

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
 Journal of the Korean Solar Energy Society  
 Vol. 25, No. 3, 2005

## 웰즈터빈의 실속방지에 대한 실험적 연구

김태환\*, 박성수\*\*, 瀬戸口俊明\*\*\*

\*두원공과대학 건축설비과(twkim@doowon.ac.kr), \*\*두원공과대학 자동차과(sspark@doowon.ac.kr),  
 \*\*\*日本 佐賀大學 機械工學科(setoguci@me.saga-u.ac.jp)

## The Experimental Study for the Stall prevention of Wells Turbine

Kim, Tai-Whan\*, Park, Sung-Soo\*\*, T. Setoguchi\*\*\*

\*Dept. of Architectural Facilate, Doowon Industrial College(twkim@doowon.ac.kr),  
 \*\*Dept. of Automobile Eng., Doowon Industrial College(sspark@doowon.ac.kr),  
 \*\*\*Dept. of Mechanical Eng., Saga University, Saga, Japan(setoguci@me.saga-u.ac.jp).

### Abstract

In order to improve the stall characteristics of the Wells turbine blade, experimental investigations have been made in the performance of the Wells turbine with 1), 2) grooved blade surface to reduce fraction drag against the steady and the sinusoidal flow condition. As the conclusion, the two methods are valid to improve the stall characteristics of the Wells turbine.

**Keywords** : 유체기계 (Fluid machinery), 웰즈터빈 (Wells turbine), 파력에너지변환 (wave energy conversion), 태양에너지 (ocean energy)

### 기 호 설 명

b	: 익높이	$r_R$	: 평균반경
$C_A$	: 입력계수{(3)식}	S	: 무차원 주파수(= $f r_R / v$ )
$C_T$	: 토크계수{식(2)}	T	: 파도의 주기(= $1/f$ )
f	: 파도의 주파수(= $1/T$ )	$T_O$	: 출력계수
I	: 동익의 관성모멘트	$T_L$	: 부하된 토크
$\ell$	: 익현장	$U_R$	: 평균반경에서의 익의 주속도
Q	: 체적유량	$v_a$	: 정상류에서의 축류속도
		$V_a$	: 왕복류 정현파에서의 최대 축류속도

- $X_I$  : 무차원 관성모멘트(=  $I/\pi\rho r_R^5$ )
- $X_L$  : 무차원 부하토크(=  $T/\pi\rho r_R^3 v^2$ )
- $z$  : 익의 매수
- $\Delta p$  : 동익전후의 전압차
- $\eta$  : 효율{식(1)}
- $\bar{\eta}$  : 평균효율
- $\rho$  : 공기의 밀도
- $\sigma_R$  : 동익의 평균반경에서의 솔리디티
- $\phi$  : 유량계수{식(4)}
- $\Phi$  : 유량계수
- $\omega$  : 로타의 각속도
- $\omega^*$  : 무차원각속도

## 1. 서 론

대양의 파도 에너지는 새로운 청정에너지로서 아시아, 유럽에서 특히 주의를 끌고 있다. 여러 가지 방법의 파력발전용 기술이 개발되고 있으나, 폭풍이나 해일 등 갑작스런 충격에 의한 발전장치 손상을 고려한 내구성을 고려하여, 파도의 왕복운동을 기류의 왕복운동으로 바꾸어 공기터빈을 작동시키는 OWC(Oscilating Water Column)방식이 일반적으로 많이 사용되고 있다.

1976년에 영국의 A. A. Wells가 OWC방식을 이용한 자기기동식 전현파의 왕복류 상태에서 작동하는 파력발전장치용 익형의 웰즈터빈을 제안하였다. 그러나 웰즈터빈은 종래의 터빈에 비하여 본질적으로 효율이 낮고, 기동 토크가 작으며, 높은 레벨의 소음과, 축 추력이 크다는 단점을 갖고 있다는 것이 판명되었다. 그럼에도 불구하고 웰즈터빈은 형상이 간단하다는 장점으로 인하여 파력발전용 터빈으로 세계적으로 다양하게 사용되고 있기 때문에 성능향상의 연구가 대단히 중요하게 인식되고 있다. 이런 이유로 일본, 영국, 중국, 인도 및 한국 등의 나라에서 성능을 개량하기 위한 연구가

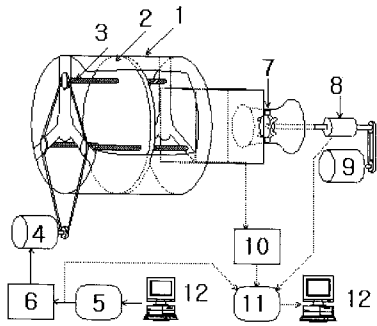
계속되었으며<sup>2),3),4),5)</sup>, 그 결과 웰즈터빈은 축에 수직인 대칭익형의 형상을 하고 있기 때문에, 큰 영역에서는 실속을 피할 수 없다. 따라서 회전수 변화가 심한 축류터빈으로 작동하는 파력발전용 웰즈터빈의 경우는 흐름계수의 작동영역을 넓혀서 실속 특성을 개량할 필요가 있다.

본 연구에서는 웰즈터빈의 실속특성을 개량하기 위하여, 두 가지 방법을 실험적으로 구명하였다. 첫 번째 방법은 항공공학에서의 리브렛(riblets)<sup>6)</sup>의 작용과 유사한 현상을 이용한 것으로, 웰즈터빈 동익의 표면에 그림 2(a)와 같이 홈을 파서 항력을 감소시켜 음압면의 박리를 지연시킴으로써 실속특성을 향상시키려고 한다.

두 번째 방법은 허브에 바이패스 통로를 이용하여, 웰즈터빈 압력면(Pressure side)으로부터 음압면(Suction surface)에 기류를 불어넣어, 음압면의 기류의 운동에너지를 증가시켜서 음압면에서의 박리를 지연시켜 실속특성을 개량하고자 하는 방법이다. 실험적인 연구로서 정상류 상태에서의 동익시험을 수행하였고, 왕복류에서의 터빈의 특성은 준정상해석을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 규명되었다<sup>1),2),3)</sup>.

## 2. 실험장치 및 실험 방법

그림 1은 본 연구에서 사용된 실험 장비를 나타내고 있다. 실험장치는 대형피스톤과 세틀링 챔버(Settling chamber), 직경30cm의 벨 마우스형의 입구와 출구로 구성되어있다. 허브와 케이싱의 비가 0.7인 웰즈터빈의 날개차를 시험부의 중앙에 설치한 후 날개차를 일정한 속도로 회전시키면서 정상류인 정현파의 흐름을 통과시키면서 실험을 실시하였다. 이때 왕복류의 주파수는 일반적인 파도의 주파수인 0.1Hz로 하고 유량은 피토크로 속도의 분포를 측정하여 적분함으로써 유량을 산출했다.



- |                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| 1. Wind Tunnel   | 7. Turbine              |
| 2. Piston        | 8. Torque Transducer    |
| 3. Ball Screw    | 9. Servomotor-Generator |
| 4. Servomotor    | 10. Pressure Transducer |
| 5. D/A Converter | 11. A/D Converter       |
| 6. Servo-Pack    | 12. Micro-Computer      |

그림 1. 실험장비

터빈의 효율은 유량과 세틀링 챔버와 대기사이의 압력강하를 측정하여 터빈에 의하여 생성된 축동력 ( $L_s = Tw$ )으로써 구한다. 실험은 각속도  $\omega$ 는 471 (rad/sec)까지, 유량  $Q$ 는  $0.320(m^3/sec)$ 의 범위 내에서 실험을 실시하였다. 익현장을 기준으로 한 레이놀드수는 약  $1.5 \times 10^5$ 이며 터빈효율의 오차범위는  $\pm 1\%$ 이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

정상류 상태에서 실험을 실시하여 유량계수( $\Phi$ )에 대하여 터빈효율( $\eta$ ), 토오크계수( $C_T$ ) 및 입력계수( $C_A$ )를 실험적으로 평가했다. 터빈효율( $\eta$ ), 토오크계수( $C_T$ ) 및 입력계수( $C_A$ )계수, 및 유량계수( $\Phi$ )의 정의는 다음과 같다.

$$\eta = T_o / (\Delta p Q) = C_T / (C_A \Phi) \quad (1)$$

$$C_T = T_o / (\rho (v_a^2 + U_r^2) b l z r / 2) \quad (2)$$

$$C_A = \Delta p Q / \rho (v_a^2 + U_r^2) b l z v a / 2 \quad (3)$$

$$\Phi = v_a / U_r \quad (4)$$

여기서,  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $U_r$ 은 동익의 평균반

경에서 주속도,  $b$ 는 익의 높이,  $l$ 은 익현장을 각각 나타낸다.

정현과 흐름상태에서의 자기기동특성과 작동특성은 정상류흐름의 데이터를 이용하여 산출한다. 자기기동특성은 다음의 회전체의 운동방정식을 이용하여 산출한다.

$$I(dw/dt) + T_L = T_o \quad (5)$$

여기에서,  $I$ 는 날개차의 관성모멘트를 나타내며,  $T_L$  및  $T_o$ 는 부하된 토오크 및 출력 토오크를 나타낸다. 식(5)는 런지-쿠타-길 법(Runge-Kutta-Gil Method)을 이용하여  $I$ ,  $T_L$ ,  $T_o$  및 흐름의 상태가 주어지면 초기치문제로 풀 수 있으며, (5)식에서 산출된  $\omega$ 를 이용하여 자기기동특성을 판정한다.

유량계수 $\Phi$ 와 평균효율 $\bar{\eta}$ 은 다음의 (6)식과 (7)식으로 정의 한다.

$$\Phi = V_a a / U_r R \quad (6)$$

$$\bar{\eta} = [\frac{1}{T} \int_0^T T_o \omega dt] / [\frac{1}{T} \int_0^T \Delta p Q dt] \quad (7)$$

정현과의 왕복류 흐름상태에서의 평균효율 $\bar{\eta}$ 은 (6)식에 의하여 정의하며, (7)식에서 유량계수 $\Phi$ 에 대한 평균효율을 나타낸다. 계산에 있어서 흐름상태는 준정상상태로 가정하고  $C_T$ 와  $C_A$ 의 값은 정상상태의 실험치를 이용한다.

#### 3.1 익면에 흡을 설치한 익의 성능개선

그림 2는 개략적인 익면의 흡을 나타내고 있다. 여기에서 파라미터는 흡과 흡 사이의 간격을 나타낸다. 그림 3, 4 및 그림 5는 정상류상태에서 실험한 입력계수  $C_A$ , 토오크계수  $C_T$  및 효율  $\eta$ 을 나타낸다. 그림2(b)의 입력계수의 경우는 모든 경우에서 별 차이를 나타내고 있지 않으나, 그림 4의 최대도

오크계수의 값으로부터 홈의 간격 4mm와 8mm의 경우로부터 최대 토크계수의 값과 실속의 지연현상이 크게 나타남을 알 수 있다.

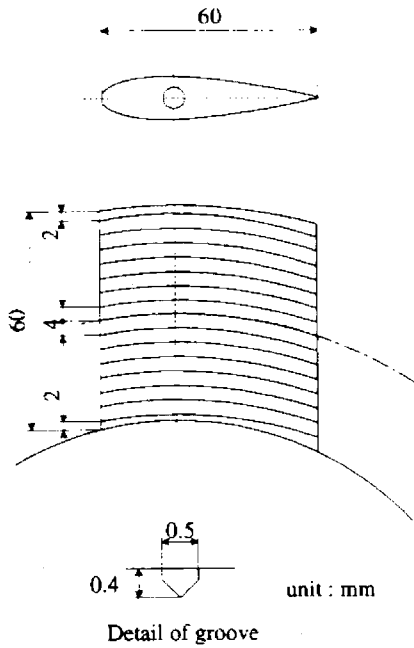


그림 2. Perspective view of grooved blades

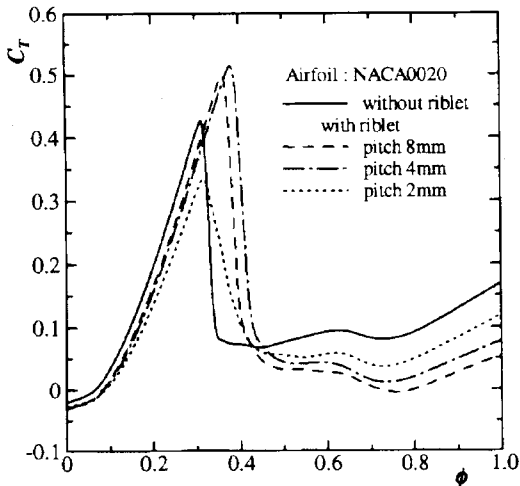


그림 3. Torque coefficient under steady flow conditions

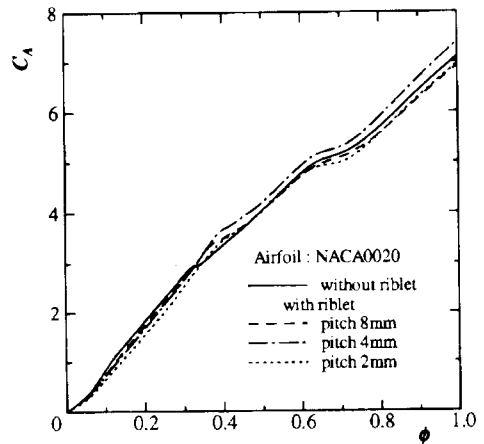


그림 4. Input coefficient under steady flow conditions

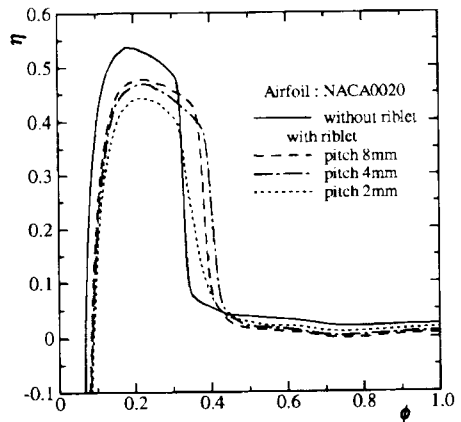


그림 5. Efficiency under steady flow conditions

한편 그림 5로부터 최대효율은 홈을 설치하지 않은 경우에 얻을 수 있었다. 이는 홈을 설치하면 효율이 감소한다는 것을 말해주나, 홈을 설치함으로써 설치하지 않은 익의 실속영역에서 높은 효율을 얻을 수 있기 때문에, 홈을 설치함으로써 넓은 유량계수에서 높은 효율의 얻을 수 있었다.

그림 6에서는 정현과 왕복류 흐름상태의 평균효율  $\bar{\eta}$ 을 나타내고 있으며,  $\bar{\eta}$ 의 정성적인 특성은  $\eta$ 와 유사하다. 그림 7은 자기기동특성을 나타내고 있으며, 종축과 횡축은 각각 무차원시간과 무차원회전

수를 나타내고 있다. 그림에서  $S$ ,  $X_L$ 와  $X_L$ 는 각각 동익의 무차원관성모멘트와 무차원토크를 나타내고 있다. 이 그림에서 모든 터빈은 단시간에 자기동하나 흡을 설치한 터빈이 설치하지 않은 터빈보다 회전수가 상당히 낮다는 것을 알 수 있다.

결과적으로 흡을 설치한 익형은 설치하지 않은 익형보다 최대효율이 감소한다. 그러나 실속이 연장되어 넓은 유량계수의 범위에서 비교적 큰 효율을 얻을 수 있으며, 동작상태에서 회전수가 감소하는 경향을 알 수 있다. 이 실험적 연구에서 흡의 간격이 4mm인 경우에 웰즈터빈의 실속 특성을 개량할 수 있는 최적의 상태임을 알 수 있었다.

### 3.2 바이패스에 의한 성능개선

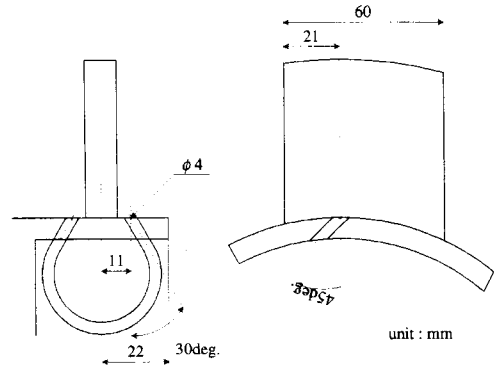


그림 8. Perspective view of bypass hub

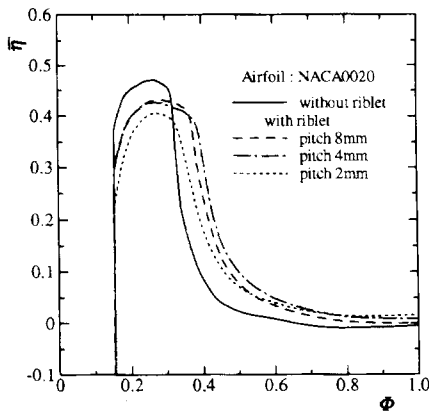


그림 6. Mean efficiency under sinusoidal oscillating flow conditions

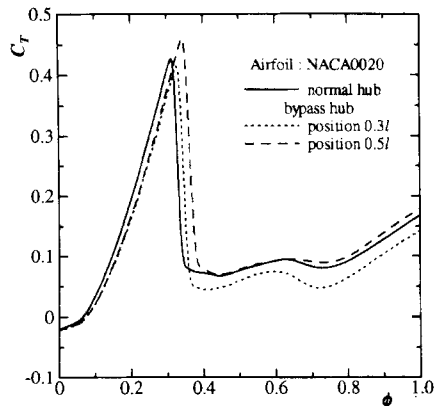


그림 9. Torque coefficient under steady flow conditions

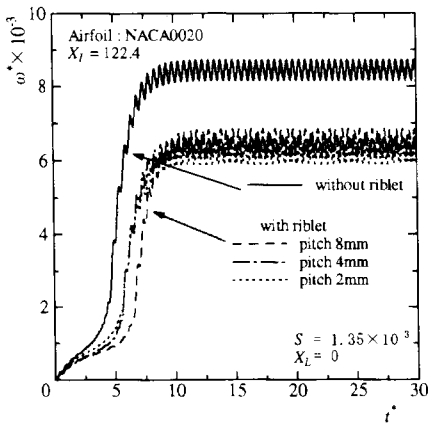


그림 7. Starting characteristics under sinusoidal oscillating flow conditions

그림 8은 웰즈터빈의 익형의 허브에 바이패스 통로를 설치한 모델을 개략적으로 나타내고 있다. 여기에서의 파라미터는 익의 선단으로부터 통로를 설치한 위치를 나타내고 있다. 그림 9, 10 및 그림 11은 정상류상태에서 실험한 입력계수  $C_A$ , 토크계수  $C_T$  및 효율  $\eta$ 를 나타낸다. 그림 4의 최대토크계수의 값으로부터 통로위치가 0.3l, 0.5l인 경우에 실속의 지연현상이 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 바이패스를 설치한 경우에는 설치하지 않은 경우보다 입력계수의 값이 감소하는데, 이는 압력면 측의 고압의 공기가 바이패스를 통하여 음압

면 측으로 흐름으로 인하여 압력면 측의 압력이 감소했음을 의미한다.

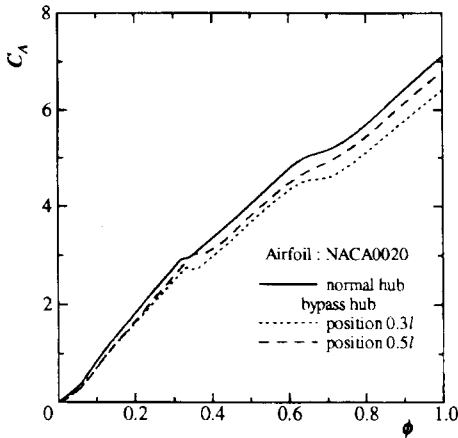


그림 10. Input coefficient under steady flow conditions

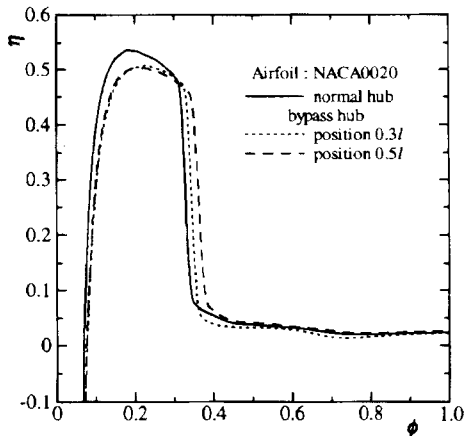


그림 11. Efficiency under steady flow conditions

그림 11은 정상류에서의 작동시험결과로서 바이패스를 설치하지 않은 경우에 최대효율을 얻을 수 있으며, 바이패스설치로 인하여 효율이 감소함을 알 수 있었다. 그러나 바이패스를 설치하지 않은 익의 실속영역에서 바이패스를 설치함으로써 높은 효율을 얻을 수 있기 때문에, 바이패스 설치함으로써 넓은 유량계수에서 높은 효율의 얻을 수 있었다.

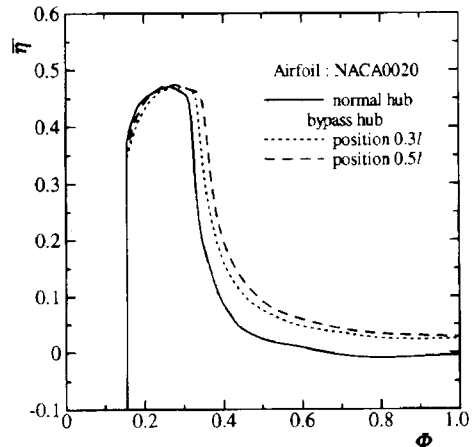


그림 12. Mean efficiency under sinusoidal oscillating flow conditions

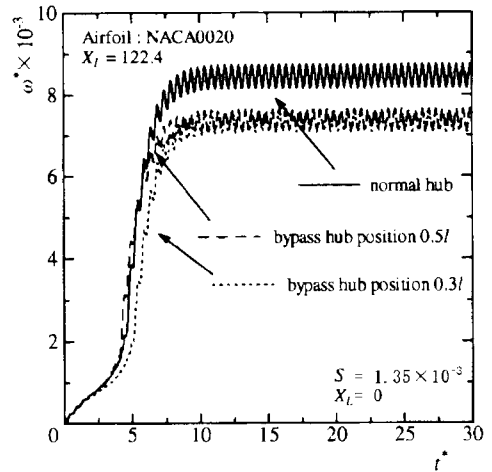


그림 13. Starting characteristics under sinusoidal oscillating flow conditions

그림 12는 정현파 왕복류 흐름상태에 평균효율,  $\bar{\eta}$ 을 나타내고 있으며, 이 그림에서 평균효율의 최대치는 바이패스를 설치하지 않은 경우와 동일한 레벨의 값을 나타내고 있다. 이는 정상류실험과 달리 바이패스를 설치함으로써 효율의 감소가 정현파 왕복류에서 작동하는 터빈의 평균효율의 레벨에 영향을 미치지 않으며 넓은 작동범위를 나타낸다.

그림 13은 기동특성을 나타내고 있으며, 종축과

횡축은 각각 무차원시간과 무차원회전수를 나타내고 있다. 이 그림에서 모든 터빈은 단시간에 자기 기동을 하나 바이패스를 설치한 터빈이 설치하지 않은 터빈보다 회전수가 상당히 낮다는 것을 알 수 있었다.

결과적으로 정현파 왕복류 흐름상태에서 바이패스를 설치한 익형은 설치하지 않은 익형에 비하여 효율이 감소하지 않으며, 실속이 연장되어 넓은 유량계수의 범위에서 비교적 큰 효율을 얻을 수 있었고, 동작상태에서 회전수가 감소하는 경향을 알 수 있었다. 이 실험적 연구에서 익의 선단으로부터 바이패스 비를 0.5ℓ로 한 경우에 웰즈터빈의 실속 특성을 개량할 수 있는 최적의 상태임을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

웰즈터빈의 실속특성을 개량하기 위하여 정상류 상태의 실험적인 연구를 수행하였고, 이 데이터를 이용하여 정현파 왕복류 흐름 상태에서의 터빈의 특성은 준정상해석을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 그 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 흡을 설치한 익형은 설치하지 않은 익형에 비하여 효율이 다소 감소했다. 그러나 실속이 연장되어 넓은 유량계수의 범위에서 비교적 큰 효율을 얻을 수 있으며, 운전회전수가 감소하는 경향을 알 수 있었다. 이 실험적 연구에서 흡의 간격이 4mm인 경우에 웰즈터빈의 실속 특성을 개량할 수 있는 최적의 상태임을 알 수 있었다.
- 2) 정현파 왕복류 흐름상태에서 바이패스를 설치한 익형은 설치하지 않은 익형에 비하여 효율이 감소하지 않으며, 실속이 연장되어 넓은 유량계수의 범위에서 비교적 큰 효율을 얻을 수 있었고, 이 실험적 연구에서 익의 선단으로부터 바이패스 비를 0.5ℓ로 한 경우에 웰즈터빈의 실속 특성을 개량할 수 있는 최적의 상태임을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. Inoue,M, Kaneko,K, Setoguchi,T and Raghunathan,S(1986). "Simulation of Starting Charting Starting Characteristics of Wells Turbine", AIAA/ASME 4th Fluid Mech. Plasma Dynamics Laser Conf., AIAA-86-1122
2. Inoue,M, Kaneko,K, Setoguchi,T and Shimamoto,K(1986). "Study on Wells Turbine for Wave Power Generation (Estimation of Performance by Modeling Test)", Bull. JSME, Vol.29, No.250, pp 1177 -1182
3. Inoue,M, Kaneko,K, Setoguchi,T and Saruwatari,T(1988). "Study on Wells Turbine for Wave Power Generation (Turbine Characteristics and Design Parameter for Irregular Wave)", JSME Int J.. Ser II, Vol.31, No.4, pp 676 -682
4. Inoue,M, Kaneko,K, Setoguchi,T and Hamakawa,H(1989). "Air Turbine with Self-Pitch-Controlled Blades for Wave Power Generator (Estimation of Performance by Modeling Test)", JSME Int J.. Ser II, Vol.32, No.1, pp 19-24
5. Raghunathan,S and Tan.C.P(1982) "Performance and Wells Turbine at Starting" J. Energy Vol.6, pp 430-431
6. Viswanath,PR(2002) "Aircraft Viscous Drag Reduction Using Riblets", Progress in Aircraft Science, Vol.38, pp 571-600
7. White,P(1995) "The Effect of Non-Axisymmetric Flow on Wellsturbine Performance" Proc. 2nd Euro Wave Power Conf., pp 226-231