

# 횡류형 파워 터빈(CPT)에서 솔리디티 영향에 관한 수치해석 연구

정 광 섭<sup>†</sup>, 김 철 호<sup>\*</sup>

서울산업대학교 공과대학 건축학부, \*서울산업대학교 공과대학 자동차공학과

## A Numerical Study on Solidity Characteristics of the Cross-flow Power Turbine(CPT)

Kwang-Seop Chung<sup>†</sup>, Chul-Ho Kim<sup>\*</sup>

School of Architecture, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

\*Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received May 6, 2010; revision received June 7, 2010)

**ABSTRACT:** Wind energy is one of the most general natural resources in the world. However, as of today, generating electricity out of wind energy is only available from big wind generator, Furthermore, an axial-flow turbine is the only way to produce electricity in the big wind generator. This paper is for the guidance of drawing impact fact about power turbine using cross-flow type transferring wind energy to electricity energy. It will find the ideal value which enables to make cross-flow power turbine(CPT) using computational fluid dynamics(CFD) code. This study tries to analyze the "Solidity" characteristics. We can find out turbine-blade number through CFD. CFD is using "Fluent\_ver 6.3.16", and the data from its result will judge fan-blade performance through specific torque and specific power from each "Solidity" model. Based upon the above, we will make cross-flow power turbine of multi-blade centrifugal fan instead of axial-flow type.

**Key words:** CPT(Cross-flow power turbine), Tip/Hub, k-ε 난류방정식, Turbulent kinetic energy, CFD(전산 수치해석), Solidity(솔리디티)

### 기 호 설 명

- $T_s$  : 비토크(Specific Torque)
- $P_s$  : 비출력(Specific Power)
- $\phi$  : 솔리디티(Solidity)
- $\eta$  : 효율(Efficiency)
- $Q$  : 입구 유입 유량
- $N$  : 블레이드의 회전수(Rotational Speed)

- $l$  : 블레이드와 블레이드 사이의 거리
- $C$  : 블레이드의 코드 길이(Length of Chord)

### 1. 서 론

이산화탄소가 지구 온난화에 미치는 영향은 이미 널리 알려진 사실이며, 대기 환경 보존을 위한 다양한 대책이 국제사회의 주요한 연구 과제로 대두되었다. 또한 화석 연료의 제한성에 따른 유가 상승의 원인으로 인해 동력 발생 장치를 연구하는 학자들을 중심으로 대체에너지의 연구 개발 역시 매우 중요한 과제로 연구가 진행되어 오고 있다. 특히 선진

<sup>†</sup> Corresponding author  
Tel.: +82-2-970-6561; fax: +82-2-972-4096  
E-mail address: kschung@snut.ac.kr

국을 중심으로 이산화탄소의 국가 총량제가 실시되고 있는 시점에서 화석 연료가 아닌 신재생에너지의 개발 및 확보 능력은 미래 국가 경쟁력을 나타내는 지표가 될 것이다.

본 연구는 신재생에너지의 한 종류인 풍력에너지를 전기에너지로 변환하는 효율적인 풍력 발전시스템의 개발에 연구의 목적을 두고 있다. 현재 개발하고자 하는 풍력 발전 시스템에 적용될 터빈은 기존의 축류형(Axial-flow turbine)이 아닌 횡류형 터빈(Cross-flow power turbine, CPT)으로 본 연구에서는 터빈 임펠러에 장착되는 날개 갯수의 최적화 도출을 위해 임펠러의 솔리디티가 터빈 성능에 미치는 영향에 관해 수치해석 기법을 이용하여 알아 보았다.

## 2. 본 론

횡류형 풍력 발전기의 터빈 임펠러 설계를 위해 선행되어야 할 연구는 임펠러 블레이드의 기하학적 형상을 최적화 하는 것이다. 이를 위해 블레이드의 주요 형상 인자인 솔리디티(Solidity,  $\phi = l/C$ )의 작

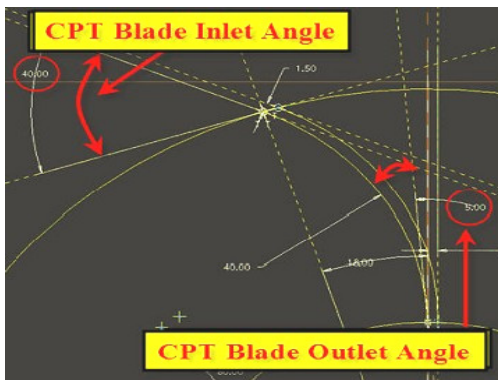


Fig. 1 Inlet and exit angle of the impeller blade of the model turbine(CPT).

Table 1 Specification of CPT models

Model	Blade number	Mesh number	Solidity ratio( $\phi$ )	Blade angle
Case 1	24ea	651,700 ~ 752,000 (Hybrid)	0.36	15.0'
Case 2	30ea		0.29	12.0'
Case 3	36ea		0.24	10.0'
Case 4	45ea		0.2	8.0'
Case 5	60ea		0.14	6.0'
Tip/Hub ratio = 0.5				

동조건에 따른 최적 값을 도출하는 것으로 전산수치해석을 도입하여 실시하였다.

솔리디티 변화에 따른 임펠러의 성능은 토크와 비출력의 값으로 비교 평가함으로서 임펠러 사이즈에 관계없이 적용 가능한 일반해를 구할 수 있었다.

본 연구에서 적용한 터빈 블레이드의 입, 출구각도는 선행 연구<sup>(2)-(4)</sup>의 결과를 참조하여 Fig. 1과 같이 입사각 40도, 출구각 5도를 설정하였으며, 블레이드의 솔리디티( $\phi$ ) 비의 변화에 따른 임펠러의 성능 변화를 산출하였다. 본 연구에 적용한 각 모델별 솔리디티의 변화는 Table 1에 주어진 것과 같다.

## 3. 전산 수치해석 기법 및 경계 조건

### 3.1 전산 수치해석 기법

본 연구에서는 임펠러 블레이드의 형상 변화에 따른 터빈의 성능 변화를 예측하기 위해 유한체적법(FVM)을 적용한 상용 CFD 프로그램인 Fluent ver 6.3<sup>(1)</sup>을 이용하였다. 해석 공간의 유동장은 :

- 준 3차원 유동(Quasi-3D flow)
- 난류유동(Turbulent flow)
- 비압축성유동(Incompressible flow)
- 정상유동(Steady flow)

으로 가정하였으며 검사체적 내부의 비압축성 난류 유동장을 해석하기 위해 3차원 Navier-Stokes 방정식<sup>(5)</sup>을 사용하였다. 난류 해석을 위해 k- $\epsilon$ 중 회전체 내부의 해석에 적합한 Realizable k- $\epsilon$  model을 사용하였다.

블레이드 표면에 작용하는 마찰력에 의한 대류 열

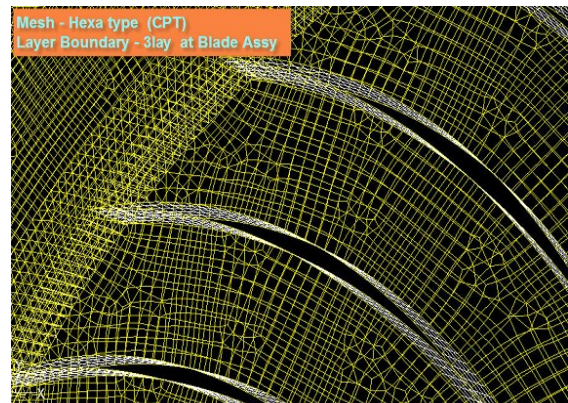


Fig. 2 Typical numerical grid of the physical domain of the CPT model(Case-03).

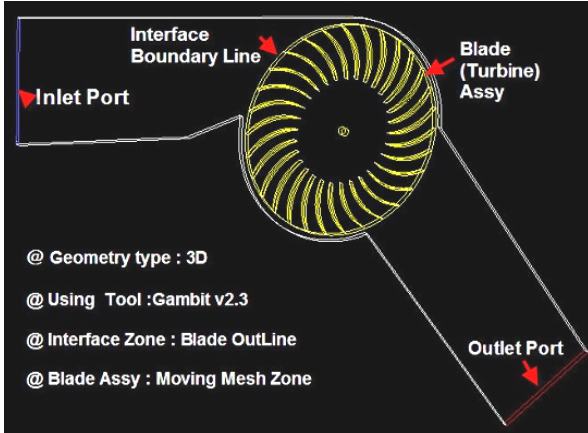


Fig. 3 Control volume and boundary condition of the model CPT.

전달의 현상은 무시하였으며, 수렴성(Residual Fraction)이  $10^{-4}$  이하로 떨어질때 까지 반복적으로 계산하였다.

블레이드 내부 격자는 3차원 hexa 격자로 Fig. 2와 같이 구성하였으며, 검사체적 내의 경계 조건은 Fig. 3과 같이 정의 하였다.

지배방정식(Governing Equations)

① Continuity equation  $\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_i}\right) = 0$  (1)

② Reynolds averaged Momentum equation

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_i u_j}$$
 (2)

③ Realizable k-εModel

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\kappa u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - G_\kappa - \rho\epsilon - Y_M + S_\kappa$$
 (3)

where

$$C_1 = \max \left[ 0.43 \times \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{\kappa}{\epsilon}$$

$$S = \sqrt{2 \times S_{ij} \times S_{ij}}$$

④ Turbulent Viscous Ratio

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{\kappa U^*}{\epsilon}}$$
 (4)

where

$$U^* = \sqrt{S_{ij} \times S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \times \tilde{\Omega}_{ij}}$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\epsilon_{ijk} \omega_k, \Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \epsilon_{ijk} \omega_k$$

$$A_0 = 4.04, A_s = \sqrt{6} \cos\phi$$
 (5)

where

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{S^3}$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

위의 계산과정에서 사용된 상수<sup>(1)</sup>들은 다음과 같다.

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2$$

### 3.2 전산 수치해석을 위한 경계 조건

1) 입구 경계면에서 유입 속도는 균질하게 들어온다고 가정하였으며 난류 강도는 5%로 가정하였고 난류 운동에너지(k) 및 소멸율(ε) 방정식은 다음과 같다.

$$k = \frac{3}{2} T_u^2 u^2, \epsilon = \frac{c_\mu k^{\frac{3}{2}}}{L_{inlet}}$$
 (6)

2) 출구 경계면은 압력 경계 조건으로 설정하였다.

3) 벽 경계면에서 경계 조건은 Wall Function을 적용하였으며<sup>(1)</sup> 난류 운동에너지와 소멸율의 경계 조건으로 처리하였다.

### 3.3 해석 연구의 결과 분석

본 수치해석 연구의 주요 인자인 솔리디티의 값을 변화시켜가며 터빈 임펠러 내부 유동장의 변화를 비교하였다. 이 때 각 솔리디티의 값에 따른 터빈 임펠러의 토크와 비출력 값으로 각 모델 터빈의 성능을 비교 평가하였다.

### 4. 해석 결과 분석 및 고찰

각 모델 별 임펠러의 해석결과 값을 이용하여 블레이드의 토크와 비출력 값을 산출하였으며 이 값을 이용하여 임펠러의 효율을 산출하였다.

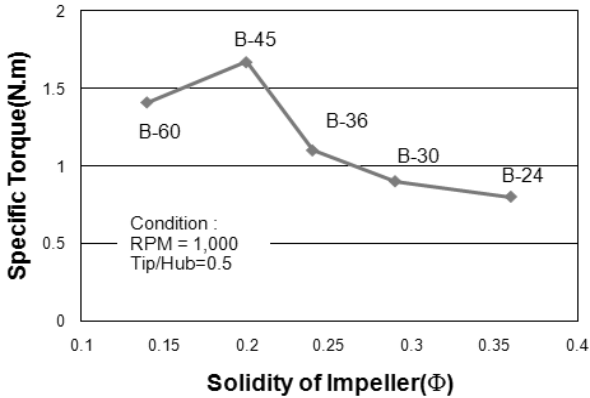


Fig. 4 Variation of specific torque with the change of solidity( $V_{in} = 20$  m/s).

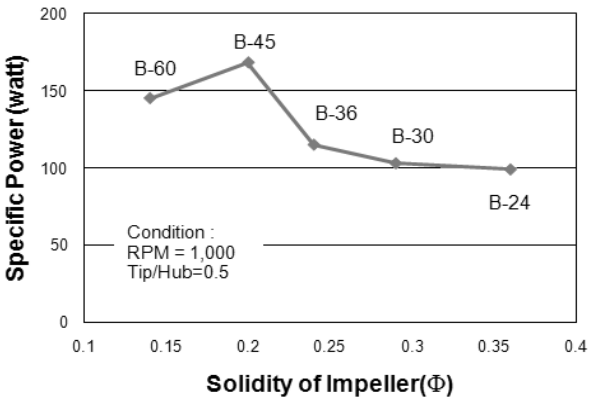


Fig. 5 Variation of specific power with the change of solidity( $V_{in} = 20$  m/s).

#### 4.1 해석 결과의 정량적 분석

임펠러의 솔리디티 변화에 따른 토크와 비출력 값을 산출하여 비교 하였으며, 이 때 토크 및 출력은 터빈 임펠러의 회전속도를 1,000 rpm으로 고정하고 산출하였다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 토크는  $\phi = 0.2$ 인 블레이드 45개 모델에서 가장 우수한 성능을 보여 주고 있다. 이 모델에서 최종 계산된 토크는 1.67 Nm이다.

비출력의 경우 역시 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 토크가 최대인 모델 Case-4(B-45)에서 최고 출력인 168 watt가 생성되는 것을 알 수 있었다.

#### 4.2 해석 결과에 대한 고찰

설계된 터빈 임펠러의 솔리디티 변화에 따른 풍력터빈의 출력성능인 토크 및 비출력의 성능 변화에 대해 알아보았다. 또한 유입 되는 전체 풍력에너

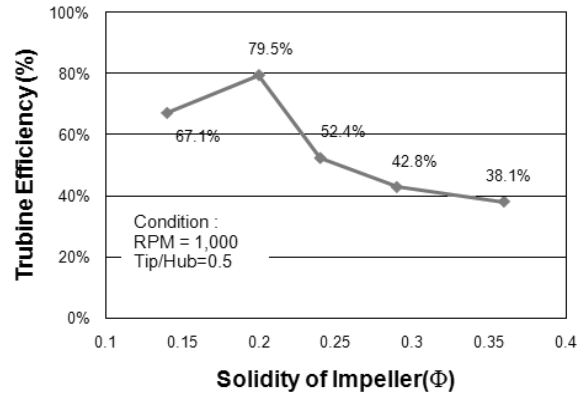


Fig. 6 Variations of the indicated turbine efficiency with the change of solidity( $V_{in} = 20$  m/s).

지 대비 실제 횡류형 타입의 풍력 발전기 터빈에서 에너지 전환을 통해 생산되는 전기 에너지 량을 비교 분석을 해보면 각 모델 임펠러의 이론적 효율을 예측 할 수 있다.

Fig. 6은 시스템으로 유입되는 총 유량에너지 220 watt에서 각 솔리디티 모델별 임펠러에서 생산되는 에너지 량의 비교를 통해 각 솔리디티 별 임펠러의 에너지 변환효율을 예측할 수 있다.

위에서 언급하였듯이 출력이 최대로 도출되는 날개 갯수가 45개인 Case-4모델이 가장 우수한 79.5%의 효율을 보여 주고 있다. 실제 차량에 적용될 횡류형 풍력 터빈의 크기는 현재의 200 mm보다 8배의 크기로 제작한다면 출력은 선형적으로 증가하여 1.3 kW 요량의 발전이 가능할 것으로 판단된다.

#### 5. 결 론

본 연구는 풍력에너지를 전기에너지로 전환하기 위해 적용될 풍력 발전 시스템의 핵심 부품인 횡류형 풍력 터빈(CPT)의 최적화 설계에 관한 연구 내용으로 터빈 임펠러 갯수의 최적화를 결정하는 설계인자인 솔리디티의 영향에 대해 수치해석 기법을 도입하여 알아보았다. 본 연구를 통해(Tip/Hub)의 비율이 0.5인 횡류형 터빈 임펠러에서 솔리디티( $\phi$ )가 0.2인 Case-4모델이 가장 우수한 터빈의 출력성능을 갖는다는 사실을 확인하였다. 즉 (Tip/Hub)의 비율이 0.5인 횡류형 풍력 터빈을 제작한다면 블레이드의 개수는 최대 45개일 때 최대효율을 갖는다는 사실이며, 이때 블레이드와 블레이드 사이의 각도는 8도 정도를 유지하게 된다. 즉 솔리디티( $\phi$ ) 계

수가 0.2를 벗어나게 되면 터빈의 효율이 저하되며 또한 캐비티에 의한 공기진동 및 소음 문제가 발생하게 된다. 차후 유사한 횡류형 풍력 발전 시스템을 제작 시 본 연구의 결과가 매우 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2009년도 한국연구재단의 지원(R01-2008-000-20066-0, KOSEF, 교육과학기술부 특정기술 연구사업)에 의해 수행된 연구내용이며, 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Fluent(Ver. 6.2.16) User Manual.
2. Han, S. Y. and Maeng, J. S., 2003, Shape Optimization of Cut-off in a Multi-blade fan/scroll system using neural network, Trans. <http://www.elsevier.com/ijhmt>.
3. Maeng, J. S., Yoon, J. Y., ahn, T. B., Yoon, J. E., and Han, D. J., 1999, An experimental study for flow characteristics inside the rotor of a multi-blade/fan/scroll system, Trans. KSME Ser. B Vol. 23, No. 5.
4. Ha, J. H., Kim, H. C., and Kim C. H., 2007, A Numerical Study on an Optimum Design of a Cross-flow Type Power Turbine(CPT), Trans. KSME, pp. 123-127.
5. Olson R. M. and Wright S. J., 1990, Essentials of Engineering Fluid Mechanics, 5th ed., Harper and Row, Publishers Inc.