

## 파랑에너지 변환용 충동터빈의 2차원 유동해석

김영국\*, 이형구\*, 김태식\*\*, 이연원\*\*\*, 김남식\*\*\*, T. Setoguchi

### 2-Dimensional Flow Analysis of Impulse Turbine for Wave Energy Conversion

Y.K. Kim\*, H.G. Lee\*, T.S. Kim\*\*, Y.W. Lee\*\*\*, N.S. Kim\*\*\*, T. Setoguchi

**Abstract** : This paper describes numerical analysis of the impulse turbine with fixed guide vanes, a high performance bi-directional air turbine having simple structure for wave energy conversion. The numerical analysis of the 2-dimensional incompressible viscous flow based on the full Reynolds-averaged Navier-Stokes equations which was made to investigate the internal flow behavior. Numerical results are compared with experimental data obtained by T.Setoguchi laboratory. As a result, a suitable choice of design factor has been clarified with the understanding of the internal flow from the numerical analysis.

**Key words**: Impulse turbine, Guide vane, Wave power conversion, Fixed guide vane

#### 1. 서론

미래의 대체에너지 산업의 일환인 파랑에너지 개발은 유럽과 일본 등지에서 실험역 실험을 거쳐 이미 활용하고 있는 미래 지향적인 연구분야이다. 이런 파력발전에 있어서 가장 중요한요소의 하나인 터빈은 발전을 일으키는 매체이기에 현재에도 보다는 성능향상에 많은 연구가 진행되고 있으며 선행 연구자들의 노력으로 이미 개발된 Wells turbine과 Impulse turbine은 파력발전에 알맞게 적용되고 있는 가장 대표적인 발전매체라고 할 수 있다. 여기서 Wells turbine은 구조가 간단하여 광범위하게 적용되고 있으나 강도성, 정비성과 소음 문제<sup>2)</sup> 등에 단점을 가지고 있다. 따라서 Wells turbine에 비해 극히 단시간에 기동하고 더욱이 회전수가 낮아 저 소음화의 관점에서 유리한 Impulse turbine 적용<sup>4),5)</sup>에 있어서 보다 나은 성능향상을 위하여 성능변수인

여러가지 기하학적 조건들에 대한 Parametric study를 행하여 고성능 파력발전용공기 터빈 설계를 위한 설계데이터를 제공하고자 한다. 아울러 삼면이 바다인 우리나라에서도 유리한 조건을 바탕으로 지속적인 관심과 연구가 진행되었으면 한다

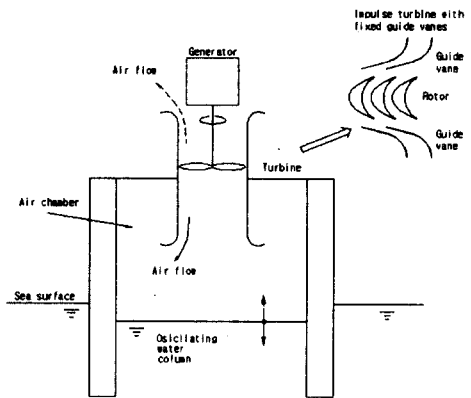


Fig. 1 Schematic of wave energy converter

\* 부경대학교 대학원 기계공학과

\*\* RIST 연구원

\*\*\* 부경대학교 기계공학부

Department of Mechanical Engineering,  
Saga University

## 2. 실험 장치 및 방법

실험에 사용된 장치는 대형 실린더와 공기실 그리고 축소형 입구와 디퓨저를 가진 직경 300mm 원통으로 구성된다. 허브 대 팁 비가 0.7인 증동터빈은 원통의 중앙에 위치시키고 정상유동 조건 하에서 일정회전 속도로 작동하였다. 전체 작동특성은 토크  $T$ , 체적유량비  $Q$ , 로터 각속도  $\omega$ 와 총 압력 강하  $\Delta P$ 가 200~800Pa, 로터 각속도  $\omega$ 는 370rad/s, 체적유량비  $Q$ 가  $0.6\text{m}^3$  범위 내이다. 블레이드 형을 대표길이로 한 레이놀즈 수는  $0.4 \times 10^5$  정도이다. 터빈형상은 상류와 하류에 고정 안내깃이 있고 증동형 터빈 로터로 구성되어 있다. (Fig.2) 각 안내깃의 수는 26개이고 안내깃 형태는 직선과 원호로 이루어져 있다. 안내깃 현길이 ( $l_g$ )는 70mm이고 피치 ( $s_g$ )는 30.8mm이다. 안내깃 설치각( $\theta$ )를  $15^\circ \sim 45^\circ$  까지 변화시킨 5가지 형태의 안내깃으로 실험하였고 Table 1은 실험 대상으로 선정된 안내깃 규격을 표시하였다.  $R_a$ 와  $\delta$ 는 각각 반경과 원호 부분의 각이다. 증동터빈 로터 블레이드 형상은 Fig 3에 표시된 것처럼 정압면에는 반경 41.4mm이고 장축 반경이 125.8mm이다. 모서리 반경은 0.5mm이고 입·출구각( $\gamma$ )이  $60^\circ$ 이다. 로터의 팁반경이 149mm 허브 반경이 105mm이다.

Table 1 Specifications of guide vanes

$\theta^\circ$	$R_a$	$\delta$
15	32	75
22.5	34.6	67.5
30	37.2	60
37.5	41.7	52.5
45	47.5	45

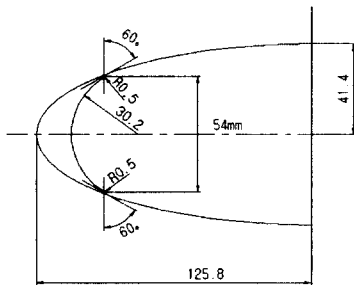


Fig. 2 Rotor geometry

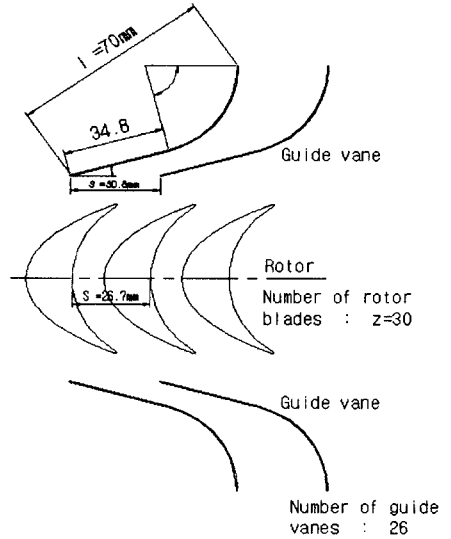


Fig. 3 Turbine geometry and design data

## 3. 수치 해석

본 논문의 고정 안내깃 증동터빈의 2차원 유동 해석은 Navier-Stokes 방정식에서 레이놀즈 평균을 취하였으며, 여기에서 난류운동 에너지 방정식 (Kinetic energy equation)과 난류 소산율 방정식 (turbine dissipation equation)은 다음과 같다.

Continuity equation :

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \text{----- (1)}$$

RANS equations :

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad \text{----- (2)}$$

Turbulent kinetic energy equations(  $k$  ) :

$$\frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_t \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon \quad (3)$$

Turbulent dissipation equation(  $\epsilon$  ) :

$$\frac{\partial(\rho U_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (4)$$

모델 상수는 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \\ \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

#### 4. 경계조건과 격자계

경계조건은 입·출구와 벽면 그리고 주기 경계면에 적용된다. 입구 경계면에 대한 속도는 안내깃에서는 절대속도, 로터에 대해서는 상대속도로 주어졌다. 상용코드로는 Fluent 5.0을 이용하였다. 지배방정식을 수치해석하기 위해 검사체적에 기초한 유한 체적법(Finite Volume Method)을 사용하여 이산화 하였고 대류항에 대해서는 하이브리드 도식(hybrid scheme)을 이용하였다. 압력은 운동량 방정식과 연속방정식을 만족하도록 간접적으로 구해야 하는데 본 논문에서는 Patankar - Spalding의 SIMPLE (Semi-implicit Pressure Linked Equation)알고리즘을 사용하였다. 그리고 수치해석에 있어 격자계는 형상이 복잡한 경우, 정렬보다는 비정렬 격자법을 많이 이용하는데 본 논문에서는 비정렬 격자법을 이용하여 각각 상부 안내깃에 5737개, 로터에 2735개, 그리고 하부 안내깃에 5737개로 분배하여 수치계산에 적용하였다.

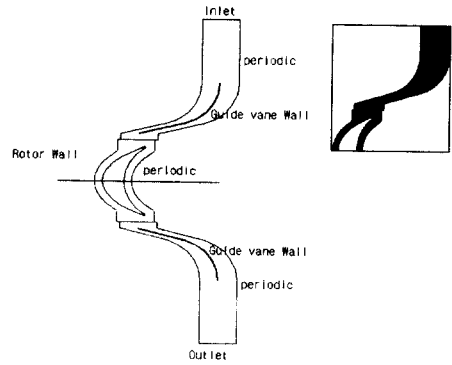
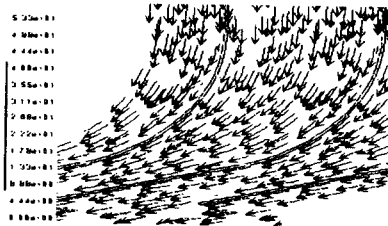


Fig.4 Computational grid for two-dimensional Impulse turbine & Boundary condition

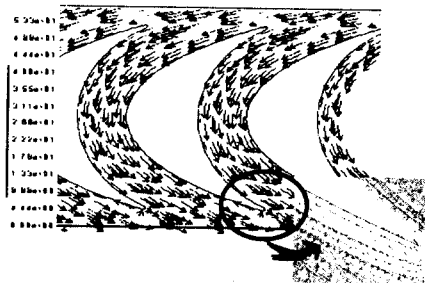
### 5. 유동 해석 및 결과

#### 5.1 유동 해석

안내깃 설치각에 대한 영향을 살펴보기 위해 상부 안내깃의 설치각과 대칭인 하부 안내깃을 15° 에서 45° 까지 3가지 모델로 변화시키면서 최적 설치각의 유동장을 파악하였다.

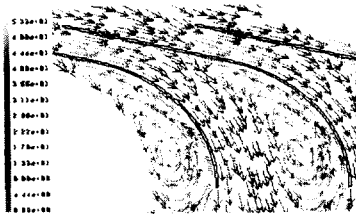


(a) top guide vane

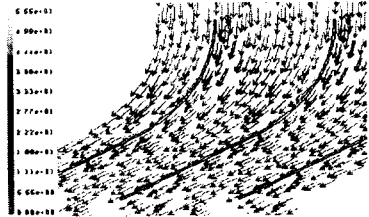


(b) rotor blade

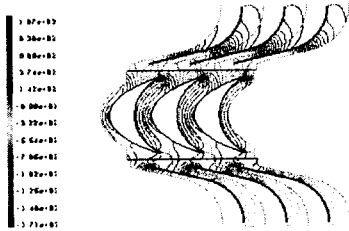
익형을 따라 주유동장이 형성됨을 알 수 있다.



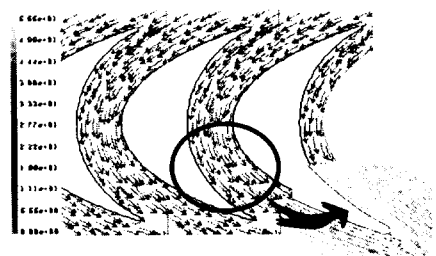
(c) down guide vane



(a) top guide vane



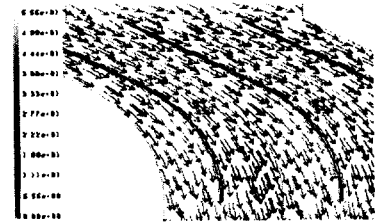
(d) Pressure contours of impulse turbine



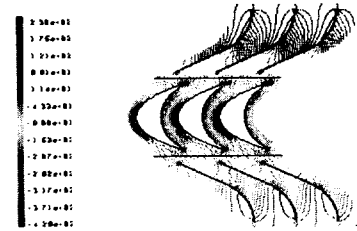
(b) rotor blade

Fig.5 Velocity vectors and pressure field at  $\phi=1.0$  and  $\theta=15^\circ$

Fig. 5는 유량계수  $\phi=1.0$  과  $\theta=15^\circ$  경우의 수치해 결과이다. Fig.5(a),(b),(c)는 속도장을 나타내고 있으며 Fig.5(d)은 압력 윤곽선을 나타내고 있다. Fig.5(a)는 상부 안내깃의 유동장을 나타내고 있는데 안내깃 곡률을 따라 끝단으로 갈수록 속도가 증가하는 것을 알 수 있었고, 로터 하부에 생기는 박리현상이 일어남을 알 수 있다. Fig.5(b)는 로터에서의 유동장을 나타내고 있다. 로터에 유입되는 유동각은 로터의 입구각과 거의 일치한다. 그러나 로터 부압면 후익(trailing edge)부근에서 유동의 박리 현상이 형성되는 것을 볼 수 있는데 이것은 로터 유입 유동 속도가 부압면의 유선곡률을 따라 급격한 변동의 영향으로 보인다. 그리고 Fig.5(c)에서 하부 안내깃 뒷부분에서도 박리가 형성되는 것을 알 수 있었다. Fig.6은 유량계수  $\phi=1.0$  과  $\theta=30^\circ$  경우, 수치해 결과이다.  $\theta=15^\circ$  인 경우와 마찬가지로 로터 내부 유동 Fig.6(b)에서도 부압면 후익 부근에서 미소한 유동 박리가 형성되고 충동터빈 내부의 유동이



(c) down guide vane

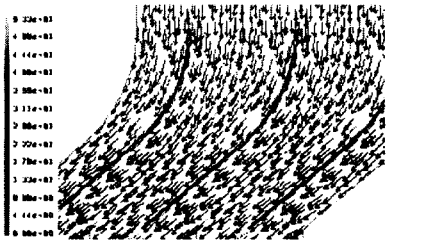


(d) Pressure contours of impulse turbine

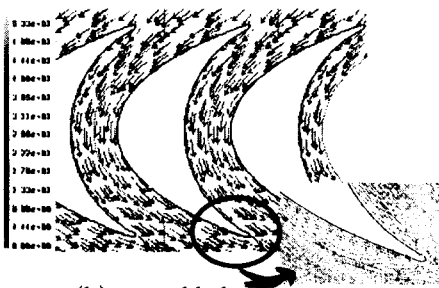
Fig.6 Velocity vectors and pressure field at  $\phi=1.0$  and  $\theta=30^\circ$

이것은  $\theta=15^\circ$  인 후익 부근에서 미소한 유동 박리가 형성되고 충동터빈 내부의 유동이 익형을 따라 주유동장이 형성됨을 알 수 있다.

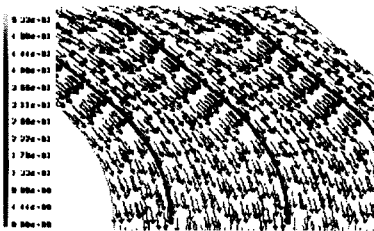
이것은  $\theta=15^\circ$  인 경우에 비해 유입유동각이 축 방향에 접근하기 때문이다.



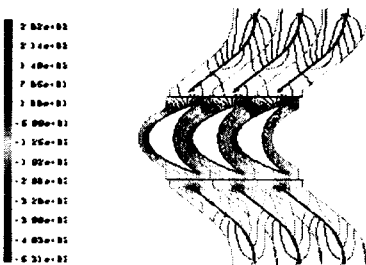
(a) top guide vane



(b) rotor blade



(c) down guide vane



(d) Pressure contours of impulse turbine

Fig.7 Velocity vectors and pressure field at  $\phi=1.0$  and  $\theta=45^\circ$

Fig. 7은 유량계수  $\phi=1.0$  과  $\theta=45^\circ$  경우인데 로터 내 유입유동 각과 흡입각이 큰 차이로 인 로터 전연의 유동 정체 현상이 커지고 로터 후연에서 미소의 박리현상이 일어남을 알 수 있었으며 하부 안내 깃의 압력 상승을 파악 할 수 있다.

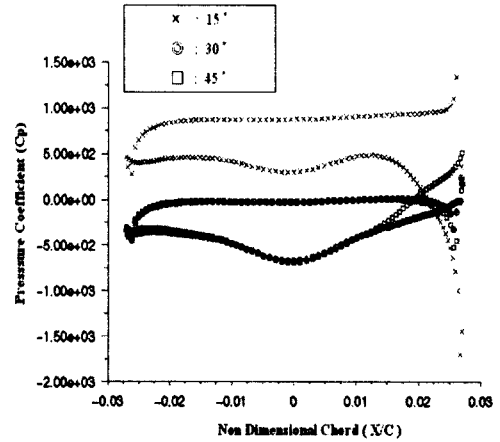


Fig. 8 Pressure Coefficient distributions of impulse turbine

Fig.8는 안내깃 설치각이  $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  로 변화될 때 로터 정압면과 부압면에서의 압력계수( $C_p$ )를 나타내고 있다. 설치각이  $15^\circ$  인 경우에는 로터 전연 부압면에서 압력계수가 급격히 감소하며, 설치각이  $30^\circ$  와  $45^\circ$  인 경우보다 로터 중간지점에서의 압력차가 상대적으로 적게 나타나고 있다. 설치각이  $45^\circ$  인 경우에는 로터 전연에서 부압면의 압력이 정압면의 압력보다 높기 때문에 충동터빈의 한 방향 회전을 지연하는 요소로 작용하고 있으며 압력 분포가 상·하부 영역에서 불균일하게 분포하는 것을 알 수 있다. 충동터빈의 효율은 로터 부압면과 정압면의 압력차가 중앙지점에서 최대치일 때와 전연과 후연에서 압력차가 최저치일 경우 최대 효율을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

5.2 실험과 수치해석 결과 비교

충동터빈의 작동특성은 정상 유동 조건하에서 얻었다. 실험결과는 유량계수 ( $\phi$ )에 대한 토크 계수 ( $C_T$ )와 입력 계수 ( $C_A$ ) 그리고 터빈 효율 ( $\eta$ ) 나타내고 다음과 같이 정의된다.

$$C_T = T / \{ \rho (v_a^2 + U_R^2) b l z r_R / 2 \} \quad \text{---- (5)}$$

$$C_A = \Delta p Q / \{ \rho (v_a^2 + U_R^2) b l z v_a / 2 \} \quad \text{---- (6)}$$

$$\Phi = v_a / U_R \quad \text{----- (7)}$$

$$\eta = T \omega / (\Delta p Q) = C_T / (C_A \Phi) \quad \text{----- (8)}$$

Fig. 9는 정상유동 조건하에서  $\Phi$ 에 대한  $C_T$ ,  $C_A$ ,와  $\eta$ 의 변화량을 나타내고 있다. Fig. 9(a)에서 토크계수  $C_T$ 는 안내깃 설치각  $\theta=15^\circ$ 의 경우에 가장 큰 값을 나타내고 안내깃 설치각이 증가할수록 점점 감소한다. Fig.9(b)에서도 안내깃 설치각  $\theta=15^\circ$ 의 경우에 입력 계수  $C_A$ 가 가장 큰 값을 나타내고 안내깃 설치각이 증가할수록 입력 계수가 감소하고 있으나 설치각이  $30^\circ$  이상 일때는 거의 변화가 없다. Fig.9(c)에서 효율 곡선은 설치각이  $15^\circ \sim 45^\circ$  일 경우에 해당된다. 효율 곡선에서 입력계수와 토크계수가 가장 큰  $15^\circ$ 인 경우에 효율이 제일 낮게 나타났다. 이는 로터 후연에서 생기는 압력변동으로 인한 박리와 안내깃 하부에서 큰 압력변동으로 생기는 와류현상으로 인해 효율 값이 떨어짐을 알 수 있다.  $45^\circ$ 인 경우에  $30^\circ$ 보다 효율이 낮은 값을 가지는데 그 이유는 축반경 속도에 근접하여 유입되는 벡터들이 안내깃 입구에서 유·출입각의 차이로 인해 로터 전연에 전반적인 유동정체 현상과 하부 안내깃의 압력 상승에 기인한다. 따라서 유량계수가 0.5이하에서 평균 효율이 높았다가 유량계수가 증가 할 때마다 감소 하는 wells turbine 보다 넓은 유량계수에서 효율이 더 높은 것으로 나타났다.<sup>6)</sup> 하지만 2차원적인 계산이므로 실험치와 수치해석 결과와의 차이가 다소 보였다. 따라서 2차원에 한정된 계산의 한계성을 극복하기 위해 3차원 실험상에 대한 후속계산이 요구된다

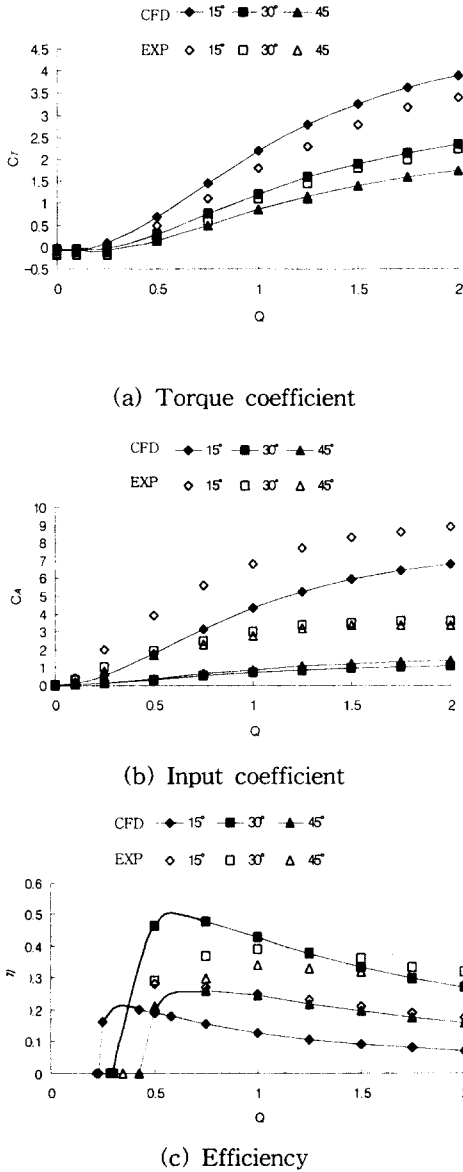


Fig. 9 The comparison results of experimental and numerical analysis

### 5. 결론

파력발전 변환용 고정 안내깃 충동터빈의 작동 특성은 정상 유동 조건하에서의 실험결과를 바탕으로 수치계산 결과와 비교 평가하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 안내깃 최적 설치각은 실험적, 수치적으로  $\theta = 30^\circ$ 가 최적 형상이다.
- (2)  $\theta = 15^\circ$ 인 경우 높은 입력 계수  $C_A$ 에 비해 터빈 효율  $\eta$ 이 저하되는 것은 큰 유동박리가 하부 안내깃에서 발생하기 때문이다.
- (3)  $\theta = 45^\circ$ 인 경우 토크 계수  $C_T$ 와 터빈 효율  $\eta$ 이 저하되는 것은 상부 안내깃의 유출 유동각과 로터 흡입각의 차로 인한 로터 전연의 유동 정체 현상과 하부 안내깃의 압력상승 때문이다.
- (4) 충동터빈의 효율은 로터 부압면과 정압면의

압력차가 중앙지점에서 최대치일 때와 전연과 후연에서 압력차가 최저치일 경우 최대 효율을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

(5) 충동 터빈 시스템은 웰즈 터빈에 비해서 효율이 높으며 넓은 유량 계수 범위에서 높은 효율치를 유지한다.

### 6. 참고 문헌

1. Demirdzic, I., Gosman, A. D., Issa, R. I. and Peric, M., 1987, "A Calculation Procedure for Turbine Flow in Complex Geometries", Computer & Fluids, Vol.15, pp.251~273.
2. Inoue, M., Kaneko, K., Setoguchi, T. and Shimamoto, K., 1986, "Studies of Wells Turbine for Wave Power Generator", of Bulletin JSME, Vol.29, No.250, pp.1171~1182
3. Launder, B.E. and Spalding D.B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Computational Methods Applicatio Mechanical Engineering, Vol.3, pp.269~289.
4. Maeda,h., Setoguchi,T., Kaneko, K., Kim, T.W. and Inoue M., 1995, "Effect of Turbine Geometry on the Performance of Impulse Turbine with Self-Pitch-Controlled Guide Vane for Wave Power Conversion", international Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.5, No.1, pp.72~74.
5. Setoguchi, T., Kaneko, Taniyama, H., Maeda, H. and Inoue M., 1996, "Impulse Turbine with Self-Pitch-Controlled Guide Vanes Connected by Links", International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.6, No.1, pp.76-80.
6. Setoguchi, T., Kaneko, Taniyama, H., Maeda, H. and Inoue M., 1999, "Study on a Impulse Turbine for Wave Energy "Conversion" Connected by Links", International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.1, p180~186

### 후기

이 논문은 2000년도 두뇌 한국 21 사업에 의하여 지원 되었음. (2000,RA/TA)