

웰즈터빈의 비정상유동특성에 관한 수치해석 Numerical Analysis Unsteady Flow Characteristics of the Wells Turbine

김 태 훈*, 박 일 규**, 이 연 원***
T. H. Kim, I. K. Park, Y. W. Lee

Key Word : Wells Turbine(웰즈터빈), Hysteresis(히스테리시스), Reciprocating flow(왕복유동), Unsteady flow(비정상유동)

Abstract : The Wells turbine has hysteresis characteristics in a reciprocating flow. In this paper, in order to understand unsteady flow characteristics of the Wells turbine, a sinusoidal flow condition is simulated. The flow conditions and hysteresis characteristics, including blade thickness, are investigated over a period of time. The pressure distributions along the blade surface are investigated at mid-span to clarify the cause of the hysteresis. The result has shown that the hysteresis characteristics become more pronounced as blade thickness becomes larger. The occurrence of these characteristics depends on the varying behavior of wakes between an accelerating flow and a decelerating flow.

1. 서론

문명생활에 따라 에너지 소비량의 급증은 산성비, 온난화와 같은 지구규모의 환경문제를 발생시키고 있다. 21세기 전반에 예상되는 에너지와 환경의 위기를 해결하고, 지구환경 보호와 대체에너지 개발을 위한 방안으로서 자연에너지 이용기술의 연구를 시작하였다. 그래서 최근, 세계적으로 파랑, 조석, 해류, 태양열등의 자연에너지 이용방안이 연구 개발되고 있다. 특히, 지구표면의 71%를 차지하는 바다는 인간의 생존에 막대한 영향을 미치고 있다. 따라서 해양자원 중 해양에너지는 자원량이 무한하고 무공해이기 때문에 미래의 중요한 대체에너지의 하나로 역할이 기대되고 있다. 그 중에서 파력은 공해가 없고, 장래 경제성에 있어서 뛰어난 대체에너지로서의 잠재성을 가진 에너지로 파

력 발전 기술 연구는 파력자원이 풍부한 일본, 영국, 노르웨이 등에서 활발하게 추진되고 있다. 3면이 바다인 우리나라의 경우 연안에 나타나는 파의 에너지는 국부적으로 높기 때문에 빠른 증가추세에 있는 에너지소비에 대처하기 위하여 에너지 저장기술과 아울러 대체에너지로써 파랑에너지를 유용하게 이용하는 적절한 개발이 이루어져야 한다. 웰즈터빈은 OWC(Oscillating Water Colum)의 원리를 이용하는 파력변환장치 중 가장 성공적인 방법의 하나로 알려져, 현재 가장 널리 사용되어지고 있는 파력에너지 변환용 공기터빈 이다.¹⁾

웰즈터빈의 설계자료와 성능평가에 대한 연구는 대부분 실험에 의존해 왔다.

Raghunathan²⁾ 는 고 솔리디티에서 2단 웰즈터빈의 기동과 운전특성을 조사하여 효율을 비교하였다. Inoue³⁾ 는 정확한 정현파장의 축류속도를 발생시켜서, 히스테리시스의 원인을 조사하였다. Setoguchi⁴⁾ 는 비정상 유동조건에서 솔리디티, 블레이드, 표면거칠기, 종횡비의 변화에 대한 히스테리시스 특성을 실험적으로 조사하였다.

* 부경대학교 대학원
** RIST 연구원
*** 부경대학교 기계공학부

웰즈터빈과 같이 고속으로 회전하는 터빈이나 압축기와 같은 터보기계내의 유동은 회전익의 형상, 솔리디티(solidity), 고정익(stator)과 회전익(rotor)의 상대운동과 같은 다양한 요인들로 인하여 아주 복잡한 성질을 갖고 있으며, 비 정상성을 내포하는 3차원 유동이다. 정상상태의 해석으로는 히스테리시스 특성을 갖는 웰즈터빈 성능평가는 어렵다. 따라서, 왕복 기류 중에서 작동하는 파력발전용 웰즈터빈의 비 정상유동특성과 히스테리시스의 원인을 조사하기 위해서는 3차원 비정상유동해석이 필요하다.

본 연구에서는 실험에 비해 시간과 경비가 절약되는 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 비 정상상태 왕복기류에 의한 비 정상유동특성을 조사하고, 블레이드 두께(Blade thickness) 변화에 대해서, 정현파 중에서 축속도의 증속과정과 감속과정에서의 히스테리시스를 조사하여, 그 원인을 찾는 데 목적이 있다.

2. 수치계산법

3-D 계산 모델은 [Warfields 1994]에서 실험한 웰즈터빈 데이터에 근거로 하였다. 8개의 날개가 있는 높은 솔리디티의 웰즈터빈은 1%의 틱 간격으로 환형 실린더 덕트에 설치되어져 있다. 공기는 공기 챔버를 통하여 종 모양의 흡입구를 통하여 흡입되고, 터빈을 지나 외부로 빠져간다.

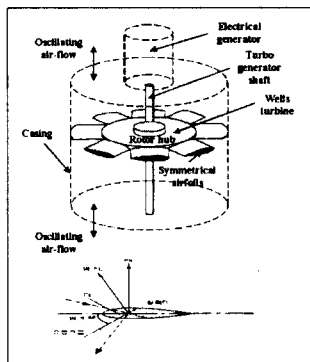


Fig. 1 Schematic of Wells Turbine

3. 계산 조건 및 유동해석결과

3.1 2-D 계산

본 논문의 웰즈터빈(Wells turbine) 계산의 난류모델은 RNG k- ϵ 을 사용하였고, 3차 정확도를 갖는 Quick스킴을 사용하여 3차원 웰즈터빈(Wells turbine)의 계산을 수행하였다.

3.2 3-D 정상상태계산

형상모델의 데이터는 선행연구 [Gato et al. 1991 과 Falcao.1984]에 기초를 두고 있다.

Fig.2 는 저자들의 연구실에서 수행된 계산결과를 보여주고 있다. 이 결과와 [Warfield 1994]에서 틱 클리어런스 1% 일때의 실험적 데이터와 수치계산에 의한 무 차원 압력강하 값을 비교하였다.

틱 클리어런스 1%일 때의 수치계산 결과와 실험데이터와는 각각의 유량에 대해서 상당히 정확한 값을 보여주고 있어 수치해석 신뢰성을 확보하고 있다고 말할 수 있다.

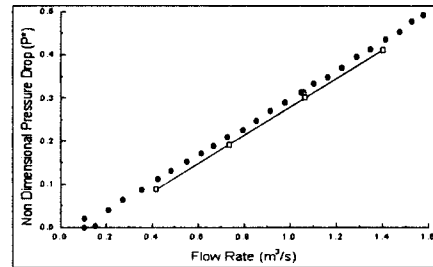


Fig. 2 Comparison of pressure drops across the Wells Turbine

3.3 3-D 비정상상태 계산

웰즈터빈(Wells turbine)의 3-D 격자생성은 터빈의 형상과 유동형태의 회전적 순환 성질로 인하여, 한 개의 날개 주위부분만을 모델링 하였다.

그리고 Periodic경계조건을 사용함으로써 8개에

대한 계산조건을 단순화하였다.

로 입구경계조건을 생성하였다. 주기함수는 다음과 같다.

$$V = V_0 + v_a(\sin 2\pi f \cdot t)$$

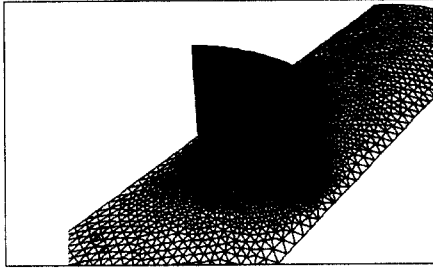


Fig. 3 Cyclically repeated Wells turbine geometry

웰즈터빈은 정현파에 의해서 작동한다고 모델링 하였으며 따라서 입구경계조건은 시간에 따라서 변한다.

따라서 입구속도를 제어하기 위해서 주기함수

여기서, V_0 는 초기속도, v_a 는 축방향 최고속도, f 는 진동수, t 는 시간이고 총 주기는 10s이다. 시간간격(Time Step)은 CFL(Courant Friedrichs Lewy)조건에 부합하게 시간간격(Time Step)을 0.001s로 하였다. 익수 $z=8$, 슬리디티 $s=0.72$, 팁 클리어런스는 1%이다.

Fig. 3은 날개 표면과 표면주위의 격자분포를 보여주고 있는데 날개표면과 날개주위에 삼각 격자를 사용하여, 약 200,000개의 격자로 이루어져있고, 케이싱 보다는 날개표면에서의 유동이 급변하기 때문에 날개표면에 조밀한 격자를 생성시켰는데 그 격자 수는 9,000개이다.

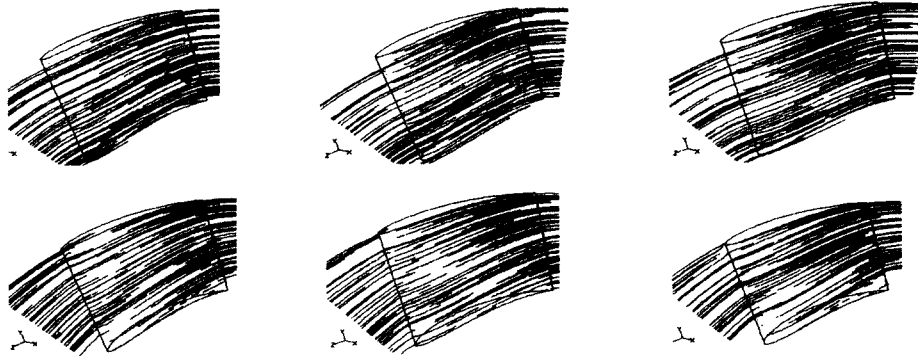


Fig. 4 Streamlines Flowing over suction side ($\alpha = 3^\circ$)

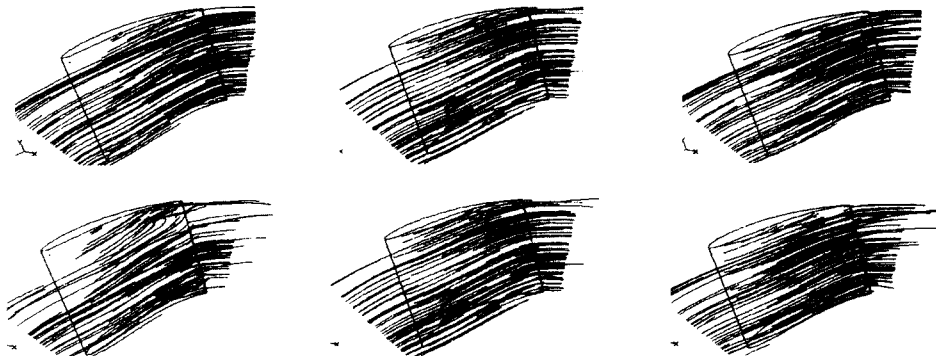


Fig. 5 Streamlines Flowing over suction side ($\alpha = 12^\circ$)

웰즈터빈의 비정상유동특성에 관한 수치해석

난류모델은 2-D 익형계산에서 검증된 RNG k-ε 모델을 사용하였고 Quick스킴을 적용하였다.

Fig. 4 ~ 5 은 영각이 3°, 12° 일 때의 축속도가 증가, 감소과정에서의 유선의 분포를 보여주고 있다. 주기함수에 따라 유입공기의 축방향 속도의 변화 때문에, 로타의 원주속도와 유입공기의 축 방향속도에 의해 결정되는 영각은 0°에서 12°까지 변화함을 알 수가 있다.

흡입면의 유선분포 결과를 보면 영각이 3° 범위에서 축속도가 증가, 감소할 때 흡입면에서의 유 유선은 거의 일치하고 있지만, 영각이 증가할수록 축속도가 증가, 감소할 때 서로 상이한 경향을 보여주고 있다. 특히, NACA0012의 팁 부분에 많은 변화가 있음을 알 수가 있다. 이러한 결과로 보아 웰즈터빈은 정현과중에서 히스테리시스 특성을 가진다. 이러한 히스테리시스 특성을 명확하게 하기 위하여 시간에 따라서 입구속도가 변화 할 때, 축속도가 증가, 감소 과정에 따른 영각이 변화함에 따라서 전압력계수(C_A)를 조사하였다. 축 속도가 증가(영각이

증가)할 때 전압력계수(C_A)의 값은 축 속도가 감소(영각이 감소)할 때 전압력계수(C_A)의 값보다 작아 반 시계방향의 히스테리시스 루프를 확인 할 수 있고, 블레이드 두께가 커질수록 히스테리시스가 더욱 뚜렷하다.

전 압력계수는 다음과 같이 정의한다.

$$C_A = \Delta p_0 Q / [(1/2)\rho(v_a^2 + U_R^2)zblw_a]$$

히스테리시스의 메카니즘을 설명하기 위하여 평균반경에서 회전하는 브레이드 표면을 따라서 압력분포를 나타낸다.

Fig .6은 3차원 웰즈터빈의 영각이 3°~12° 일때의 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)에서의 압력계수분포이다. 여기서 검은색과 회색은 영각이 각각 증가과정, 감소 과정을 나타내고 있다.

압력 계수는 다음과 같이 정의 한다.

$$c_p = (p - p_1) / [(1/2)\rho(v_a^2 + U_R^2)]$$

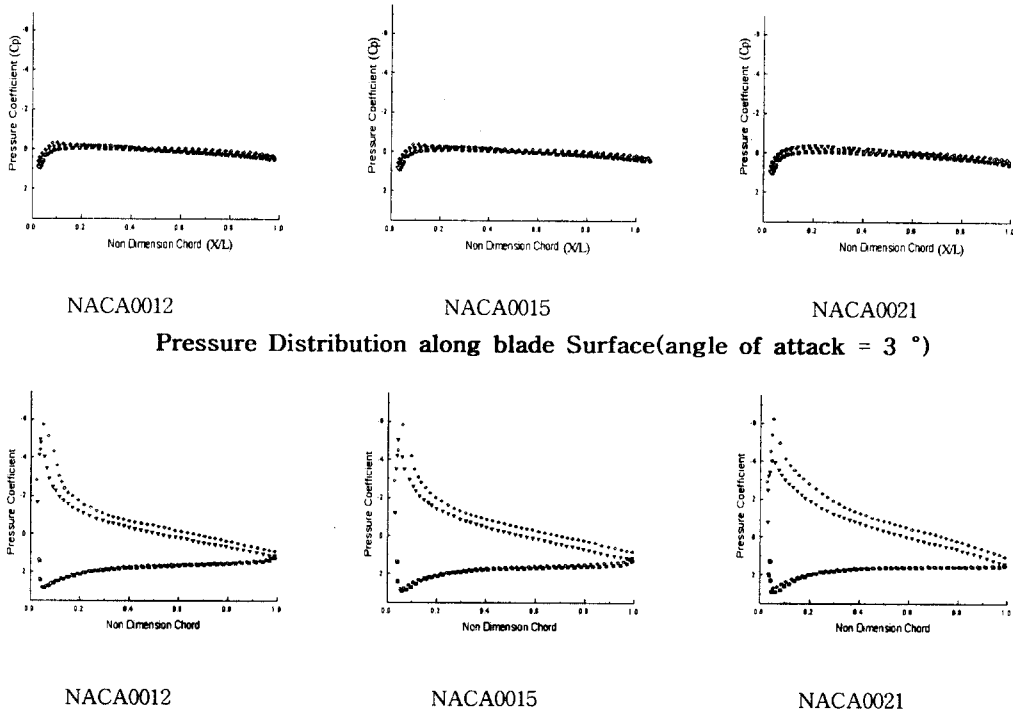


Fig.6 Pressure Distribution along blade Surface(angle of attack = 12°)

Fig.7 의 결과를 보면 압력면에서의 압력분포는 주목할만한 차이가 없지만은, 부압면에서는 영각이 증가 할때의 음의 값보다 영각이 감소 할 때의 음의 값이 높게 나타낸다. 이러한 차이는 영각이 증가할수록, 블레이드 두께가 클수록 크게 나타남을 알수가 있다. 그래서, 영각에 대한 전압력계수(C_A)의 히스테리시스 루프는 블레이드 두께가 클수록 증가함을 알수가 있다.

Fig. 8~9은 블레이드 중간현에서의 속도 분포이다.

히스테리시스가 생성됨을 알 수가 있다.

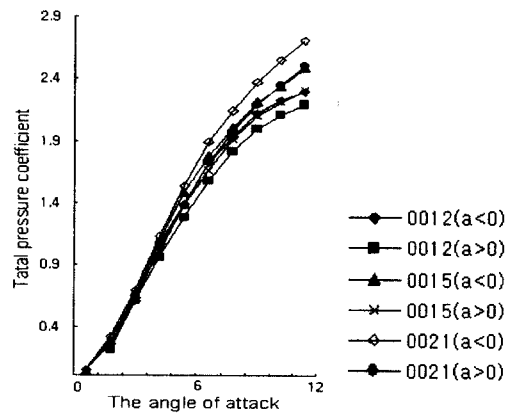


Fig. 7 Hysteretic characteristics of Wells Turbine for total pressure coefficient

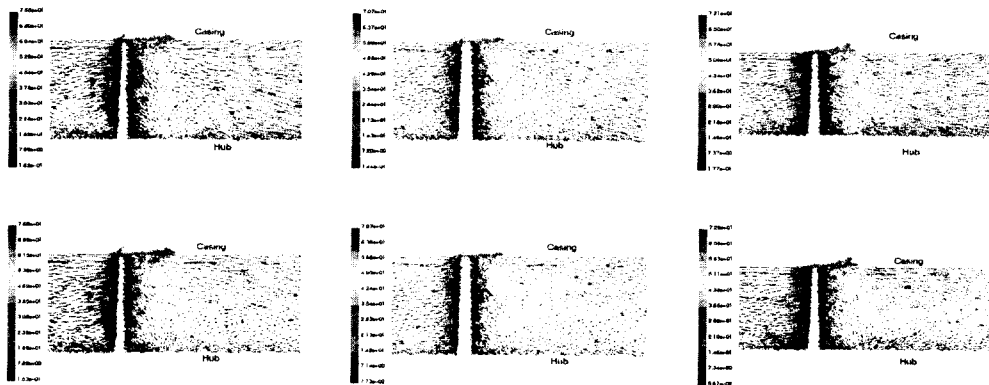


Fig. 8 Velocity vectors projected onto a mid-chord grid plane (angle of attack = 3 °)

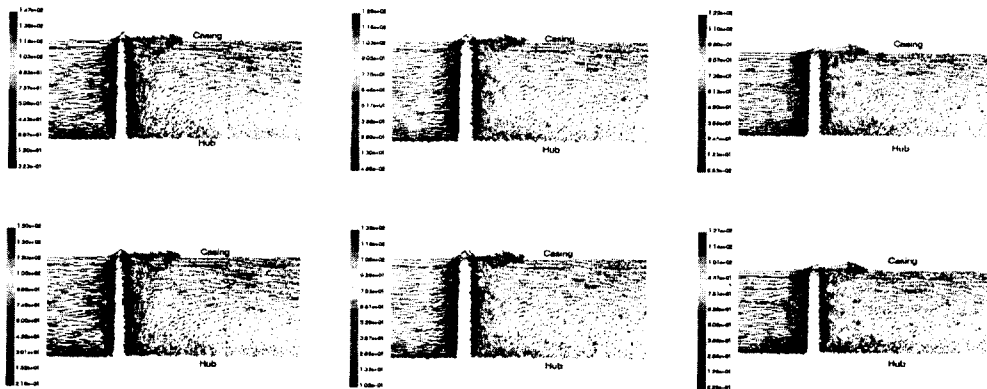


Fig. 9 Velocity vectors projected onto a mid-chord grid plane (angle of attack =12 °)

속속도가 증가할때와 감소할 때 흡입면에서의 유동 분포를 보면 서로 상이한 결과를 나타낸다. 이러한 결과로 보아 영각이 증가 할 때와 감소 할 때의 블레이드 상류와 하류 사이의 흐름의 상호작용에 의한 후류(wake)의 영향 때문에 히스테리시스가 생성됨을 알 수 가있다.^{2) ~5)} 특히, 블레이드 두께가 커질수록 크게 나타남을 알 수가 있다.

4. 결론

왕복 기류 중에서 작동하는 과력발전용 웰즈터빈의 비정상 유동특성을 구하기 위해서 비정상, 왕복기류조건하에서 웰즈터빈의 블레이드 두께(Blade thicknes) 변화에 대해서 조사하였다.

- 1) 영각이 최대 12 °로 변할때, 흡입면의 유선 분포 결과를 보면 영각이 3 °범위에서 흡입면에서의 유선은 거의 일치하고 있지만, 영각이 증가할수록 서로 상이한 경향을 보여주고 있다.
- 2) 속속도가 증가, 감소할 때 반시계 방향의 히스테리 시스루프를 확인할수 있고, 블레이드 두께가 커질수록 히스테리시스가 더욱 뚜렷하다는 것을 수치계산에서도 확인하였다.
- 3) 히스테리시스는 영각이 증가, 감소할때의 블레이드 상류와 하류 사이의 후류(wake)의 영향 때문에 히스테리시스가 생성됨을 알 수 있다.

후 기

본 연구의 일부는 2000년도 두뇌한국21사업의 RA/TA 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Falcao, A.F.O., Whittaker, T.J.T. and Lewis, A.W.(1993) JOULE II Preliminary Action : European Wave Energy Symp., pp 247 ~ 257
- 2 T. Setoguchi, M.Takao, K.kaneko, 1998."Hysteresis on Wells Turbine Characteristics in Reciprocating Flow" Journal of rotating. machinery Vol. 4 No1 pp 17 ~ 24
3. 井上-弘, 金子賢二, 瀬戸口俊明, 高良文浩, "復氣流中で作動するウェルズター빈のヒ스테リシス特性", 日本機械學會論文集(B編), 53卷496号, pp. 3699~3704, 1987
4. 金子賢二, 瀬戸口俊明, 中野智弘, 高良文浩, 井上-弘, "波力發展用 ウェルズター빈のヒ스테リシス特性に関する研究, 流れの可視化, Vol7 No. 26 pp 153 ~ 156, 1987
5. 瀬戸口俊明, 金子賢二, 井上-弘, "波力發電用復葉式 ウェルズター빈のヒ스테リシス特性", 日本機械學會論文集(B編), 55卷512号, pp 1153 ~ 1158, 19