

## 파력발전용 웰즈터빈의 더블플랩에 관한 연구

김정환\* · 김범석\* · 윤수한\*\* · 이연원\*\*\* · 이영호\*\*\*\*

### A Study on Double Flap of Wells Turbine for Wave Power Conversion

J. H. Kim, B. S. Kim, S. H. Yoon, Y. W. Lee and Y. H. Lee

**Key Words** : Double Flap(더블플랩), Wells Turbine(웰즈터빈), Wave Power Conversion(파력발전), Ocean Energy(해양에너지), Fluid Machinery(유체기계), Angle of Attack(영각)

#### Abstract

A numerical investigation was performed to determine the effect of airfoil on the optimum flap height using NACA 0021 Wells turbine. The five double flaps which have 0.5% chord height difference were selected. A Navier-Stokes code, FLUENT, was used to calculate the flow field of the Wells turbine. The basic feature of the Wells turbine is that even though the cyclic airflow produces oscillating axial forces on the airfoil blades, the tangential force on the rotor is always in the same direction. Geometry used to define the 3-D numerical grid is based upon that of an experimental test rig. This paper tries to analyze the optimum double flap of Wells turbine with the numerical analysis.

#### 1. 서론

파력발전은 바다라던 어느 곳이나 산재되어 있는 무공해, 무한정의 파도를 이용하므로 환경에 미치는 영향이 거의 없고, 장래 경제성에 있어서 뛰어난 대체에너지로서의 잠재력을 가진 파력에너지를 이용한 발전 기술 연구는 파력자원이 풍부한 일본, 영국, 노르웨이 등에서 활발하게 추진되고 있다. 파력발전은 심한 출력변동과 대규모 발전 플랜트를 해상에 계류시키는데 기술적인 어려움이 있으나 2010년까지는 상용발전이 가능한 것으로 전망되고 있다.

일본은 Kaimei(海明)에 240kW급의 해안 고정식 파력발전 장치를 설치하여 시험가동하고 있으며, 해양과학 기술센터의 주관으로 54kW급의 부유식 파력발전소 건설을 진행하고 있다. 영국은 Queen's University of Belfast에 75kW급 파력 발전 장치를 설치가동 중이고, 노르웨이, 덴마크에서도 이와 같은 발전소 건설을 추진 중에 있다.<sup>1)</sup> 따라서 우리나라와 같이 많은 해안선을 가지고 있는 지형특성을 고려해 볼 때 파력에너지는 매력적인 자연에너지인 것은 분명하다. 웰즈터빈은 OWC(oscillating water column)의 원리를 이용하는 파력변환장치 중 가장 성공적인 방법의 하나로 알려져, 현재 가장 널리 사용되어지고 있는 자력 공기 터빈이다.<sup>2)</sup> Fig. 1에서와 같이 웰즈터빈은 축 둘레에 일정한 슬리디티의 캠버가 없는 날개로 이루어져 있다. 날개는 터빈의 축방향에 90°로 설치하면, 터빈은 회전면에 대칭이고 OWC에서 근거리로 한 것처럼 양방향성의 공기유동에 의해서 터빈은 한 방향

\* 회원, 한국해양대학교 대학원

\*\* 회원, 동명정보대학교 로봇시스템공학과

\*\*\* 회원, 부경대학교 기계공학부

\*\*\*\* 회원, 한국해양대학교 기계·정보공학부

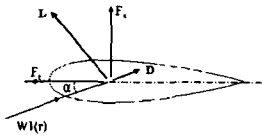
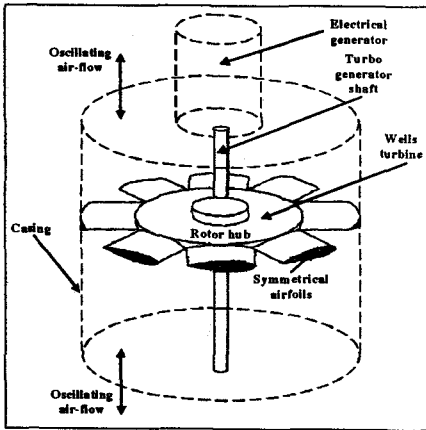


Fig. 1 Schematic of Wells turbine

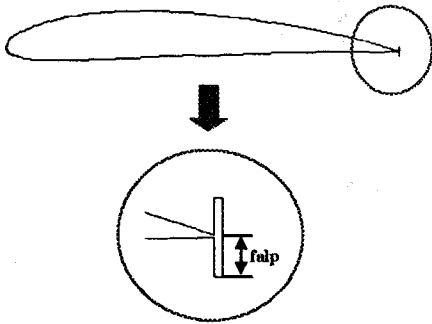


Fig. 2 Double flap

으로 회전을 한다.

웰즈터빈의 대한 수치계산은 거의 이루어져 있지 않으며 영각(angle of attack)대한 연구가鈴木正己<sup>3)</sup>등에 의해 연구된바 있다. 여기에서의 계산은 영각 19°와 30°의 높은 영각에서 계산을 수행하였으며 본 연구에서는鈴木正己의 수치해석과 비교를하고 Fig. 2에서와 같이 새로 고안한 더블플랩 웰즈터빈을 더블플랩 크기를 0.5%에서 2%까지 변화를 시켜 계산을 수행하여 최적의 더블플랩 크기와 영각과 더블플랩에의 유동특성을 규명하는

데 그 목적을 두고 있다.

본 논문에서는 CFD코드인 FLUENT를 사용하여 웰즈터빈의 몇몇 실험데이터의 유동모델을 생성하기 위한 시도이며, 본 논문에서 행한 연구는 웰즈터빈 실험장치에서 사용한 챔버가 없는 날개 주위 3차원 웰즈터빈의 형상을 모델링하고 계산을 수행하였다.

## 2. 계산조건

### 2.1 수치해석 코드

FLUENT<sup>4)</sup>는 널리 인증 되어있고 연구를 수행하기 위한 필요한 형상이 복잡한 공간에서의 유동해석 능력이 뛰어나기 때문에 웰즈터빈을 모델 테스트하기 위해서 선택되어 졌다. 연속방정식과 운동량방정식은 유한체적법으로 차분화(差分化)하였고 이산화(離散化)된 식의 계산과정은 SIMPLE방식<sup>5)</sup>의 속도-압력보정 알고리즘이 사용되었으며, 격자생성은 싱글블럭(single block)구조이다.

### 2.2 3-D 웰즈터빈의 계산조건

계산 모델은 Fig. 1에 나와 있는 바와 같이 웰즈터빈은 날개수 8개, 솔리디티 0.72의 조건하에 환형 실린더 덕트에 설치되어져있다. 공기는 공기챔버를 통하여 중 모양의 흡입구를 통하여 흡입되고, 터빈을 지나 외부로 빠져나가도록 되어 있다. 이는 1984년에鈴木正己<sup>6)</sup>등이 실험한 웰즈터빈의 모델과 유사한 것이다.

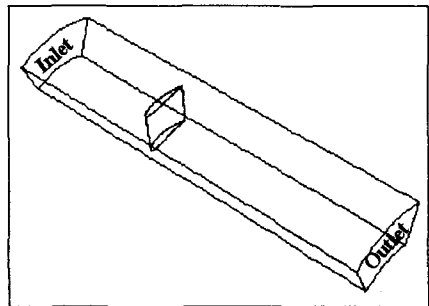


Fig. 3 Computational domain

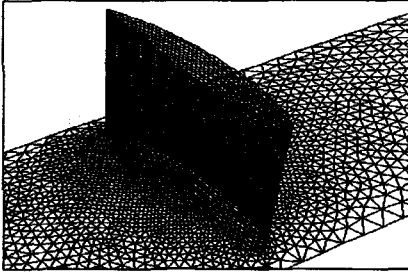


Fig. 4 3-Dimensional grid of a Wells turbine

3-D 격자생성에 있어서 터빈의 형상과 유동형태의 회전적 순환 성질로 때문에 Fig. 3과 같은 개의 날개 주위부분이 모델링 되어졌고, Periodic경계조건을 사용함으로써 8개에 대한 계산조건을 단순화하였다. 그리고 영각은 일정한 회전속도에서의 10° 에서 30° 까지 다양한 경우를 비교 계산하였다. Fig. 4는 날개 표면과 표면 주위의 격자분포를 보여주고 있는데 날개표면에는 사각격자, 날개주위에는 삼각격자로 이루어진 비정렬 혼합격자를 사용하였다. 그리고 격자수는 약 240,000개의 격자로 이루어져있고, 날개표면에서의 격자수는 7600개이다. 난류모델은 RNG k-ε 모델을 사용하였고 Quick스킴을 적용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 5~7은 스즈키의 실험결과와 수치계산한 결과를 비교한 그래프이다. 여기서 나타낸 유량계수  $\phi$ , 토크계수  $C_T$ , 압력강하계수  $\psi$ , 효율  $\eta$  등의 무차원 수들은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\phi = \frac{V_a}{U} = \tan \alpha$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho (U^2 + V_a^2) AR}$$

$$\psi = \frac{\nabla P}{\frac{1}{2} \rho (U^2 + V_a^2)}$$

$$\eta = \frac{C_T}{\phi \psi} \quad (1)$$

각각의 그래프에서 보면 영각 15° 보다 낮은 영각에서는 상당히 정확한 결과값들을 보여주고 있으며, 15° 이상의 영각에서는 영각이 커질수록

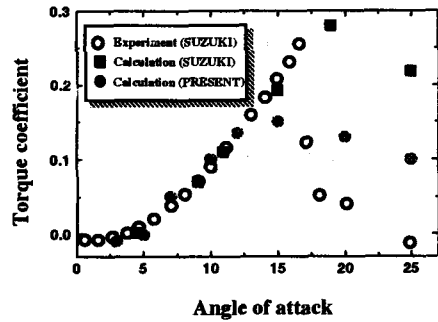


Fig. 5 Torque coefficient against angle of attack

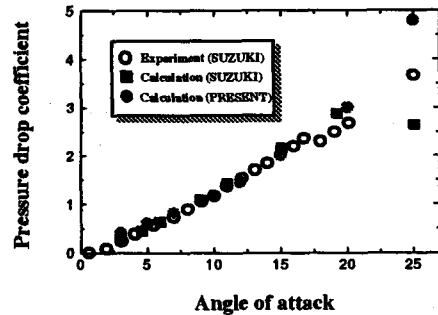


Fig. 6 Pressure drop coefficient against angle of attack

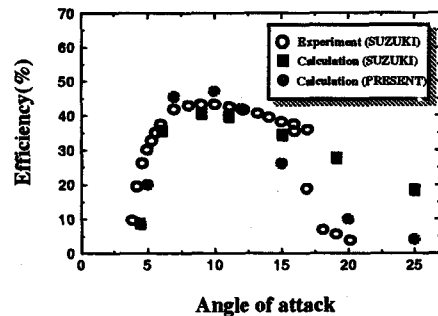
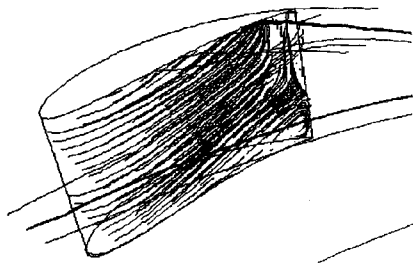
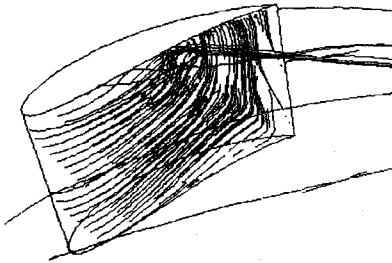


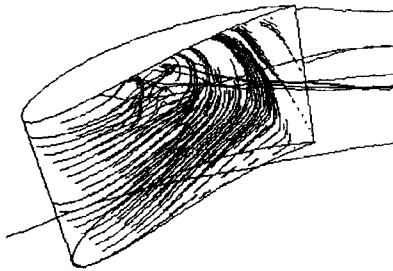
Fig. 7. Efficiency against angle of attack



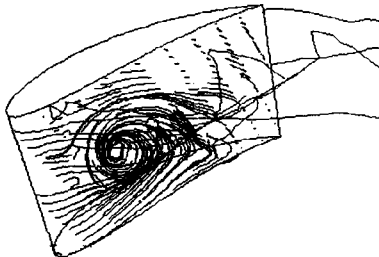
(a) angle of attack=10°



(b) angle of attack=20°



(c) angle of attack=25°



(d) angle of attack=30°

Fig. 8. Streamlines flowing over suction side

실험결과와 오차가 점점 더 커지고 있지만 스크키의 계산결과 보다는 보다 더 정확한 계산결과

를 보여주고 있다.

본 논문에서는 이것을 근거로 하여 서로 다른 더블플랩에 대하여 수치계산을 수행하였다.

Fig. 8은 익수  $z=8$ , 솔리디티  $s=0.72$ , 팁 클리어런스 1%일 때 날개 흡입면에서의 유선분포를 보여 주고 있는데 영각이 증가할수록 팁 근방에서 발생하고 있는 박리점은 후연에서 전연으로 이동하고 있고, 영각이 25° 일 때부터 전연에서 후연으로 향하던 유동방향이 전연으로 향하기 시작하고 있는 것을 관찰할 수 있으며, 영각 30° 에서는 날개 흡입면 중심부 전체에 걸쳐 크고 강한 와류가 관찰되고 있다.

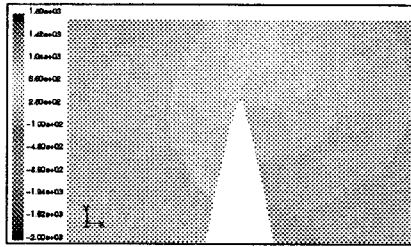
Fig. 9는 익수  $z=8$ , 솔리디티  $s=0.72$ , 영각  $\alpha=12^\circ$  의 조건하에서 더블플랩 0.0%에서 2.0%까지 변화할 때 흡입면에서의 압력분포에 대한 결과를 보여주고 있는데, Fig. 9의 결과를 보면 더블플랩이 증가할수록 날개의 후연의 pressure side부분에서 압력이 높아지고 있다. 웰즈터빈은 pressure side와 suction side의 압력차로 부터 발생하는 양력에 의해서 회전하기 때문에 더블플랩이 커질수록 터빈의 성능이 우수해짐을 압력분포로서도 알 수 있다.

Fig. 10~12은 다양한 더블플랩에 대한 토크계수와 압력강하계수 그리고 효율을 나타내고 있다. 더블플랩이 커지면 커질수록 토크계수, 압력강하계수는 높아지는 경향을 보이고 있지만 효율은 더블플랩 0.5%에서 가장 높은 효율을 보이다가 0.5%이후에서는 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이것으로 보아 더블플랩을 장착하지 않을 때 보다는 장착했을 때 그 효율은 높아지고 최적의 더블플랩은 약 0.5%가 적절하다는 것을 알 수 있다.

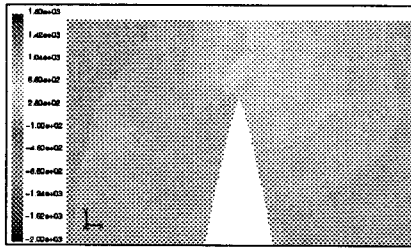
#### 4. 결론

본 연구에서는 영각과 더블플랩의 영향에 대한 파력발전용 웰즈터빈의 유동특성을 수치해석을 통해서 다음과 같이 결론을 얻었다.

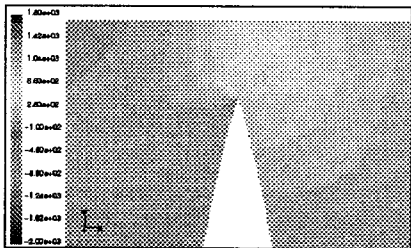
1) 낮은 영각에서 높은 영각으로 갈수록 웰즈터빈의 날개주위 흐름은 팁 방향으로 향하고 있으며, 영각 25° 에서부터 전연으로 향하기 시작한다. 그리고 영각 30° 에서는 날개 중심부에서 대단히 큰 와(vortex)류가 형성되고 있으며 이러한 결과로 볼 때 일정한 유량에서 실속을 억제하기



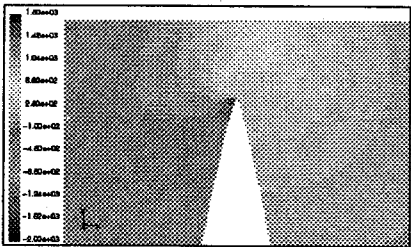
(a) double flap=0.0%



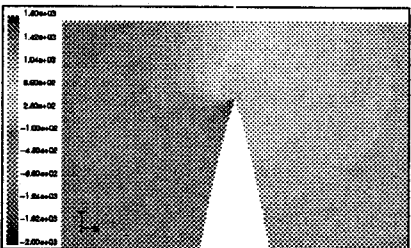
(b) double flap=0.5%



(c) double flap=1.0%



(d) double flap=1.5%



(e) double flap=2.0%

Fig. 9 Pressure distribution around trailing edge

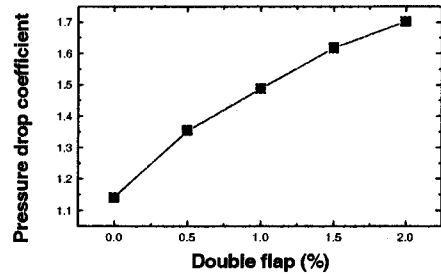


Fig. 10 Torque coefficient against double flap

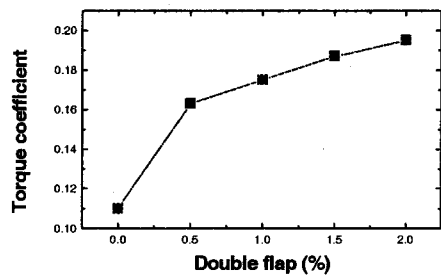


Fig. 11 Pressure drop coefficient against double flap

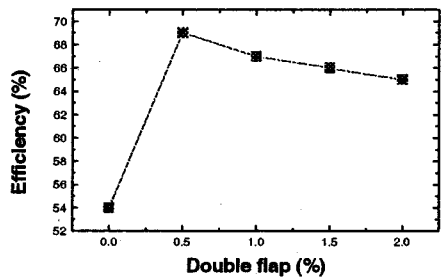


Fig. 12 Efficiency against double flap

위해서는 낮은 유량에서도 고속으로 회전할 수 있는 터빈 개발이 시급하다.

2) 더블플랩이 커질수록 pressure side의 압력과 suction side의 압력차는 점점 더 커지고 있음을 알 수 있었다.

3) 웰즈터빈의 수치계산에 의하면 유동특성과 터빈의 효율적인 측면에서 적절한 더블플랩의 크기는 약 0.5%정도가 적절함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) C. L. Ryu, "Ocean energy engineering" New technique, pp. 75~123.
- (2) Falcao, A.F.O., Whittaker, T.J.T. and Lewis, A.W.(1993) JOULEII Preliminary Action : European Pilot Plant Study, Proc. 1993 European Wave Energy Symp., pp. 247~257.
- (3) M. Suzuki, C. Arakawa., 1999, "Numerical Simulation of Flow around Wells Turbine for Wave Power Generator", Procs. of 1999 JSME Annual Meeting (No.99-1), pp. 199~200.
- (4) FLUENT Users Manuals, Fluent Inc.
- (5) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow" Hemisphere, Washington, D.C.
- (6) M. Suzuki, C. Arakawa, T. Tagori., 1999, "Wells Turbine Flow the Rotating Blade for Wave Power Genertor" Journal of the Flow Visualization Society of Japan, Vol.4, Suppl, pp. 51~56.
- (7) L. M. C. Gato., A. F. de O. Falcao., 1984, "On the Theory of the Wells Turbine" Journal of Engineering for Gas Turbines and Power vol.106 pp. 628~633.
- (8) Takao. M. and Setoguchi. T., 1996, "Performance of Wells Turbine with Guide Vanes for Wave Energy Conversion" Journal of Thermal Science, Vol. 5, pp. 82~87.
- (9) A. Thakker., S. Slater., "A Study of CFD Airflow Predictions in a Wells Turbine" International Offshore and Polar Engineering Conference May 24~29 1998.