

CFD 에 의한 파력발전용 웰즈터빈의 팁 클리어런스에 관한 연구 A Study on Tip Clearance of Wells Turbine for Wave Power Conversion by CFD

김정환¹ · 김동균² · 문종춘³ · 남청도⁴ · 이영호⁵
J. H. Kim¹, D. G. Kim², J. C. Moon³, C. D. Nam⁴, and Y. H. Lee⁵

1. 서론

최근, 지구환경 보호와 대체에너지 개발을 위한 방안으로서 자연에너지 이용기술이 강조되고 있고 파력, 풍력, 조석, 해류, 태양열등의 자연에너지 이용방안이 연구 개발되고 있다. 특히, 파력은 공해가 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, 해양 과학 기술 센터의 주관으로 54kW급의 부유식 파력발전소 건설을 진행하고 있다.

영국은 Queen's University of Belfast 에 75kW급 파력발전 장치를 설치가동 중이고, 노르웨이, 덴마크에서도 이와 같은 발전소 건설을 추진 중에 있다. 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 공기 터빈이다.

Fig. 1에서와 같이 웰즈터빈은 축둘레에 일정한 슬리디티의 캠버가 없는 날개로 이루어져있다. 날개는 터빈의 축방향에 90° 로 설치하면, 터빈은 회전면에 대칭이고 OWC에서 근거리 한 것처럼 양방향성의 공기유동에 의해서 터빈은 한 방향으로 회전을 한다.

웰즈터빈의 영각(angle of attack)에 대한 수치계산에 의한 연구는 鈴木正巳등에 의해 연구된바 있으며 여기에서의 계산은 영각 19와 30° 의 높은 영각에서 계산을 수행하였다. 그리고 본 연구에서는 영각 10~30° 와 팁클리어런스(tip clearance)는 0%에서 6%까지 계산을 수행하였으며 낮은 영각에서부터 높은 영각까지의 다양한 각도와 팁 클리어런스에 대한 계산을 수행함으로써 그 영각과 팁 클리어런스에 따른 유동 특성을 규명하는데 그 목적을 두고 있다.

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

¹ 한국해양대학교 대학원 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea Maritime University, #1, Dongsam-dong, Youngdo-Ku, Pusan 606-791, Korea)

² 동아대학교 대학원 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Dong-A University, #840, Hadan-dong, Saha-Ku, Pusan 604-714, Korea)

³ 경동정보대학 기계산업시스템계열(Division of Mechanical· Industrial System, Kyung Dong college, #224-1, Buho-ri, Hayang-up, Kyungsan-shi, Kyungsang buk-do 712-900, Korea)

⁴ 한국해양대학교 기관시스템공학부(Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University, #1, Dongsam-dong, Youngdo-Ku, Pusan 606-791, Korea)

⁵ 한국해양대학교 기계· 정보공학부(Division of Mechanical and Information Engineering, Korea)

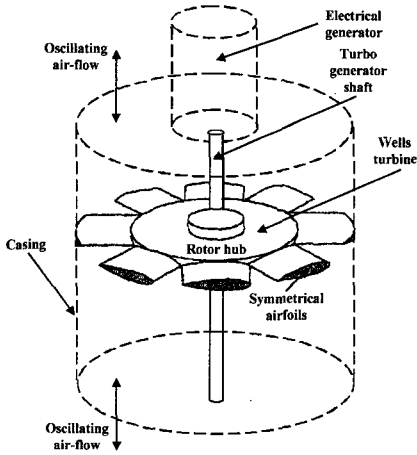


Fig. 1 Schematic of Wells turbine

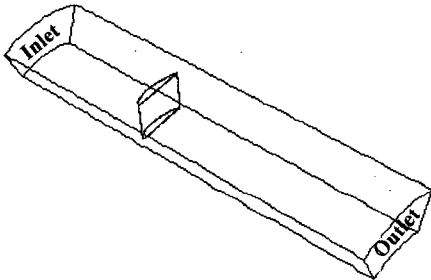


Fig. 2 Computational domain

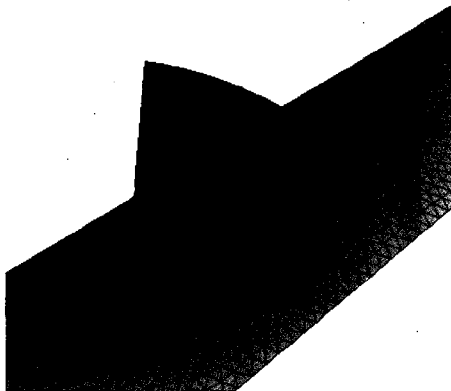


Fig. 3 3-Dimensional grid of a Wells turbine

2. 계산조건

2.1 수치해석 코드

FLUENT는 널리 인증 되어있고 연구를 수행하기 위한 필요한 형상이 복잡한 공간에서의 유동해석 능력이 뛰어나기 때문에 웰즈터빈을 모델테스트하기 위해서 선택되어 졌다. 연속방정식과 운동량방정식은

유한체적법으로 차분화(差分化)하였고 이산화(離散化)된 식의 계산과정은 SIMPLE 방식의 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 종 모양의 흡입구를 통하여 흡입되고, 터빈을 지나 외부로 빠져나가도록 되어있다. 이는 1984년에 鈴木正己등이 실험한 웰즈터빈의 모델과 유사한 것이다.

3-D 격자생성에 있어서 터빈의 형상과 유동형태의 회전적 순환 성질 때문에 Fig. 2와 같이 한 개의 날개 주위부분이 모델링 되어졌고, Periodic경계조건을 사용함으로써 8개에 대한 계산조건을 단순화하였다. 그리고 영각은 일정한 회전속도에서 10° 에서 30° 까지 다양한 경우를 비교 계산하였다. Fig. 3은 날개 표면과 표면주위의 격자분포를 보여주고 있는데 날개표면에는 사각격자, 날개주위에는 삼각격자로 이루어진 비정렬 혼합격자를 사용하였다. 그리고 격자수는 약 220,000개의 격자로 이루어져있고, 날개표면에서의 격자수는 9800개이다. 난류모델은 RNG k-ε 모델을 사용하였고 Quick스킵을 적용하였다.

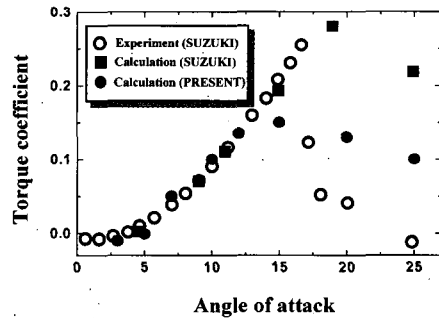


Fig. 4 Torque coefficient against angle of attack

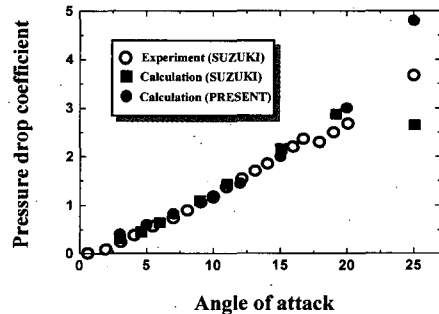


Fig. 5 Pressure drop coefficient against angle of attack

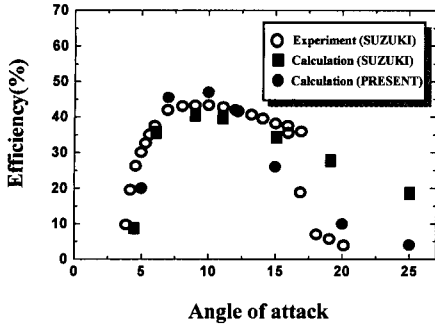
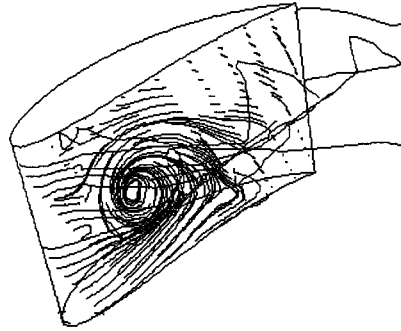
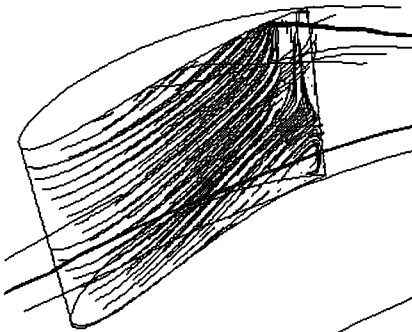


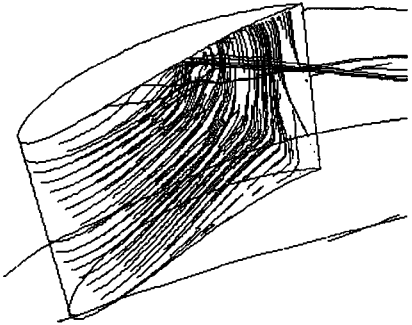
Fig. 6 Efficiency against angle of attack



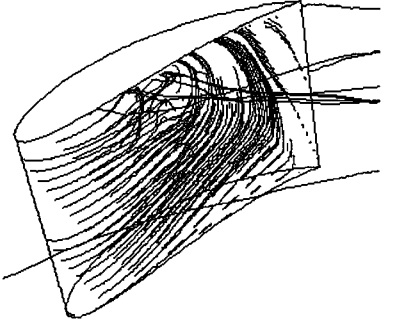
(d) angle of attack=30°
Fig. 7. Streamlines flowing over suction side



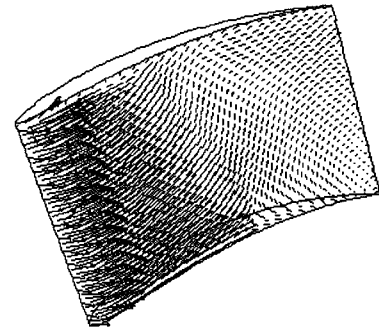
(a) angle of attack=10°



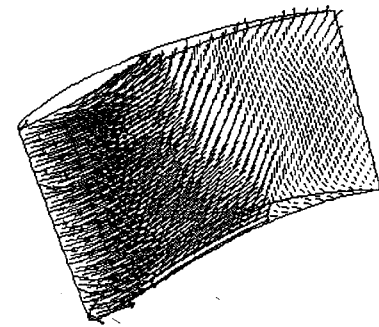
(b) angle of attack=20°



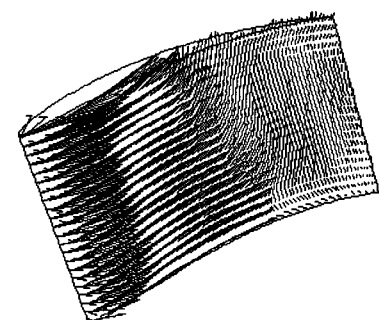
(c) angle of attack=25°



(a) Tip clearance = 0%



(b) Tip clearance = 2%



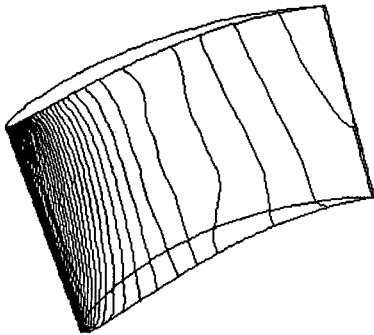
(c) Tip clearance = 6%

Fig. 8 Velocity vector on suction side

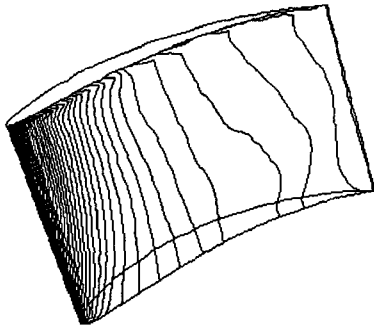
3. 결과 및 고찰

Fig. 4~6은 스즈키의 실험결과와 수치계산 한 결과를 비교한 그래프이다. 여기서 나타낸 유량계수 ϕ , 토크계수 C_T , 압력강하계수 ϕ , 효율 η 등의 무차원 수들은 다음과 같이 정의할 수 있다.

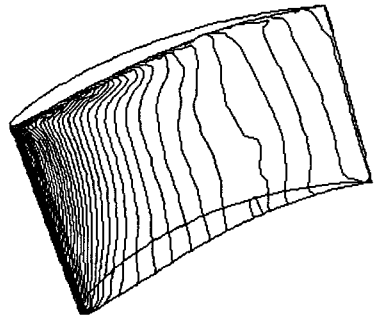
$$\phi = \frac{V_a}{U} = \tan \alpha$$



(a) Tip clearance = 0%



(b) Tip clearance = 2%



(c) Tip clearance = 6%

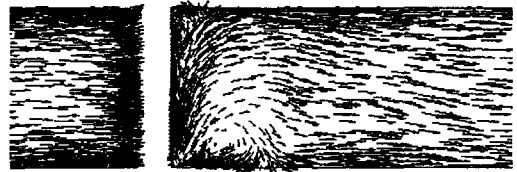
Fig. 9 Static pressure distributions on suction side

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

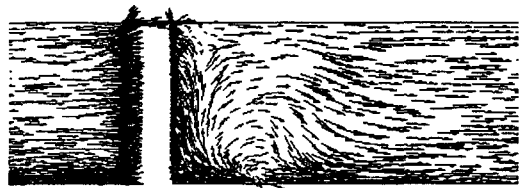
$$\phi = \frac{\nabla P}{\frac{1}{2} \rho (U^2 + V_a^2)}$$

$$\eta = \frac{C_T}{\phi \phi}$$

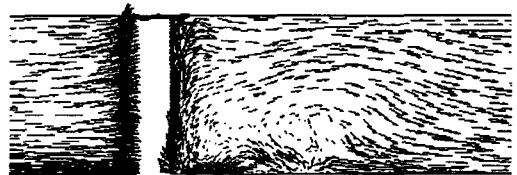
(1)



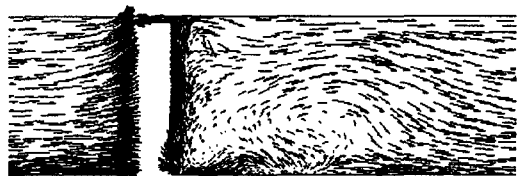
(a) Tip clearance = 0%



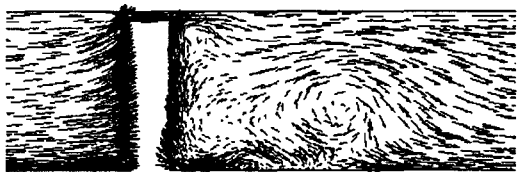
(b) Tip clearance = 1%



(c) Tip clearance = 2%



(d) Tip clearance = 4%



(e) Tip clearance = 6%

Fig. 10 Velocity vectors distributions projected onto a meridional grid plane

각각의 그래프에서 보면 영각 15° 보다 낮은 영각에서는 상당히 정확한 결과값들을 보여주고 있으며, 15° 이상의 영각에서는 영각이 커질수록 실험결과와 오차가 점점 더 커지고 있지만 스키의 계산결과 보다는 보다 더 정확한 계산결과를 보여주고 있다.

본 논문에서는 이것을 근거로 하여 서로 다른 팁 클리어런스에 대하여 수치계산을 수행하였다.

Fig. 7은 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. 8~9는 익수 $z=8$, 솔리디티 $s=0.72$, 영각 $\alpha=12^\circ$ 의 조건하에서 팁 클리어런스가 0%에서 6%까지 변화할 때 흡입면에서의 속도벡터와 압력분포의 유동특성을 보여주고 있는데, Fig. 8의 결과를 보면 날개의 후연부분의 근방에서 광범위하게 박리영역이 나타나며, 또한 회전에 의한 원심력의 영향으로 날개의 후연으로 갈수록 반경방향으로의 흐름이 강하게 나타난다.

그리고 팁 클리어런스가 증가할수록 가장 큰 회전 방향 속도가 날개 팁(tip)에서 존재할 수 있으므로 이로 인하여 날개 팁면의 증대된 운동량이 박리를 보다 후연쪽으로 이동시킬 수 있다.

또한 이러한 팁 흐름(tip flow)의 영향은 Fig. 9의 압력분포에서도 잘 나타나고 있다.

Fig. 10은 5가지의 팁 클리어런스에 대해서 날개 현의 중간 평면에서의 축방향의 속도벡터를 나타내고 있다. 그림에서 왼쪽은 입구측이고 오른쪽은 출구측이다.

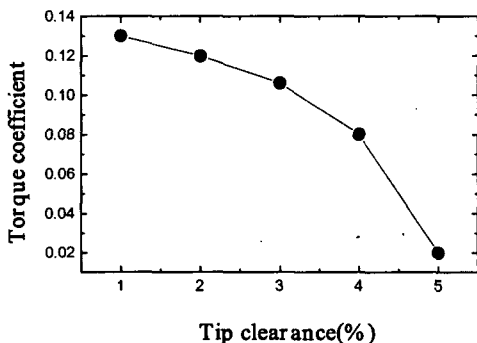


Fig. 11. Torque coefficient against tip clearance

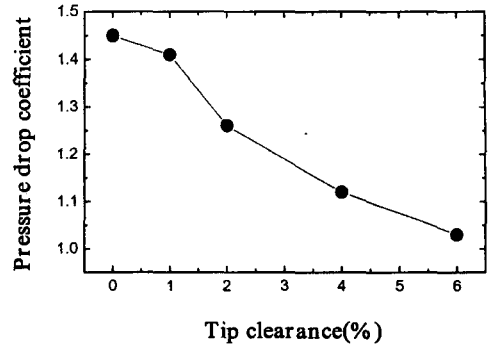


Fig. 12. Pressure drop coefficient against tip clearance

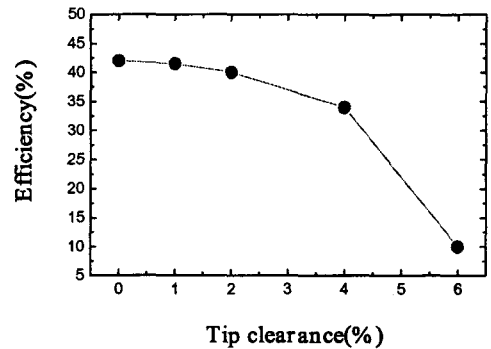


Fig. 13. Efficiency against tip clearance

Fig. 10에서의 축방향의 속도벡터를 보면 출구측의 케이싱 부근에서의 축방향속도는 팁 클리어런스가 커질수록 속도구배가 커지고 있으며, 또한 날개 뒤에서 나타나는 재순환영역도 점점 더 커지고 있고 하류측으로 이동함을 관찰할 수 있다.

Fig. 11~13은 다양한 팁 클리어런스에 대한 토크계수와 압력강하계수 그리고 효율을 나타내고 있다. 팁 클리어런스가 커지면 커질수록 토크계수, 압력강하계수 그리고 효율은 낮아지는 경향을 보이고 있지만, 팁 클리어런스가 1%이내에서는 효율을 비롯한 토크계수, 압력강하계수는 소폭 감소하는 것을 볼 수 있으며 이것은 터빈의 효율적인 면에서 보면 팁 클리어런스는 약 1%이내에서 적절하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 영각의 영향에 대한 파력발전용 헬릭스 터빈의 유동특성을 수치해석을 통해서 다음과 같이 결론을 얻었다.

1) 낮은 영각에서 높은 영각으로 갈수록 헬릭스 터빈의 날개주위 흐름은 팁 방향으로 향하고 있으며, 영각

25° 에서부터 전연으로 향하기 시작 한다. 그리고 영 각 30° 에서는 날개 중심부에서 대단히 큰 와(vortex) 류가 형성되고 있으며 이러한 결과로 볼 때 일정한 유량에서 실속을 억제하기 위해서는 낮은 유량에서도 고속으로 회전할 수 있는 터빈 개발이 시급하다.

2) 팁 클리어런스를 고려했을 때 극간에서 축방향으로 유동이 고속분출되고 있다. 이로 인해 팁 모서리 부분에서 크지는 않지만 작은 팁 볼텍스가 형성되고 있으며, 팁 클리어런스가 증가할수록 날개 뒤에서의 와류가 점점 더 커지고 하류쪽으로 이동함을 관찰할 수 있다.

3) 웰즈터빈의 수치계산에 의하면 유동특성과 터빈의 효율적인 측면에서 적절한 팁 클리어런스는 팁 클리어런스는 1% 이내가 적절하다.

~87.

A. Thakker., S. Slater., "A Study of CFD Airflow Predictions in a Wells Turbine * International Offshore and Polar Engineering Conference May 24 29 1998.

참고문헌

- C. L. Ryu, " Ocean energy engineering" *New technique*, pp. 75 ~ 123
- Falcao, A.F.O., Whittaker, T.J.T. and Lewis, A.W.(1993) JOULE II Preliminary Action : European Pilot Plant Study, *Proc. 1993 European Wave Energy Symp.*, pp. 247 ~ 257.
- M. Suzuki, C. Arakawa, " Numerical Simulation of Flow around Wells Turbine for Wave Power Generator" ,(in Japanese), *Procs. of 1999 JSME Annual Meeting* (No.99-1), pp. 199 ~ 200, 1999.
- FLUENT Users Manuals, Fluent Inc.
- Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow" Hemisphere, Washington, D. C. 1980.
- M. Suzuki, C. Arakawa, T. Tagori, " Wells Turbine Flow the Rotating Blade for Wave Power Generator" *Journal of the Flow Visualization Society of Japan, (in Japanese)*, Vol.4, Suppl, pp. 51 ~ 56, 1984.
- Harris, C.D., "Two-Dimensional Characteristics of the NACA0012 Airfoil in the Langley, 8-Foot Transonic Pressure Tunnel" *NASA Technical Memorandum* 1927, April 1981.
- 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.
- 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