

수치해석을 이용한 파력발전용 웰즈터빈의 유동특성에 관한 연구

김정환* · 이형구** · 이연원*** · 이영호**** · 瀬戸口俊明*****

**A Study on Flow Characteristics of a Wells Turbine
for Wave Power Conversion Using Numerical Analysis**

J-H Kim · H-G Lee · Y-W Lee · Y-H Lee and T. Setoguchi

Key words : Wells Turbine(웰즈터빈), Wave Power Conversion(파력발전), Ocean Energy(해양에너지), Fluid Machinery(유체기계), Angle of Attack(영각), Tip Clearance(팁클리어런스)**Abstract**

The aerodynamics of the Wells turbine has been studied using a 3-D, unstructured mesh flow solver for the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. 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. The 3-D Wells turbine model, consisting of approximate 220,000 cells is tested at four axial flow rates. In the calculations the angle of attack has been varied between 10° and 30° of blades. Representative results from each case are presented graphically and analysed. It is concluded that this technique holds much promise for future development of Wells turbines.

1. 서 론

최근, 지구환경 보호와 대체에너지 개발을 위한 방안으로서 자연에너지 이용기술이 강조되고 있

고, 파랑, 조석, 해류, 태양열등의 자연에너지 이용 방안이 연구 개발되고 있다. 특히, 파력은 공해가 없고, 장래 경제성에 있어서 뛰어난 대체에너지로서의 잠재력을 가진 파력에너지를 이용한 발전 기

* 부경대학교 대학원 (현 : 한국해양대학교 대학원)(원고접수일 : 2000년 10월)

** 부경대학교 대학원

*** 부경대학교 기계공학부

**** 한국해양대학교 기계·정보공학부

***** 日本)佐賀大學 機械工學科

술 연구는 파력자원이 풍부한 일본, 영국, 노르웨이 등에서 활발하게 추진되고 있다. 파력발전은 심한 출력변동과 대규모 발전 플랜트를 해상에 계류시키는 데 기술적인 어려움이 있으나 2010년까지는 상용발전이 가능한 것으로 전망되고 있다. 일본은 Kaimei(海明)에 240kW급의 해안 고정식 파력발전 장치를 설치하여 시험가동하고 있으며, 해양 과학 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.¹⁾ 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 자기가변형 공기 터빈이다.²⁾ Fig. 1에서와 같이 웰즈터빈은 축 둘레에 일정한 솔리디티의 캠버가 없는 날개로 이루어져있

다. 날개는 터빈의 축방향에 90°로 설치하면, 터빈은 회전면에 대칭이고 OWC에서 근거로 한 것처럼 양방향성의 공기유동에 의해서 터빈은 한 방향으로 회전을 한다.

웰즈터빈의 영각에 대한 수치계산에 의한 연구는鈴木正己³⁾등에 의해 연구된바 있으며 여기에서의 계산은 영각 19°와 30°의 높은 영각에서 계산을 수행하였다. 그리고 본 연구에서는 영각 10~30°까지 계산을 수행하였으며 낮은 영각에서부터 높은 영각까지의 다양한 각도에서 계산을 수행함으로써 그 영각에 따른 유동특성을 규명하는데 그 목적을 두고 있다.

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

2. 계산조건

2.1. 수치해석 코드

FLUENT⁴⁾는 널리 인증 되어있고 연구를 수행하기 위한 필요한 형상이 복잡한 공간에서의 유동 해석 능력이 뛰어나기 때문에 웰즈터빈을 모델 테스트하기 위해서 선택되어 졌다. 연속방정식과 운동량방정식은 유한체적법으로 차분화(差分化)하였고 이산화(離散化)된 식의 계산과정은 SIMPLE 방식⁵⁾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 0.72, 팁 클리어런스 2mm의 팁 간격으로 환형 실린더 덕트에 설치되어져 있다. 공기는 공기챔버를 통하여 종 모양의 흡입구를 통하여 흡입되고, 터빈을 지나 외부로 빠져나가도록 되어있다.

이는 1984년에鈴木正己⁶⁾등이 실험한 웰즈터빈의 모델과 유사한 것이다.

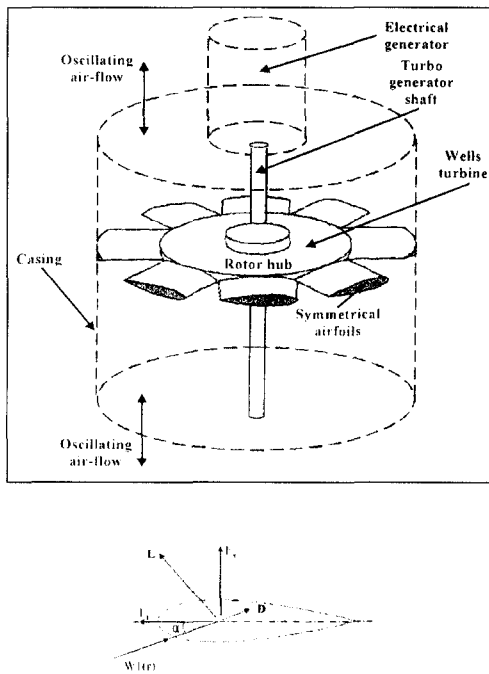


Fig. 1 Schematic of Wells turbine

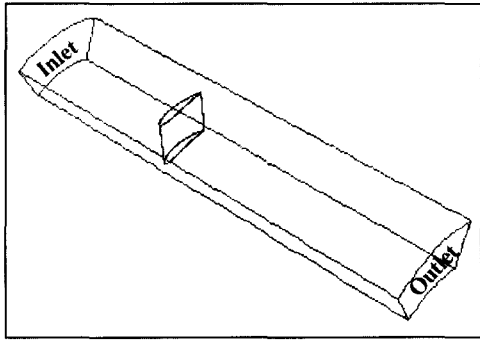


Fig. 2 Computational domain

3-D 격자생성에 있어서 터빈의 형상과 유동형태의 회전적 순환 성질로 인하여 Fig. 2와 같이 한 개의 날개 주위부분이 모델링 되어졌고, Periodic경계조건을 사용함으로써 8개에 대한 계산조건을 단순화하였다. 그리고 영각(angle of attack)은 일정한 유량에서의 10°에서 30°까지 다양한 경우를 비교 계산하였다. Fig. 3는 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 Quick스킴을 적용하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

Fig. 4는 [Warfield 1994]에서 팁 클리어런스 1%일 때의 실험적 데이터와 수치계산에 의한 무차원 압력강하 값들을 비교한 것이다. 팁 클리어런스 1%일 때의 수치계산 결과와 실험데이터와는 각각의 유량에서 상당히 정확한 값들을 보여주고 있으며, 본 논문에서는 이것을 근거로 하여 서로 다른 팁 클리어런스와 영각에 대해서 수치계산을 수행하였다.

Fig. 5~7은 익수 $z=8$, 솔리디티 $s=0.72$, 팁 클리어런스 $t=2\text{mm}$ 의 조건하에서 영각이 10° ~ 30°까지 변화할 때 흡입면에서의 속도벡터와 유선 그리고 압력분포의 유동특성을 보여주고 있고, Fig. 8은 mid-chord에서 투영된 평면의 축방향의 속도벡터와 등속도분포를 나타내고 있으며, Fig.

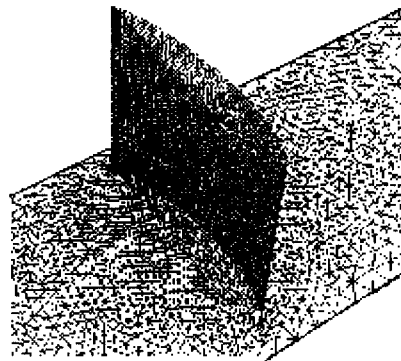


Fig. 3 3-Dimensional grid of a wells turbine

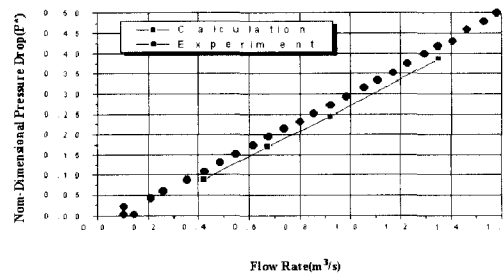


Fig. 4 Comparison of experimental and numerical pressure drops across the turbine

9은 일정한 반경에서의 상대속도벡터를 보여주고 있다.

Fig. 5와 6을 보면 영각이 증가할수록 팁 근방에서 발생하고 있는 박리점은 후연에서 전연으로 이동하고 있고, 영각이 25°일 때부터 전연에서 후연으로 향하던 유동방향이 전연으로 향하기 시작하고 있으며, 실속이 발생하고 있음을 관찰할 수 있다. 이는 Fig. 7에서와 같은 압력분포가 발생하고 있다. 압력분포를 살펴보면 낮은 영각에서는 전연의 팁부근에서 최저압력이 관찰되고 있지만 영각이 증가할수록 최저압력이 허브 쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있다. 그리고 영각 30°에서는 흡입면 중심부 전체에 걸쳐 와류가 관찰되고 있다.

Fig. 8은 날개 mid-chord 평면에서의 속도벡터와 등속도분포를 보여주고 있다. 이 그림에서도 영각이 증가할수록 발생하는 불안정한 유동장을 볼 수 있는데 영각이 증가할수록 날개 하류측의 케이싱부근에서의 와류가 점점 더 커지고 있음을 관찰할 수 있고, 팁 모서리에서 발생하는 볼텍스도 증

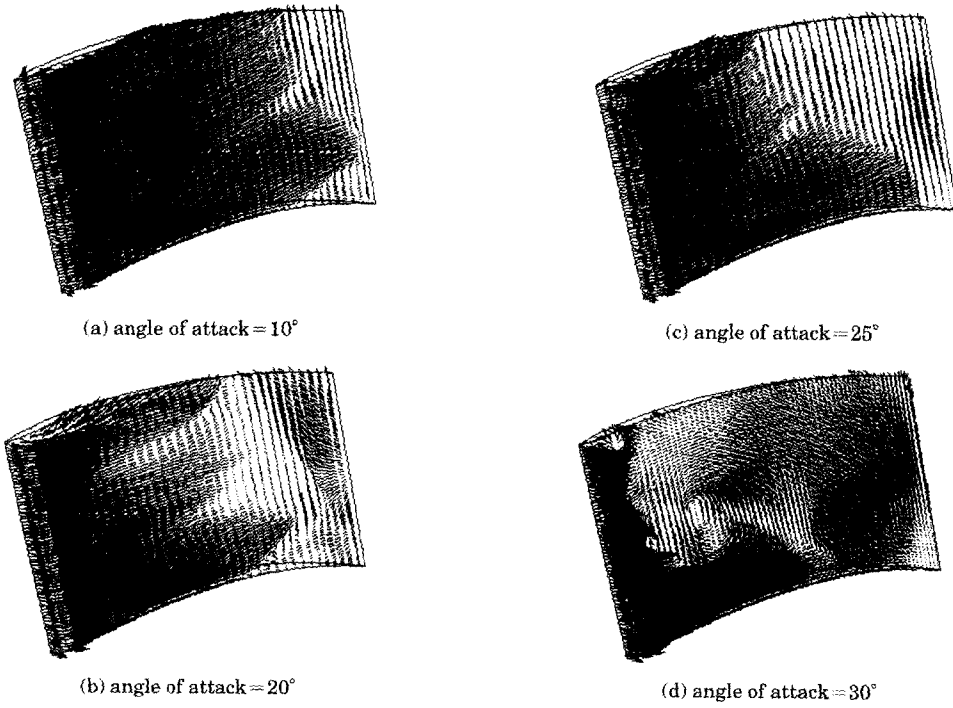


Fig. 5 Velocity vector on suction side

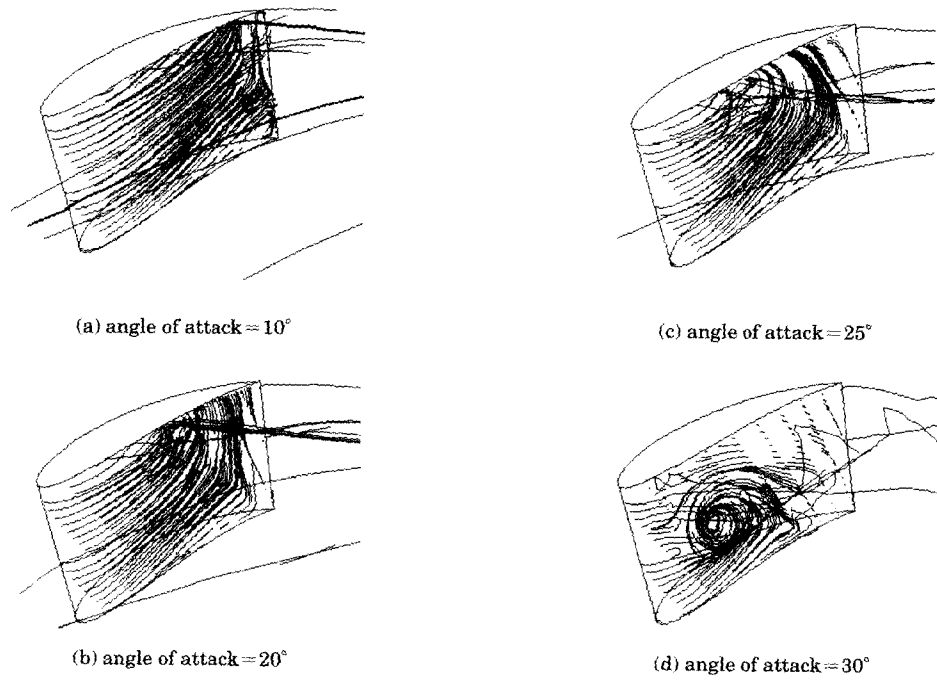


Fig. 6 Streamlines flowing over suction side

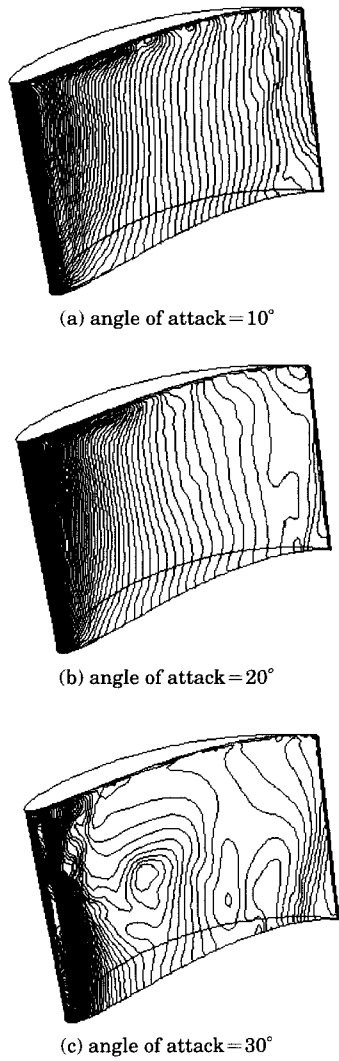


Fig. 7 Static pressure distributions on suction side

가하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 9는 영각 10°~30°까지의 일정한 반경 허브와 팁 부근에서의 상대속도벡터를 나타내고 있다. 먼저 허브부근에서는 영각 10°에서는 일정한 속도분포를 보여주고 있지만 영각 15°에서부터 날개 후연에서 와류가 발생하고 있음을 관찰할 수 있었고 영각 30°에서는 날개 전체에 걸쳐 발생하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 팁 부근에서는 허브 부근보다 속도가 빠르기 때문에 영각 10°에서부터 날개 후연에서 와류가 발생하고 있었고 영각이 증

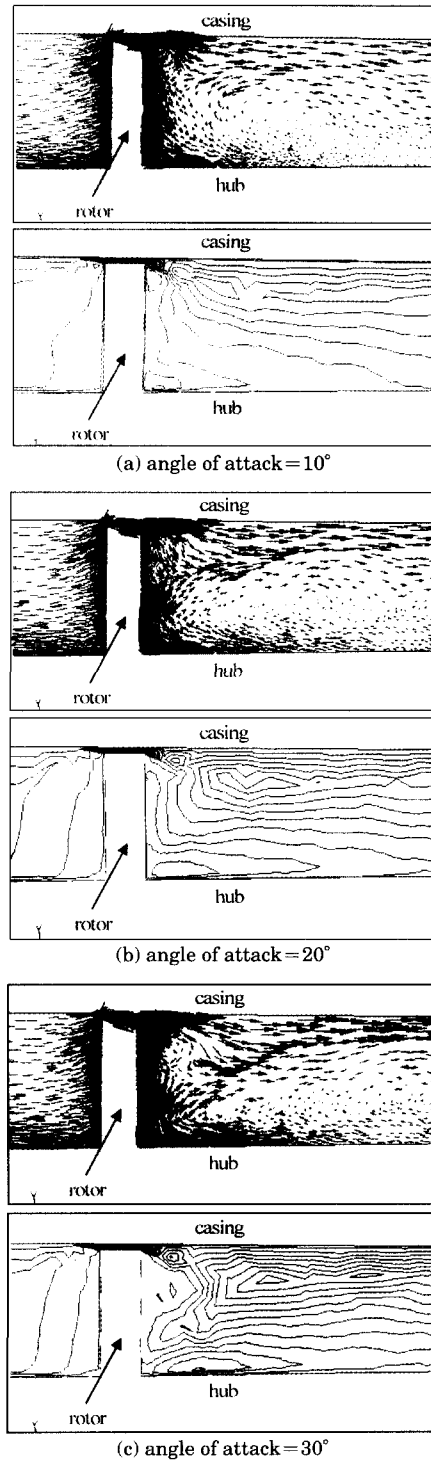


Fig. 8 Velocity vectors and x-direction distributions projected onto a meridional grid plane

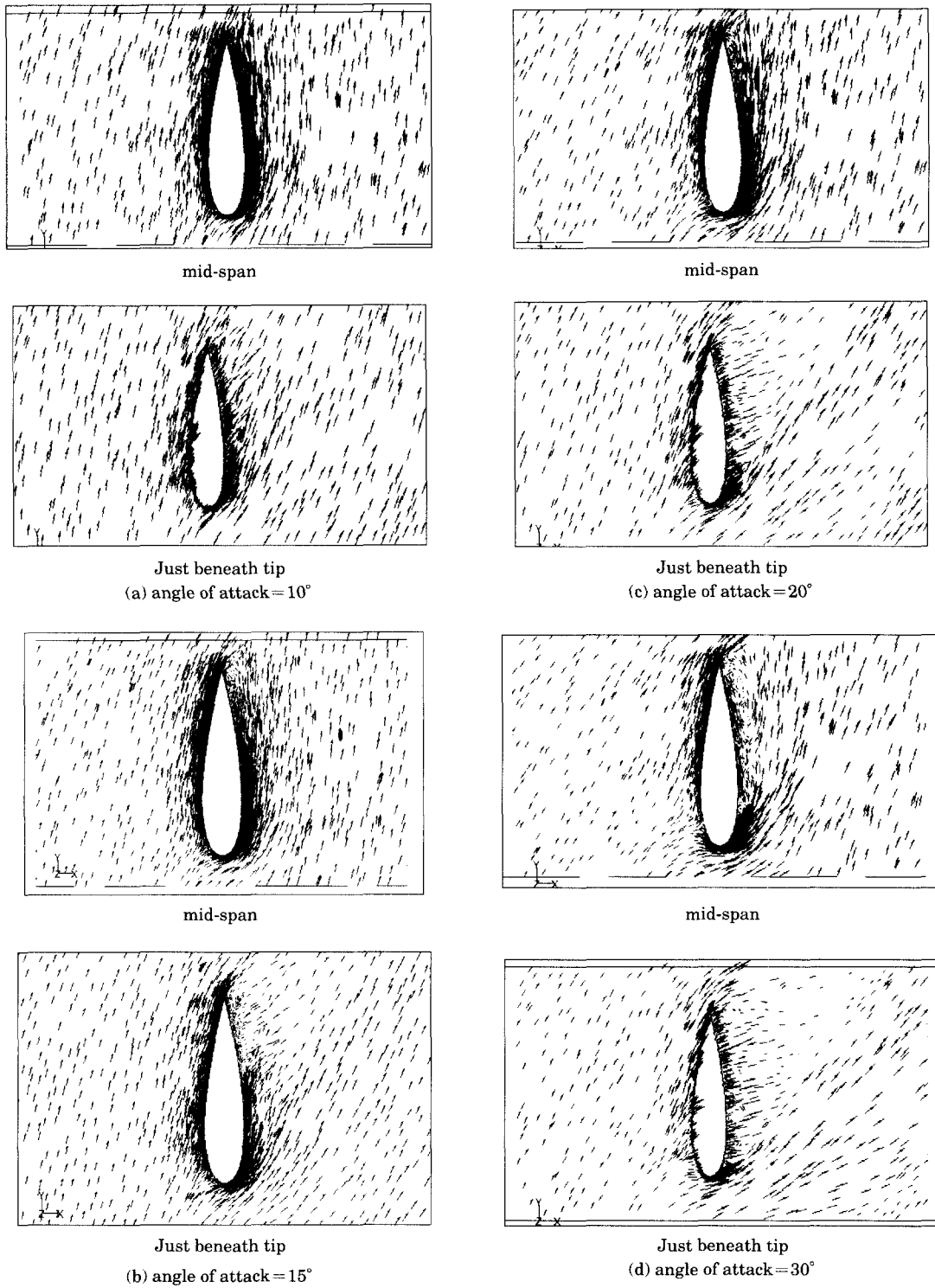
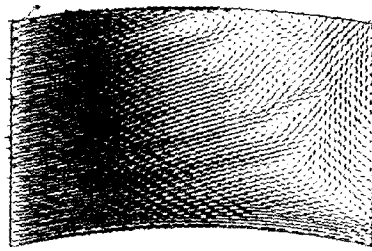
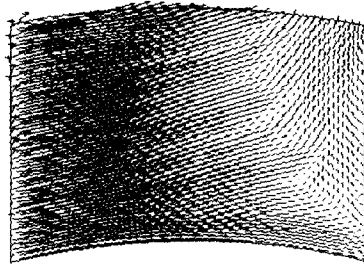


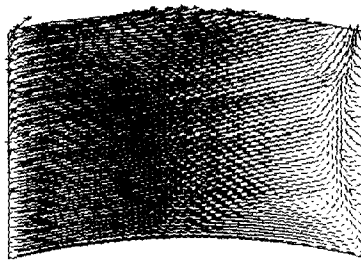
Fig. 9 Relative vectors contours on planes of constant radius



(a) tip clearance=0%



(b) tip clearance=2%



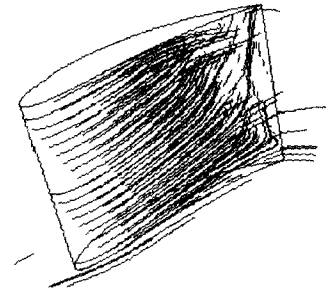
(c) tip clearance=6%

Fig. 10 Velocity vector on suction side

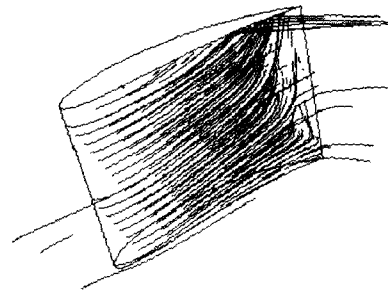
가할수록 와류의 크기가 증가하며 그 와류는 더욱 더 심해지고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 10~12는 웰즈터빈이 2000rpm으로 회전하고 있고, 축방향속도가 일정할 때 여러 종류의 팁 클리어런스의 경우에 대한 터빈의 흡입면에서의 속도벡터와 정압분포 그리고 유선을 나타내고 있다.

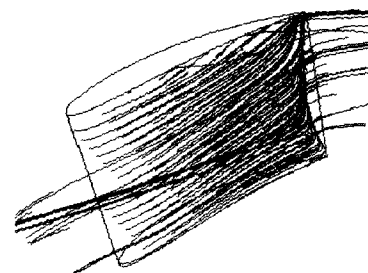
Fig. 10(a)의 결과를 보면 날개의 후연부분의 근방에서 광범위하게 박리영역이 나타나며, 또한 회전체에 의한 원심력의 영향으로 날개의 후연으로 갈수록 반경방향으로의 흐름이 강하게 나타난다. 그리고 Fig. 10(b), (c)와 같이 팁 클리어런스가 증



(a) tip clearance=0%



(b) tip clearance=2%



(c) tip clearance=6%

Fig. 11 Streamlines flowing over suction side

가할수록 가장 큰 회전방향속도가 날개 팁(tip)에서 존재할 수 있으므로 이로 인하여 날개 팁면의 증대된 운동량이 박리를 보다 후연쪽으로 보내게 됨을 알 수 있고, 이는 Fig. 11의 유선의 그림에서도 확인할 수 있다. 또한 이러한 팁 흐름(tip flow)의 영향은 Fig. 12(a)~(c)의 압력분포에서도 잘 나타나고 있다.

Fig. 13은 팁 클리어런스 변화에 대한 무차원 압력강하계수($\psi=1.351$)를 나타내고 있다. 팁 클리어런스가 증가할수록 압력강하계수는 전체적으로

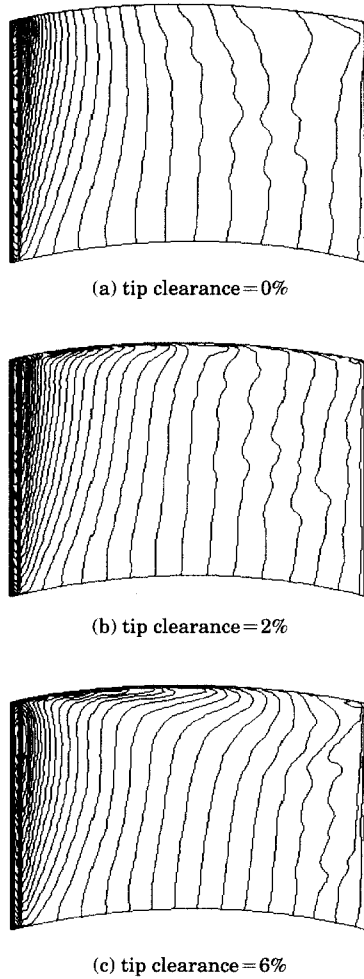


Fig. 12 Static pressure distributions on suction side

낮아지는 경향을 보이고 있지만 팁 클리어런스 0%와 1%에서는 무차원 압력강하계수 차가 동일하게 나타나고 있으며 팁 클리어런스 2%부터는 압력강하계수가 큰 폭으로 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 터빈의 효율적인 측면에서 보면 팁 클리어런스는 1%이내에서 적절하다는 것을 알 수 있으며 무차원 압력강하계수는 다음과 같이 정의하였다.

$$\Delta p^* = \frac{p_1 - p_2}{\rho \Omega^2 R_t} \quad (1)$$

식 (1)에서 p_1 은 압력면(pressure side)에서의 압

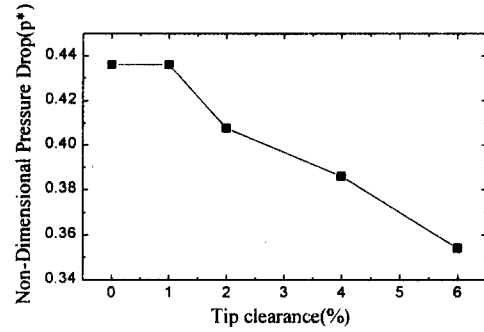


Fig. 13 Variation of pressure drop with clearance ($\psi = 1.351$)

력을 나타내고, p_2 는 흡입면(suction side)에서의 압력을 나타내고 있다. 그리고 Ω 는 로터의 각속도이며 R_t 는 팁 반지름이다.

4. 결 론

본 연구에서는 영각의 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 위해서는 낮은 유량에서도 고속으로 회전할 수 있는 터빈 개발이 시급하다.
- 2) 팁 클리어런스가 감소할수록 케이싱과 허브의 근방의 점성마찰에 의해서 속도에너지가 감소하고 이로 인해 역압력구배에 의한 재순환영역이 증가하고 있다.
- 3) 웰즈터빈의 수치계산에 의하면 압력강하의 영향이 거의 나타나지 않은 적절한 팁 클리어런스는 1% 이내이다.

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) JOULE II Preliminary Action : European Pilot Plant Study, Proc. 1993 European Wave Energy Symp., pp. 247~257.
3. 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.
4. FLUENT Users Manuals, Fluent Inc.
5. Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow" Hemisphere, Washington, D. C. 1980.
6. 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.
7. Harris, C. D., "Two-Dimensional Characteristics of the NACA0012 Airfoil in the Langley, Foot Transonic Pressure Tunnel" NASA Technical Memorandum 1927, April 1981.
8. 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.
10. 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.
11. A. Thakker., S. Slater., "A Study of CFD Airflow Predictions in a Wells Turbine" International Offshore and Polar Engineering Conference May 24~29 1998.

저 자 소 개



김정환(金貞煥)

1968년 2월생, 1998년 부경대학교 기계공학과 졸업, 2000년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 현재 한국해양대학교 대학원 기계공학과 박사과정 재학 중, 당학회 정회원



이형구(李亨求)

1960년 2월생, 1981년 경북대학교 기계공학과 졸업, 1998년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 현재 부경대학교 대학원 기계공학과 박사과정 재학 중, (주)세기 하이텍 근무



이연원(李蓮源)

1958년 8월생, 1981년 경북대학교 기계공학과 졸업, 1983년 경북대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1993년 일본 동경대학 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1984~1986년 포스코개발 설계팀장, 1997년 7월~8월 일본 동경대학 생산기술연구소 객원연구원, 1993년~현재 부경대학교 기계공학부 부교수, 당학회 종신회원



이영호(李英浩)

1967년 2월생, 1980년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1982년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사, 유체공학), 1986년 동경대학 기계공학과 졸업(박사, 유체공학), 현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 교수, 당학회 종신회원



瀬戸俊明

현재 일본 시가대학 기계공학과 교수