명한 일이며, 화석연료의 대량소비가 부른 폐가스, 폐열 그리고 폐기물의 증대에 의한 환경오염이 날로 심각해지고 있다.

21세기 전반에 예상되는 에너지와 환경의 위기를 해결하기 위해서는 화석연료의 사용량을 대폭 절감할 수 있도록 새로운 에너지가 개발되지 않으면 안 된다. 앞으로 세계를 이끌어 갈 기술·경제 대국으로서 의연하게 화석에너지원 수입국으로 안주해 있는 우리나라는 총력을 기울여 새로운 에너지 개발에 몰두하지 않으면 안 된다.

2. 에너지변환 시스템

해양에너지를 이용한 발전시스템에는 바다의 심해와 천해의 온도차를 이용한 해양온도차 발전시스템과 파도의 운동에너지를 이용한 파력발전시스템, 바다의 간만의 차를 이용한 조력발전시스템 등이 있지만 본 고에서는 OWC식의 파력발전 시스템 위주로 설명하였다.

파랑의 이용이란 파가 갖는 에너지를 사회생활에 유용하게 이용하는 것이라 말할 수 있다. 일반적으로 널리 알려져 있는 것은 파랑을 발전으로 변환하는 것이 파력발전이다. 파력발전 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다. “파랑 → 1차변환 → 2차변환 → 발전 → 송전 → 이용”의 순서에 의해 파랑에너지를 전기에너지로 변환하여 이용하는 시스템이다.

파랑이용 시스템의 1차변환은 기본적으로 다섯 종류로 분류할 수 있다. 이는 파랑에 의한 장치의 운동으로서 파랑에너지를 흡수하는 방법과 파랑의 변형을 이용하는 방법으로 대별된다. 전자에는 파랑이 가동물체(movable body)나 진동수주(oscillating water column)에 작용하게 하고 가동물체나 진동수주에 유압장치나 공기터빈 등의 2차변환 장치를 부착하는 ①가동물체형과 ②진동수주형이 있으며, 해중에서 파랑의 수압변동을 흡수하여 공기나 물의 흐름으로 변환한 후 2차변환장치

* 한국조선기자재연구원 연구개발센터

** 한국해양대학교 기관시스템공학부

*** 부경대학교 기계공학부

**** 한국해양대학교 기계정보공학부

E-mail : jhkim@komeri.re.kr

를 운전하는 ③수압면형 (Pressure type)이 있다. 후자에는 수심이 얇은 해역에서 파랑의비선형 영향에 의한 해수의 수평류, 또는 제방으로부터의 월파를 이용해 수차를 운전하는 것과 ④월파형과 방파제 전면 등에서 볼 수 있는 소파공 (wave dissipator works)에 의한 평균수위의 상승인 wave set-up에 의한 해수의 흐름을 이용하는 방식인 ⑤set-up형이 있으며, 그 종류는 표 1에 자세하게 정리하였다.

1차변환장치에서 역학적 에너지로 변환된 파랑에너지를 이용하기 쉬운 에너지 형태로 변환시키기 위하여 2차 변환장치가 필요하다. 파랑에너지가 1차변환장치에 의해 기계적 에너지로 바뀐 경우 2차 변환장치는 유압피스톤과 유압모터의 조합으로 이루어지는 것이 일반적이며, 1차변환장치에서 유체 에너지로 바뀐 경우 2차변환장치는 공기터빈 (air turbine)이나 수류터빈 (water flow turbine)이 사용되는 것이 일반적이다.

진동수주형에서 공기실 (air chamber)상부에 공기터빈을 장착하여 운전하는 장치에서는 공기실내 수면의 상하운동에 의해서 공기류의 방향이 변한다. 이 때문에 밸브 기구를 이용하여 공기터빈에 항상 한 방향으로 공기가 흘러 들어가게 하는 방식을 사용한다. 그러나 파력발전용으로 개발된 웰즈터빈 (Wells turbine)은 정류와 원동기 기능을 동시에 행하는 특성을 가진 공기터빈으로서 왕복공기류 중에서 항상 한 방향으로 회전하는 장치이다. 이 웰즈터빈은 전체 시스템을 간소화하기 위해서 널리 이용되고 있다. 공기터빈, 유압모터, 수차 등에 발전기를 연결하면 전력을 생산할 수 있고, 발전기를 연결하면 열에너지를 얻을 수 있다. 2차변환에서 터빈, 발전기를 사용하여 전력을 얻는 방법이 일반적으로 채택되고 있으며, 이는 전력의 이용측면에서 유리하기 때문이다.

파력에너지는 장·단기적으로 변동하기 때문에 이용면에서 문제가 되는 경우가 있다. 따라서 출력에너지를 일정하게 하기 위해서는 1차변환, 2차변환장치에 저장기능이나 평활화 기능을 갖출 필요가 있다. 기능적인 방법으로서 플라이 휠 (flywheel), 유압, 어큐뮬레이터 (accumulator) 등이 있으며, 기체에 대해서는 압력탱크 등을 생각할 수 있다. 소출력 발전기에서는 현재의 축전지와 조합하는 방법이 있지만, 대출력 발전기에 대응하는 축전지는 고가이므로 실용적이지 못하다. 대출력 발전기에 대해서는 기존 기술과 조합하는 방법으로 양수발전과 조합하는 방안이 제시되어 있다.

한편, 해수를 높은 곳에 위치한 저수지로 모아서 저

Table 1 1차변환장치의 분류

1차변환장치	파랑에 의한 장치의 운동	가동 물체형	상하운동
			회전운동
			수평운동
	연성운동		
	연결부체운동		
	진동수주형	공기류	
		수류	
파랑의 변형	수압변형		
	월파형	수류	
		저류	
셋업형	수류		

장기능과 평활기능을 갖게 하는 방법도 있다. 이는 파고를 증폭시켜 월파한 해수를 저수지에 모아 저낙차 터빈 (low head turbine)을 작동시키는 방법이다. 그러나 정격출력 공급을 위해서는 대규모 저수지가 필요하다.

신기술을 이용한 방법으로서 최근 주목을 모으고 있는 고온초전도 기술 등의 이용을 생각할 수 있다. 이 기술은 1차변환에도 응용 가능성이 있지만, 저장면에서 초전도자석과 조합하여 에너지 저장과 출력의 평활화를 위해 이용할 수 있을 것이다. 차후, 고온초전도 기술개발 동향에 주목할 필요가 있을 것이다.

2.1. 파랑에너지 흡수기구

파랑에너지를 흡수하여 발전하는 파력발전장치의 메커니즘은 장치와 파랑의 상호작용을 이해하면 명확해질 것이다. 파랑에너지 이용 장치의 1차변환장치는 다양한 방식이 제안되어 있으나, 여기서는 실용화되고 있는 진동수주형 공기터빈 방식의 파력발전장치를 중심으로 설명한다.

Figure 1에 나타낸 것처럼 파랑 중에 바닥이 열린 공기실을 해면으로 고정하면 파랑에 의해 공기실 내 수주는 상하로 진동하게 되면 공기실 상부의 공기는 진동수주의 운동에 따라 공기실 상부로 출입하게 된다. 이 고속 공기류 중에 공기터빈을 설치하면 회전하게 되고 발전기를 접속시켜 발전하는 방식이다. 여기서는 공기왕복류 중에서도 항상 한 방향으로만 회전하는 장점에 의해 널리 사용되고 있는 웰즈터빈 (Wells turbine)을 사용하고 있다.

파고 H인 파랑의 공기실에 작용하여 기준수위로부터

y만큼 공기실내 수주가 운동한다면 그 운동은 식 (1)에 의해 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$a \frac{d^2 y}{dt^2} = -b \frac{dy}{dt} - cy + H \sin \omega t \quad (1)$$

여기서, a는 공기실 면적과 공기터빈의 노즐 (Nozzle) 면적의 비율에 관계하는 양이며, b는 전력으로 변환하는 것에 의해 수위변동에 미치는 감쇄계수, c는 진동수주의 복원계수, ω 는 파의 각주파수이다.

정상해와 공기실의 진동수주에 의해 얻을 수 있는 출력은 다음과 같이 정리된다.

$$y = \text{Re} \left[\frac{H \epsilon^{j\omega t}}{(c - \omega^2 a) + j\omega b} \right] \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dt} = \text{Re} \left[\frac{j\omega H \epsilon^{j\omega t}}{(c - \omega^2 a) + j\omega b} \right] \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{2} \left[\frac{j\omega b H \epsilon^{j\omega t}}{(c - \omega^2 a) + j\omega b} \right] \left[\frac{-j\omega b H \epsilon^{-j\omega t}}{(c - \omega^2 a) - j\omega b} \right] \quad (4)$$

여기서, $j = \sqrt{-1}$, P는 평균출력, Re는 복소수의 실수부를 의미한다. 특히 $a = 0, c = 0$ 라면 출력은 $H^2/2b$ 로 되어 파고의 2승에 비례하게 된다.

여기서는 진동수주의 상하운동에 대해서만 나타내었으나 복잡한 부채장치는 운동이 6자유도로 되며, 모든 운동에 대한 운동방정식은 각 운동모드 사이에 연성항

을 포함한 연성 운동방정식을 정립하여야 한다. 또한, 계류선의 복원력 계수도 고려하여야 한다.

3. 개발역사

파랑에너지 변환장치의 개발역사는 짧은 편은 아니며, 기록상 최초의 것은 1799년 제라드 (프랑스)가 신청한 특허기록이다. 일본에서도 항만공학의 선구자인 히로이박사가 1918년 파랑에너지 이용연구에 몰두한 바 있으며, 동경제국대학 공학부 교수로서 재직 중이던 1918년부터 1919년 다이토자끼에서 현지 실험을 실시한 바 있다.

그 후, 많은 연구자들에 의해 각종 파랑이용장치가 연구개발되어 왔지만 현재 실용화된 장치는 항로표지용 전원으로 활용되고 있는 파력발전부표가 대표적인 것이다. 그 출력은 60 W 정도로 매우작다.

3.1. 일본

대규모 출력을 목적으로 한 파랑에너지 변환장치에 대한 구체적인 연구가 시작된 것은 1973년의 제 1차 오일쇼크 이후이다. 그 후 수많은 장치가 제안되었으며, 일본, 영국, 노르웨이를 중심으로 기초이론이 정립되었다. 최근에는 기초연구 단계로부터 발전되어 실물 개발이 진행되고 있으며, 일본에서 진행되고 있는 파력발전용 공기터빈의 연구동향은 다음과 같이 요약하였다.

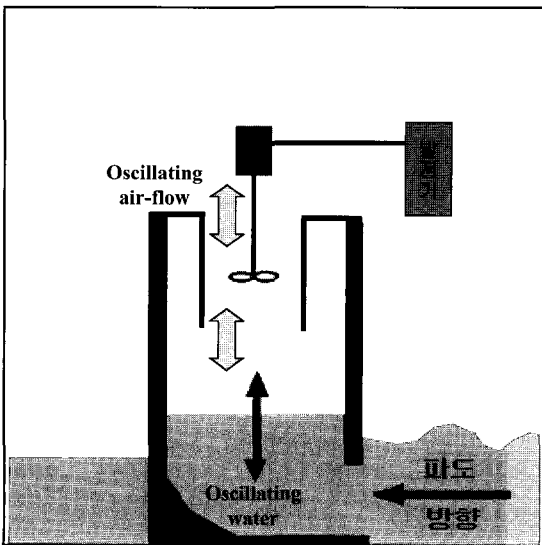


Fig. 1 진동수주형 파력발전

- 1) 1982년 일본 사가대학의 T. Setoguchi 등은 안내깃이 있는 웰스터빈특성과 안내깃과 로터간의 간격 및 안내깃의 솔리디티 (solidity)의 영향에 대해 연구하였으며, 실속을 지배하는 파라미터에 대해서도 연구보고 한 바 있다.
- 2) 1984년 M. Suzuki 등은 유막법에 의해 익 (翼)면상의 유동의 흐름을 가시화하였다. 날개는 fan-shaped 와 rectangular blade를 사용하여 다양한 영각에 대한 유동가시화를 나타내었다.
- 3) 1986년 T. Setoguchi 등은 4종류의 파력발전용 웰스터빈을 토크계수 및 압력계수, 효율 등 다양한 파라미터에 대해 그 성능을 비교하였다.
- 4) 1994년 T. Setoguchi 등은 파력발전용 공기터빈 중의 안내깃이 서로 링크된 유·무에 따른 층동터빈을 서로 비교하였다. 연구발표에 따르면 안내깃이 링크되어 있는 경우가 효율적인 면에서 월등하

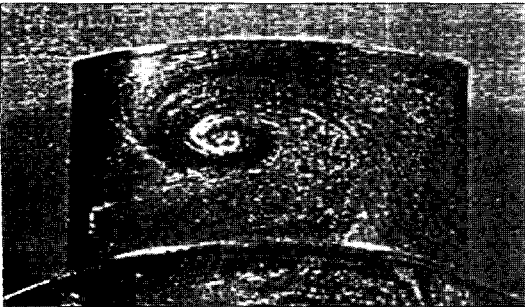
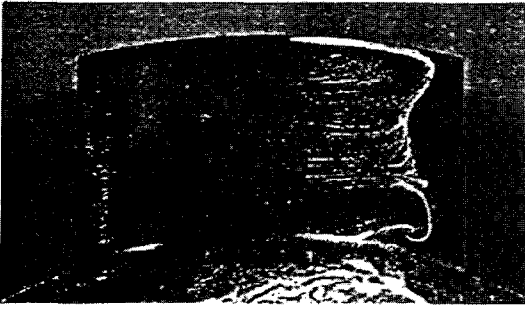


Fig. 2 오일 필름 방법을 사용한 블레이드 표면에서의 유동흐름

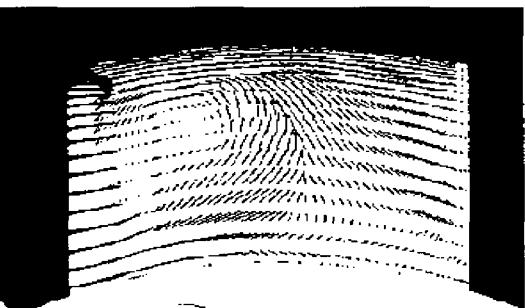
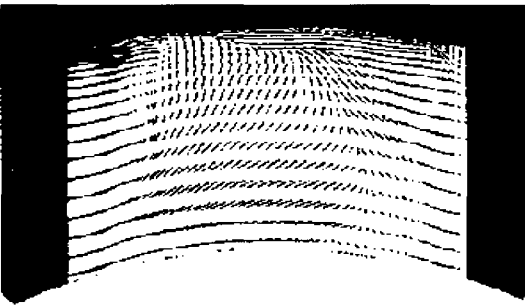


Fig. 3 수치해석을 이용한 블레이드 표면에서의 유동흐름

였으나 터빈의 회전속도에서 볼 때는 안내깃이 링크 되어있지 않는 경우가 회전속도 면에서 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다.

- 5) 1996년 일본 큐슈대학의 M. Inoue 등은 Wells turbine with self-pitch-controlled blades를 공기 흐름의 따라서 setting angle를 변화시켜가면서 그 성능을 측정하여 연구 발표하였다.
- 6) 1998년 T. Setoguchi 등은 웰즈터빈의 히스테리시스 특성에 대해서 연구결과를 발표하였는데 히스테리시스는 솔리디티와 블레이드 두께에 영향이 있고 레이놀드 수, 블레이드 종횡비에 따라서는 영향이 없다는 연구결과를 발표한 바 있다.

3.2. 외국의 연구사례

일본 이외에 파력발전을 연구해 온 대표적인 선진국은 영국과 노르웨이이다. 영국에서는 Salter박사가 1974년 Nature지에 획기적인 파력발전장치를 제안하였다. 영국은 2GW 출력의 파력발전장치를 목표로 하였으나 장기간의 연구개발을 통하여 2GW 장치는 목표 출력치가 높고 초기투자가 과도하게 소요되기 때문에 대형장치개발에 앞서 소형장치 개발로 목적을 변경하였다. 현재, 스코틀랜드 외해에 있는 아이라 섬에서 출력 75kW 급 고정식 파력발전장치를 실험 중에 있다.

노르웨이는 개발 초기부터 1유닛당 출력을 300~500kW를 목표로 하여 개발을 시작하였으며, 이 기술을 이용하여 개발도상국을 원조하기 위한 방안을 수립하고 있다. 현재, 출력 500kW의 다중공진 공기터빈식 장치와 출력 300kW급 월파저수식 장치를 가동 중에 있다. 그리고 인도네시아 및 통가와 이들 설비의 수입계약을 체결하여 인도네시아의 발리섬에 출력 1,000kW의 월파저수식 발전설비를 건설하고 통가에 출력 2,000kW의 다중공진 공기터빈식 발전설비를 건설하겠다고 발표하였다.

- 1) 1996년 J. K. Watterson 등은 웰즈터빈에 사용하고 있는 블레이드 중에서 NACA0012와 NACA0015의 블레이드를 대상으로 유량계수 0.05, 0.1, 0.15, 0.2에서의 터빈의 유동특성과 성능을 예측하였다.
- 2) 1997년 J. K. Watterson 등은 수치해석을 이용하여 블레이드가 6개인 웰즈터빈 로터의 NACA0012와 NACA0015에서 다양한 팁 클리어런스에 대한 블레이드 흡입면에서의 팁 클리어런스에 의해 발생하는 팁 클리어런스 볼텍스 (tip clearance vortex)

유동현상과 터빈의 성능을 다양한 각도로 연구하였다.

- 3) 1998년 S. Raghunathan 등은 솔리디티 (Solidity)의 영향에 대해서 연구하였다. 수치계산에 사용한 솔리디티는 0.32와 0.48, 0.64이며, 이것 중 솔리디티 0.32에서 보다 높은 효율을 보여주고 있다라는 연구논문을 발표하였다.
- 4) 1988년 A. Thakker 등은 CFD를 이용하여 로터를 일정한 각속도로 하에서 다양한 축류속도로 계산을 수행하여 웰즈터빈 로토주위의 유동특성을 다양하게 나타내었다.

3.3. 국내의 연구현황

국내의 파력발전에 관한 연구는 해양연구소 (1983)가 실시한 동해안의 후포 해역에서 파력발전 예비 타당성 조사를 통하여, 조사해역에서 파랑에너지 부존량 (단위 (km)에 부존하는 연간 파랑에너지는 44 GWh)을 계산하여 파력발전의 가능성을 제시하였고, 그 이후 한국전력공사 (1989~1991)에서 실시한 해양에너지 이용 연구에서 죽변과 포항 해역의 파랑에너지 밀도 (두 해역 모두 5 kW/m)를 추산, 파력발전 가능성을 확인하였다.

또한 한국전력공사 (1994)는 파력발전 장치 개발을 통한 연안 및 도서지역 소규모 전력수요 충당을 목표로 60 kW급 OWC를 개발하였다.

1999년 김정환 등은 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 웰즈터빈의 성능에 영향을 주는 팁 클리어런스(팁과 영각에 대해서 다양한 계산을 시도하여 유동장의 유동패턴을 해석하였으며, 이러한 유동해석

을 바탕으로 웰즈터빈의 성능향상을 위한 성능변수인 기하하적인 조건들에 대하여 Parametric study를 행하였다.

4. 개발 현황

4.1. 일본

- 1) 연안 고정식 파력발전 시스템 (coastal fixed type wave power system) 『미쯔세형』 (진동수주형 · 공기류)

야마가타현 미쯔세해안의 바위 절벽에 공기실을 고정하고 발전기 축의 양쪽에 웰즈터빈을 장착한 탠덤 (tandem)배치형이다. 이에 대한 실험은 1983년~1984년에 걸쳐 실시되었으며, 동절기 동안 평균출력은 약 11 kW였다. (Fig. 5) (일본 신기술개발 사업단, 해양과학기술센터, 미쯔이조선, 후지전기)

- 2) 파력을 이용한 열회수 시스템 (heat collection by wave power) (진동수주형 · 공기류)

파력을 이용한 열회수 시스템은 공기류가 Wells 터빈에 직접 연결된 발열장치를 작동한다. 현지실험은 1986년~1987년에 걸쳐 니이카타현 네야어항의 기존 시설된 방파제 전면에 콘크리트제 공기실을 만들어 에너지를 얻었다. 취득된 열에너지는 10~30 kW였다. (일본 타이세이 건설)

- 3) 소파장치형 정압화탱크 방식 (wave dissipator type constant pressure tank) 파력발전시스템 (진동수주형 · 공기류)

여러 공기실에서 얻어진 압축공기를 정압화 탠

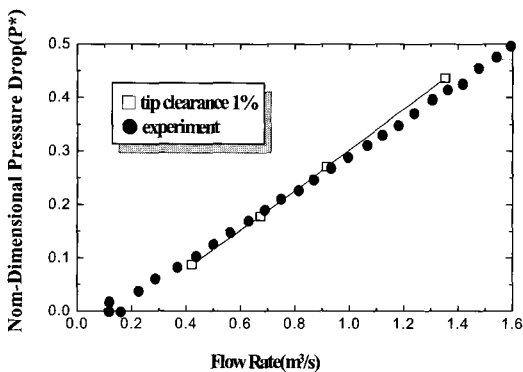


Fig. 4 Comparison of experimental and numerical pressure drops across the turbine

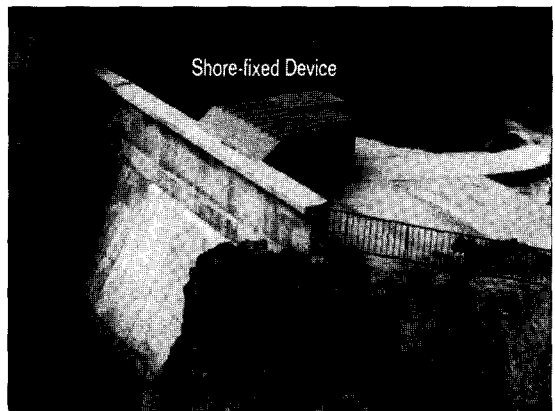


Fig. 5 연안 고정식 파력발전 시스템

크에 모아서 변동성을 평활화시킨 후 공기터빈 · 발전기로 보내서 안정된 발전을 하기 위한 장치이다. 1987년에 치바현 야마다케군 쿠주쿠리정에 최대출력 30 kW의 실증설비를 건설하여 실험역 검증실험을 실시하였다.

(일본 (재)엔지니어링진흥협회 · 쿠주쿠리정 · 타케나카공무점 · 카와사키제철)

4) 파력발전 케이슨방파제

혼성방파제 (composite breakwater)나 케이슨식 호안으로써 사용할 수 있도록 공기실을 케이슨으로 일체화한 것도 있다. 1988년에 야마가타현 사카타항 북방파제에 이 파력발전 케이슨 방파제를 시설하고 텐덤 웰즈터빈과 발전기를 조합하여 60kW로 발전하고 1995년부터 육상의 계통전원과 접속하여 운전 중에 있다.

(일본 운수성 항만기술연구소 · 제1항만건설국)

5) 물밸브 집약식 파력발전시스템 (wave power system by water valve reciter) (진동수주형 · 공기류)

여러 공기실에서 얻어진 왕복 공기류를 공기의 압력에 의해서 개폐되는 물 밸브를 이용하여 정류함으로써 공기력을 일방향 흐름으로 집약하고 1대의 터빈발전기를 구동하는 발전시스템이다. 동북 전력 하라마찌에 위치한 화력발전소의 남방파제에 공기실을 설치하고 1996년부터 출력 130 kW장치에 대한 현장실험 중이다. (일본 토호쿠전력 · 전력기술연구소)

6) 고정식 등대용 파력발전장치

공기실은 등대의 원형기초 중심부를 둘러싸는 선형으로 되어 있으며, 저파랑시의 출력을 고려하여 직경 800 mm의 웰즈터빈을 사용하여 각종 발전실험을 실시하고 있다. (일본 해상보안청 등대부 · 운수성 선박기술연구소 · 녹성사)

7) 파력발전장치 「카이메이」 (진동수주형 · 공기류)

전장 80m, 폭 12m, 총 중량 800톤의 선형 부체에 13칸의 공기실을 설치하였다. 공기실은 입사파의 진행방향에 따라 배치되며, 정격 125 kW급 터빈 발전기가 8실에 탑재되었다. 이 발전장치는 야마가타현 쓰루오카시 유라 외해 3km에 계류되어, 1978년, 1979년, 1985년에 각각 개량을 해 가면서 실험을 실시하였다. (일본 해양과학기술센터)

8) 마이티 웨일 (mighty whale) (진동수주형 · 공기류)
다수의 공기실이 파 입사방향과 직각으로 배치

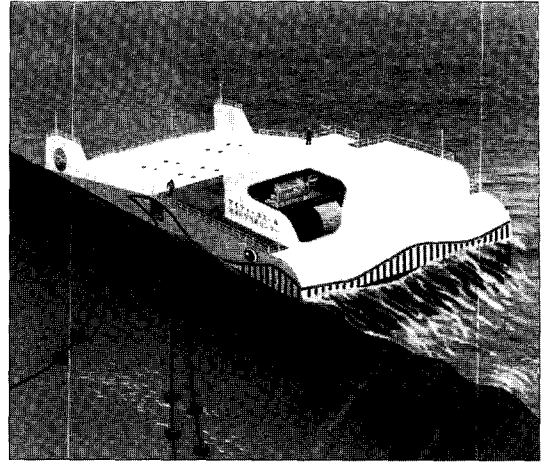


Fig. 6 마이티웨일(mighty whale)

하고, 그 후방은 부력실과 경사면으로 구성되어 있다. 파랑에너지 이용과 장치 배후해역의 정온화를 통하여 해역이용을 고도화하려는 다목적 이용형 파력발전장치이다. 실험역 실험용으로서 폭 30m, 길이 50m의 실험 장치를 건조하여 1998년부터 미에현고카쇼만 입구에서 실험을 실시하였다. (Fig. 6) (일본 해양과학기술센터)

9) 항로표지 부표 (navigation buoy) 파력발전장치 (진동수주형 · 공기류)

파에 의한 부표의 상하운동과 부표 중앙에 위치한 긴 중앙 파이프 속에서의 해수의 상대운동을 이용하여 파이프 내에서 공기류를 발생시켜 이용하는 시스템이다. 여기에 사용하는 공기터빈은 공기정류 밸브 (air rectifying valve)를 필요로 하는 충동터빈과 이를 필요로 하지 않는 웰즈터빈 장치가 있으며, 일본을 비롯한 다수 국가에 수천대가 가동 중에 있다. (일본 해사아보안청 등대부 공무과 · 녹성사)

10) 후면 곡형 덕트 (duct)부표

공기실의 덕트가 입사파의 반대쪽에 위치하며 L자형으로 굽어진 부표형식의 장치이다. 흡수가 얇기 때문에 연안에서 이용이 가능하며, 일본의 기술지원 아래 중국에서 출력 5kW급 장치를 개발하였다. (일본 메카니컬플라넬트 · 녹성사)

11) 파동펌프

외해 측에 개구부를 가진 직사각형 케이슨 내부에 연직운동만을 허용하는 가동부체를 부유시켜 놓고, 부체에는 유량 제어형 밸브를 부착한 양

수 펌프를 시설하여 파랑에 의한 부체의 상하운동에 의해 해수를 양수하는 장치이다. 이에 대한 대축척 모형실험과 양수량의 이론해석이 행하여졌다. (일본 카시마건설)

4.2. 일본 외 다른나라

1) Kvaerner MOWC (노르웨이)

북해에 면한 절벽을 깎아 50 m²의 콘크리트제 공기실을 시설하여 이용하며, 공기실은 입사파랑과 다중 공진에 의해 출력을 증대시키기 위한 harbor 구조 (입사파의 물을 집중시키기 위한 구조)를 갖춘 다중공진식 진동수주형 (MOWC) 파력발전장치이다. 공기실 위에는 강재로 제작된 air duct를 부착하고 그 상부에 직경 2m 웰즈터빈을 장착하여 순간 최대출력 1,000 kW, 정격출력 500 kW를 발전하는 장치이다. 발전전력은 AC→DC→AC로 변환하여 수요계통으로 공급한다.

2) Tapchan (노르웨이)

나팔관 모양의 길이 90m 수로를 이용하여 파고를 증폭시키며 배후 저수지로 해수를 모은 후, 저수지 수면과 해면 간의 3~8m 낙차를 이용하여 발전하는 방식이다. 저수지 면적은 약 8,500 m²이며 발전에 사용하는 낙차 카프란 수차는 낙차 3m에 대해 유량 14~16 m³/sec의 성능을 갖는다. 정격출력은 350 kW이며, 현재 운전 중에 있다.

3) 아이라 연안고정식 (영국)

헤브리즈 가까이에 위치한 아이라 섬에 자연지형을 이용하여 공기터빈방식의 공기실을 건설하고

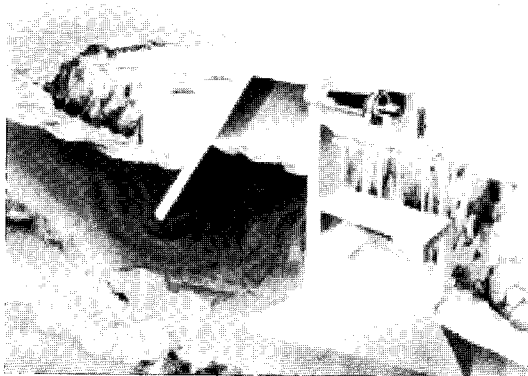


Fig. 7 아이라 연안 고정식 파력발전시설

2단 웰즈터빈과 발전기를 사용하여 운용 중에 있다. 최대 출력은 75 kW이지만 차후 150 kW로 향상시킬 예정이며, 현재 가동 중이다. (Fig. 7)

4) 국립기술연구소 OWC 진동수주식

OWC 진동수주식 파력발전장치를 구성하기 위해 국립기술연구소에서는 공기실을 방파제에 집어 넣는 방식과 부체구조물에 넣는 두 가지 방식을 제안하고 있다. 장치는 콘크리트 구조로 제작되며, 공기는 공기실로부터 터빈을 지나 대기 중으로 배기된다. 터빈은 충동형을 고려하고 있으며, 공기 정류판을 필요로 한다. 부체식의 경우 1 유니트의 길이는 263 m, 정격출력은 14.4 MW이며, 방파제의 경우 1 유니트의 길이는 64 m, 정격출력은 4.7 MW이고 설치 수심은 21 m이다. 공기터빈은 각 공기실마다 한 대씩 설치한다.

5) Belfast OWC식 파력발전장치 (영국)

Belfast의 퀸즈대학을 중심으로 개발된 장치로서 해저 고정식의 진동수주 (OWC)형 장치가 있다. 2개의 진동수주가 다른 공기실을 유니트화한 방식을 제안하고 있으며, 공기실은 “J”형상을 하고 있는 것이 특징이다. 해저부는 직경 64 m, 흡수부는 직경 30 m, 정격출력은 4.8 MW이며, 설치수심은 34 m로 되어있다.

6) Sea clam type (영국)

장치의 개요는 콘크리트제의 척추형 골격 외측에 공기주머니를 배치하여 전체 장치를 해면상에 띄우는 방식이다. 파에 의해 주머니 내의 공기가 밀려나와 터빈을 돌리고, 본체의 내부로 들어가는 폐쇄식 시스템이며 공기터빈은 웰즈터빈을 사용한다. 현재는 공기주머니를 링크형식으로 배열하는 방식에 대해서 연구 중에 있다. 1 유니트의 길이는 290 m, 공기주머니의 크기는 25 m × 13 m, 정격출력은 10 MW이다.

7) Buoy-piston (스웨덴)

대형 부표 중앙에 피스톤을 장착한 중앙 파이프를 세운 구조이며, 파랑에 의한 부표의 상하운동에 의해 피스톤과 중앙파이프의 상대운동을 이용하는 것이다. 여기서 피스톤 운동을 유체 운동으로 변환하여 펌프수차를 이용하여 발전하는 장치이다. 이 방식은 이미 제품으로서 완성되어 있다.

8) Wave rotor type (스웨덴)

두 개의 긴 수차를 V자형으로 배치하여 수차의 중심축이 흡수선이 되도록 부유시킨다. 수차는 파랑

에 의해 발생하는 부력과 중력 차이에 의해 회전시키는 형식이다. 현재 기본적 특성에 대해 연구 중에 있다.

9) PWECS type (맥커믹 터빈) (영국)

공기터빈 방식의 파력발전장치로서 밸브를 필요로 하지 않는 이중 반전식 공기터빈을 개발하였다. 일본 해양과학기술센터의 카이메이 파력발전장치의 첫 공기실에서 실험역 실험을 실시하였다. 이 터빈과 방파제 방식의 조합을 제안하고 있다.

10) Blue rock (아일랜드)

자연적으로 생긴 해안지형 구멍의 윗면을 복개하여 공기터빈을 부착하기 위한 공기실을 제작한 것이다. 현재, 터빈 대신에 노즐을 부착하여 공기출력을 개측 중이며, 장차 웰즈터빈을 부착하여 발전함으로써 등대의 전원으로 이용할 계획이다.

11) 고정형 공기터빈식 (인도)

캘커타의 남방파제 외측에 공기실을 콘크리트 유니트로 만들어 배차하고, 공기실을 harbor형 벽에 부착하여 출력 향상을 시험하고 있다. 1 유니트의 케이슨 크기는 17m × 23m이며, 상부에 직경 2m의 날개 8장을 가진 웰즈터빈을 부착하여 구성한다. 평균출력은 75kW, 최대출력은 150kW를 대상으로 하고 있다.

5. 파력발전용 공기터빈

5.1. 진동수주 (The oscillating water column)

OWC (oscillating water column)는 바다의 파도에서 에너지를 추출할 수 있는데, 바다의 파도에 의해서 발생하는 진동수주의 수위변화가 공기흐름을 발생시키게 하

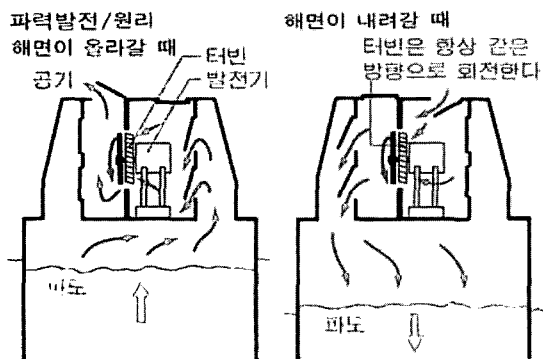


Fig. 8 진동수주형 파력발전

는 장치이다. 이 장치는 바다에 어느 정도 잠겨있는 상태이고 바닥은 바다에 열려있다. Fig. 8에서와 같이 파도가 OWC에 들어오게 되면, OWC내부의 수위는 올라가게 되며 이것에 의해서 공기는 아래에서 위로 올라가면서 터빈을 지나게 되고, 이때의 공기는 터빈의 전연과 후연의 압력차에 의해서 터빈이 회전을 하게 된다. 그리고 반대로 파도가 OWC로부터 나가게 되면 공기는 대기 중에서 OWC 내부로 들어오게 되고 이때도 공기는 터빈을 지나게 되며 터빈이 회전하는 원리는 동일하다. 이러한 방법에서 파도를 통해 터빈으로부터 주기적으로 에너지를 추출하는 것이 가능하다.

5.2. 웰즈터빈

파력발전용 웰즈터빈의 종류는 다음과 같이 4가지 종류가 가장 보편적으로 쓰인다.

- 1) Wells turbine
- 2) Wells turbine with guide vanes
- 3) Turbine with self-pitch-controlled blades
- 4) Biplane Wells turbine with guide vanes

OWC의 장치에서 진동하는 공기흐름의 에너지는 웰즈터빈을 사용하여 추출될 수 있다. 그리고 이 터빈은

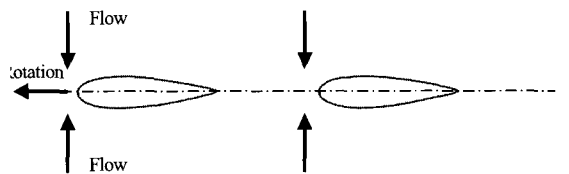


Fig. 9 웰즈터빈

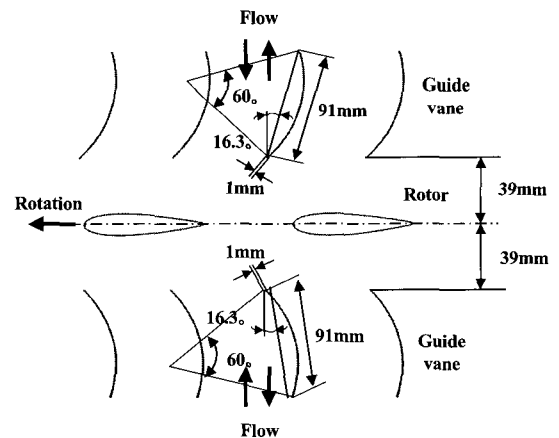


Fig. 10 안내깃 웰즈터빈

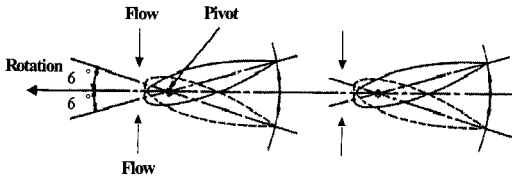


Fig. 11 자기 가변의 웰즈터빈

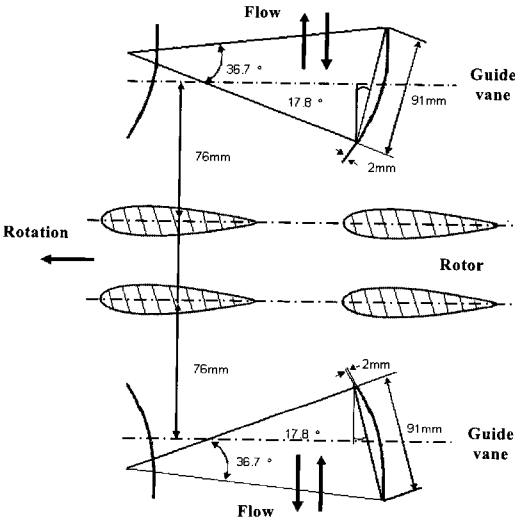


Fig. 12 안내깃 복엽식 웰즈터빈

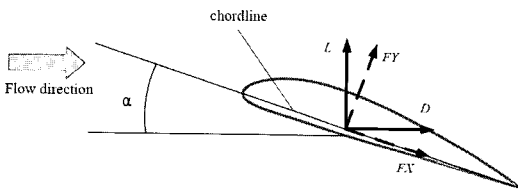


Fig. 13 웰즈터빈 날개에 작용하는 힘

한 방향으로 회전하는 터빈이고 로터 설계는 양방향의 공기흐름에 대해서 한 방향으로 회전하는 것으로만 가능하다.

그 중에서 가장 간단하고 유용한 터빈은 1970년대 중반에 영국의 벨페스트 퀸즈대학 (Queens' University of Belfast)의 웰즈 (Wells)에 의해 개발된 터빈이다. 이 터빈은 날개가 NACA00계열을 사용한 대칭적이고 공기흐름에 대해서 한 방향을 회전하는 대표적인 파력발전용 터빈이다. 그리고 웰즈터빈은 실속 (stall)이 발생되지 않은 일반적인 조건에서 터빈이 작동할 때 익형에서 흔히

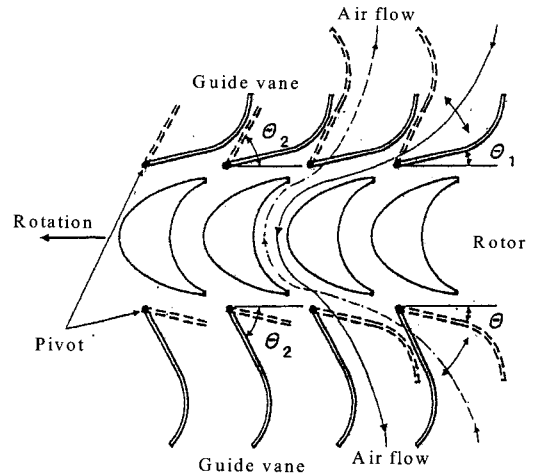


Fig. 14 고정안내깃 충동터빈

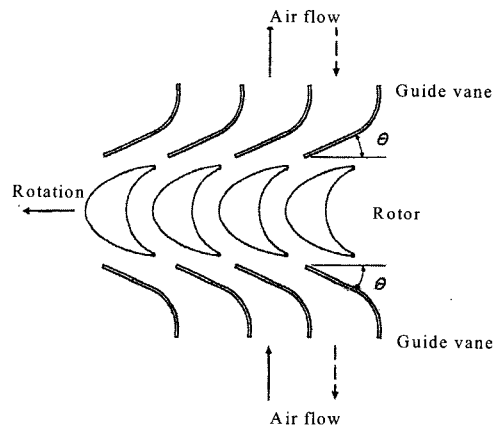


Fig. 15 자기가변 피치 안내깃 충동터빈

발생하는 유사한 형태의 공기흐름이 생긴다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 날개로 들어오는 공기흐름에 의해서 터빈로터에 작용하는 힘 (force)들이 발생함을 알 수 있다.

이 힘들은 수직하게 2개로 발생하게 되는데 상대속도와 같은 방향을 이루는 것이 항력 (drag force, D)이고, 이 벡터와 수직으로 이루는 성분이 양력 (lift force, L)이다. 그리고 Fig. 13에서 FY는 터빈로터의 축 방향으로 발생하는 축력 (axial force)이고, FX는 접선력 (tangential force)을 나타내고 있다. 접선 방향의 힘은 터빈로터가 회전을 할 때 토크 (torque)를 일으키는 힘이 된다.

5.3. 충동터빈

고효율화, 저속화를 실현하는 터빈으로서 충동터빈이

제안되고 있는데 총동터빈의 종류는 다음과 같이 2가지 종류가 있다.

- 1) 고정안내깃 총동터빈
- 2) 자기가변 피치 안내깃 총동터빈

총동형 터빈은 왕복류에 있어서 작동하는 것 같이 동익 전후에 안내깃을 갖고 있다. 안내깃은 피봇 (pivot)회전부에 설정된 설치각의 각도차 ($\theta_2 - \theta_1$)의 범위에서 회전한다. 파에 의한 왕복기류로부터 자동적으로 피칭 (pitching)운동이 가능하도록 피봇위치는 안내깃의 동익측에 있다. 상류측과 하류측의 안내깃은 왕복류에 있어서 축류속도가 작을 때 반전하여 각각 소정의 설치각 θ_1 과 θ_2 로 설정되어, 축류속도가 크게 되면 터빈 작동을 한다.

Figure 14은 총동터빈의 실제구조를 나타낸다. 안내깃의 피봇은 베어링을 사이에 두고 케이싱 바깥으로 나가고 동익 전후의 안내깃을 링크기구에 결합하고 있다.

총동터빈은 웰즈터빈 특성에서 보여지는 실속현상을 동반하지 않으므로 기동 및 작동특성에서 우수하지만 안내깃의 보수면에서 단점이 있다. 이를 극복하기 위해서는 Fig. 15에 나타낸 것처럼 안내깃을 각도 θ 로 고정하는 방법이 제안되고 있다.

6. 파력발전용 공기터빈 성능비교

일본사가대학의 T. Setoguchi교수에 의하면 지금까지 제안된 최적화된 파력발전용 공기터빈을 실용적인 관점에서 테스트를 해본 결과 자기 가변피치를 갖고 있는 총동터빈이 파력발전에 있어서 추천할만한 터빈이라고 하는 연구논문발표가 있다.

Figures 16과 17의 그래프에서 Turbine (a)는 Wells turbine이고 (b)는 Wells turbine with guide vanes, (c)는 Turbine with self-pitch-controlled vanes, (d)는 Biplane Wells turbine with guide vanes, (e) Impulse turbine with self-pitch-controlled guide vanes connected by links이다.

Figure 16은 유량계수 ϕ 에 대해서 토크계수를 보여주고 있는데 Turbine (a) ~ Turbine (d)는 실속 (stall)로 인한 토크계수가 감소하고 있음을 알 수 있으며, Turbine (e)는 실속에 의한 토크계수는 감소하지 않음을 알 수 있다.

Figure 17은 Turbine (a) ~ Turbine (e)까지의 다섯가지의 터빈의 평균효율을 보여주고 있는데 Turbine

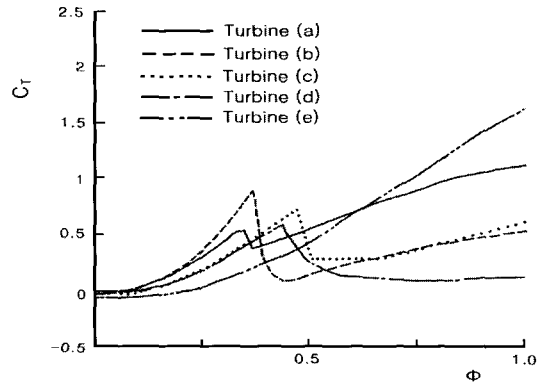


Fig. 16 토크계수 비교

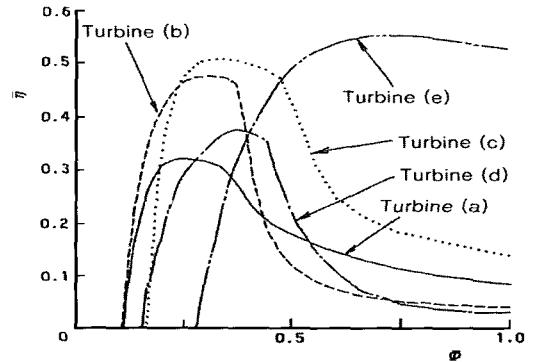


Fig. 17 평균효율 비교

(e)는 넓은 범위의 유량계수에 대해서 효율이 월등히 우수함을 보여주고 있다.

7. 결론

우리나라와 같은 지형적인 면과 화석에너지를 전량 수입하고 있는 여건으로 볼 때, 대체에너지를 개발하는 것은 국가적인 입장에서 누군가가 풀히 해야될 과제임은 자명한 사실이며, 파력에너지를 이용한 발전기술 연구사례를 중심으로 본 고를 정리한 결과 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 1) 국내에서는 아직 파력에너지를 개발에 관한 구체적인 연구가 시도된 바 없지만, 1983년 해양연구소에서 파력발전 예비타당성 조사 결과 파력발전의 가능성을 제시하였다.
- 2) 서해와 남해와 같이 발전단가가 고가인 낙도에 파력을 이용한 자가 발전장치를 설치하여 전기개통

에 관련된 건설비와 유지비를 절감할 수 있으며, 고출력의 부표 전원이나 해양구조물의 보조전원과 방파체에 다목적으로 사용할 수 있다.

- (3) 파력은 무공해 청정에너지이므로 해양환경에도 절대적 기여가 예상된다.
- (4) 지금까지 제안된 파력발전장치의 공기터빈의 실용적인 관점에서 비교해보면 장래에는 충동형 터빈 개발에 관심을 가질 필요가 있고, 체계적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) 류청로, “해양에너지공학” 신기술, pp. 75~123
- (2) 이연원, T. Setoguchi, 김정환, “파력발전용 공기터빈의 성능비교 (A Comparison of Performances of Turbines for Wave Power Conversion),” 대한기계학회 1998년도 추계학술대회 논문집 B., pp. 770~774.
- (3) 이연원, T. Setoguchi, 김정환, “파력에너지 변환 장치의 성능특성에 관한 연구 (A Study on Performances Characteristics of Air Turbines for Wave Power Conversion),” 한국해양공학회 '98년도 추계학술대회 논문집, pp. 38~42.
- (4) 김정환, 김태식, 이형구, 이연원, T. Setoguchi, “비정렬 혼합 격자를 이용한 웰즈터빈의 유동특성 연구 (A Study on Flow Characteristics in the Wells Turbine by Using Unstructured Hybrid Grids),” '99 추계학술대회 논문집, pp. 21~27.
- (5) 김정환, 김태식, 이형구, 이연원, T. Setoguchi, “파력발전용 웰즈터빈의 유동특성에 관한 수치해석 (Numerical Simulation on Flow Characteristics of Wells Turbine for Wave Power Conversion),” 대한기계학회부산지부 1999년도 추계학술대회 논문집, pp.165~170.
- (6) 김정환, 김태식, 이형구, 이연원, T. Setoguchi, “파력발전용 웰즈터빈에 있어서 팁 클리어런스 영향 연구 (A Study on Effects of Tip Clearance in Wells Turbine for Wave Power Conversion),” 대한기계학회부산지부 1999년도 추계학술대회 논문집, pp.110~116.
- (7) 김태식, 김정환, 이형구, 이연원 T. Setoguchi, “파력에너지변환용 충동터빈의 수치해석 (Numerical Analysis of Impulse Turbine for Wave Power

Conversion),” 한국해양공학회 '99추계학술대회 논문집 pp. 36~42.

- (8) 김정환, 김태식, 이형구, 이연원, T. Setoguchi, “CFD를 이용한 파력발전용 웰즈터빈의 유동특성 연구 (A Study on Flow Characteristics of Wells Turbine for Wave Power Conversion Using CFD),” 대한기계학회 1998년도 추계학술대회 논문집, pp. 488~493.
- (9) 김정환, 김태식, 이형구, 이연원, T. Setoguchi, “웰즈터빈에 있어서의 팁 클리어런스 영향 (Effects of Tip Clearance in Wells Turbine),” 한국박용기관학회 '99추계학술대회논문집, pp. 25~31.
- (10) 김태식, 김정환, 이형구, 이연원 T. Setoguchi, “파력발전용 충동터빈에 있어서 안내각의 영향에 관한 연구,” 한국동력기계공학회 '99추계학술대회논문집, pp. 40~46.
- (11) Jeong-Hwan Kim, Hyeong-Gu Lee, Yeon-Won Lee, Toshiaki-Setoguchi, Chang-Soo Kang, “Numerical Analysis of Flow Characteristics in a Wells Turbine for Wave Power Conversion,” International Offshore and Polar Engineering Conference, May 24~29, 2000.
- (12) 鈴木正己, 荒川忠一, 田古里哲夫, “波力發電用ウエルズタービンにおける動翼面上の流れ,” 流れの可視化, Vol. 4, Suppl, 1985.
- (13) 鈴木正己, 荒川忠一, 田古里哲夫, “波力發電用ウエルズタービン性能に及ぼす諸因子の影響,” 第2回波浪エネルギー利用シンポジウム, 昭和62年.
- (14) 鈴木正己, 荒川忠一, 田古里哲夫, “波力發電用ウエルズタービンの動翼面上の流れ,” 流れの可視化, Vol. 5, No. 18, 1985.
- (15) A. Thakker, S. Slater, “A Study of CFD Airflow Predictions in a Wells Turbine,” International Offshore and Polar Engineering Conference, May 24~29, 1998.
- (16) J. K. Waterson, S. Raghunathan, “Investigation of Wells Turbine Performance Using 3-D CFD,” IEEE, 1996.
- (17) J. K. Watterson, S. Raghunathan, “Computed Effects of Tip Clearance on Wells Turbine Performance,” AIAA, January 6-10, 1997.
- (18) J. K. Watterson, S. Raghunathan, “Computed Effects of Solidity on Wells Turbine Performance,”

- JSME International Journal, Series B, Vol. 41, No. 1, 1998.
- (19)鈴木正己, 荒川忠一, “數値解析による波力發電用ウエルズタービンまわりの流れ,” 日本機械學會年次大會, 1999.
- (20) Harris, C.D, “Two-Dimensional Characteristics of the NACA0012 Airfoil in the Langley, 8-Foot Transonic Pressure Tunnel,” NASA Technical Memorandum 81927, April 1981.
- (21) 이봉준, “날개 (에어포일)이론,” 한국항공대학교 출판부, 1998.
- (22) Thompson. Joe. F., Warsi, Z. U. A Warsi, C. Wayne Mastin, 1985, “Numerical Grid Generation,” Elsevier Science Publishing Co.
- (23) T. Hayase, J. A. C. Humphrey and R. Grief, “A Consistently Formulated QUICK Scheme for Fast and Stable Convergence Using Finite-Volume Iterative Calculation Procedure,” J. of Comp. Phys, Vol. 98, pp. 108~118, 1992.
- (24) Patankar, S. V., “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow,” Hemisphere, Washington, D.C. 1980.
- (25) FLUENT Users Manuals, Fluent Inc.
- (26) Budugur Lakshminarayana, “Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery,” Wiley-Interscience, 1996.
- (27) M. Takao, T. Setoguchi, K. Kaneko, M. Inoue., “A Wells Turbine with Guide Vanes for Wave Energy Conversion,” The Fifth Asian International Conference on Fluid Machinery, pp. 511~518, October 6-8, 1997.
- (28) L. M. C. Gato, A. F. de O. Falcao, “On the Theory of the Wells Turbine” Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Vol. 106, pp. 628~633, 1984.
- (29) Falcao, A.F.O., Whittaker, T.J.T. and Lewis, A.W. (1993) JOULEII Preliminary Action: European Pilot Plant Study, Proc., European Wave Energy Symp., pp. 247~257, 1993.



2006 유체 기계 연감

- ▣ 펌프 분야 연구동향
- ▣ 송풍기 분야 연구동향
- ▣ 압축기 분야 연구동향
- ▣ 가스·스팀터빈분야 연구동향
- ▣ 유량계 분야 연구동향
- ▣ 회전체 동역학 및 Tribo 요소의 연구동향
- ▣ 수처리기계 분야 연구동향

