

Article

## 플랩 블레이드를 이용한 조류 터빈의 부하 저감에 대한 연구

정다솜 · 고진환\*

제주대학교 공과대학 기계공학전공  
(63243) 제주특별자치도 제주시 제주대학로 102

### Study on Load Reduction of a Tidal Stream Turbine Using a Flapped Blade

Dasom Jeong and Jin Hwan Ko\*

Major of Mechanical Engineering, College of Engineering, Jeju National University,  
Jeju 63243, Korea

**Abstract** : Blades of tidal stream turbines have to sustain many different loads during operation in the underwater environment, so securing their structural safety is a key issue. In this study, we focused on periodic loads due to wave orbital motion and propose a load reduction method with a blade design. The flap of an airplane wing is a well-known structure designed to increase lift, and it can also change the load distribution on the wing through deflection. For this reason, we adopted a passive flap structure for the load reduction and investigated its effectiveness by an analytical method based on the blade element moment theory. Flap torsional stiffness required for the design of the passive flap can be obtained by calculating the flap moment based on the analytic method. Comparison between a flapped and a fixed blade showed the effect of the flap on load reduction in a high amplitude wave condition.

**Key words** : blade element momentum theory, load reduction, passive flap, tidal stream turbine, wave-induced velocity

#### 1. 서 론

조류터빈(tidal stream turbine) 중에서 축을 중심으로 블레이드(blade)가 회전하고, 회전축이 유체의 흐름과 수평을 이루는 형식을 수평축터빈(horizontal axis turbine)이라고 한다. 일반적으로 이러한 형식에서는 축 방향으로 발생하는 추력이 블레이드 구조 안전성에 가장 큰 영향을 미친다. 반면 최근 추력 이외에 조류터빈에 미치는 파랑유발 하중(wave-induced load)의 영향에 대한 연구들이 진행되었다. 파랑유발 하중은 풍력터빈과 달리 조류터빈에만 고려되는 것으로, 파도에 의하여 발생하며 표면에 가까운 조류터빈 블레이드 일부에 가해지는 추가적인 반복 하중을

말한다. 2012년 Faudot는 파랑유발 하중을 조류터빈 블레이드의 피로 하중에 대한 주요 원인 중 하나로 보고 각 블레이드의 추력 및 토크를 분석하였으며(Faudot and Dahlhaug 2012) 2015년 Tatum은 주기적으로 발생하는 파도가 블레이드에 작용하였을 때의 영향을 연구하였다(Tatum et al. 2016). 또한 2018년 Guo는 실험을 통해 파도가 블레이드에 주기적인 진동을 준다는 사실을 확인하였다(Guo et al. 2018). 그리고 2016년 Tully는 파도가 미치는 영향과 그 영향을 줄이기 위한 연구를 진행하였다(Tully 2016).

Fig. 1과 같이 전단흐름(sheared current)과 파랑 오비탈(wave orbital)의 속도가 같은 방향으로 작용할 때 블레이드에 더욱 더 큰 하중이 부가 되게 된다. 또한 파랑유발 하중은 주기성을 가지며 블레이드의 수명을 낮추는 구조

\*Corresponding author. E-mail: jko@jeju.ac.kr

피로를 발생시킨다. 이는 비용과 안전 측면 모두에서 원치 않는 결과를 일으키므로 블레이드에 걸리는 하중을 줄이기 위한 대책이 필요하였다.

하중 감소 연구의 경우 조류터빈과 유사한 형태를 가지고 있는 풍력터빈 블레이드에 대해 연구가 활발히 진행되었다. 그 중 블레이드의 받음각(Angle of Attack, AOA)이나 양력 계수(lift coefficient)를 변형시켜서 부하를 감소시키는 플랩(flap)방법이 제안되었다. 플랩은 블레이드의 뒷전(trailing edge)부분을 변형시키는 방법으로 액추에이터(actuator)의 유무에 따라 능동 플랩(active flap)과 수동 플랩(passive flap)으로 나눌 수 있다. 2011년 연구에서는 하중감소를 위하여 뒷전 부분에 플랩을 적용한 방법을 제시하였고(Behrens 2011) Castaignet의 연구에서는 실험을 통해 플랩의 하중감소 효과를 확인하였다(Castaignet 2011). 2017년 Oltmann 등의 연구에서는 플랩을 코드(chord)의 20%, 스패(span)방향으로 전체의 80.5~92.7%에 적용했을 때 블레이드의 루트(root) 부분에 걸리는 굽힘 모멘트가 효과적으로 감소된다는 사실을 확인하였다(Oltmann et al. 2017). 그리고 2016년 A Croce 등의 연구에서는 플랩의 위치를 뒷전(trailing edge) 부분과 끝단(tip)에 적용한 뒤 BEMT (blade element moment theory)를 사용하여 비교한 결과를 발표하였다. 이때 플랩의 길이는 코드의 25%로 적용하였으며 스패방향으로는 전체의 70~80%에 위치시켰다(Croce et al. 2016). 또한 McWilliam 등은 2018년에 플랩을 스패방향으로 전체의 30%를 적용시켜 연구하기도 하였다(McWilliam et al. 2018).

선행 연구들에서 풍력터빈 블레이드에 적용된 플랩에 대한 블레이드의 하중을 계산하기 위해서 사용되는 이론적인 방법 중 가장 대표적인 것이 BEMT이다. BEMT는 블레이드 요소 이론(blade element theory)과 운동량 이론(momentum theory)을 결합한 이론으로 블레이드를 분석하거나 설계할 때 사용한다. BEMT는 풍력터빈에서뿐만 아니라 조류터빈의 해석에도 사용되고 있다. 2008년 Batten 등은 해상 터빈의 유체 역학적 설계를 위한 BEMT

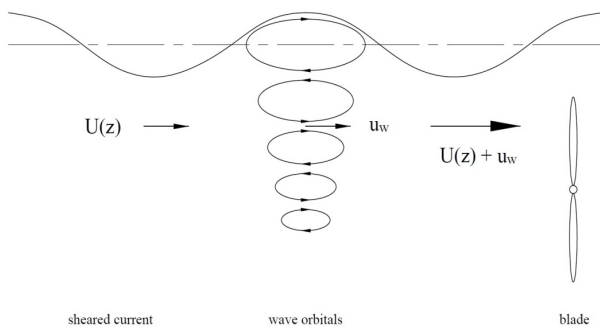


Fig. 1. wave-induced velocity

모델의 개발에 대하여 연구하였다(Batten et al. 2008). 2017년 Allsop 등의 연구에서는 두 종류의 수평축 조류터빈을 BEMT와 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 사용하여 해석하였고 두 가지 방법을 비교한 결과, BEMT가 납득할만한 오차 범위에서 상대적으로 계산비용이 절감된다는 결과를 얻었다(Allsop et al. 2017).

따라서 본 연구에서는 조류터빈의 구조 안전성에 영향을 미치는 요인인 파랑유발 하중을 저감하기 위해서 풍력터빈의 선행연구에서 하중감소 효과가 검증된 블레이드 플랩을 적용한 뒤, BEMT를 사용하여 파랑유발 하중 영향과 블레이드의 하중감소 영향을 확인해 보고자 한다.

## 2. 방법과 재료

### 파랑유발 속도

파도에 의해 발생하는 파랑유발 속도(wave-induced velocity)에 영향을 미치는 주요 인자에는 수심  $H$ 와 파장  $\lambda$ 가 있다.  $H/\lambda > 1/2$ 인 경우는 주로 심해(deep water)에서 발생하며 파장의 영향을 거의 받지 않는 특성을 가지고,  $H/\lambda < 1/20$ 인 경우는 천해(shallow water)에서 주로 발생하며 수심의 영향을 거의 받지 않는 특성을 가진다. 또한  $1/20 \leq H/\lambda \leq 1/2$ 인 중간수심(intermediate depth)에서는 수심과 파장의 영향을 모두 받으며 가장 일반적인 형태라고 볼 수 있다(Holthuijsen 2007). 파랑유발 속도의 시간에 따른 변화에 대한 이전의 연구(Tully 2016)에서는 선형파 이론(linear wave theory)을 바탕으로  $H/\lambda = 1/7$ 인 중간수심이라고 가정하였을 때, Fig. 2와 같이 기존 유속의 20~30% 정도의 증폭을 가지며 주기적으로 작용하는 것으로 확인하였다. 이를 토대로 본 연구에서는  $H/\lambda = 1/7$ 인 중간수심에서 발생하는 주기 반복하중을 상당 정 하중으로 변환하고 플랩의 효과를 확인하고자 한다. 먼저 블레이드에

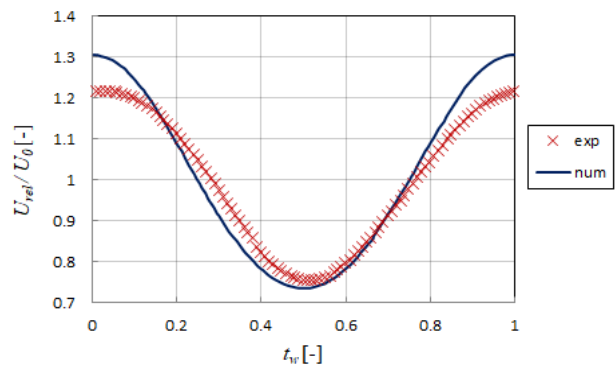


Fig. 2. Measured (exp) and predicted (num) flow speed experienced by the hydrofoil during a wave period (Tully 2016)

작용하는 하중 중에서 가장 영향력이 큰 추력만을 고려하였고 작용하는 방향이 조류와 수평하며 블레이드의 면과는 수직 하다고 가정하였다. 또한 주기적으로 작용하는 파랑유발 속도를 일정한 속도로 작용한다고 가정하였다. 이때 파랑유발 속도의 경우 기존의 주기적인 형태에서 정적인 형태로 바꾸기 위한 가장 단순한 방법인 동적 계수(dynamic coefficient)를 적용하였다.

### Xfoil과 Javafoil 활용 유체역학적 특성(fluid dynamic characteristics) 도출

플랩을 적용했을 경우 유체역학적 특성을 파악하기 위해 피치 회전축 기준 모멘트 외에 플랩 회전 축 기준 모멘트인 플랩모멘트( $C_{Mf}$ )의 계산이 필요하다. 하지만 익형(airfoil)의 유체역학적 특성을 해석하기 위해 주로 사용되는 프로그램인 Xfoil (Drela 2001)에서는  $C_{Mf}$ 를 계산하는 모듈이 없어 프로그램 수정이 요구되었다. 이 때 익형은 대칭 형상을 가지고 있는 NACA0012를 사용하였고 플랩을 적용하였을 때의 형상은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

Xfoil (Matlab 코드)(Virtuani 2015)을 수정하여  $C_{Mf}$ 를 구하기 위하여 제일 먼저  $C_{Mf}$ 의 회전축(Fig. 3의  $C_{Mfref}$ )에 대한 정보 추가가 필요하다. 기존의 피치 모멘트의 중심을 나타내는  $C_M$ 의 회전축(Fig. 3의  $C_{Mref}$ )은 선행 연구(Croce et al. 2016; McWilliam et al. 2018; Oltmann et al. 2017)에서 코드길이의 20~25%를 적용했던 것을 바탕으로 본

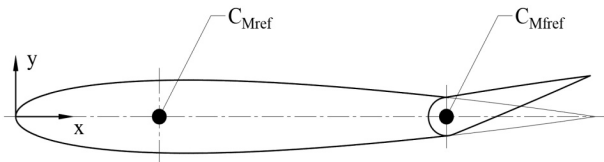


Fig. 3. Pitch and flap moment centers of a flapped airfoil

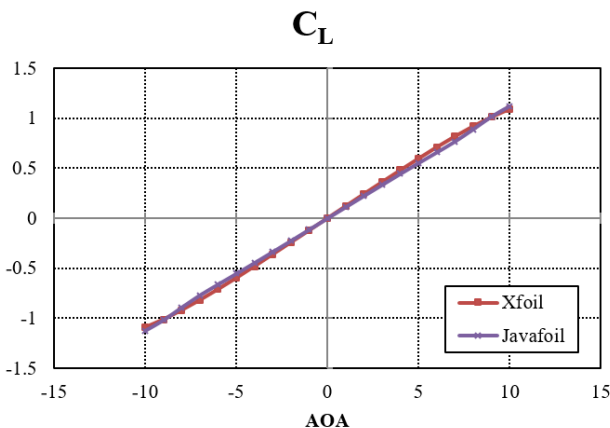


Fig. 4. Comparison of Xfoil and Javafoil results

연구에서는 25%를 적용하도록 하였다. 또한 플랩은 뒷전에서부터 25%를 차지하는 것으로 설정하였다. 따라서 코드 전체 길이를 1로 보았을 때  $C_{Mref}$ 는 0.25지점,  $C_{Mfref}$ 는 0.75지점이 된다. 이것을 토대로  $C_{Mf}$  계산 시 기존  $C_M$ 의 계산식에서  $C_{Mfref}$ 의 우측 부분만 계산하도록 프로그램 상의 계산루트를 수정하였다.

위와 같은 과정을 통하여 받음각(Angle of Attack, AOA)의 변화에 따른 유체역학적 특성인  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$  그리고  $C_{Mf}$  값을 얻을 수 있다. 이 과정은 블레이드 전체에 작용하는 하중을 계산하기 위하여 필요한 전처리 과정으로 다음 장의 BEMT 기반 프로그램에서는 AOA -90도에서 90도까지의  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$  자료를 요구하고 있다. 하지만 Xfoil 내에서는 이와 같은 넓은 범위 AOA의 결과를 얻기 어려워서 Javafoil을 병행 사용하였다. Javafoil은 Xfoil과 마찬가지로 주어진 익형에 대한 유체역학적 특성을 계산해 주는 프로그램으로 유체역학적 특성 자료를 얻을 수 있다 (Hepperle 2017). Javafoil과 Xfoil의 유사도를 확인하기 위해 레이놀즈수와 마하수가 같은 조건에서 AOA별  $C_L$ 을 비교한 결과를 Fig. 4와 같이 나타냈을 때 평균오차 약 5%로 매우 유사한 결과를 얻었다. 이를 이용하여 정확도를 요구하는 좁은 범위를 제외한 부분에서는 Javafoil에서 얻어진 수치를 사용하였다.

### BEMT기반 프로그램

앞서 언급한 BEMT 기반 프로그램인 BemBo (Ko and Park 2015)는 익형의 형상을 따로 입력하지 않고  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$ 의 정보만 가지고 다양한 형태의 블레이드 하중 해석에 사용되는 전산 도구이다. 하지만 기존의 BemBo는 유입 유속 조건이 주어졌을 때 블레이드의 하중 해석에만 사용되므로 이 연구에서 필요한 파랑유발 하중의 영향을 계산하기에는 어려움이 있었다. 따라서 플랩 블레이드와 파랑유발 하중의 영향을 확인할 수 있도록 기존 프로그램 수정이 필요하게 되었다. 또한 선행연구(Croce et al. 2016; McWilliam et al. 2018; Oltmann et al. 2017)에서 플랩을 블레이드의 스패 방향으로 10~30%를 적용했던 것을 참고하여 블레이드의 끝단에서부터 전체의 20% 부분에 적용하고, 파랑유발 속도(wave-induced velocity)가 블레이드에 미치는 영향 영역도 끝단에서 20%에 한정되는 것으로 가정하였다.

먼저 Table 1과 같이 조류속도  $V = 2$  m/s에서 20 m 터빈직경(2R), 2 m 허브직경( $2R_h$ ), 3개 블레이드(B)의 조류터빈 조건을 사용하였다. 유입 유속  $V$ 에 의해 회전하는 3 블레이드 수평축 조류 터빈은 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\omega$ 는 회전속도를 의미한다. 또한 BemBo는 효율 측면에서 최적 형상정보를 도출하는 기능을 가지고 있는데 이것을 이용하여 블레이드 요소 개수인  $N = 40$ 에

Table 1. Information of BemBo input

R	Rh	B	Rho	V	N
10	1	3	1020	2	40

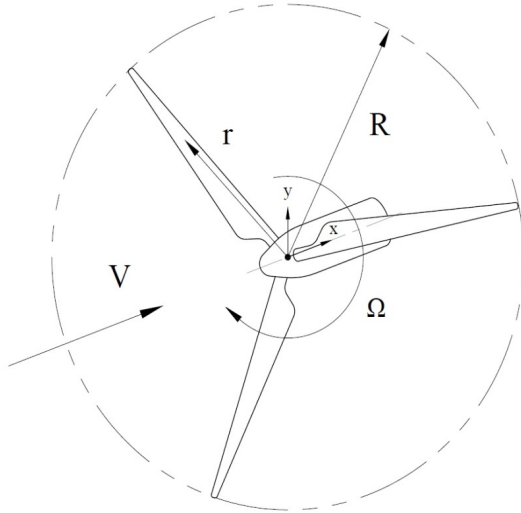


Fig. 5. Three blade turbine

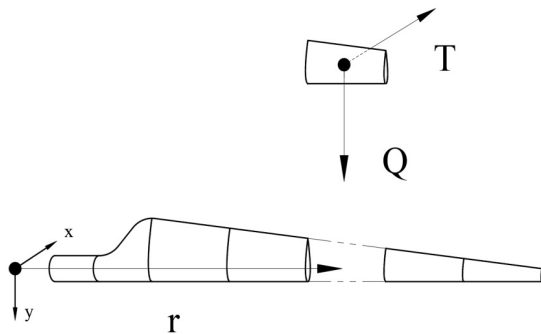


Fig. 6. Blade element

대한 최적 형상정보를 도출하고 사용하였다. 여기서 블레이드 요소는 Fig. 6와 같이 표현할 수 있고, 이 때 r은 허브 중심에서부터 블레이드 요소 중심까지의 거리를 의미한다. 또한 블레이드 요소에 작용하는 힘은 추력(T)과 토크 계산에 사용되는 횡방향 힘(Q)으로 나뉘어 진다.

다음으로는 기존에 사용하던 CL, CD, CM의 정보에 CMf 정보를 읽는 루틴을 BemBo에 추가하였다. 이때 블레이드 끝단에서 20% 부분에는 플랩을 적용했을 때의 정보를 사용하고 나머지는 기존의 익형 형태인 NACA0012에서 얻은 정보를 사용하도록 하였다. 즉 끝단 20% 영역에서 CMf정보를 읽고 반영할 수 있도록 프로그램을 수정하였다.

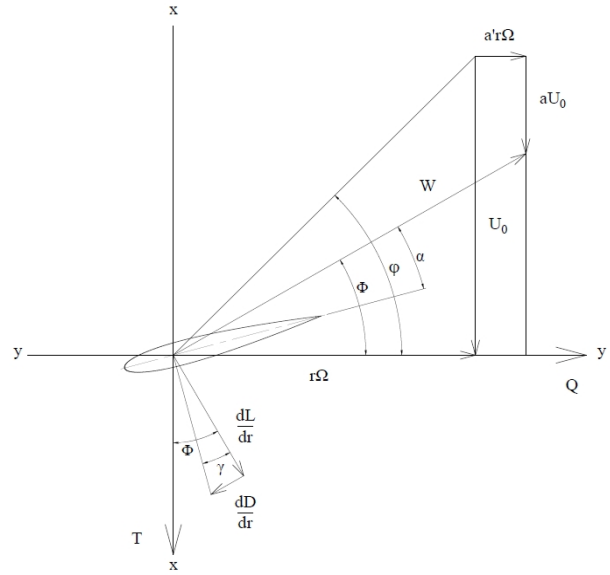


Fig. 7. Blade forces of a marine current turbine (Batten et al. 2008)

먼저 블레이드 요소에 걸리는 힘은 Fig. 7과 같이 표현할 수 있다. Fig. 7에서 a는 축 흐름 유도 계수, a'는 접선 흐름 유도 계수,  $\alpha$ 는 받음각(AOA),  $U_0$ 는 자유흐름 속도, L은 양력, D는 항력 그리고 W는 회전하는 블레이드에 작용하는 합성속도(resultant velocity on rotating blade),  $\sqrt{U_0^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+a')^2}$ 를 의미한다. 이를 토대로 블레이드의 추력 계수인  $C_{Tb}$ 는 아래 식 (1)과 같은 미분 식으로 나타낼 수 있다(Batten et al. 2008). 이 식으로부터 추력 계수는 블레이드 루트에서 팁까지 적분을 통해 얻을 수 있으나 전산 상에서는 요소 개수 N에 대한 합의 형태인 식 (2)로 계산될 수 있다. 추력계수와 추력간의 관계도 역시 식 (2)에 제시되어 있다. 반면  $C_L$ 과  $C_D$ 은 이차원 익형에 대한 계수이므로 A가 c로 대체되어서 나타낼 수 있다(Drela 2001).

$$\frac{dC_{Tb}}{dr^*} = \frac{(2(1-a)^2 \sigma_K C_T)}{\pi \sin^2 \phi} \tag{1}$$

$$C_{Tb} = \sum_i^N \left( \frac{2(1-a)^2 \sigma_K C_T}{\pi \sin^2 \phi} C_T \right)_i = \frac{Tb}{qA} \tag{2}$$

여기서 A는 로터 회전 단면적, a는 축 흐름 유도계수,  $\rho$ 는 밀도,  $r^*$ 는  $r/R$ ,  $\sigma_K$ 는  $c_B/2R$  그리고 q는  $0.5\rho V^2$ 이다.

식 (2)을 기반으로 Tb와 T와의 관계식인 식 (3-1)이 도출되며 이를 나열하면 식 (3-2)로 표현될 수 있다.

$$\frac{Tb}{qA} = \sum_i^N \left( \frac{T}{qc} \frac{2(1-a)^2 \sigma_K C_T}{\pi \sin^2 \phi} \right) = \sum_i^N \left( \frac{T}{qc} \gamma \right) \quad (3-1)$$

$$\frac{c}{A} = \left( \frac{T}{Tb} \gamma \right)_1 + \left( \frac{T}{Tb} \gamma \right)_2 + \dots + \left( \frac{T}{Tb} \gamma \right)_N \quad (3-2)$$

여기서  $\gamma = \frac{(2(1-a)^2 \sigma_K)}{\pi \sin^2 \phi}$  이다.

다음으로 블레이드의 추력 및 모멘트 계수인  $C_{Tb}$ 와  $C_{Mb}$ 는 식 (4)로 나타낼 수 있다(Drela 2001). 이를 이용하여  $C_T$ 와  $C_M$ 의 관계 및  $C_{Tb}$ 와  $C_{Mb}$ 의 관계를 비례식으로 정리하면 식 (5-1)과 (5-2)로 표현된다.

$$C_{Tb} = \frac{Tb}{qA}; RC_{Mb} = \frac{Mb}{qA} \quad (4)$$

$$\frac{C_T}{T} = \frac{cC_M}{M} = \frac{1}{qc} \quad (5-1)$$

$$\frac{C_{Tb}}{Tb} = \frac{RC_{Mb}}{Mb} = \frac{1}{qA} \quad (5-2)$$

이 때 식 (5-2)를 식 (5-1)로 나누면 다음의 관계식이 도출된다.

$$\frac{T}{Tb} \frac{C_{Tb}}{C_T} = \frac{M}{Mb} \frac{RC_{Mb}}{cC_M} = \frac{c}{A} \quad (6)$$

또한 각 블레이드 요소의 추력인 T의 선형 중첩(linear combination)으로 블레이드 추력인 Tb가 계산되며, 마찬가지로 각 블레이드 요소의 모멘트인 M의 선형 중첩으로 Mb가 계산되므로 식 (3-2)은 다음과 같이 변환 될 수 있다.

$$\frac{c}{A} = \left( \frac{M}{Mb} \gamma \right)_1 + \left( \frac{M}{Mb} \gamma \right)_2 + \dots + \left( \frac{M}{Mb} \gamma \right)_N \quad (7)$$

따라서 식 (6)과 (7)을 이용하여  $C_{Mb}$ 에 대한 최종식이 아래와 같이 도출된다.

$$C_{Mb} = \sum_i^N \left( C_{Mf} \frac{c}{R} \right)_i = \sum_i^N \left( C_M \frac{(2(1-a)^2 \sigma_K c)}{\pi \sin^2 \phi R} \right)_i \quad (8)$$

식 (8)의 모멘트와 관련된 계수  $C_M$ 와  $C_{Mb}$ 를 플랩모멘트와 관련된 계수  $C_{Mf}$ 와  $C_{Mb}$ 으로 치환하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{Mfb} = \sum_i^N \left( C_{Mf} \gamma \frac{c}{R} \right)_i = \sum_i^N \left( C_{Mf} \frac{2(1-a)^2 \sigma_K c}{\pi \sin^2 \phi R} \right)_i \quad (9)$$

즉 식 (8)과 (9)를 통해 블레이드의 모멘트 및 플랩 모멘트 계산을 할 수 있고 이를 프로그램에 수정 반영하였다.

또한 파도가 적용되는 부분에는 Fig. 8과 같이 기존의 속도 V에 파랑유발 속도를 나타내는  $V_{wave}$ 를 더한  $V_{new}$ 가 적용되어 계산되도록 Fig. 8의 순서도(flow chart)를 기반으로 수정하였다.  $V_{new}$ 의 적용범위는 플랩 적용 범위와 동일한 블레이드 끝단에서부터 20% 부분이다. 이를 통해 최종적으로 파랑유발 속도가 적용됐을 때는 물론 플랩이 적용되었을 때의 결과를 비교할 수 있게 된다.

기본적인 BEMT의 경우 팁 부분에서의 와류 방출이 후류에 미치는 3차원 영향을 고려하지 못하는 주요한 한계점이 있다. 이를 보정하기 위해 축 흐름 유도 계수(axial flow induction factor, a)와 접선 흐름 유도 계수(tangential flow induction factor, a'), 그리고 팁 손실 계수(tip loss factor, f)를 이용하는 팁 손실 보정식 등이 사용되고 있으며 본 연구의 BemBo에서 식 (10)~(12)의 보정식(Lee et al. 2012)을 적용하고 있다.

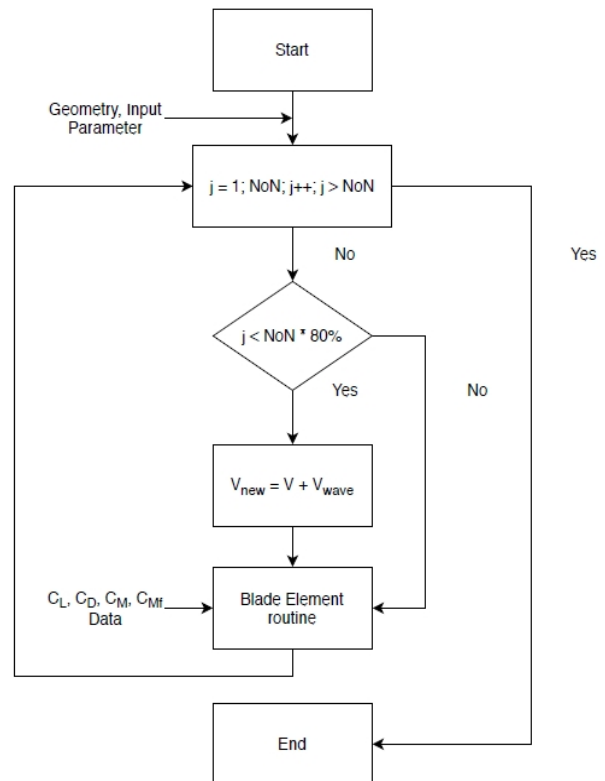


Fig. 8. Flow chart of modified BemBo code

$$f = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \exp \left( -\frac{B}{2} \frac{R-r}{r} \sqrt{1 + \frac{(TSR \cdot r)/R^2}{1-a}} \right) \right] \quad (10)$$

$$dT = 4\pi r^2 \left[ U_0^2 a f (1 - a f) + (a' \Omega r f)^2 \right] dr \quad (11)$$

$$dQ = 4\pi r^3 U_0 \Omega a' f (1 - a f) dr \quad (12)$$

추가적으로 끝단에서부터 20% 부분의 플랩에 의해서 급격한 각도 변화가 생기고 이에 따른 손실이 발생할 수 있다. 하지만 이에 대한 보정은 본 연구의 범위 밖에 있으며 추후 플랩 블레이드의 3차원 전산유동해석 결과와의 비교 분석을 포함하는 보정식 개발 연구가 가능할 것으로 예상된다.

### 3. 결과 및 토의

#### 추력 기준 파랑유발 속도와 플랩의 효과

파랑유발 속도(wave-induced velocity)와 플랩의 효과를 확인하기 위해서 기존 NACA0012의 익형에 유입 속도가 적용되었을 경우, 기존의 익형에 파랑유발 속도가 반영되었을 경우, 그리고 파랑유발 속도가 반영되고 익형에 -15도 플랩이 적용했을 경우의 3가지 조건을 비교해 보았다. 이때 파랑유발 속도는 앞에서 서술하였듯이 블레이드의 유체역학적 특성을 우선적으로 확인하기 위하여 동적 계수(dynamic coefficient)를 적용하였다. 이때의 동적 계수는 통상적으로 심각한 진동일 경우 2에서 3정도를 적용하는 것을 고려하여(Tully 2016) 파랑유발 속도가 기존 속도의 50%로 일정하게 작용한다고 가정하였다. 속도의 합이 기존 속도의 150%가 되면 속도에 제곱에 비례하는 하중은 225%가 되므로 2배와 3배 사이에 있게 된다. 그리고 기존 익형의 효율이 최대인 지점을 기준으로 비교하기 위해서  $C_p$  분포를 파악하였을 때 TSR (Tip Speed Ratio)이 5인 지점이 최대가 나왔으므로 이 지점을 중심으로 추력과 출력을 확인하고자 한다.

먼저 Fig. 9의 추력을 비교해 보면 유입 속도만이 적용된 경우 대비 파랑유발 속도가 추가 적용되었을 경우에는 추력이 14.8% 증가하였고, -15도 플랩이 같이 적용되었을 경우에는 4.26%만 증가하는 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 10의 출력을 비교해 보면 유입 속도만이 적용된 경우 대비 파랑유발 속도가 추가 적용되었을 경우는 45.57%가 증가하였고, -15도 플랩이 같이 적용되었을 경우는 34.12%가 증가하였다. 이 결과들을 보면 유입속도 50%에 해당되는 파랑유발 속도로 인해 발생하는 하중 및 출력 증가는 상당히 크지만 플랩을 사용하였을 때 증가되는 출력 대비 하중의 증가율은 상대적으로 감소함을 알 수 있었고 본

연구에서 제안한 방법을 사용하여 정량적인 감소분을 얻을 수 있다는 사실도 확인할 수 있다.

다음으로 수동 플랩 설계에 필요한 플랩모멘트( $M_F$ ) 결과를 확인해보았다. Fig. 11에 나타낸 바와 같이 TSR이 5인 지점에서  $M_F$ 는 17.47 Nm로 계산되었다. 수동 플랩의 비틀림 스프링상수는 이  $M_F$  값을 회전각으로 나눠서 계산할 수 있다. 계산결과 비틀림 스프링 상수는 1.162 N·m/deg.이 된다. 즉 이 비틀림 스프링 상수를 갖는 스프링이

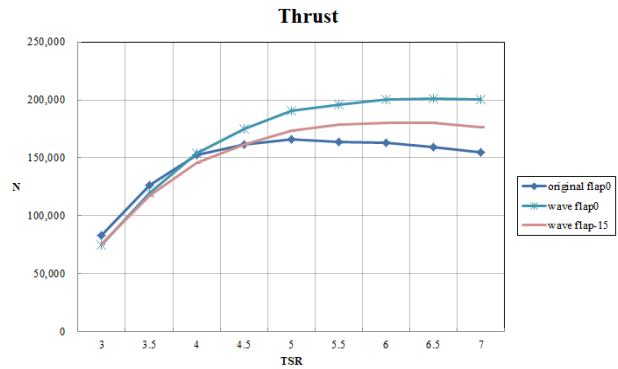


Fig. 9. Comparison of thrust

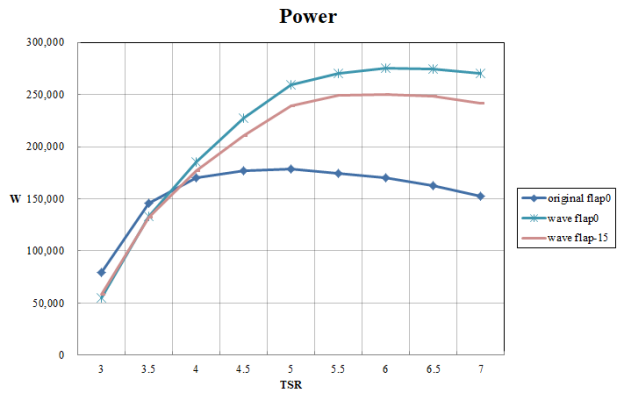


Fig. 10. Comparison of power

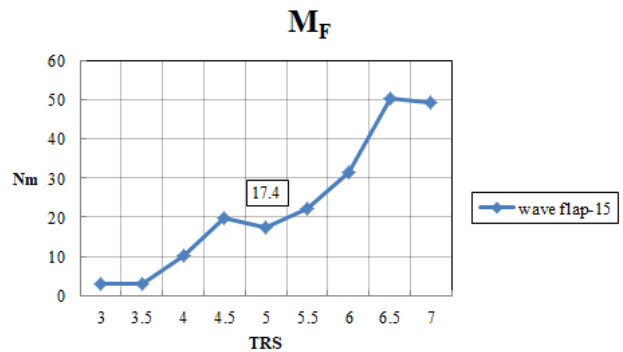


Fig. 11.  $M_F$  of 50% wave-induced velocity

플랩 블레이드에 장착되어 최대 출력 시 -15도의 플랩을 가질 수 있게 되면 50% 파랑유발 속도에 의한 추력 영향이 제한적인 플랩 설계에 활용 할 수 있게 된다.

### 출력 기준 파랑유발 속도와 플랩의 효과

앞서 제시한 결과에서 플랩을 적용하는 것이 파랑유발 속도로 인해 증가하는 추력과 출력을 감소시키는데 효과가 있다는 사실을 보여주었다. 하지만 기존 익형에 유입

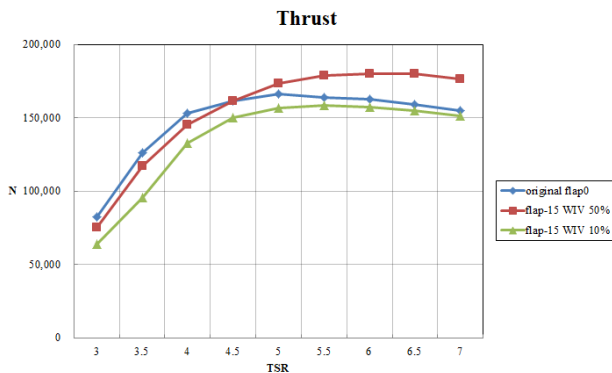


Fig. 12. Thrust comparison

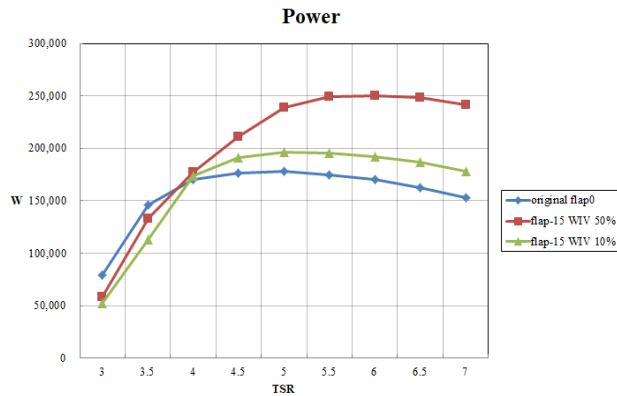


Fig. 13. Power comparison

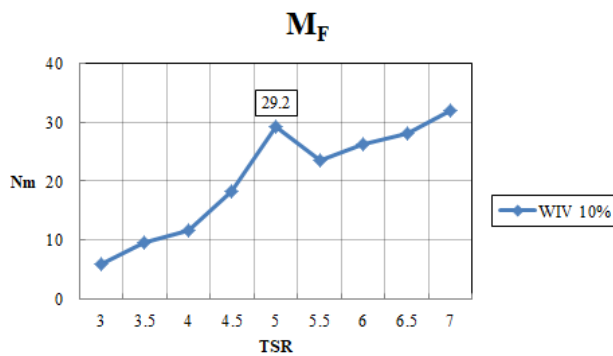


Fig. 14. M<sub>F</sub> of 10% wave-induced velocity

속도만 적용되는 경우 대비 파랑유발 속도와 플랩이 반영된 경우, 추력은 근사한 수치를 보인 것과 달리 출력의 경우 큰 차이를 보임을 확인할 수 있다. 터빈에서 추력은 블레이드의 구조적인 문제를 야기하지만, 순간출력이 정격출력을 크게 벗어난 경우에는 터빈 시스템 내 전기적인 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 기존 터빈의 정격출력과 근사한 결과를 얻을 수 있도록 파랑유발 속도 조건을 변경해보았다. 이를 위해 유입 속도만 적용되는 기존 익형, 파랑유발 속도 10%와 50%가 반영되는 플랩 익형의 경우를 비교해 보았다.

Fig. 12의 추력그래프에서 파랑유발 속도 10%를 적용한 경우의 결과를 보면 기존 익형 보다 많이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 13의 출력그래프에서 파랑유발 속도 10%를 적용한 경우의 결과를 보면 이전의 결과에 비해서 TSR 5 지점에서 정격출력과와의 차이가 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있다.

또한 Fig. 14에서 나타낸 바와 같이 TSR이 5일 때 M<sub>F</sub>값은 29.23 N·m로 비틀림 스프링상수를 계산하면 1.949 N·m/deg의 결과를 얻을 수 있다. 즉 이 비틀림 스프링 상수를 갖는 스프링이 플랩 블레이드에 장착되어 최대 출력 시 -15도의 플랩 각을 가질 수 있게 되면 10% 파랑유발 속도에서의 출력 영향이 제한적인 플랩 설계에 활용될 수 있다. 물론 추력은 50% 파랑유발 속도의 경우보다 작은 값을 가지게 되어 구조적으로도 안전한 설계가 될 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 Xfoil과 Javafoil 프로그램 내에서 기본적으로 제공하는 유체역학적 특성 정보 외에 블레이드에 플랩을 적용하였을 때 필요한 정보인 플랩모멘트(C<sub>Mf</sub>)를 계산하기 위하여 Xfoil 코드를 수정하였으며, BEMT 기반 프로그램도 역시 파랑유발 속도(wave-induced velocity)를 고려한 하중 분석이 가능하도록 코드를 수정하였다. 이 수정 과정을 통하여 플랩 블레이드를 사용한 경우의 기계적 및 전기적 부하 감소 효과를 정량적으로 확인하였으며 파랑유발 하중(wave-induced load)의 영향을 줄일 수 있다는 사실도 확인하였다. 그리고 플랩 각도 등의 입력 값을 조절하여 터빈의 출력과 블레이드에 걸리는 하중을 원하는 목표 값으로 조정할 수 있다는 결과를 얻었다. 또한 플랩 축 모멘트 결과를 이용하여 비틀림 스프링상수를 구할 수 있어 수동 플랩 설계에 활용이 가능할 것으로 기대된다. 이러한 연구 결과를 토대로 향후에는 파랑유발 속도의 조건을 실제와 가깝게 동적 하중으로 적용하여 시간에 따른 하중과 출력의 변화를 확인해 보고, 플랩의 크기 및 위치 조건을 변화시켜 최적 형상과 위치를 도출하는 연구를 진행할 계획이다.

## 사 사

이 논문은 2020학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었습니다. 그리고 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2020R1A2C1102994)과 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(No. 20184030202200)을 받아 수행한 연구 성과입니다.

## 참고문헌

- Allsop S, Peyrard C, Boulougouris B, Gareth PH (2017) Hydrodynamic analysis of a ducted, open centre tidal stream turbine using blade element momentum theory. *Ocean Eng* **141**:531-542
- Batten WMJ, Bahaj AS, Molland AF, Chaplin JR (2008) The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines. *Renew Energ* **33**(5):1085-1096
- Behrens T (2011) Simulation of moving trailing edge flaps on a wind turbine blade using a navier-stokes based immersed boundary method. Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, 131 p
- Castagnet DB (2011) Model predictive control of trailing edge flaps on a wind turbine blade. Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, 134 p
- Croce A, Gualdoni F, Montinari P, Riboldi CED, Bottasso CL (2016) Inertial and aerodynamic tuning of passive devices for load alleviation on wind turbines. *J Phys Conf Ser* **753**(10):102005. doi:10.1088/1742-6596/753/10/102005
- Drela M (2001) MIT aero & astro, harold youngren, aircraft, Inc.Xfoil 6.9 user primer. [https://web.mit.edu/drela/Public/web/Xfoil/Xfoil\\_doc.txt](https://web.mit.edu/drela/Public/web/Xfoil/Xfoil_doc.txt) Accessed 30 Nov 2001
- Faudot C, Dahlhaug OG (2012) Prediction of wave loads on tidal turbine blades. *Energy Procedia* **20**:116-133
- Guo X, Yang J, Gao Z, Moan T, Lu H (2018) The surface wave effects on the performance and the loading of a tidal turbine. *Ocean Eng* **156**:120-134
- Hepperle M (2017) JavaFoil user's guide. <http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/java/JavaFoil%20Users%20Guide.pdf> Accessed 14 Jul 2017
- Holthuijsen LH (2007) *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, Cambridge, 404 p
- Ko JH, Park HC (2015) BemBo-Theory Manual\_v1.0. KIOST, Ansan, 37 p
- Lee JH, Park S, Kim DH, Rhee SH, Kim MC (2012) Computational methods for performance analysis of horizontal axis tidal stream turbines. *Appl Energ* **98**:512-523
- McWilliam MK, Barlas TK, Madsen HA, Zahle F (2018) Aero-elastic wind turbine design with active flaps for AEP maximization. *Wind Energy Sci* **3**:231-241
- Oltmann NC, Sobotta D, Hoffmann A (2017) Load reduction of wind turbines using trailing edge flaps. In: 4th International conference on energy and environment research, ICEER 2017, Porto, 17-20 Jul 2017, pp 176-181
- Tatum SC, Frost CH, Allmark M, O'Doherty DM, Mason-Jones A, Prickett PW (2016) Wave-current interaction effects on tidal stream turbine performance and loading characteristics. *Int J Mar Energy* **14**:161-179
- Tully S (2016) Ignazio maria viola. Reducing the wave induced loading of tidal turbine blades through the use of a flexible blade. In: 16th International symposium on transport phenomena and dynamics of rotating machinery, ISROMAC 2016, Honolulu, 10-15 Apr 2016
- Virtuani L (2015) Xfoil for matlab. <https://kr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50070-xfoil-for-matlab> Accessed 17 Mar 2015

## Author's Information

### Dasom Jeong

Ph.D. Student, Jeju National University

### Jin Hwan Ko

Professor, Jeju National University

*Received Jul. 13, 2020*

*Revised Sep. 15, 2020*

*Accepted Sep. 25, 2020*



### Appendix. Nomenclature

A	Rotor section area, 로터 회전 단면적
a	Axial flow induction factor, 축 흐름 유도 계수
a'	Tangential flow induction factor, 접선 흐름 유도 계수
B	Number of blade, 블레이드 개수
c	Blade chord, 코드
$C_D$	Drag coefficient, 항력계수
$C_L$	Lift coefficient, 양력계수
$C_M$	Moment coefficient, 모멘트 계수
$C_{Mf}$	Flap moment coefficient, 플랩 모멘트 계수
$C_{Mfref}$	Center of flap axis, 플랩의 회전 중심
$C_{Mref}$	Center of moment axis, 모멘트의 중심
$C_p$	Power coefficient, 출력계수
D	Drag, 항력
L	Lift, 양력
$M_f$	Flap moment [ N·m ], 플랩 모멘트
N	Number of blade element, 블레이드 요소 개수
$U_0$	Free stream velocity, 자유 흐름 속도
R	Turbine radius, 터빈 반지름
r	Distance of local blade element, 로터 중심과 블레이드 요소 중심 간 거리
$R_h$	Hub radius, 허브 반지름
TSR	Tip speed ratio, 팁 속도 비
$\Omega$	Rotational speed, 회전 속도
W	Resultant velocity on rotating blade = $\sqrt{(U_0^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+a')^2)}$
$\rho$	Density, 밀도