

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 23, No. 3, 2003

## 파력발전용 웰즈터빈의 동익형상이 성능에 미치는 영향 (제2보 : 최적익형의 형상 제안)

김태환\*, 박성수\*\*, 瀬戸口 俊明\*\*\*, 高尾 學\*\*\*\*

\* 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),

\*\*\*\* 日本 松江高等工業專門學校 電子制御科(takao@matsue-ct.jp)

## The Effect of Rotor Geometry on the Performance of a Wells Turbine for Wave Energy Conversion (Part II : The Suitable Choice of Blade Design Factors)

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

\* Dept. of Architectural Facilate, Doowon Industrial College

\*\* Dept. of Automobile Eng., Doowon Industrial College

\*\*\* Dept. of Mechanical Eng., Saga University, Saga, Japan

\*\*\*\* Department of Control Eng., Matsue College of Technology, Matsue-shi, Shimane, Japan

### Abstract

This paper represents the effect of rotor geometry on the performance of a small-scale Wells turbine for wave energy conversion. In this study, four kinds of blade profile were selected from previous studies with regard to the blade profile of the Wells turbine. The experimental investigations have been performed for two solidities by model testing under steady flow conditions, and then the effect of blade profile on the running and starting characteristics under sinusoidal flow conditions have been investigated by a numerical simulation using a quasi-steady analysis. In addition, the effect of sweep on the turbine characteristics has been investigated for the cases of CA9 and HSIM 15-262123-1576. As a result, a suitable choice of these design factors has been suggested.

**Keywords** : 유체기계(Fluid machinery), 웰즈터빈(Wells turbine), 익형(Airfoil), 파력에너지변환(Wave energy conversion), 해양에너지(Ocean energy).

기 호 설 명

- $b$  : 익 높이
- $C_A$  : 입력계수 [(3)식 참조]
- $C_T$  : 토오크 계수 [(2)식 참조]
- $f$  : 파도의 주파수 [=1/T]
- $g$  : 스윙프 비 (Table 1 참고)
- $I$  : 동익의 관성모멘트
- $l$  : 익현장
- $Q$  : 유량
- $r$  : 평균반경
- $S$  : 무차원주파수 [=fr/Va]
- $t$  : 시간
- $t^*$  : 무차원시간 [=t/T]
- $T_L$  : 부하토오크
- $T_0$  : 출력토오크
- $T$  : 파도의 주기 [=1/f]
- $U_r$  : 평균반경( $r$ )에서의 주속도
- $v_a$  : 평균축류속도
- $V_a$  :  $v_a$ 의 최대값
- $x$  :  $x$ -축을 따라서 축간거리 (그림1참고)
- $X_I$  : 동익의 무차원 관성모멘트[= $I/(\pi r^5)$ ]
- $X_L$  : 무차원 부하토오크[= $T_L/(\pi r^3 V_a^2)$ ]
- $y$  : 축을 따라서 축간거리 (그림1참고)
- $z$  : 동익매수
- $\Delta p$  : 동익에서의 압력강하
- $\Phi$  : 유량계수 [(4)식 참조]
- $\phi$  : 유량계수
- $\eta$  : 효율[ (1) 식 참조 ]
- $\bar{\eta}$  : 평균효율
- $v$  : 허브/팁 비
- $\rho$  : 공기의 밀도
- $\sigma_r$  : 반경 $r$ 에서의 솔리디티[= $lz/(2\pi r)$ ]
- $\omega$  : 동익의 각속도
- $\omega^*$  : 무차원 각속도[= $T\omega$ ]

1. 서 론

파도 에너지를 이용하기 위한 여러 가지의 방법이 있으나, 거친 파도에 의하여 발전장치가 파괴되지

않는 구조적인 장점을 가진 OWC법 (Oscillating Water Column Method)이 가장 널리 사용되어진다. OWC법의 챔버는 부양체로 되어있거나 혹은 해저에 고정되어 있는 경우가 있으나, 어느 쪽이나 물 속에 잠겨있는 쪽은 완전히 개방되어 파도에 의한 해수면의 상하운동을 그대로 챔버 내부에 유입하도록 설계되었다. 유입된 수면의 자유면 왕복운동에 의하여 챔버의 내부에서 공기의 왕복운동으로 변환되어지고, 다시 이 왕복기류의 흐름은 터빈에 의하여 기계적 에너지로 변환되어진다. 대표적으로 가장 널리 사용되는 파력발전장치는 일본에서 개발된 OWC방법<sup>1)</sup>으로서 부표를 이용한 장치이며, 이는 자기가변형 축류 웰즈터빈을 부표에 설치한 형태이다.<sup>1-3)</sup> 이와 같이 부표를 이용한 웰즈터빈은 LIMPET시스템이나 Islay U.K<sup>4,5)</sup>와 같은 파력발전장치에 비하여 소형이기 때문에, 소형 웰즈터빈의 동익형상이 성능에 미치는 영향을 구명하는 것은 대단히 중요하다.

웰즈터빈의 작동성능 및 시동성능에 관한 연구는 대단히 많이 행하여졌으며, 지금까지의 연구에서 NACA0020(일본, Saga대학)<sup>6,7)</sup>; NACA0021(영국 Queens대학)<sup>7,8)</sup>; CA9(아일랜드 Limerick 대학)<sup>9)</sup>; 및 HSIM15-262123-1576(포르투갈 Lisbon 공과대학)<sup>10)</sup>과 같은 익형들이 성능이 양호한 것으로 보고되었다.

그러나, 지금까지 발표된 연구결과는 정상류에서 실험한 결과이며, 실제의 파력 발전용 터빈이 작동 환경인 비정상류에서 터빈 익형의 성능을 기술한 논문은 없으며, 웰즈터빈 익형의 스윙프에 의한 성능변화에 대하여 발표된 적이 없다.<sup>7,11)</sup> 본 연구의 목적은 소형 웰즈터빈의 익형이 터빈성능에 미치는 영향을 구명하는 것이다. 이전의 연구에서 많이 채택된 적이 있는 4종류의 웰즈터빈의 대칭형 익형을 이용하여 실험을 실시하여 동작 특성과 기동특성을 비교하였다. 사용된 익형은 NACA 0020, NACA0015, CA9 그리고 HSIM15-262123-1576(그림 1)이다.

제1보에서는 터빈의 최적 익형을 결정하기 위하여, 정상류 상태에서 2가지의 솔리디티에서 실험적인 조사를 실시하고, 익형이 사인파의 왕복류 상태에서의 작동특성 및 기동특성에 미치는 영향을 조사하여, 모든 익형에 있어서 스윙프비 ( $g=0.35$ )가 가장 최적임이 판명되었다. 제2보에서는 스윙프비( $g=0.35$ )에서의 이들 웰즈터빈 익형의 전반적인 성능을 비교하여 파력발전용 터빈의 최적익형의 형상을 제안한다.

## 2. 웰즈터빈의 익형

1976년 OWC형 파력발전용 자기가변형 터빈 익형으로서 웰즈터빈이 적합하다는 사실이 제안되었으며, 웰즈터빈의 기동특성과 작동특성에 대한 많은 연구결과가 발표되었다.<sup>12-15)</sup> 지금까지의 연구에 의하면, 웰즈터빈 동익의 익형은 NACA 계열의 두께비가 약 20% 대칭익형이 바람직한 것으로 보고되어 왔으며<sup>6-8)</sup>, 한편으로는 최근 CA9와 HSIM15-262123-1576 (다음 부터는

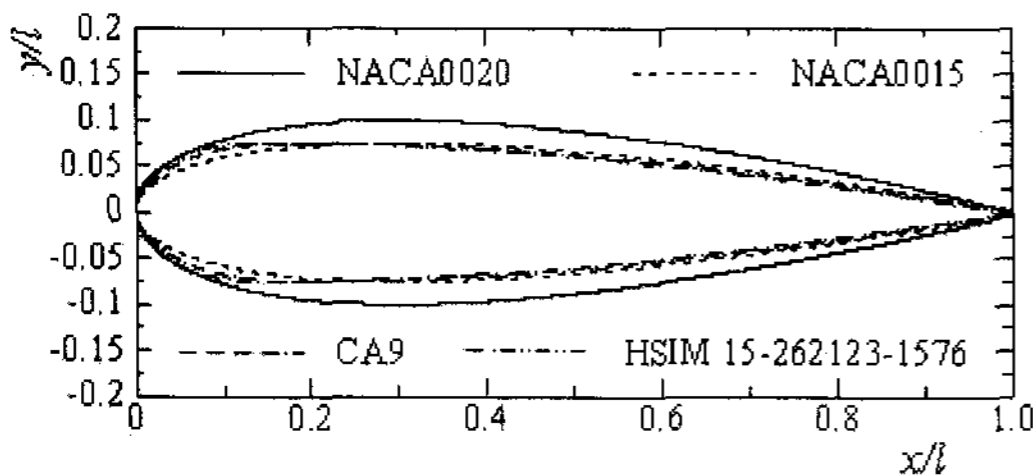
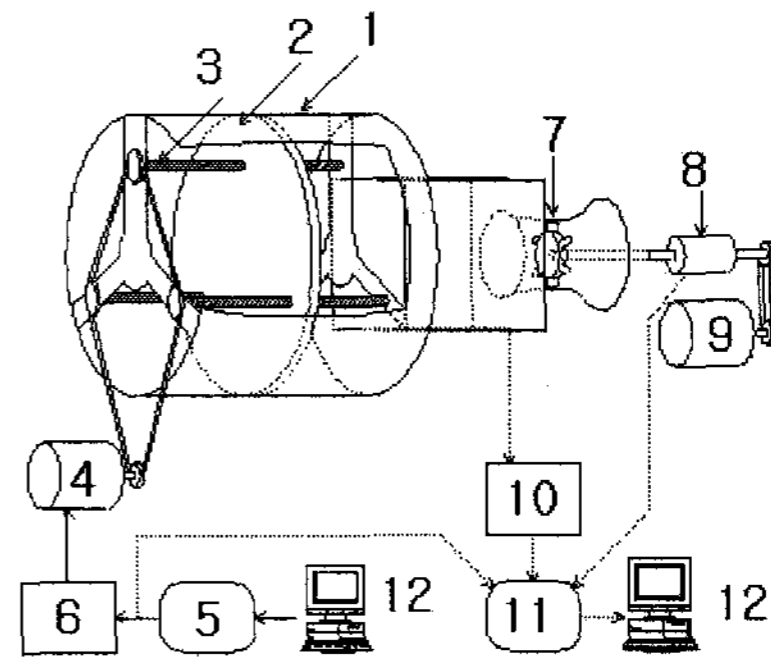


그림 1. Blade Profiles

표 1. Specification of turbines

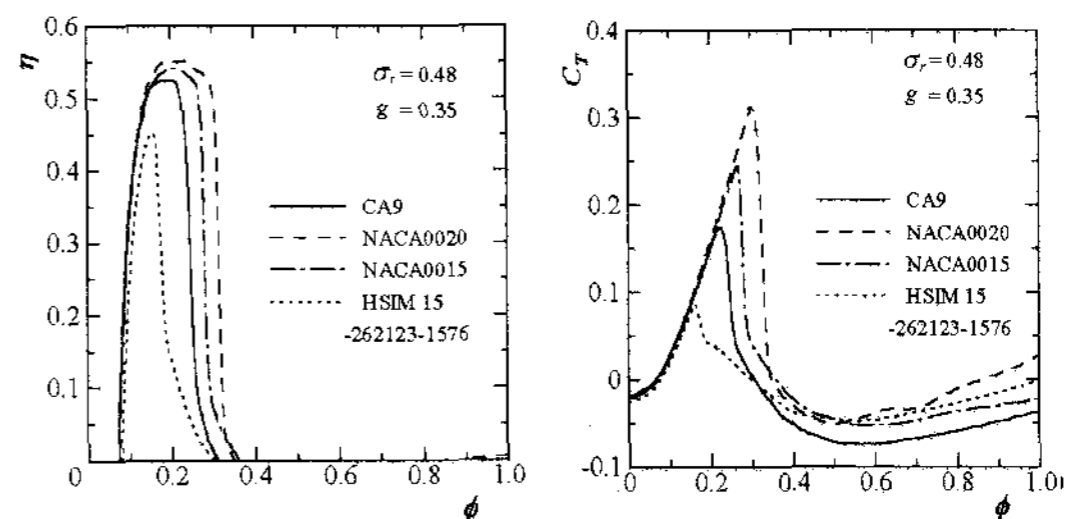
Airfoil	Thickness ratio	Sweep ratio $g$	Solidity at mean radius $\sigma_r$ (Number of rotor blades $z$ )	Remarks
NACA0020	0.20	0.35	0.48(6), 0.64(8)	Rotor diameter = 298 mm Hub-to-tip ratio $\nu=0.6$ Tip clearance = 1 mm Chord length $l=60$ mm Aspect ratio = 1
NACA0015	0.15	0.35		
CA9	0.15	0.35		
HSIM15-262123-1576	0.15	0.5		
		0.35		
		0.5		

HSIM15로 칭함)등이 동익의 박리를 지연시켜 실속을 지연시키기 위하여 새롭게 고안되었다.<sup>9,10)</sup>

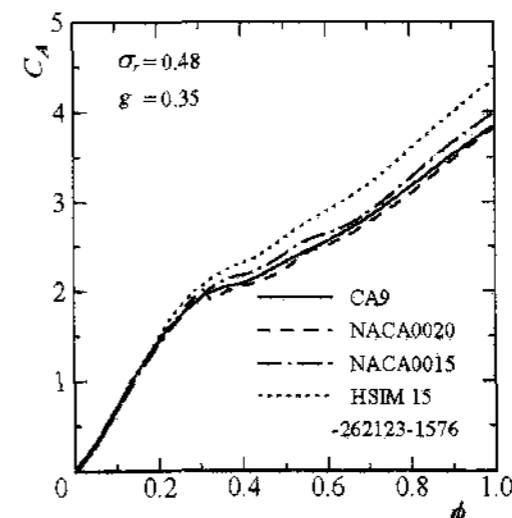


- 1. Wind Tunnel
- 2. Piston
- 3. Ball Screw
- 4. Servomotor
- 5. D/A Converter
- 6. Servo-Pack
- 7. Turbine
- 8. Torque Transducer
- 9. Servomotor-Generator
- 10. Pressure Transducer
- 11. A/D Converter
- 12. Micro-Computer

그림 2. Test Apparatus



(a) Efficiency (b) Torque Coefficient



(c) Input Coefficient

그림 3. Effect of blade profile on turbine characteristics under steady flow condition ( $\sigma_r = 0.48$ )

그림 1은 CA9와 HSI15의 익형 및 NACA 0020 와 NACA0015의 익형을 동시에 나타내고 있다. CA9와 HSI15의 익형은 익선단의 반경과 최고 최대익두께의 위치와 익후단의 경사를 변화시켜 설계된 익형은 익면의 박리가 역 압력구배에 의하여 발생하기 때문에, 익형둘레의 압력분포를 개량하기 위하여 실험적 연구에 의하여 최적화된 익형이다.

이들 개량된 익형은 비교적 높은 레이놀즈수의 정상류 흐름상태에서의 실험적 연구에 의하여 최적화되어 졌다.<sup>9,10)</sup> 그러나 이들 익형의 비정상류 상태에서의 특성과 낮은 레이놀즈수에서의 터빈의 특성은 구명되지 않았다.

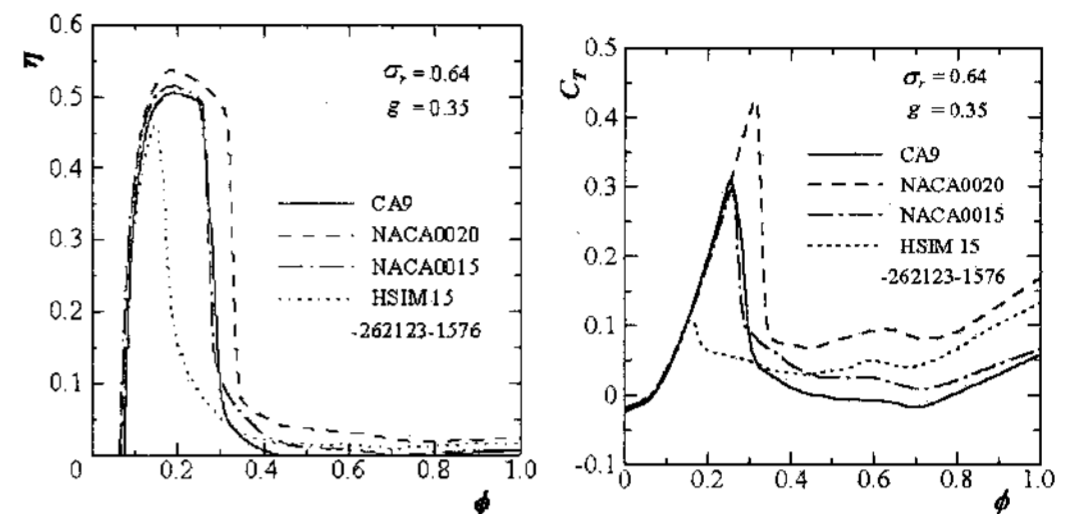
OWC형 파력발전용 터빈은 왕복흐름의 왕복류 상태에서 작동해야 하므로 최적화된 2종류의 익형은 비정상류 상태에서 실험적 연구를 수행하여 NACA익형과 특성을 비교 및 검토하여 그 실용도를 검증할 필요가 있다.

그림 2는 개략적인 실험장치를 나타내고 있으며, 장비의 구조와 실험방법은 참고문헌<sup>3)</sup>에 상세히 기술되어 있다.

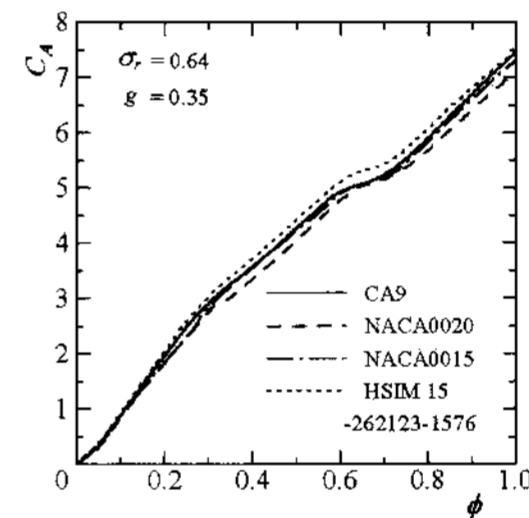
본 연구에서는 익현장 ( $l$ )이 60mm인 4종류의 대칭 익형을 이용하여 실험을 실시하였으며, 익형의 사양은 그림 1과 표 1에서 각각 나타내고 있으며, 스위프비( $g$ ) 또한 표1에 명시되어 있다. 모든 테스트 익형의 솔리디티( $\sigma_r$ )는  $\sigma_r=0.48$  과 0.64로 하여 실험을 실시하였다. 웰즈터빈용 익형으로서 NACA0021이 양호한 것으로 발표되었으나<sup>7,8)</sup>, 이는 두께비가 1% 다른 것 이외는 NACA0020와 유사한 익형이다. 그러므로 두께비가 약 0.2인 NACA0020익형을 이용했다. 한편 NACA0015익형은 CA9 와 HSI15가 두께비가 0.15 이므로 비교를 위하여 실험에 이용되었다.

NACA0020의 데이터는 참고문헌<sup>7,8)</sup>의 스위프비에 대한 자료를 이용하며, 참고문헌에서  $g=0.35$ 에서 가장 우수한 성능을 가지며, 평균반경

에서의 익현장과 상대속도를 기준으로 한 레이놀즈수  $Re=2.2 \times 10^5$  에서 최대효율을 얻었다.



(a) Efficiency (b) Torque Coefficient



(c) Input Coefficient

그림 4. Effect of blade profile on turbine characteristics under steady flow condition ( $\sigma_r = 0.64$ )

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 익형상의 영향

OWC형의 파력발전용 터빈은 사인파형의 흐름속에서 작동하기 때문에, 왕복류 상태에서 터빈의 특성을 연구하는 것은 대단히 중요하다. 스위프비의 효과가 터빈의 특성에 미치는 영향을 구명하기 위하여 사인파의 왕복류 상태에서의 터빈의 특성에 관한 수치시뮬레이션을 실시했다. 제1보의 그림 3, 그림 4, 그림 5 및 그림 6에서 터빈의 정상류에서의 특성 데이터를 이용하여 준정상 해석법에 의하여 사인파형의 흐름에서의 특성을 시뮬레이션 계산을 실시하였다. 준정상해석법<sup>14)</sup>은 이전의 연구에서 그 유효성이 증명되었으며, 준정상해석법을 이용하여 터빈의 기동특성과 동작특성을

예측할 수 있다.<sup>9)</sup>

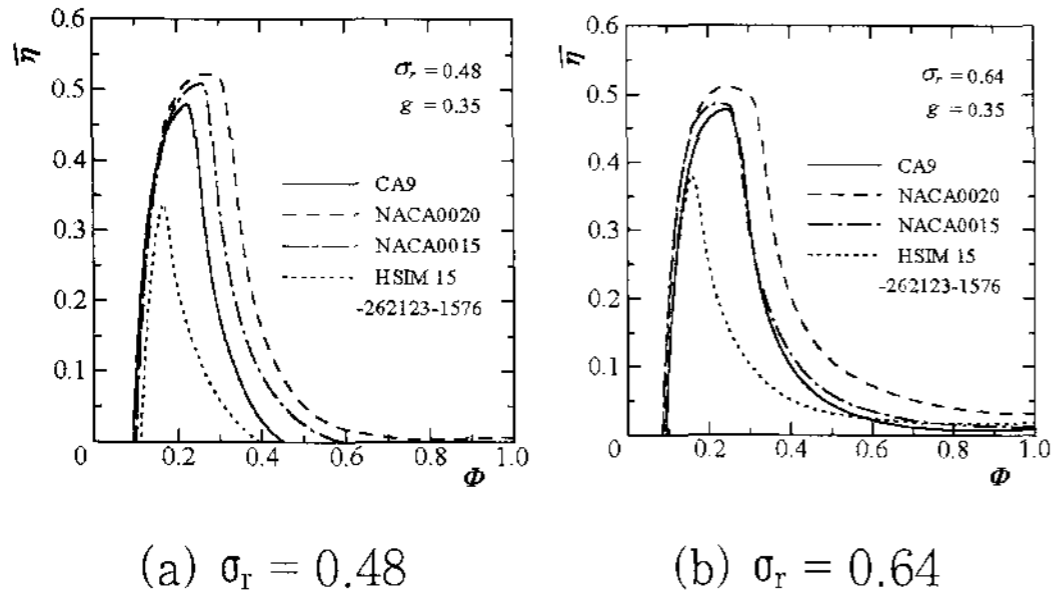


그림 5. Effect of blade profile on mean efficiency under sinusoidal flow condition.

### 3.2 정상류 상태에서의 터빈의 특성

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

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

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

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

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

그림 3 과 그림 4에서는 정상류상태에서 터빈의 익형상이 터빈의 특성에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 2종류의 솔리디티의 값에 관계없이 NACA0020의 익형을 장착한 터빈에서 최대효율을 얻을 수 있었으며, 모든 익형 가운데에서 NACA0020이 가장 큰 실속각을 가지고 있다.

한편, 최적익형에 대하여 NACA 익형에 비하여 다른 익형의 효율과 실속각이 바람직하지 않으며, 특히 HSIM15의 경우 효율이 대단히 낮으며 작동범위도 아주 좁다. 그러므로 높은 레이놀즈수에서 HSIM15익형은 NACA0015보다 넓은 범위의 실속각을 갖지만<sup>10)</sup>, 저 레이놀즈수에서 작

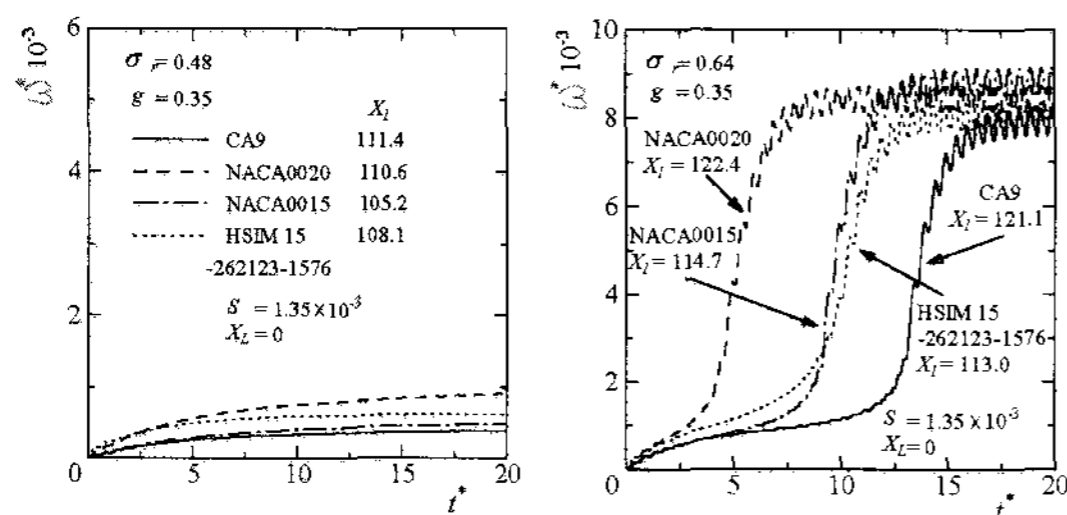
동하는 웰즈터빈의 익형으로서 적당하지 않다. 그 이유는 다음과 같이 추론되어진다. 일반적으로, 익형의 실속특성은 익선단의 형상에 크게 의존한다. 그림1에서 나타낸 바와 같이, 본 연구에서 사용한 HSIM15익형의 선단의 반경은 NACA0020의 것과 유사하다. 그러므로 HSIM15익을 장착한 터빈의 실속특성이 꼭 같은 두께비에 더 적은 선단반경을 가진 NACA0015를 장착한 것 보다 더 우수한 것으로 예상될 수 있다. 그러나 낮은 상대흐름의 유량계수에서 익의 부압면에서 박리가 일어난 것으로 추측되어진다. 그 이유로는 참고문헌<sup>10)</sup>의 경우와 비교하여,  $x/l=0.1$ 에서의 곡률반경이 적고 레이놀즈수가 비교적 낮다는 것 때문으로 사료되어진다. 결과적으로 HSIM15를 장착한 터빈의 실속점은 NACA0020의 거의 절반의 유량계수에 위치한다. 또한, HSIM15익형의  $C_A$ 는 그림 3(a)와 4(a)에서 나타내는 바와 같이 작동영역 내에서 NACA익형보다 더 높으며, 이로 인하여 그림3(c)와 4(c)에서 보는 바와 같이 부표를 이용한 OWC시스템의 파력발전 장치에서 축 방향 추력을 크게 하고, 에너지 변환 효율이 낮게 하는 원인이 되는 것으로 사료된다<sup>16)</sup>.

### 3.3 사인파형의 왕복류에서의 터빈특성

그림 5는 사인파의 왕복류 상태에서의 익형상이 터빈의 평균효율에 미치는 영향을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 2종류의 솔리디티에서 NACA0020를 장착한 터빈의 효율이 가장 높으며, 작동영역도 NACA0020의 경우가 가장 넓으며, 최대효율이 차지하고 있는 유량계수의 영역도 가장 크다. 또한 NACA0020 익형을 장착한 웰즈터빈은 작동 회전수가 낮은 관계로 터빈의 소음 레벨 또한 낮다.<sup>16)</sup>

그림 6에서는 사인파형의 왕복류에서 익형의 자기기동 특성을 나타내고 있다.  $\sigma_r=0.48$ 인 경우 모든 터빈은 자기기동하지 않으나,  $\sigma_r=0.64$ 인 경우에는 모든 터빈은 자기기동한다. 이는  $\sigma$

$r=0.48$  인 경우에는 고 유량계수에서  $C_T$  의 값이 음의 값을 나타내나 그림 11(b),  $\sigma_r=0.64$  인 경우에 거의 모든 범위의 유량계수에서  $C_T$  의 값이 양의 값을 나타내기 때문이다. 그리고 그림 6(b)에서 NACA0020에 대한 자기기동특성이 나머지 3종의 익형보다 양호하다는 것을 알 수 있다. 이것에 대한 원인은 그림6(b)에서 고 유량계수에서  $C_T$ 의 NACA0020의  $C_T$ 의 값이 모든 터빈 중에서 가장 높다는 것으로서 명백해진다. 이상의 결론으로부터 소규모의 웰즈터빈에 사용하는 최적익형으로서 NACA익형에 두께비가 약 20%인 익형이 2종의 솔리디티에서 가장 적합한 것으로 결론을 짓는다.



(a)  $\sigma_r=0.48$

(b)  $\sigma_r=0.64$

그림 6. Effect of blade profile on starting characteristics under sinusoidal flow condition.

#### 4. 결 론

파력발전용 소형웰즈터빈용 동익의 익형의 영향을 구명하기 위하여, 지금까지의 웰즈터빈용 익형으로서 연구에서 우수한 것으로 판명된 4종류의 익형을 선택하고, 2종류의 솔리디티로 익형을 정상류 상태에서 모델실험을 실시하였다. 또한, 실험에서 얻어진 데이터를 이용하여 사인파의 왕복류에서의 작동특성과 기동특성을 준정상해석법을 이용한 시뮬레이션을 이용하여 연구하였다. 그리고 CA9익형과 HSIM15-262123-1576익형에 대해서 스윙프비와 익형상에 대한 터빈 특성을

조사하였다. 그 결과 소형웰즈터빈용 익형으로서 두께비가 약 20%의 NACA익형으로서 스윙프비가 0.35인 익형이 가장 우수한 익형으로 판명되었다.

#### 참 고 문 헌

1. Setoguchi, T. and Takao, M. 'State of Art on Self-Rectifying Air Turbines for Wave Energy Conversion Proceedings of the 4th International Conference on Mechanical Engineering, Dhaka, Bangladesh, December 2001 p. 117-126.
2. Neal, A. N. 'Air Turbine for Use with Alternating Flows - the Choices' Proceedings of European Wave Energy, Edinburgh, U.K., July 1993 p. 1-6.
3. Kaneko, K., Setoguchi, T. and Raghunathan, S. 'Self-Rectifying Turbine for Wave Energy Conversion' Proceedings of the 1st International Offshore and Polar Engineering Conference, Edinburgh, U.K., August 1991 p. 358-392.
4. Renewable Energy World, January-February 2001 p. 18.
5. Boake, C. B., Whittaker, T. J. T., Folley, M. and Ellen, H. 'Overview and Initial Operational Experience of the LIMPET Wave Energy Plant' Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 1 May 2002 p. 586-594.
6. Setoguchi, T., Kaneko, K. and Inoue, M. 'Determination of Optimum Geometry of Wells Turbine Rotor for Wave Power Generator - Part I - Performances of Isolated Airfoils and Rotors' Proceedings of the 9th Annual Energy - Sources Technology Conference and Exhibition, ASME, USA, February 1986 p. 435-440.



7. Raghunathan, S., Setoguchi, T. and Kaneko, K. 'Aerodynamics of Monoplane Wells Turbine- A Review' International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 4 No. 1 March 1994 p. 68-75.
8. Raghunathan, S. and Tan, C.P. 'Effect of Blade Profile on the Performance of the Wells Self-Rectifying Air Turbine' International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 6 No. 1 March 1985 p. 17-22.
9. Thakker, A., Frawley, P., Bajjeet, E. S. and Heffernan, A. 'Experimental Investigation of CA9 on a 0.3m Wells Turbine Rig' Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seattle, USA, Vol. 1 May 2000 p. 345-350.
10. Webster, M. and Gato, L. M. C. 'The Effect of Rotor Blade Shape on the Performance of the Wells Turbine' Proceedings of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France, Vol. 1 May 1999 p. 169-173.
11. Webster, M. and Gato, L.M.C. 'The Effect of Rotor Blade Sweep on the Performance of the Wells Turbine' Proceedings of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal, Canada, Vol. 1 May 1998 p.94-99.
12. Gato, L. and Warfield, V. 'Performance of a High-solidity Wells turbine for an OWC Wave Power Plant' Proceedings of European Wave Energy Symp. NEL 1993 p.181-190.
13. Inoue, M., Kaneko, K., Setoguchi, T. and Shimamoto, K. 'Studies of Wells Turbine for Wave Power Generator' Bulletin of JSME Vol. 29, No. 250 1986 p.1171-1182.
14. Inoue, M., Kaneko, K., Setoguchi, T. and Raghunathan, S. 'Simulation of Starting Characteristics of the Wells Turbine' Proceedings of AIAA/ASME 4th Fluid Mechanics Plasma Dynamic Laser Conference, 1986 AIAA-86-1122.
15. Raghunathan, S., Setoguchi, T. and Kaneko, K. 'The Wells Air Turbine Subjected to Inlet Flow Distortion and High Levels of Turbulence' International Journal of Heat and Fluid Flow Vol. 8 No. 2 1987 p. 165-167.
16. Kim, T. H., Takao, M., Setoguchi, T., Kaneko, K. and Inoue, M. 'Performance Comparison of Turbines for Wave Power Conversion'. International Journal of Thermal Sciences, Editions Elsevier, Vol. 40, No. 7 July 2001 p. 681-689.