

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.8.661>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5324(Online)

## 수평축 조류발전용 로터 블레이드 형상설계 및 CFD에 의한 출력성능해석

정지현\* · 김범석\*\*†

\* 제주대학교 기계공학과, \*\* 제주대학교 대학원 풍력공학부

### Rotor-Blade Shape Design and Power-Performance Analysis for Horizontal-Axis Tidal Turbine Using CFD

Ji Hyun Jung\* and Bum Suk Kim\*\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Jeju Nat'l Univ.,

\*\* Faculty of Wind Energy Engineering, Graduate School, Jeju Nat'l Univ.

(Received January 3, 2015 ; Revised May 26, 2015 ; Accepted June 8, 2015)

**Key Words:** Horizontal Axis Tidal Turbine(수평축조류터빈), Power Performance(출력성능), Cavitation(공동현상), Blade Element Momentum Theory(날개요소운동량이론), CFD(전산유체역학)

**초록:** 본 연구에서는 풍력발전분야의 블레이드 공력설계 및 성능해석에 적용되고 있는 날개요소운동량이론을 이용한 조류터빈 블레이드 형상설계 방법론을 제시하였으며, S814 단일 에어포일로 구성된 2 블레이드 형식의 1MW급 수평축 블레이드 형상설계 결과를 제시하였다. 조류터빈 블레이드는 해양환경에서 운전되는 특성 상 블레이드 팁 근방에서 캐비테이션 발생으로 인한 문제가 상존하므로, 설계초기단계에서 신중히 고려되어야 한다. 본 연구를 통해 설계된 1MW 조류터빈 블레이드의 유동특성분석 및 출력성능해석을 위해 캐비테이션 모델이 고려된 CFD 해석을 수행하였으며, 블레이드 팁 근방 흡입 면 및 압력 면에서 캐비테이션이 발생하고 있음을 확인하였다. 최대 출력계수는 설계 주속비 7의 조건에서 47%로 나타났다.

**Abstract:** We present a design methodology for horizontal-axis tidal turbine blades based on blade element momentum theory, which has been used for aerodynamic design and power-performance analysis in the wind-energy industry. We design a 2-blade-type 1 MW HATT blade, which consists of a single airfoil (S814), and we present the detailed design parameters in this paper. Tidal turbine blades can experience cavitation problems at the blade-tip region, and this should be seriously considered during the early design stage. We perform computational fluid dynamics (CFD) simulations considering the cavitation model to predict the power performance and to investigate the flow characteristics of the blade. The maximum power coefficient is shown to be about 47 under the condition where TSR = 7, and we observed cavitation on the suction and pressure sides of the blade.

#### 1. 서론

신재생에너지산업은 검증된 기술력과 경제성을 바탕으로 전 세계적인 기후변화 및 다양한 에너지원의 확산에 크게 기여하고 있으며, 바람, 해양, 태양, 지열, 온도차 등 다양한 신재생에너지

원에 대한 기술개발이 활발히 진행되고 있다.

조류발전(tidal current power generation)은 에너지 밀도가 높고 예측 가능한 자원변동성 때문에, 경제성확보가 기대되는 기술로 평가받고 있으며, 상업발전단지개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 현재 다양한 실증시험용 조류터빈이 개발되고 있으며, 조류에너지자원이 풍부한 영국과 프랑스 해안지역에서 상용화를 위한 다수의 프로젝트가

† Corresponding Author, [bkim@jejunu.ac.kr](mailto:bkim@jejunu.ac.kr)

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

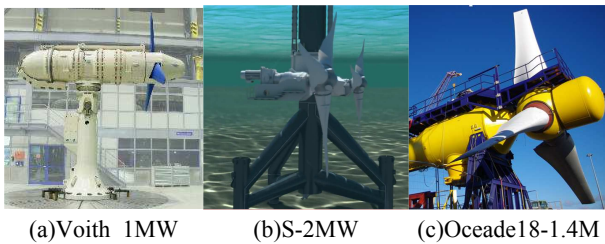


Fig. 1 Horizontal axis type tidal current turbines, designed and developed by Voith, MCT and ALSTOM in regular order

진행 중이다. EDF사는 OpenHydro 기술을 이용하여 프랑스 Paimpol-Bréhat 지역에서 2MW 규모의 조류발전단지를 실증 중에 있으며, EMEC(European Marine Energy Center)은 2012년에 영국에서 4MW 규모의 시범단지를 개발하였다. 2012년에 Siemens에 합병된 MCT(Marine Current Turbines)사는 자사의 Seagen S-2MW 모델을 투입하여 스코틀랜드, 영국, 북아일랜드 지역에서 상업단지개발을 계획 중이다. Alstom은 TLG(Tidal Limited Generation)사를 인수한 후, 수평축 피치제어방식인 Oceade™ 18-1.4MW(3bladed, D=18m) 터빈을 개발하였고, 프랑스에 5.6MW 규모의 발전단지개발을 계획하고 있다.<sup>(1)</sup>

대부분 지역에서의 평균조류속도는 다르며, 불규칙적인 최대조류속도가 나타난다.<sup>(2)</sup> 조류터빈의 출력과 하중은 유속, 난류 및 파도의 영향을 받기 때문에,<sup>(3)</sup> 로터 블레이드에 작용하는 높은 추력을 완화하고 지속적인 정격출력의 유지를 위한 하중 및 출력제어기술이 요구된다.<sup>(4)</sup>

HATT의 작동원리는 근본적으로 수평축 풍력터빈(Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT)과 동일하다. 로터 블레이드는 조류의 운동에너지를 전기에너지로 변환하기 위한 1차 에너지변환장치로써, 성능, 하중 및 시스템의 동역학적 특성을 결정짓는 중요부품으로 분류된다. 따라서 효율적인 블레이드 설계는 HATT 설계에 매우 중요한 요소이다. 현재까지 다양한 개념의 조류터빈이 개발되었으나, 높은 유속조건에서의 출력 및 하중제어를 위해, 실속 또는 피치제어를 적용하는 수평축 조류터빈(Horizontal Axis Tidal Turbine, HATT)이 상용화에 가장 근접한 기술로 평가되고 있다. 현재 개발 중이거나 실증 상용화단계에 있는 조류터빈 중 50% 이상은 해저면(seabed)에 고정되고, 낮은 블레이드 솔리디티(solidity)를 갖는 수평식으로 설계되고 있다.<sup>(5)</sup>

조류터빈 블레이드 형상설계는 J. A. Clark 등<sup>(6)</sup> 및 Celine Faudot<sup>(7)</sup> 등의 연구결과와 같이 대부분 BEM(Blade Element Momentum)이론을 이용하여 수행된다. Ben Whitby 등은 피치제어 및 실속제어형 조류터빈의 성능비교에 관한 연구를 수행하였으며, 1MW급 HATT 설계를 통해 피치제어방식이 실속제어방식에 비해 저 유속영역에서 높은 효율로 운전될 수 있고, 안정적인 출력제어가 가능함을 보였다. 특히 에너지밀도가 높은 해양환경에서 운전되는 조류터빈의 경우 구조안전성에 대한 신뢰성이 매우 중요하며, 정격이상의 높은 유속조건에서는 피치제어를 통해 터빈의 축 추력을 크게 감소시킬 수 있기 때문에 대형 조류터빈 블레이드는 피치제어의 적용이 필요하다.

Fig. 1은 Marine Current Turbine, Siemens, Alstom, Voith, Verdant Power 등의 제작사들에 의해 개발이 완료된 중대형(100~2,000kW)급 피치제어형(pitch control type) HATT이며, 현재 이를 이용한 실증시험 및 상업단지개발이 진행되고 있다. HATT에 적합한 로터블레이드 설계는 수력설계(hydrodynamic design), 하중해석, 구조안정성해석으로 구분된다. 수력설계는 조류터빈의 최적성능을 확보하기 위해, 블레이드 단면에서의 코드 길이(chord length)와 비틀림 각(twist angle)을 계산하는 과정을 말한다. 극한하중은 블레이드 설계 수명기간동안 축 방향 및 회전방향으로 작용하는 방향별 최대하중을 의미하며, 일반적으로 극치조류속도 조건에서 발생한다.

현재의 HATT 기술개발 추세는 경제성 등을 이유로 MW 규모로 점차 대형화되는 추세이다. 따라서 본 연구에서는 풍력터빈 블레이드 설계에 적용되고 있는 BEM 이론<sup>(8)</sup>을 이용하여 피치제어형 HATT 블레이드 설계방법을 제시하고, 이를 이용한 1MW급 블레이드 형상설계를 수행하고자 한다.

## 2. HATT 로터 블레이드 설계

### 2.1 피치제어형 블레이드 형상설계 방법

HATT 블레이드 형상설계는 BEM 이론의 적용을 통해 수행되고, 자유표면, 해저면 및 캐비테이션(cavitation) 영향을 제외하면 풍력터빈 블레이드 설계방법과 거의 유사하다. BEM 이론은 로터 블레이드의 출력성능 및 하중해석을 위해 운동량이론과 날개요소이론이 서로 결합된 형태이며,

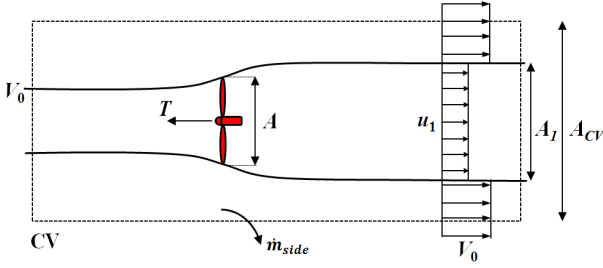


Fig. 2 Illustration of lateral boundary of the control volume around a turbine

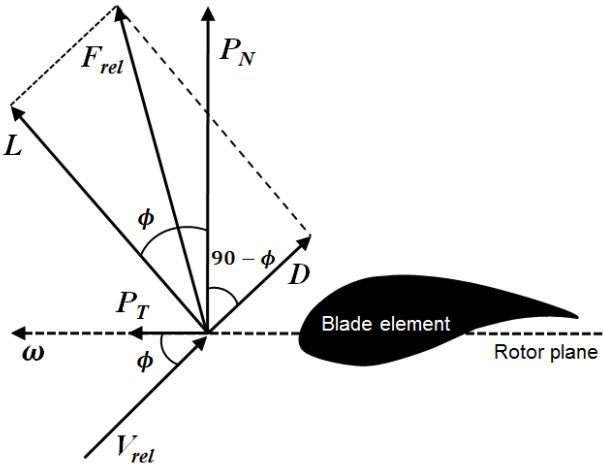


Fig. 3 Relationship of local loads, acting on a blade element section

이를 유도하는 과정에서 블레이드 형상설계에 중요한 관계식을 얻을 수 있다.

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 a(1-a)dr \quad (1)$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_0 \omega(1-a)a'dr \quad (2)$$

Fig. 2에 나타낸 검사체적으로부터 로터 디스크에 작용하는 축 방향과 회전방향으로의 힘과 운동량 변화를 고려하면 로터에 작용하는 추력(thrust)과 토크(torque)는 식 (1), 식 (2)와 같이 유도된다. 또한 추력과 토크는 Fig. 3과 같이 블레이드 곡부단면으로 유입되는 흐름으로부터 발생하는 힘의 상관관계를 통해 유도될 수 있으며, 축 방향으로 작용하는 힘과 회전방향으로 작용하는 힘은 식 (3)과 (4)와 같다.

$$P_N = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (3)$$

$$P_T = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (4)$$

이를 블레이드 단면 에어포일에서의 양력계수

$$C_N = \frac{P_N}{\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c} = C_L \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (5)$$

$$C_T = \frac{P_T}{\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c} = C_L \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (6)$$

$$dT = B P_N dr = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_0^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} c C_N dr \quad (7)$$

$$dM = r B P_T dr \quad (8)$$

$$= \frac{1}{2} \rho B \frac{V_0 (1-a) \omega r (1+a')}{\sin \phi \cos \phi} c C_T r dr$$

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_N} + 1} \quad (9)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_T} - 1} \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (11)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{1-a}{1+a'} \times \frac{V_0}{r\omega}\right) \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{V_0}{r\omega} \quad (13)$$

$$\frac{c}{R} = 4\pi \frac{r}{R} \sin^2\left(\arctan\left(\frac{2/3}{1+a'\lambda(r/R)}\right)\right) \times F \frac{1}{C_N} \frac{1}{B} \frac{2a}{(1-a)} \quad (14)$$

$$\theta = \phi - \alpha \quad (15)$$

와 항력계수로 다시 표현하면 식 (5)와 (6)과 같으며, 따라서 날개요소이론으로부터 블레이드 단면에서의 추력( $dT$ )과 토크( $dM$ )는 식 (7), (8)과 같이 유도될 수 있다. 운동량이론으로부터 유도된 식 (1), (2)와 날개요소이론으로부터 유도된 식 (7), (8)을 같다고 두고 정리한 후, 유한한 블레이드의 팁에서 발생하는 손실을 고려하면 축 방향 및 회전방향 흐름유도계수(flow induction factors) 값,  $a, a'$ 을 구할 수 있는 식 (9), (10)이 얻어질 수 있다. 블레이드 형상설계는 곡부단면에서 최적의 출력을 발생시킬 수 있는 에어포일을 선정하고 chord 길이와 비틀림 각을 계산한다. 블레이드 단면에서의 chord 길이 계산식은 식 (9)로부터 유도될 수 있으며, 식 (11)~(13)을 이용하여 식 (14)로 표현된다. 블레이드 곡부단면에서의 비틀림 각은 식 (15)로부터 계산될 수 있다.

## 2.2 1MW급 블레이드 형상설계

Ahmed M.R.<sup>(8)</sup>은 풍력터빈과 조류터빈 블레이드에 적용되는 에어포일 선정을 위한 연구를 수행한 바 있으며, 블레이드 전연부 오염 및 손상

에 의한 표면 거칠기 변화는 출력 및 하중변화를 초래할 수 있기 때문에, 표면 거칠기 민감도가 낮은 에어포일의 적용에 대한 기존 연구논문의 분석결과들을 제시하였다. 또한 길이가 긴 블레이드가 높은 에너지밀도의 환경에서 운전 될 경우 루트부 구조안전성이 문제 될 수 있으므로, 효과적인 구조설계를 위해 가능한 두꺼운 에어포일 시리즈를 선택 할 필요가 있다. 대형 풍력터빈 블레이드의 경우, 높은 출력성능의 확보를 위해 블레이드 outboard 영역에  $t/c=15\sim 21\%$ 의 NACA 6자리 계열의 에어포일을 사용한다. Christian Bak 등<sup>(9)</sup>에 의해  $Re=1.6\times 10^6$ 의 조건에서 측정된 NACA 63-415 ( $t/c=15\%$ ) 에어포일 공력성능을 분석해 보면,  $C_{Lmax}$ 가 clean 조건에서 1.33, LEGR(leading edge grit roughness) 조건에서 1.04로 나타나며, 21.8% 감소한다. S814 에어포일에 비해 최대양력계수 감소율은 3.2% 낮지만, 최대양력계수가 나타나는 받음각 이후부터 실속에 의한 급격한 양력계수의 감소가 나타나기 때문에 정확한 피치제어가 수행되지 않으면 받음각 변화에 따른 출력성능 저하율이 상대적으로 높게 나타날 가능성이 있다. NREL은 NACA 6자리 계열 에어포일에 비해 비교적 두꺼운 두께 비( $t/c=24\%$ )를 갖고, 표면 거칠기 민감도가 낮으며, 완만한 실속특성을 갖는 풍력터빈용 S-시리즈 에어포일을 개발하였다. 이후 OSU(Ohio State University) 풍동에서 전연부 표면 거칠기 및 레이놀즈 수 변화를 고려한 S814 에어포일 공력성능 측정이 수행되었으며, 측정 받음각 범위는  $-20^{\circ}\sim 40^{\circ}$  이다.

Fig. 5는 NREL에 의해 수행된 풍동시험결과를 나타낸다. clean 조건에서의 최대 양력계수는  $1.32$  ( $AoA=11^{\circ}$ )이고 LEGR 조건에서는  $0.99$  ( $AoA=8^{\circ}$ )로써 25% 감소하고 있으나, 실속 받음각 이후의 공력성능 변화가 매우 완만한 특성을 나타낸다.

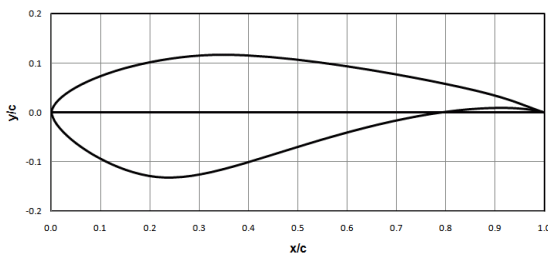


Fig. 4 Configuration of the S814 airfoil

이상적으로는 inboard 영역에 S814 에어포일을 사용하고 outboard 영역에 NACA 6 자리계열 ( $t/c=15\sim 18\%$ )의 에어포일을 사용하는 것이 공력 및 구조설계 관점에서 더 효과적인 방법이라 판단되나, 본 연구에서는 구조설계에 유리하고, 비교적 안정적 출력성능확보가 가능하며, 에어포일 시리즈가 변화되는 천이구간에서의 형상변화를 최소화하기 위한 목적으로 S814 에어포일을 단독으로 사용하였다.

이상과 같은 방법으로 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 IMW급 HATT 블레이드의 형상설계를 수행하

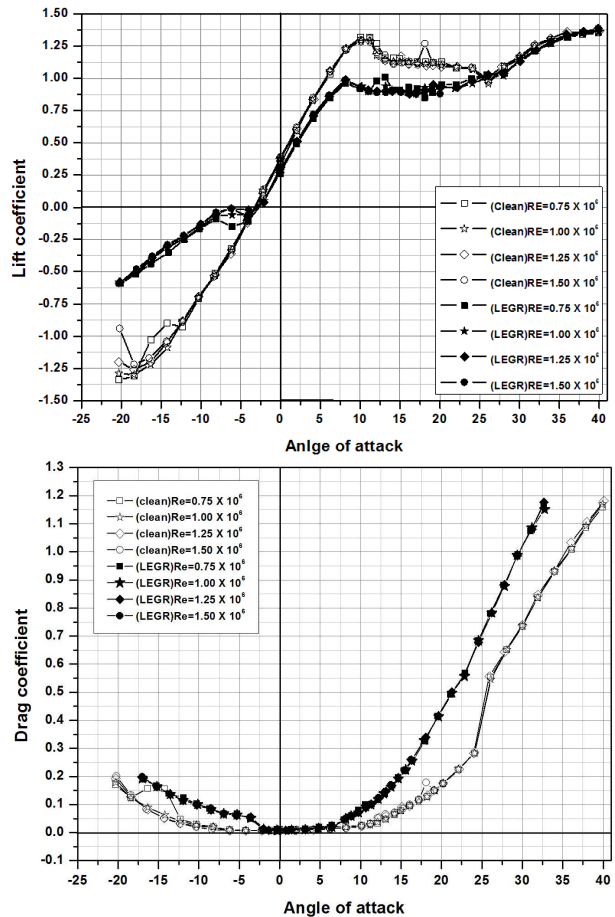


Fig. 5 Aerodynamic characteristics of the S814 airfoil as variation of AoA and Re number measured at OSU wind tunnel by NREL<sup>(10)</sup>

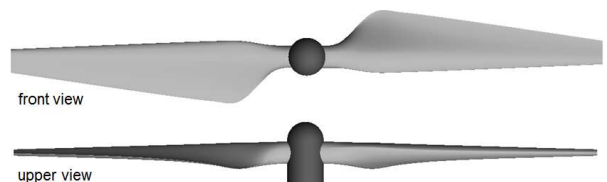


Fig. 6 Front and upper view of the 3-D modelled IMW HATT rotor blade

**Table 1** Configuration design result of the blade

Station No.	Section [r/R]	Chord [mm]	Twist [°]	Hydrofoil [-]
1(root)	0.00	600	-	cylinder
2	0.05	TR	TR	TR
3	0.10	TR	TR	TR
4	0.15	TR	TR	TR
5	0.20	TR	TR	TR
6	0.25	2098	18.52	S814
7	0.30	2008	15.61	S814
8	0.35	1918	13.31	S814
9	0.40	1828	11.47	S814
10	0.45	1738	9.96	S814
11	0.50	1648	8.72	S814
12	0.55	1558	7.67	S814
13	0.60	1468	6.78	S814
14	0.65	1378	6.00	S814
15	0.70	1288	5.32	S814
16	0.75	1198	4.70	S814
17	0.80	1108	4.12	S814
18	0.85	1018	3.57	S814
19	0.90	928	3.00	S814
20	0.95	838	2.35	S814
21(tip)	1.00	748	1.80	S814

**Table 2** Calculation conditions on the 2-D airfoil

Items	Values
angle of attack [°]	3.5
calculation section [%]	95(from root)
relative inlet velocity [m/s]	14.47
chord length [mm]	748
sea water density [kg/m <sup>3</sup> ]	1,024
vapor pressure [mmHg]	17.4
turbulence model [-]	SST

였으며, 설계결과를 Table 1에 나타내었다. 블레이드 직경은 19.2m이며, 설계유속은 2.5m/s, 정격회전속도는 14.92rpm, TSR (Tip Speed Ratio,  $\lambda$ )은 6 이다.

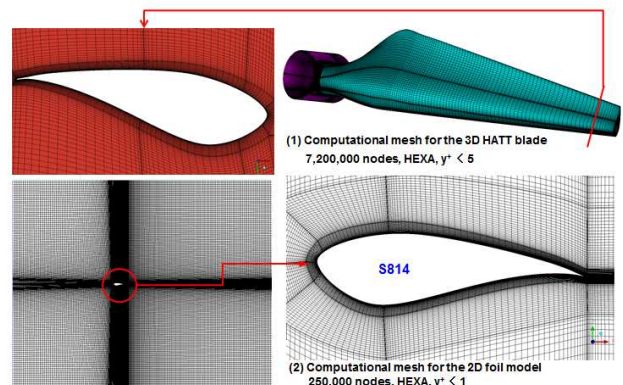
### 3. CFD에 의한 출력성능해석

#### 3.1 계산격자 및 수치해석 조건

본 연구에서의 CFD 해석은 블레이드 유동특성 및 출력성능, 캐비테이션(cavitation) 발생범위에 대한 검토를 위한 3차원 정상상태(steady state) 해석과, 팁 영역 2-D 단면( $\mu=0.95$ )에서의 시간변화에 따른 캐비테이션 특성 확인을 위한 비정상상

**Table 3** Calculation conditions on the 3-D blade

Items	Values
rotational speed [rpm]	14.92 rpm
TSR(8 cases) [-]	2~9
sea water density [kg/m <sup>3</sup> ]	1,024
vapor pressure [mmHg]	17.4
turbulence model [-]	SST

**Fig. 7** Computational grids for 2D and 3D CFD analysis

태(unsteady state) 해석으로 구분된다. 2D 단면에 대한 해석을 위해 3차원 블레이드의 허브 중심로부터 95% 지점에 위치하는 절단면을 해석대상으로 하였으며, 정격운전조건에서의 경계조건 값들을 계산하여 적용하였다.

2D CFD 해석을 위한 계산조건은 Table 2와 같다. 3D CFD 해석은 Table 3과 같은 TSR 변화에 따라 주기(periodic)경계조건으로 처리된 단일 블레이드에 대해 수행되었으며, 캐비테이션 모델이 적용되었다. 입구 경계조건으로 균일 속도유입조건을, 출구 경계조건으로 평균정압조건을 각각 부여하였다. 3D CFD 해석 도메인은 허브 중심으로부터 입구 경계조건까지 5D, 출구 경계조건까지 20D, 블레이드 반경 방향으로 10D의 거리를 유지하였다. 난류모델은 에어포일 및 유체기계 성능해석 시 비교적 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려진  $k-\omega$  기반의 천이난류모델(transitional turbulence model)을 적용하였으며,<sup>(11)</sup> ANSYS-CFX를 사용하였다.

계산격자의 생성을 위해 2D 및 3D 해석 모두 ANSYS ICEMCFD를 이용하였으며, Multi-block HEXA 격자계로 구성하였다. 계산격자 수는 3D 해석의 경우 약 720만 노드(node)가 사용되었으며, 2D 해석의 경우 약 25만 노드의 격자가 사용

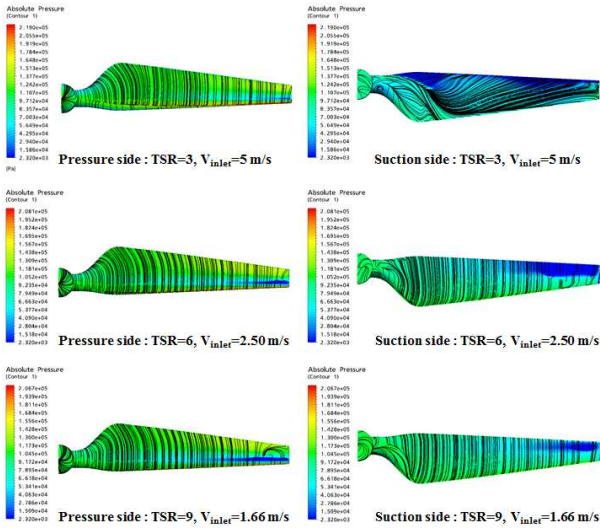


Fig. 8 Surface pressure overlapped with streamlines on pressure and suction side of the blade

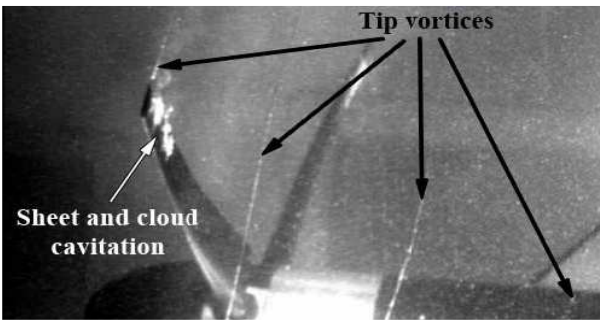


Fig. 9 Cavitation on suction side of a HATT rotor

되었다. 모든 계산 격자계는 천이난류모델의 적용을 위해 벽면에서의  $y^+$  조건을 5이하로 유지하였다. Fig. 7에 2D 및 3D 격자계를 나타내었다.

3.2 유동장 및 출력성능해석 결과 분석

Fig. 8에 TSR 3, 6, 9 조건에서의 블레이드 표면 압력 및 유선분포 해석결과를 나타내었다.

흡입면(suction side)의 경우 블레이드 팁 근방 전연(leading edge) 부에서 가장 높은 압력이 나타나고 있으며, 전연으로부터 약 25% 지점에서 급격히 낮은 압력이 형성되고 있다. 이때 예측된 압력 값의 범위가 해수의 포화증기압(saturation vapor pressure) 이하로 낮아지게 되면 캐비테이션이 발생 할 가능성이 있다. 이러한 저압영역은 압력면에서는 TSR이 증가할수록 발생범위가 큰 반면, 흡입면의 경우 TSR이 감소할수록 크게 나타나는 특징을 보인다. 압력면에서의 표면유선분포는 대부분의 조건에서 상대적으로 균일한 분포의 부착류(attached flow)가 형성되고 있으나, 흡입

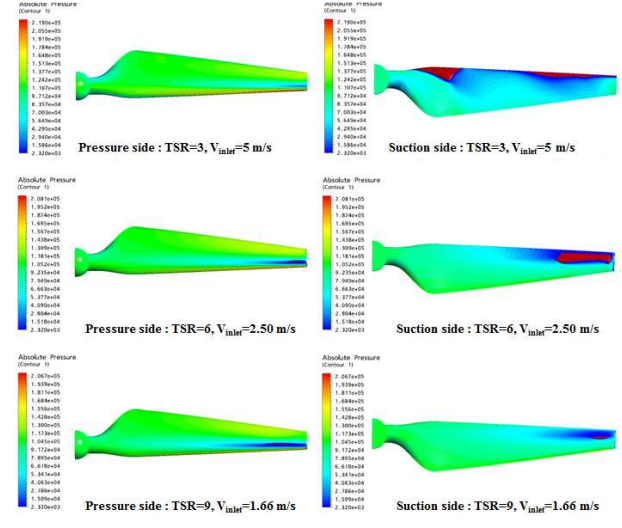


Fig. 10 Cavitation generation regions on pressure and suction side of the blade

면의 경우 TSR=3 의 조건에서는 전 범위에 걸쳐 상당히 복잡한 형태의 표면 유선이 형성 되었다. 이는 로터의 회전속도는 고정인 반면 작동유체의 유입속도가 증가함에 따라, 블레이드와 유입유동 사이의 받음각 변화가 크게 발생하여 흡입면에서 깊은 실속이 발생되었기 때문이며, 이는 출력 및 효율저하의 주된 원인이 된다. 피치제어를 적용하는 터빈의 경우, 정격 유속이상의 구간에서는 정격출력의 일정한 유지를 위해 피치제어를 실시하게 된다. Fig. 8의 TSR=3의 조건에서 나타난 흡입면 유동특성은 피치제어가 반영되지 않은 해석결과이므로, 전연부에 발생한 포화증기압 이하로의 압력강하 및 블레이드 전 구간 실속 등의 문제점이 실제터빈의 운전성능에 영향을 미칠 가능성은 없다. HAWT와는 달리 HATT는 바다 속에 설치되어 운전되며, 특히 얕은 수심에 설치될 경우 로터의 방위각(azimuthal angle) 변화에 따른 캐비테이션 발생 가능성이 있다.

Fig. 9는 Bahaj 등<sup>(12)</sup>에 의해 2007년에 수행된 수조시험결과이며, 블레이드 끝단 흡입면에서 발생하는 sheet 및 cloud 캐비테이션을 잘 보여주고 있다. 잘 알려진 바와 같이, 이는 블레이드 표면 침식과 진동 등의 문제를 유발하며 결국 설계수명 단축 및 잦은 유지보수 등의 문제를 발생 시키게 된다. 따라서 HATT 블레이드 설계 시에는 캐비테이션 발생가능성에 대한 검토가 필요하다. 설계된 1MW 블레이드의 정격 팁 속도는 15m/s이며, 팁 부분에서 캐비테이션이 발생할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 단일 블레이드가

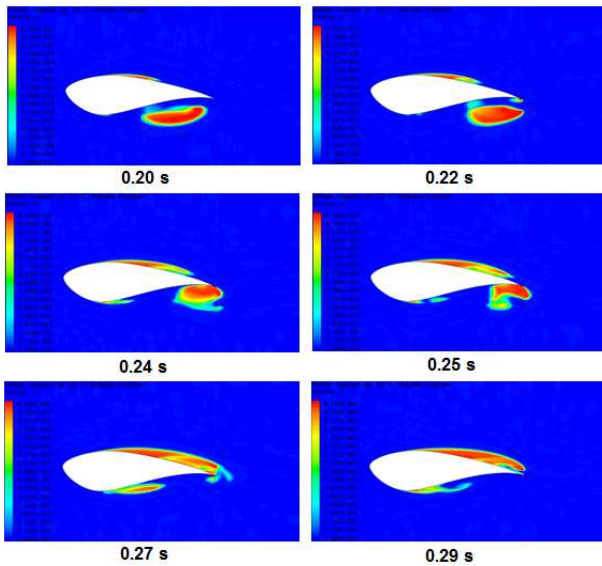


Fig. 11 Time variation of cavitation flow on 2-D section of the blade

일정한 압력조건에 놓여 있다는 가정 하에 캐비테이션 모델을 적용한 CFD 해석을 수행하였으며, Fig. 10에 해석결과를 나타내었다. 압력면의 경우 TSR이 높은 조건에서 팁 일부 영역의 캐비테이션이 관찰되고 있으며, 흡입면의 경우 전술한 바와 같이 TSR이 낮아질수록 압력저하가 크게 나타나기 때문에 캐비테이션 발생범위가 점차 확대되고 있다. 따라서 HATT 블레이드는 이러한 캐비테이션 문제의 최소화를 위해 블레이드 단면을 형성하는 hydrofoil의 종류, 블레이드 회전속도, 수심(water depth) 등의 설계요소가 신중히 검토 될 필요가 있다.

Fig. 11은 블레이드 팁에서 발생하는 캐비테이션의 시간 변화에 따른 특징을 관찰하고자, 허브로부터의 무차원 거리,  $r/R=0.95$  지점에 위치한 hydrofoil 단면에서의 비정상 2-D CFD 해석결과를 나타낸다. 붉은색은 공기의 VOF(volume of fraction)가 1 임을 의미하며, 푸른색은 반대로 해수의 VOF가 1 임을 의미한다. 블레이드 흡입면 전연부로부터 약 30% 지점에서 시작된 얇은 층 캐비테이션은 시간변화에 따라 후연으로 그 범위가 점차 확대되고 있으며, 압력면의 경우 최대 두께를 갖는 지점으로부터 발생한 캐비테이션 유동이 생성과 소멸을 반복하는 형태를 보인다.

Fig. 12에 CFD와 BEM 해석으로부터 얻어진 출력계수곡선의 비교결과를 나타내었다. 두 결과는 정성적으로 잘 일치하고 있으나, CFD 해석결과가 BEM 결과에 비해 대체로 낮은 효율을 예

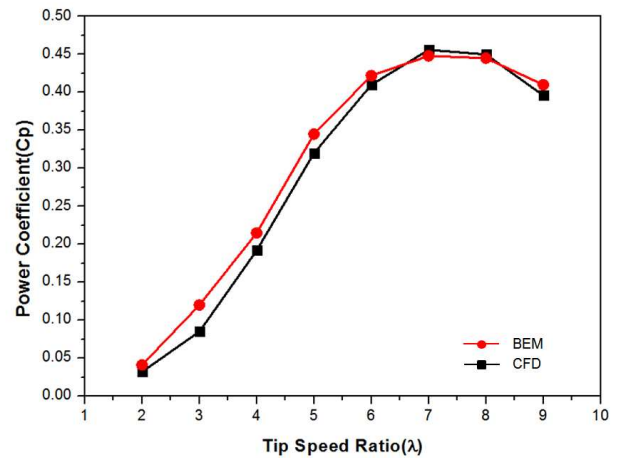


Fig. 12 Comparison of simulated power curve against BEM calculation result

측하고 있다. 최대 출력계수( $C_{P,max}$ )는 TSR=7에서 약 0.47(47%)이며, TSR이 증가 할수록 출력계수가 점점 증가하다가  $C_{P,max}$ 를 기준으로 다시 감소하는 특징을 보인다. Fig. 12의 결과는 순수하게 로터 블레이드로부터 얻어지는 기계적 출력이며, 드라이브트레인(drive train) 및 발전기 손실이 고려된 전기적 출력 값 보다 높다. 흐름유도 및 집중장치 등이 부착되지 않은 외부유동조건에서 이론적으로 얻을 수 있는 블레이드 최대 출력계수는 59.3%로 알려져 있으며,<sup>(13)</sup> 상용 HATT 로터 블레이드의 기계적 출력은 약 45~50% 수준이다. 블레이드의 성능에 관계된 설계변수는 하이드로포일 종류, 반경, 회전속도, 캐비테이션, 블레이드 수, 현의길이 및 비틀림 각 이다. 따라서 우수한 성능을 갖는 블레이드 팁 하이드로포일의 적용, 블레이드 국부단면에서의 설계변수 최적화 및 팁 형상 최적화를 통한 성능향상이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 BEM 이론과 대형 풍력터빈 블레이드 설계법을 응용한 HATT 블레이드 설계를 수행하였고, 전연부 표면 거칠기 변화 민감도가 낮은 NREL S814 에어포일을 이용한 1MW급 블레이드 형상설계 결과를 제시하였다.

형상 설계결과 타당성 확인을 위해 캐비테이션 모델을 고려한 CFD 해석을 통해 출력성능 및 유동해석 결과를 제시하였다. 본 연구에서 설계된 2 블레이드 타입 조류터빈의 경우 3 블레이드에 비해 동일한 운전조건에서 직경이 다소 큰 설

계적 특성으로 인해 틱 영역 흡입 면으로부터 캐비테이션이 발생하고 있으며, 최대효율은 TSR= 7의 조건에서 약 47 %로 나타났다. 향후 출력성능 극대화를 위한 형상 최적화 및 캐비테이션 방지 설계에 대한 연구가 필요 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) <http://www.alstom.com/press-centre/2014/10/alstom-improves-the-performance-of-its-tidal-energy-solutions-with-oceade-18-14mw>
- (2) EY, 2013, "Rising tide - Global Trends in the Emerging Ocean Market," *EYG no. FW0025*.
- (3) Fraenkel, P. L., 2002, "Power from Marine Currents," *Proc. of Instn. Mech. Engrs. Part A: J Power and Energy*, Vol. 216, pp. 1~14.
- (4) Fraenkel, P., 2010, "Practical Tidal Turbine Design Considerations: a Review of Technical Alternatives and Key Design Decisions Leading to the Development of the SeaGen 1.2MW Tidal Turbine," *Proc. of Instn. Mech. Engrs. - Fluid Machinery Group*, pp. 1~19.
- (5) Bir, G. S., Lawson, M. J. and Li, Y., 2011, "Structural Design of a Horizontal-Axis Tidal Current Turbine Composite Blade," *ASME 30<sup>th</sup> Int. Conf. on Ocean, Offshore, and Arctic Eng.*, Vol. 5, pp. 797~808.
- (6) Clark, J. A., 2006, "Design and Testing of a Contra-rotating Tidal Current Turbine," *Proc. of IMech. Part: J. Power and Energy*, Vol. 221, pp. 171~179.
- (7) Faudot, C. and Dahlhaug, Ole G., 2011, "Tidal Turbine Blade: Design and Dynamic Loads Estimation Using CFD and Blade Element Momentum Theory," *ASME 30<sup>th</sup> Int. Conf. on Ocean, Offshore, and Arctic Eng.*, Vol. 5, pp. 599~608.
- (8) Hansen, M. O. L, 2008, *Aerodynamics of Wind Turbines*, earthscan, London, pp. 27~57
- (9) Ahmed, M. R., 2012, "Blade Sections for Wind Turbine and Tidal Current Turbine Applications-current Status and Future Challenges," *Int. J. Energy Res.*, Vol. 36, pp. 829~844.
- (10) Bak, C., Fuglsang, P., Johansen, J. and Antoniou, I., 2000, "Wind Tunnel Tests of the NACA 63-415 and a Modified NACA 63-415 Airfoil," *Riso-R-1193(EN)*, pp. 1~108.
- (11) Janiszewska, J. M., Ramsay, R. R., Hoffmann, M. J. and Gregorek, G. M., 1999, "Effects of Grit Roughness and Pitch Oscillations on the S814 Airfoil," NREL/TP-442-8161.
- (12) Menter, F. R., Langtry, R. B., Likki, S. R., Suzenx, Y. B., Huang, P. G. and VÖLKER, S., 2006, "A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables Part I Model formulation," *ASME Journal of Turbomachinery*, 128:413-422, pp. 413~422.
- (13) Bahaj, A. S., Molland, A. F., Chaplin, J. R. and Batten, W. M. J., 2007, "Power and Thrust Measurements of Marine Current Turbines under Various Hydro Dynamic Flow Conditions in a Cavitation Tunnel and a Towing Tank," *Renewable Energy*, Vol. 32, No. 3, pp. 407~426.
- (14) Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. and Bossanyi, E., 2011, *Wind Energy HandBook 2<sup>nd</sup> Edition*, pp. 42~43.