

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
*Journal of the Korean Solar Energy Society*  
Vol. 23, No. 2, 2003

## 파력발전용 웰즈터빈의 동익형상이 성능에 미치는 영향 (제1보 : 스위프비의 영향)

### The Effect of Rotor Geometry on the Performance of a Wells Turbine for Wave Energy Conversion (Part I : The Effect of Sweep Ratio on Turbine Performance)

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

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

**Key words** : 유체기계(Fluid machinery), 웰즈터빈(Wells turbine), 익형(Airfoil),  
파력에너지변환(Wave energy conversion), 태양에너지(Ocean energy)

#### Abstract

This paper presents the effect of rotor geometry on the performance of a small-scale Wells turbine for wave energy conversion. In this study, four kinds the Wells turbine of blade profile were selected from previous studies. The types of blade profile included in the papers are as follows : NACA0020 ; NACA0015 ; CA9 ; and HSIM 15-262123-1576. The experimental investigations have been performed for two solidities by testing model under steady flow conditions. The effect of blade profile on the running and starting characteristics under sinusoidal flow conditions have also been investigated by a numerical simulation based on a quasi-steady analysis. In addition, the effect of sweep on the turbine characteristics has been studied for the cases of CA9 and HSIM 15-262123-1576. Based on the evaluation, a suitable choice of these design factors has been suggested. As a result, it seems that a suitable choice of the sweep ratio of 0.35 for the blade profile of the Wells turbine.

\* 두원공과대학 건축설비과

\*\* 두원공과대학 자동차과

\*\*\* 日本 佐賀大學 機械工學科

\*\*\*\* 日本 松江高等工業專門學校 電子制御科

\* 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., Matsuel College of Technology,  
Matsue-shi, Shimane, Japan

■ 기호설명 ■

- $b$  : 익 높이
- $C_A$  : 입력계수 [(3)식 참조]
- $C_T$  : 토오크 계수 [(2)식 참조]
- $f$  : 파도의 주파수[  $=1/T$  ]
- $g$  : 스위프 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
- $va$  : 평균축류속도
- $Va$  :  $va$ 의 최대값
- $x$  :  $x$ -축을 따라서 축간거리 (그림1참고)
- $X_I$  : 동익의 무차원 관성모멘트[  $=I/(\pi r^5)$  ]
- $X_L$  : 무차원 부하토오크[  $=T_L/(\pi r^3 Va^2)$  ]
- $y$  : 축을 따라서 축간거리 (그림1참고)
- $z$  : 동익매수
- $\Delta p$  : 동익에서의 압력강하
- $\Phi$  : 유량계수 [ (4)식 과 (10)식 참조]
- $\phi$  : 유량계수 [ (8)식 참조]
- $\eta$  : 효율[ (1) 식 참조 ]
- : 평균효율[(7)식 과 (9)식 참조]
- $v$  : 허브/팁 비
- $\rho$  : 공기의 밀도
- $\sigma_r$  :  $r$  에서의 솔리디티[  $=lz/(2\pi r)$  ]
- $\omega$  : 동익의 각속도
- $\omega^*$  : 무차원각속도[  $=T\omega$  ]

1. 서론

대표적으로 가장 널리 사용되는 파력발전장치는 일본에서 개발된 OWC방법[1]으로서 부표를 이용한 장치이며, 이는 자기 가변형 축류 웰즈터빈을 부표에 설치한 형태이다[1,2]. 이와 같이 부표를 이용한 웰즈터빈은 LIMPET시스템이나 Islay U.K[10,11]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)[2,3]; NACA0021(영국 Queens대학)[4,5]; CA9(아일랜드 Limerick 대학)[6]; 및 HSI15-262123-1576(포르투갈 Lisbon 공과대학)[7,8]과 같은 익형들의 성능이 양호한 것으로 보고되었다.

그러나, 지금까지 발표된 연구결과는 정상류에서 실험한 결과이며, 실재의 파력 발전용 터빈의 작동 환경인 비정상류에서 터빈 익형의 성능을 기술한 논문은 없었으며, 특히 웰즈터빈 익형의 스위프에 의한 성능변화에 대하여 발표된 적이 없었다[4, 8]. 본 연구의 목적은 소형 웰즈터빈의 익형이 터빈성능에 미치는 영향을 구명하는 것이며, 이전의 연구에서 많이 채택된 적이 있는 4종류의 웰즈터빈의 대칭형 익형을 이용하여 실험을 실시하여 동작특성과 기동특성을 비교하였다. 사용된 익형은 NACA 0020, NACA0015, CA9 그리고 HSI15-262123-1576 (그림 1)이다.

제1보에서는 터빈의 정상류 상태에서 2가지의 솔리디티에서 실험적인 조사를 실시하고, 익형이 사인파의 왕복류 상태에서의 스위프비가 작동특성 및 기동특성에 미치는 영향을 조사하여, 최적 스위프비를 결정하고 제2보에서는 최적 스위프비에서 이들 4종류의 웰즈터빈 익형에

대한 전반적인 성능을 비교하여 소형 파력발전용 터빈의 최적익형의 형상을 제안하려고 한다.

### 웰즈터빈의 익형

1976년 OWC형 파력발전용 터빈의 익형으로서 웰즈터빈이 적합하다는 사실이 제안된 후, 지금까지의 연구에 의하면, 웰즈터빈 동익의 익형은 NACA계열의 두께비가 약 20% 대칭익형이 바람직한 것으로 보고되었다.[3-5] 최근 CA9와 HSIM15-262123-1576(이 다음의 문장에서는 HSIM15로 칭함)등이 동익의 박리를 지연시킴으로써 실속을 지연시키기 위하여 새롭게 고안되었다[6,7].

그림1은 CA9와 HSIM15의 익형 및 NACA 0020 와 NACA0015의 익형을 동시에 나타내고 있다. CA9와 HSIM15의 익형은 익선단의 반경과 최고 익두께의 위치와 익후단의 경사를 변화시켜 설계된 익형은, 익면의 박리가 역압력 구배에 의하여 발생하기 때문에, 익 둘레의 압력분포를 개량하기 위한 실험적 연구를 통해 최적화된 익형이다.

이들 개량된 익형은 비교적 높은 레이놀즈수의 정상류 흐름상태에서의 실험적 연구에 의하여 최적화되어 졌다[6,7]. 그러나 이들 익형의 비정상류 상태에서의 특성과 낮은 레이놀즈수에서의 터빈의 특성은 구명되지 않았다. OWC형 파력발전용 터빈은 왕복흐름의 왕복류 상태에서 작동해야 하므로 최적화된 2종류의 익형은 비정상

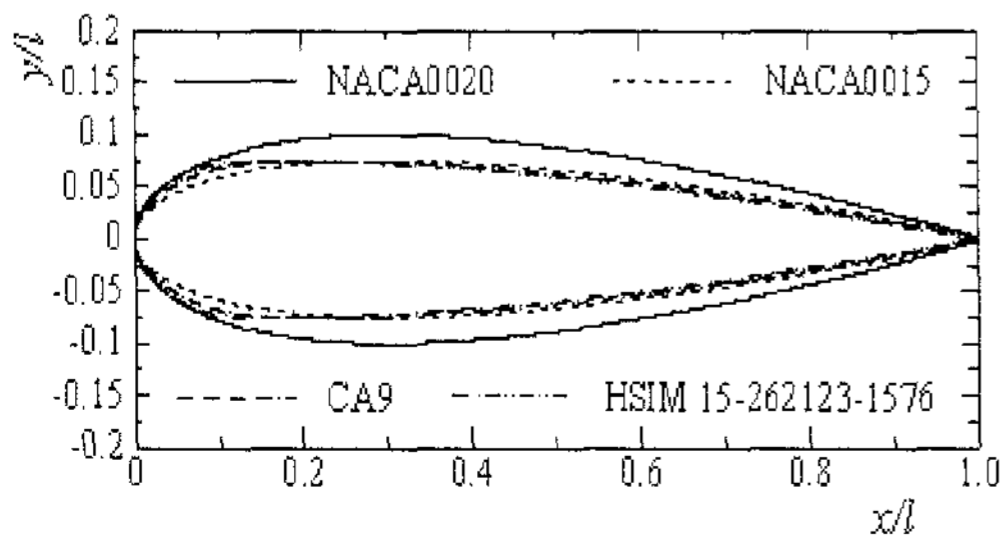
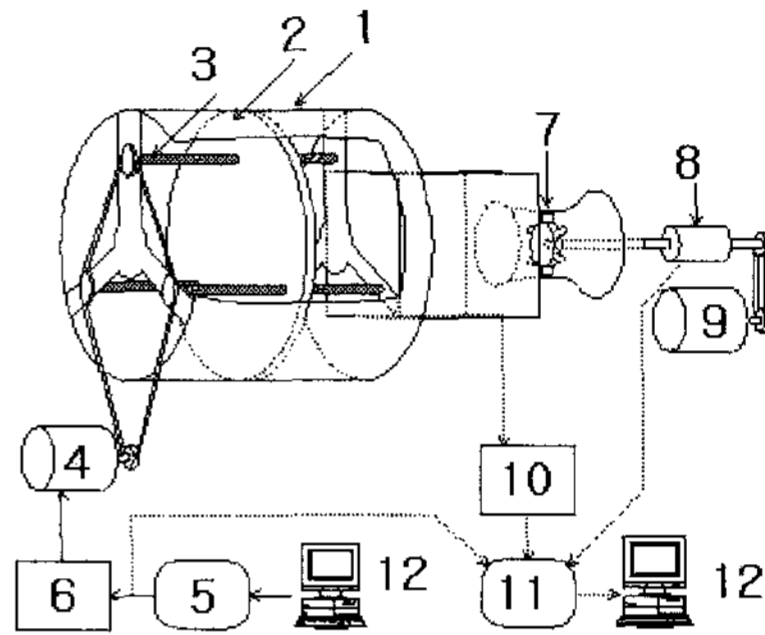


그림 1. Blade Profiles

류 상태에서 실험적 연구를 수행하여 NACA의 형과 특성을 비교 검토하여 그 실용도를 검정할 필요가 있다.

### 2. 실험장치 및 방법



- |                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| 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 2. Test Apparatus

그림 2에서는 개략적인 실험장치를 나타내고 있으며, 장비의 구조와 실험방법은 참고문헌 [2,3]에 상세히 기술되어있다. 본 연구에서는 익현장,  $l$  이 60mm인 4종류의 대칭 익형을 이용하여 실험을 실시하였으며, 익형의 사양은 그림1과 표 1에 각각 나타내고 있으며, 스유프비 ( $g$ ) 또한 표1에 명시되어 있다. 모든 테스트 익형의 솔리디티( $\sigma_r$ )는 0.48 과 0.64로 하여 실험을 실시하였다.

웰즈터빈용 익형으로서NACA0021이 양호한 것으로 발표되었으나[4, 5], 이는 두께비가 1% 다른 것 이외는 NACA0020와 유사한 익형이다. 그러므로 두께비가 약 0.2인 NACA0020의 형을 이용했다. 한편 NACA0015익형은 CA9와 HSIM15가 두께비가 0.15이므로 비교를 위하여 실험에 이용되었다. NACA0020의 데이터는 참고문헌[4], [5]의 스유프비에 대한 자료를

이용하며, 참고문헌에서  $g=0.35$ 에서 가장 우수한 성능을 가지며, 평균반경에서의 익현장과 상대속도를 기준으로 한 레이놀즈수  $Re=2.2 \times 10^5$ 에서 최대효율을 얻었다.

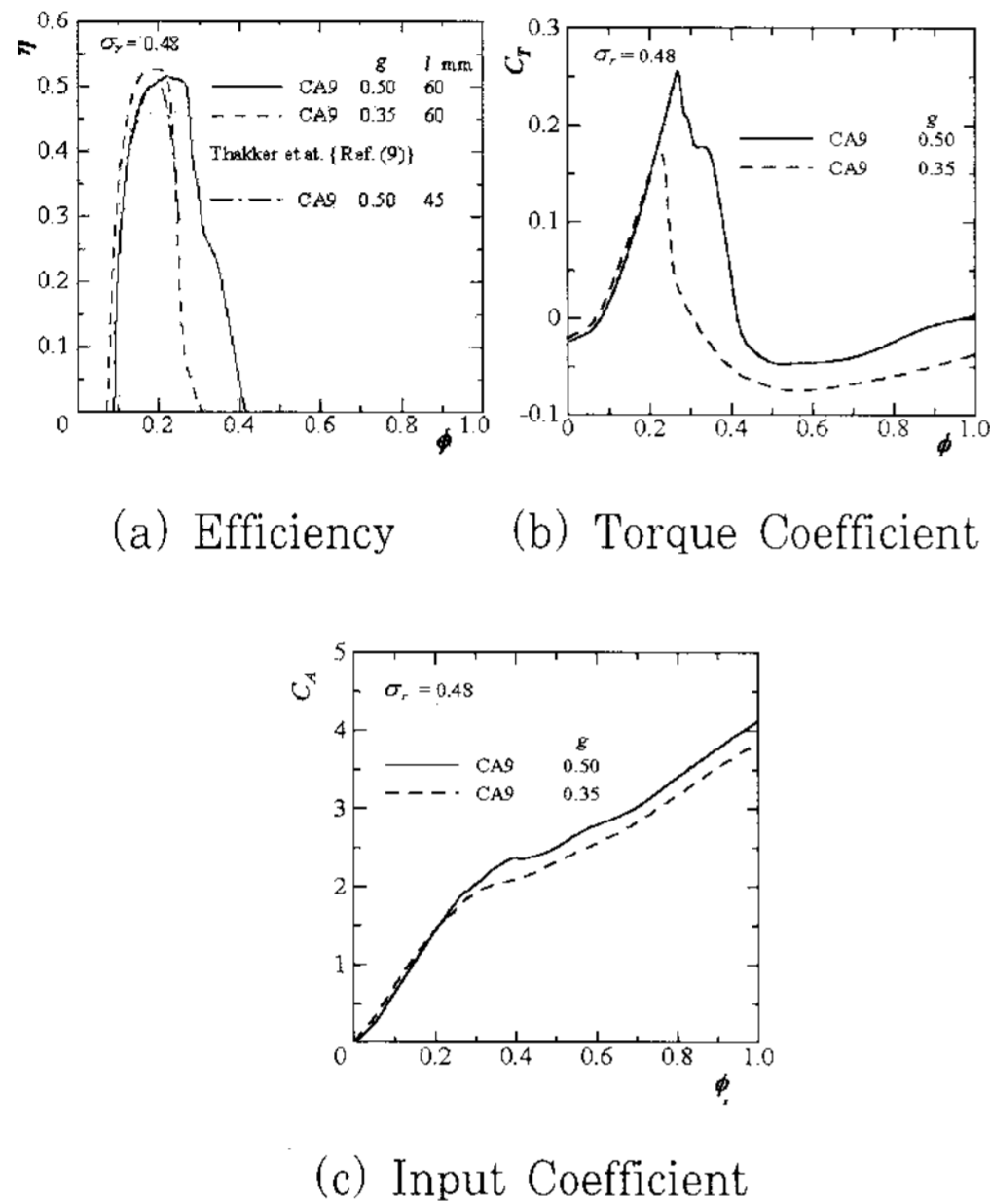



그림 3. Effect of sweep ratio on turbine characteristics under steady flow condition (CA9,  $\sigma_r = 0.48$ )

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		
HSLM15-262123-1576	0.15	0.5		
		0.35		

### 3. 실험결과 및 토의

#### 스위프비에 의한 영향

정상류 상태에서 실험을 실시하여 유량계수( $\phi$ )에 대하여 터빈효율( $\eta$ ), 토크계수( $C_T$ ) 및 입력

계수( $C_A$ )를 평가했다. 각각 계수의 정의는 다음과 같다.

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

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

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

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

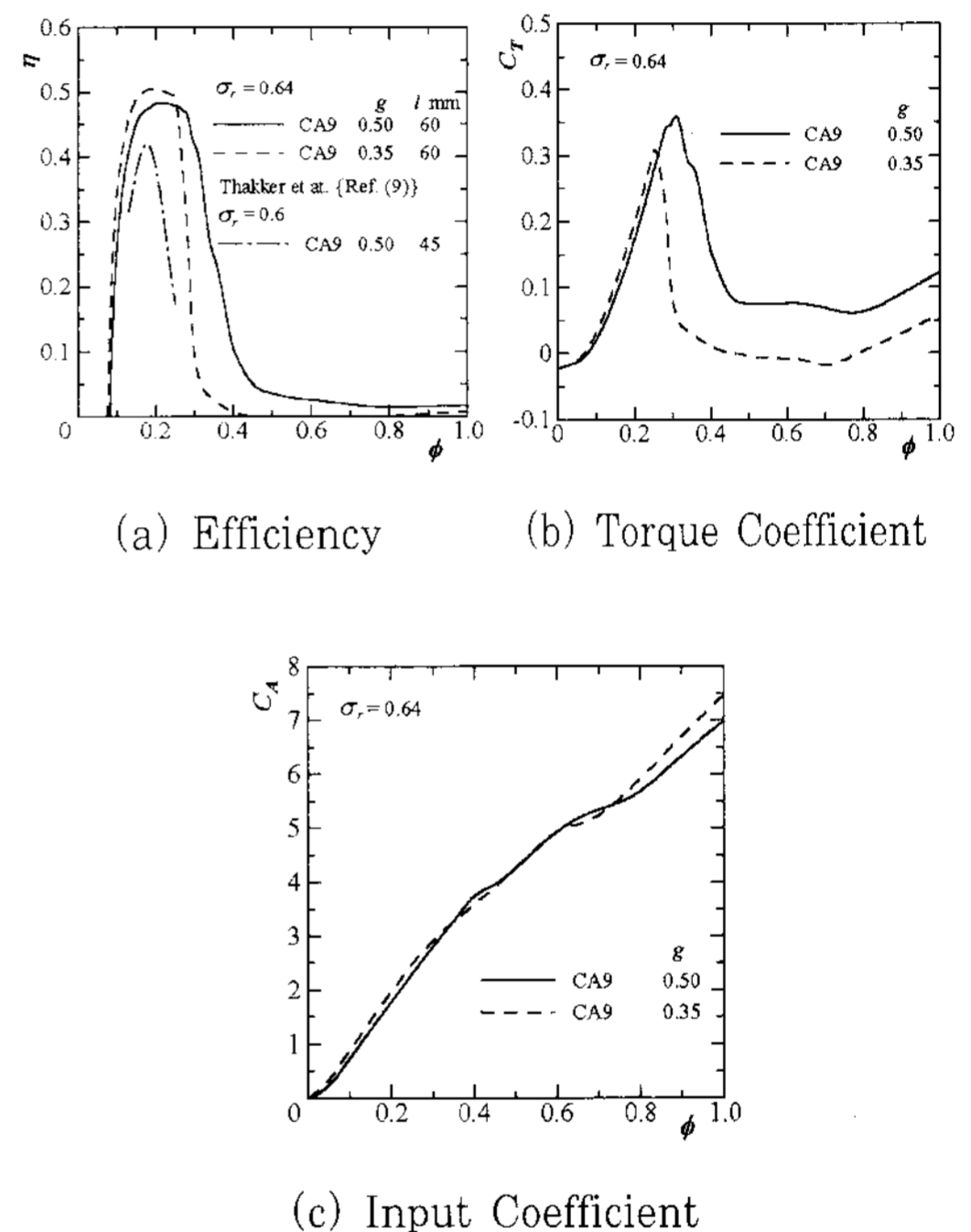


그림 4. Effect of sweep ratio on turbine characteristics under steady flow condition (CA9,  $\sigma_r = 0.6$ )

그림3과 4는 정상류 상태에서 CA9익형을 가진 웰즈터빈의 스위프비가 터빈의 성능에 미치는 영향을 나타낸다.

그림3(a) 과 4(a)에서 사선은 참고문헌[9]에서 얻어진 결과이며, 이 그림으로부터 솔리디티에 관계 없이  $g=0.35$ 의 경우 최대효율은  $g=0.5$ 경우 보다 높다는 것을 알 수 있다. 그러나  $g=0.5$ 의 경우의 실속각이  $g=0.35$ 의 경우 보다 연장된다는 것을 알 수 있다. 한편,  $C_A-\phi$

특성에서 솔리디티에 관계없이  $g=0.35$ 의 경우  $C_A$ 의 값이 낮은 유량계수( $\phi$ )에서 0.5의 경우보다 훨씬 큰 값을 갖지만 실속 후에는 완전히 반대의 경향을 갖는다.(그림3(c)과4(c) 참조). 참고문헌[6]에서의 효율과 실속각은 본 실험에서 얻어진  $g=0.5$ 의 경우의 값들 보다 다소 적은 값 이었다. 이와 같은 결과는 참고문헌[6]에서의 실험 레이놀즈수가  $1 \times 10^5$ 으로 본 실험의 레이놀즈수( $Re=2.2 \times 10^5$ )보다 다소 적은 관계로 인하여 야기된 것으로 사료된다.

### 사인파 흐름상태에서 터빈의 특성

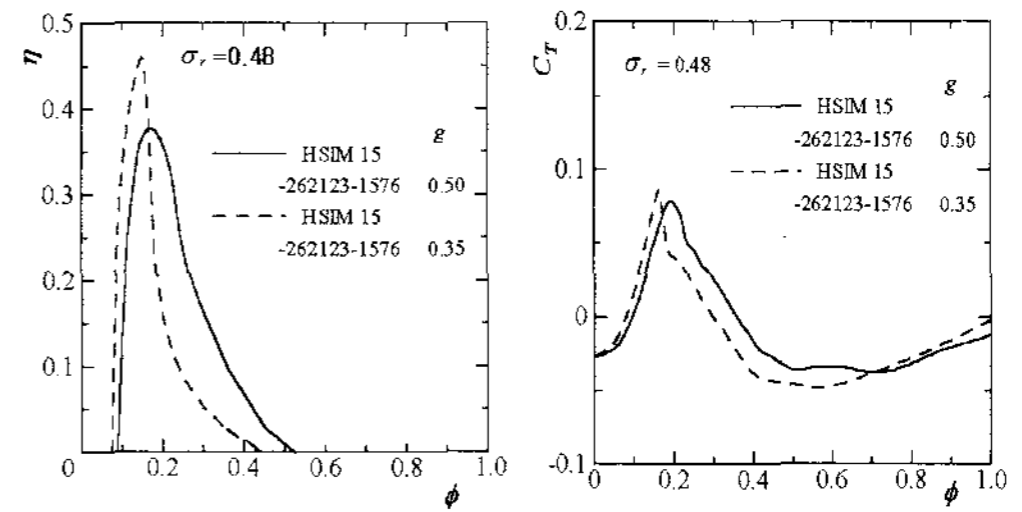
실재의 경우 OWC형의 파력발전용 터빈은사인파형의 흐름 속에서 작동하기 때문에, 왕복류 상태에서 터빈의 특성을 연구하는 것이 대단히 중요하다. 스위프비의 효과가 터빈의 특성에 미치는 영향을 구명하기 위하여 사인파의 왕복류 상태에서의 터빈의 특성에 대하여 시뮬레이션을 실시했다. 그림3, 그림4, 그림5 및 그림6에서 터빈의 정상류에서의 특성 데이터를 이용하여 준정상해석법에 의하여 사인파형의 흐름에서의 특성을 시뮬레이션 계산을 실시하였다. 준정상해석법[9]은 이전의 연구에서 그 유효성이 증명되었으며, 준정상해석법을 이용하여 터빈의 기동특성과 동작특성을 예측할 수 있다[9].

터빈이 사인파의 왕복류상태에서 작동할 때  $T_0$ ,  $\eta$ ,  $\Delta p$  및  $Q$ 는 흐름의 상태에 따라 주기적으로 변화한다. 이 경우에 터빈의 동작특성은 유량계수,  $\phi$ 에 대한 평균효율로서 평가한다.

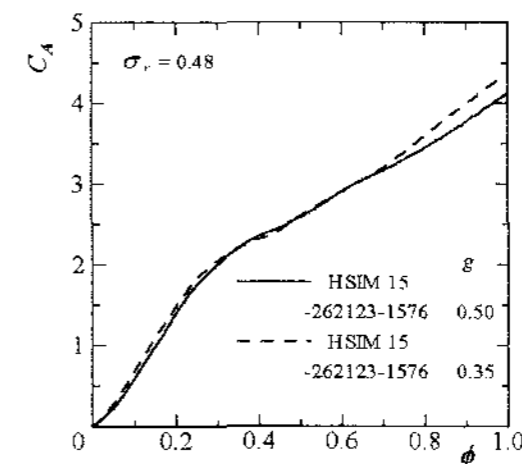
여기에서 평균효율( $\bar{\eta}$ )와 유량계수( $\phi$ )는 다음과 같이 정의된다:

$$\bar{\eta} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T T_0 \omega dt \right] / \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \Delta p Q dt \right] \quad (5)$$

$$\phi = V_a / U_r \quad (6)$$



(a) Efficiency (b) Torque Coefficient



(c) Input Coefficient

그림 5. Effect of sweep ratio on turbine characteristics under steady flow condition(HSIM15,  $\sigma_r = 0.15$ )

그림7은 CA9익형을 조립한 터빈의 사인파의 왕복류 상태에서 스위프비가 평균효율에 미치는 영향을 나타낸다. 스위프비에 대한 효율은  $\sigma_r=0.48$ 인 경우에는 거의 같지만,  $\sigma_r=0.64$ 인 경우에는 스위프비,  $g=0.35$ 인 경우가 스위프비 0.5인 경우에 비하여 2%정도 효율이 높다.

실속후의 효율은  $g=0.5$ 인 터빈의 경우,  $g=0.35$ 인 경우에 비교하여 서서히 떨어진다. 그 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 그림3(b)와 4(b)에서 다단계의 실속으로 인한 결과로 사료된다.

한편, 그림8은 사인파형 왕복류에서의 무부하 터빈의 기동특성을 나타낸다. 솔리디티  $\sigma_r=0.48$ 인 터빈은 그림3(b)에서와 같이 높은 유량계수에서 음의  $C_T$  값을 갖기 때문에 자기기동하지 않으나,  $\sigma_r=0.64$ 인 터빈은 자기기동 함을 알 수 있다. 또한,  $\sigma_r=0.64$ 의 경우 스위프비  $g=0.5$ 인 터빈이 0.35인 터빈보다 기동특성이 우수하

며 회전속도가 느리다는 것을 알 수 있다.

이는 기동특성은  $C_T-\phi$  특성에 의존하며, 그림 4(b)에서 나타내는 바와 같이  $g=0.5$ 의 경우  $CT=0$ 일 때의 유량계수( $\phi$ )의 값과  $C_T$ 의 값이  $g=0.35$ 의 경우보다 크다는 것이 그 이유이다. 그림 9와 10은 사인파의 왕복류 상태에서 HSIM15의 익형을 장착한 터빈의 기동특성을 나타낸다. 스위프비  $g=0.35$ 인 경우의 최대효율이  $g=0.5$ 의 경우보다 높으나,  $g=0.5$ 의 경우의 작동영역이 0.35의 경우보다 넓다는 것을 보여준다.

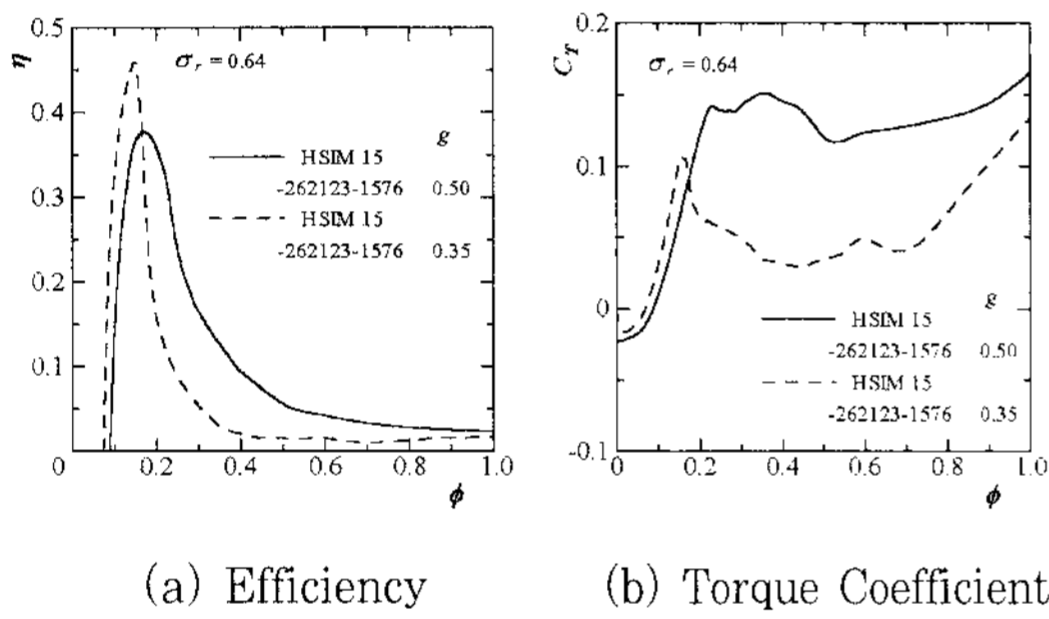


그림 6. Effect of sweep ratio on turbine characteristics under steady flow condition(HSIM15,  $\sigma_r = 0.64$ )

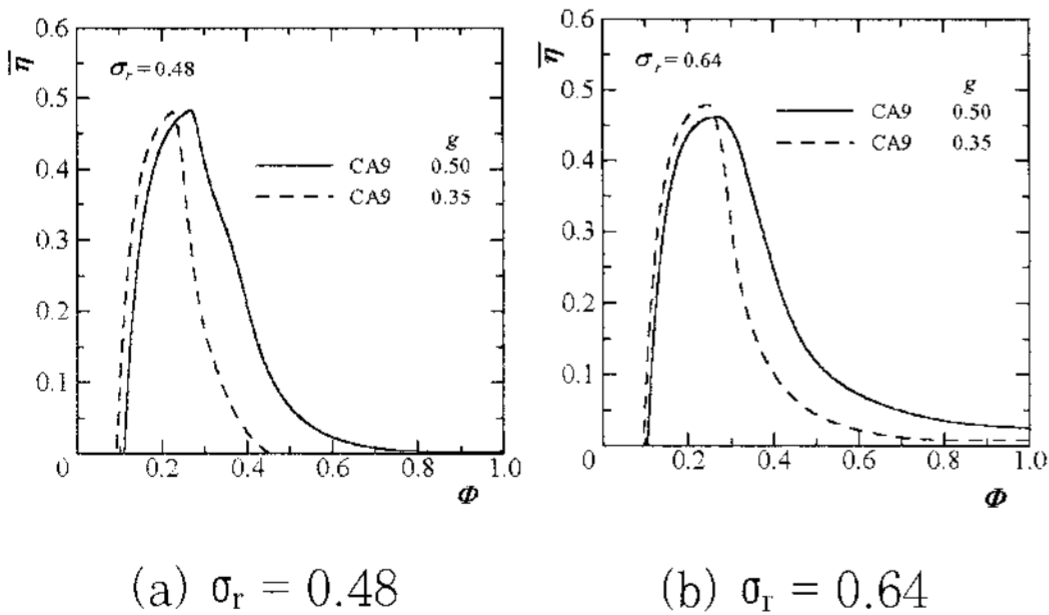


그림 7. Effect of sweep ratio on mean efficiency under sinusoidal flow condition (CA9)

기동특성에 있어서는 솔리디티 0.64의 경우  $g=0.35$ 인 터빈이  $g=0.5$ 인 터빈보다 우수하다. 이상의 결론으로부터 CA9익형 및 HSIM15

익형에 있어서 스위프비는  $g=0.35$ 가 추천되어지며, 이는 이전의 연구로부터 발표된 NACA 익형과 일치하는 스위프비이다.

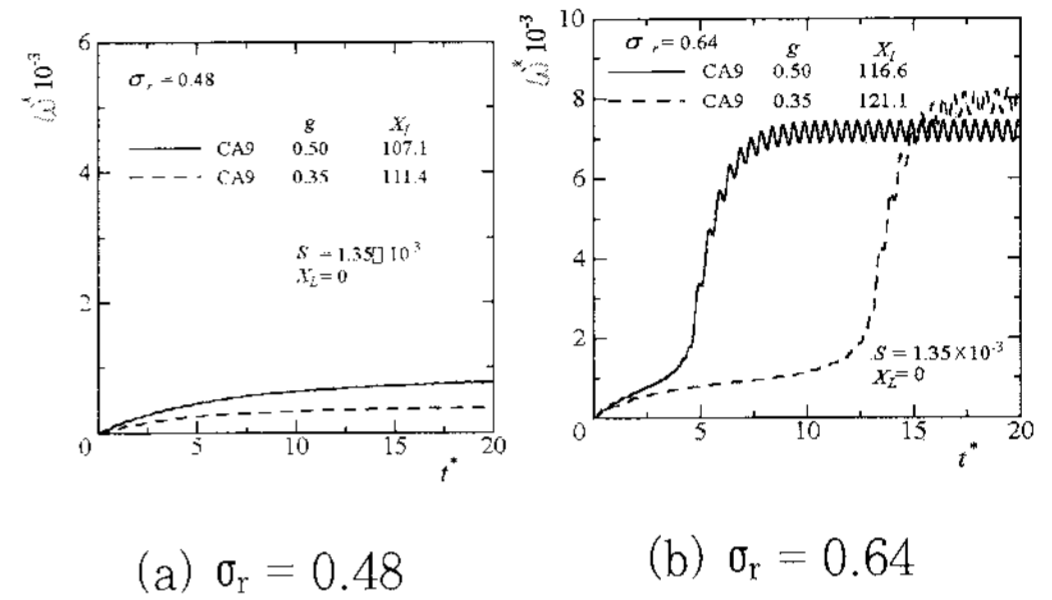


그림 8. Effect of sweep ratio on starting characteristics under sinusoidal flow condition (CA9)

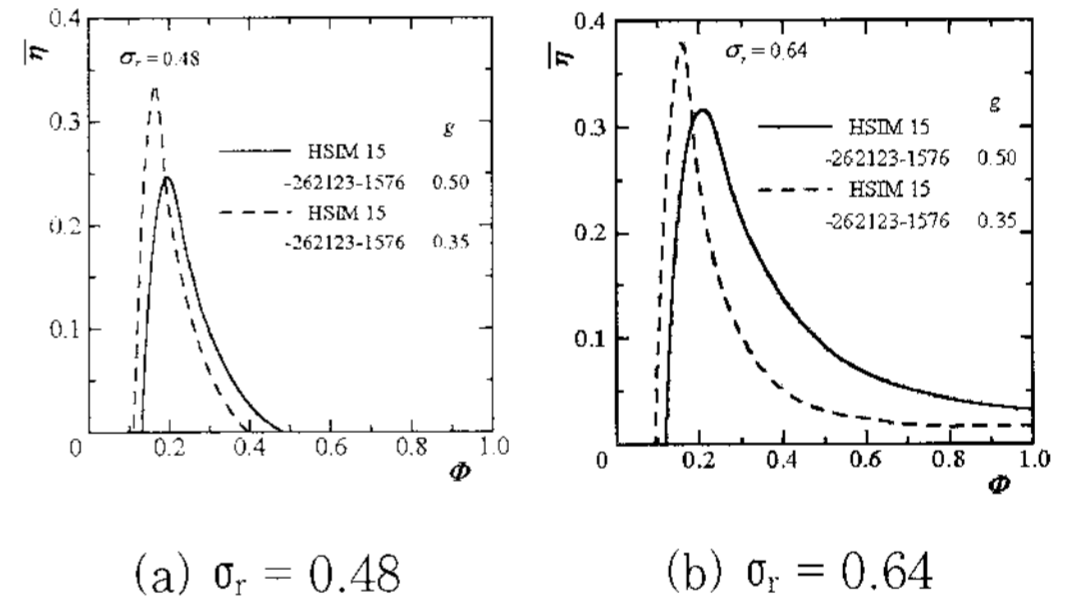


그림 9. Effect of sweep ratio on mean efficiency under sinusoidal flow condition (HSIM15)

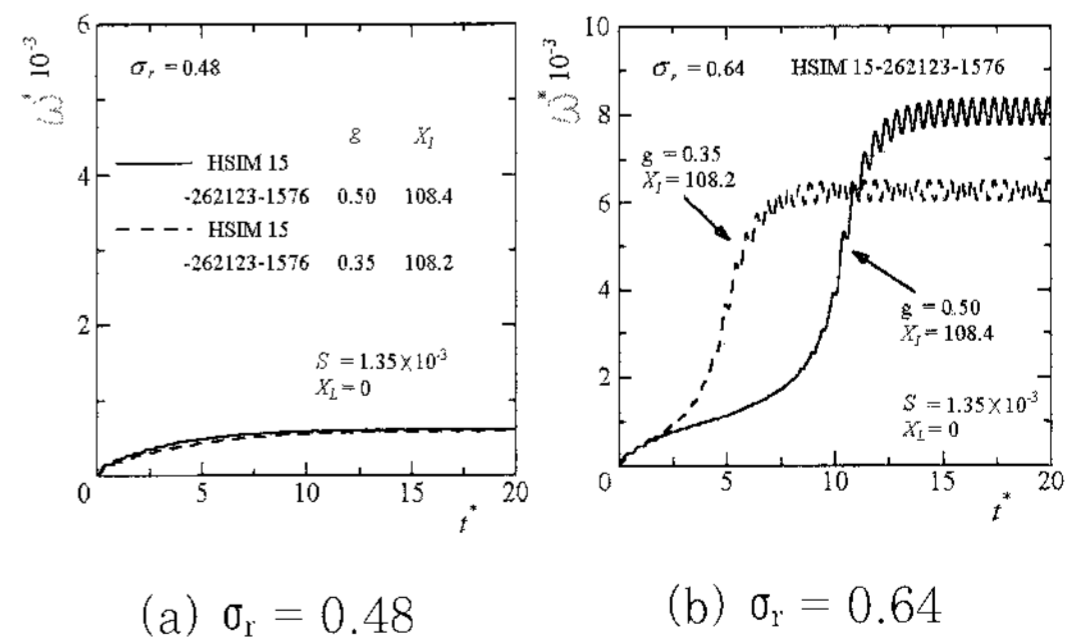


그림 10. Effect of sweep ratio on starting characteristics under sinusoidal flow condition (HSIM15)

#### 4. 결론

파력발전용 소형웰즈터빈용 동익의 익형의 영향을 구명하기 위하여, 지금까지의 연구에서 우수한 것으로 보고된 NACA0015, NACA0020, CAS9 및 HSIM15의 익형을 선택하고, 2종류의 솔리디티로 CA9익형과 HSIM15-262123-1576익형에 대해서 스위프비에 대한 터빈 특성을 조사하였다. 그 결과 소형웰즈터빈용 익형으로서 스위프비가 0.35인 익형이 가장 우수한 익형으로 판명되었다.

#### 참고문헌

1. Setoguchi, T. and Takao, M., Proc. of 4th Int. Conf. on Mech. Eng., Dhaka, Bangladesh, December 2001 pp. 117-126.
2. Kaneko, K., Setoguchi, T. and Raghunathan, S. Proc. of the 1st Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Edinburgh, U.K., Aug. 1991 pp. 358-392.
3. Setoguchi, T., Kaneko, K. and Inoue, M. Proc. of the 9th Annual Energy - Sources Tech. Conf. and Exhibition, ASME, USA, Feb. 1986 pp. 435-440.
4. Raghunathan, S., Setoguchi, T. and Kaneko, K. Int. J. of Offshore and Polar Eng., Vol. 4 No. 1 March 1994 pp. 68-75.
5. Raghunathan, S. and Tan, C.P. Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol. 6 No. 1 March 1985 pp. 17-22.
6. Thakker, A., Frawley, P., Bajjeet, E. S. and Heffernan, A., Proc. of the 10th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Seattle, USA, Vol. 1 May 2000 pp. 345-350.
7. Webster, M. and Gato, L.M.C. Proc. of the 9th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France, Vol. 1 May 1999 pp. 169-173.
8. Webster, M. and Gato, L.M.C., Proceedings of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal, Canada, Vol. 1 May 1998 pp. 94-99.
9. Inoue, M., Kaneko, K., Setoguchi, T. and Raghunathan, S., Proc. of AIAA/ASME 4th Fluid Mechanics Plasma Dynamic Laser Conference, 1986 AIAA-86-1122.
10. Renewable Energy World, Jan.-Feb, 2001 p. 18.
11. Boake, C. B., Whittaker, T. J. T., Folley, M. and Ellen, H., Proc. of the 12th Int. Off-shore and Polar Engineering Conference, Vol. 1 May 2002 pp. 586-594.