

## 조류발전용 수직축 터빈의 방수로 설치에 따른 성능에 관한 연구

이정기 · 현범수<sup>†</sup>

한국해양대학교 조선해양시스템공학부

# Study on Performance of Vertical-axis Tidal Turbines Applied to the Discharged Channel of Power Plant

Jeong-Ki Lee and Beom-Soo Hyun<sup>†</sup>

Div. of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

### 요 약

국내 연안에 위치해 있는 화력 및 원자력 발전소는 발전시설 냉각을 위해 해수를 사용한다. 입구를 통해 배출되는 온배수는 유량이 상당하여 입구 근처에 큰 운동에너지가 존재한다. 이러한 제한된 입구에서 빠른 흐름이 존재하는 제트류 영역에 설치된 수직축 터빈의 성능을 수치적으로 조사하였다. 제트류 영역에서 입구와 터빈간 거리, 입구 직경과 수직축 터빈의 직경에 따른 성능 변화를 TSR=3.0에서 조사하였다. 또한, 입구가 1개인 경우와 2개인 경우에 대해 직경이 다른 터빈을 배치하여 성능 및 발전량을 비교하였다. 입구가 1개인 경우 입구로부터 터빈과의 거리가 증가함에 따라 터빈 효율이 감소함을 알 수 있었고, 터빈 직경과 입구 직경이 동일할 때 효율이 가장 좋은 것을 알 수 있었다. 입구가 2개인 경우는 효율 및 총 발전량을 고려하여 입구와 동일한 크기의 터빈을 각각 배치하는 것이 좋은 것을 확인하였다. 본 연구는 방수로 입구 전방에 설치된 수직축 터빈을 개념적으로 설계하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** – Thermal and nuclear power plants on shore commonly use the sea water for cooling facility. Discharged cooling water has the high kinematic energy potential due to amount of water flux. Numerical analysis was made to find the suitable combinations between the arrangement of tidal turbines and the overall dimensions of the discharged channel. Several parameters such as the turbine diameter to inlet size, and the axial distance to turbine size were investigated. Power coefficients for various test conditions were also compared to see the effect of inlet configurations such as single inlet and dual inlet. For the single inlet, the mean power coefficient appeared to be gradually decreased with increasing distance, and the maximum power was obtained when the turbine diameter was same as the inlet diameter. For the dual inlet, the tendency was similar so that the better result when the turbine diameter was same as the inlet diameter. It is expected that the present methodology can be extensively utilized to harness the high kinetic energy flow of the discharge channel of power plant.

**Keywords:** Power plant(발전소), Discharged cooling water(방출수), Axisymmetric jet flow(축대칭 제트류), Vertical-axis turbine(수직축 터빈), Multi-arrayed turbine(다배열 터빈)

### 1. 서 론

조류발전은 조류에너지를 이용하여 터빈을 회전시켜 발전하는 방법을 의미한다. 터빈의 대표적인 방식은 흐름에 수평한 수평축 터빈(Horizontal-Axis Turbine; HAT)과 수직한 수직축 터빈(Vertical-Axis Turbine; VAT)이 있고, Hyun *et al.*[2012]에 따르면 통상 수평축 터빈 방식은 1 MW급 이상의 대용량, 수직축 터빈 방식은

300 kW이하의 작은 용량에 주로 적용되며, 2 m/s이상인 해역에 설치하는 것이 적합하다.

한편, ‘신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법’이 시행됨에 따라 대용량 발전사업자를 대상으로 총 생산전력의 일정 부분을 신·재생에너지를 이용하여 발전하도록 하고 요구수준에 미치지 못한 부족분에 대해 과징금을 부과하는 신재생에너지 의무비율 할당제(Renewable Portfolio Standard; RPS)가 적용되고 있다. 이에 따라 500MW이상 발전설비를 운용하는 발전사업자는 신·재생에너지를 이용한 발전설비를 갖추어야 하므로 태양광, 풍력,

<sup>†</sup>Corresponding author: bshyun@kmou.ac.kr

조류, 온도차, 소수력 등의 다양한 에너지를 이용한 발전시스템을 가동하거나 구축하고 있다. 이와 더불어 총 전력생산량에서 신·재생에너지 발전의 의무량을 달성하고 그 비율을 높이기 위해서는 신·재생에너지를 이용한 발전 설비를 갖추어야 하는 실정이다. 특히, 막대한 양의 냉각수를 공급받아야 하는 발전시설들은 신·재생에너지원의 개발 측면에서 주변 해양에너지 자원을 적극 검토할 필요가 있다(Song *et al.*[2014]). 이러한 관점에서 볼 때, 발전시설에서 냉각을 위해 사용한 후 배출되는 상당한 양의 온배수(평균 50 ton/s)가 일정한 입구에서 배출되어 수로를 따라 흐르는 경우 그것이 운동에너지 형태로 바뀌어 존재할 것임을 짐작할 수 있다. 또한 이러한 온배수는 온전히 버려지게 되므로 이를 회수하기 위해 신·재생에너지를 이용한 발전시스템을 적용해 볼 수 있고, 이러한 사례로 삼천포 화력발전소와 하동화력발전소가 있다. 삼천포 화력발전소의 경우 2008년에 20 kW급 수평축 터빈을 배수로에 설치하여 시험가동한 바 있고, 하동화력발전소의 경우 35 kW급 헬리컬(Helical) 터빈시스템을 설치하여 가동한 바 있다. 관련된 연구로 수치해석을 이용하여 터빈 설치로 인한 발전소 배수로 계통 영향에 대해 연구한 바가 있고, 수치해석시 터빈 대신 다공매질(Porous medium)을 적용하였으며, 터빈의 위치나 배치에 따른 성능 변화는 연구하지 않았다(Kim and Kang[2008]). 또한, Song *et al.*[2014]은 온배수 운동에너지의 부존량을 이론적으로 산출하고 배수로 전방에 수직축 터빈을 개념설계하여 설치하는 방법을 제안함과 더불어 그에 따른 발전량을 예측한 바 있다. 이러한 연구사례들을 바탕으로 배수로 없이 수중 배수구를 통해 바다로 직접 배출되는 경우 배수로 전방에 작은 용량에 적합한 수직축 터빈시스템을 설치하는 흐름식 발전을 적용하여 그 성능 및 특성을 비교하는 것은 매우 흥미롭다고 하겠다.

전술한 바와 같이 사각단면 형태의 배수구를 통해 배출되는 온배수의 상당한 유량으로 인해 그 구간에서의 유속분포는 제트류와 유사하다. 이와 관련된 연구는 1900년대부터 꾸준히 수행되었고, 주로 실험을 통해 입구로부터 배출되는 흐름의 속도 프로파일(Velocity profile), 단면 속도분포, 중심 속도 감소 등을 얻고자 하였다. Kwon and Seo[2005]는 PIV(Particle Image Velocimetry) 실험을 통해 노즐로부터 배출되는 축대칭 제트문제에 대해 레이놀즈수에 따른 속도 분포를 계측하였고, 실험과 이론 결과를 비교하였다. 제트류 전체 영역을 크게 유동형성영역(Zone of flow establishment)

과 유동후류영역(Zone of established flow)으로 구분하였고 유동형성영역에서의 단면 중심속도는 입구근처에서의 속도와 거의 같으며, 유동후류영역에서는 단면 중심속도가 레이놀즈수가 증가함에 따라 입구 근처에서 속도보다 감소함을 밝힌 바 있다. Xu and Antonia [2002]는 압축 노즐과 파이프로부터 형성된 제트류간의 속도 프로파일 차이를 실험을 통해 조사하였는데, 두 흐름의 난류유동구조가 다르고, 파이프 제트류가 노즐 제트류보다 자기보존유동현상이 빠르게 나타남을 확인한 바 있다.

본 연구에서는 발전소에서 사용된 상당한 양의 냉각수가 입구를 통해 배출될 때 입구 전방에 매우 빠른 유속구간이 존재하고 흐름이 진행되면서 유속이 점차 느려지는 제트류(Jet flow) 영역에서 수직축 터빈을 배치하는 흐름식 발전에 대해 연구하고자 하였다. 구체적으로는 제트류 영역에 대하여 제트류의 유동 특성을 파악하고, 그 영역 하에서 터빈 직경, 터빈과 입구간 거리에 따른 터빈 성능을 비교하였으며, 입구 전방에 터빈 배치에 따른 성능 및 발전량을 비교하였다.

## 2. 문제 정식화

### 2.1 대상 영역 및 터빈

Song *et al.*[2014]에 의하면 발전소는 발전시설 냉각을 위해 해수를 사용하고 그 온배수를 방수로나 수중 입구(Inlet)를 통해 배출시키고, 시설 규모에 따라 2개 혹은 4개의 인접한 입구가 존재한다. 배출된 온배수는 약 300 m정도 되는 방수로를 통해 외해로 빠져나가게 되는데, 온배수의 상당한 유량으로 인해 입구 전방에서는 매우 빠른 유속이 존재하고 제트류와 유사한 유동이 형성된다(Fig. 1) 통상 조류발전용 터빈이 작동하는 유동 영역과는 달리 온배수 입구로부터 나오는 제트류 영역에서 작동되는 터빈은 각 날개가 균일하지 않은 유속을 받으며 회전하게 되므로 그에 따른 성능을 파악하여 적절하게 터빈을 배치하는 방법을 조사해 볼 필요가 있다.

제트류 영역 문제를 해결하는데 있어 중요한 것은 입구로부터 형성되는 흐름이 제트류와 유사하고, 속도 프로파일을 가지는 완전 발달된 난류 유동이라는 점으로 이를 수치적으로 잘 해결하기 위해서는 채널이나 파이프와 같은 입구로부터 흘러나오는 유입류를 균일한 유속이 아닌 속도 프로파일 조건을 부여해야 한다는 것이다. 또한, 속도 프로파일을 구성할 때 통상 수직축 터빈의 최소 설

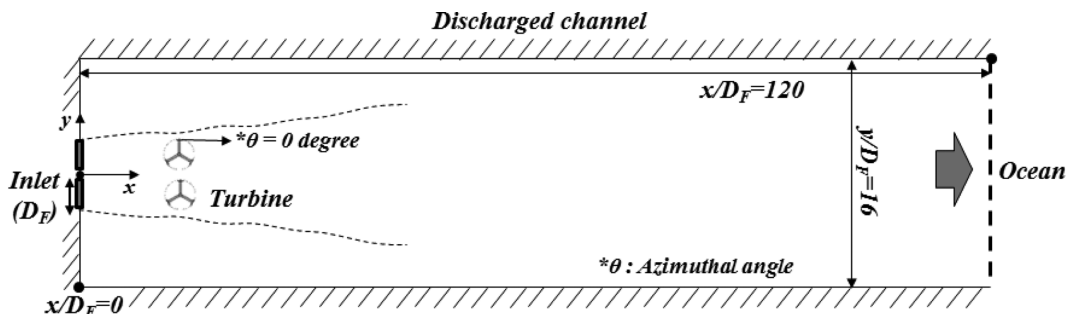


Fig. 1. Schematics of discharged channel with VATs (2-D).

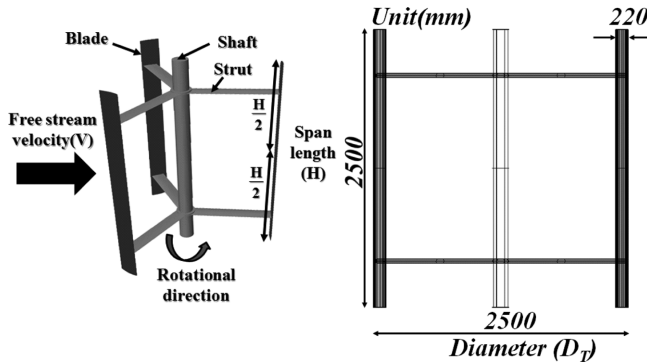


Fig. 2. Vertical-axis turbine selected.

Table 1. Principal particulars of VAT

Designation	Symbol	Values
Diameter (m)	$D_T$	2.5
No. of blade	$Z$	3
Chord length (m)	$c$	0.22
Solidity	$\sigma$	0.085
Span length to diameter ratio	$H/D$	1.0
TSR (Tip speed ratio)	$\lambda$	3.0
Blade section		NACA65 <sub>3</sub> -018

치유속인 2 m/s를 기준으로 유량이 같도록 하였고, 본 연구에서 적용한 조건은 3절에서 구체적으로 기술하였다.

한편, 본 논문에서 다루고자 하는 대상 터빈은 수직축 형식으로 Hyun *et al.*[2012]이 다양한 설계변수에 따른 연구를 통해 가장 성능이 우수하도록 설계한 100 kW급 터빈으로 선정하였다. 다만 통상적인 방식으로 토출구의 크기를 고려하여 터빈의 직경을 토출구 직경( $D_F$ )과 동일하도록 직경과 스펠 길이를 2.5 m로 축소하였다. 터빈의 형상과 주요치수는 Fig. 2 및 Table 1과 같다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 제트류 영역

터빈 수치해석에 앞서 제트류 영역에 대한 수치해석을 수행하였다. Kwon and Seo[2005]의 연구결과에 따르면 압축 노즐을 통해 나오는 제트류는 입구 근처에서는 입구 직경의 중심에서 반경방향에 따라 탑햇(Top hat)의 형상을 띠는 거의 일정한 속도 프로파일을 보인다. 그러나 파이프를 통해 빠져나오는 흐름은 완전 발달된 난류 속도 프로파일에 거의 근접한다(Xu and Antonia[2002]; Fox and McDonald[1994]). 이는 채널이나 파이프의 벽면의 마찰에 기인된 완전 발달된 속도 프로파일을 갖는 흐름이 그대로 빠져나오게 됨에 따라 이러한 영역에서 터빈 성능을 파악하기 위해서는 입구로부터 나오는 유입류가 마땅히 속도 프로파일을 가져야 함을 의미하므로 Xu and Antonia[2002]의 실험 결과를 바탕으로 제트류 영역에 대한 해석 및 검증은 수행하였다.

수치해석은 2차원으로 수행하였고, 유입 속도조건은 1/7th power law profile을 적용하였다. 계산영역의 크기는 상방향으로  $10D_F$  하

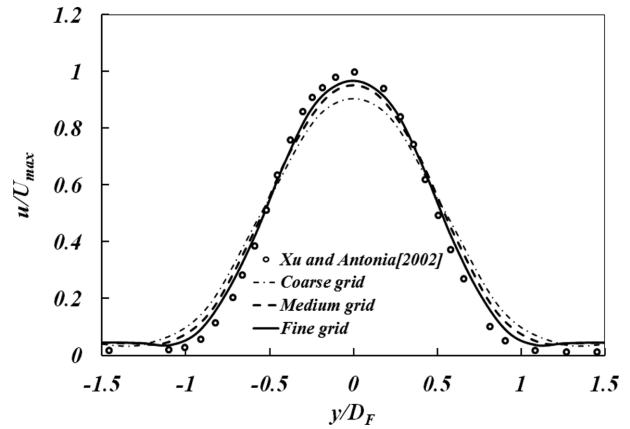


Fig. 3. Velocity profiles at  $x/D_F=3.0$  for grid dependency.

방향으로  $15D_F$  만큼 구성하였다. 유입 및 유출 조건은 Velocity inlet 과 Pressure outlet 조건을 부여하였고, 솔버(Solver)는 범용 소프트웨어인 FLUENT를 이용하였다. 난류모델은  $k-\omega$  SST모델을 사용하였고, 계산은 Xu and Antonia[2002]의 실험과 동일한 조건으로 수행하였다. 또한, 격자의존도(Grid-dependency)를 알아보기 위해 성긴 격자(Coarse grid)로부터 조밀 격자(Fine grid)까지 격자수를 2배씩 증가시켜 결과를 비교하였고, 총 격자수는 성긴 격자는 3,978 개, 중간 격자는 7,840개, 조밀 격자는 15,444개로 구성하였다.

Fig. 3은  $x/D_F=3.0$ 에서의 속도 프로파일을 실험결과와 비교한 것으로 성긴 격자에서 조밀 격자로 갈수록 실험과 잘 일치하는 것을 알 수 있었는데, 격자가 증가함에 따라  $y/D_F=0$ 에서의 속도가 근접하며, -1에서 1까지의 프로파일 폭이 좁아지면서 실험결과에 가까워지는 것을 확인하였다. 이상의 결과로부터 본 연구에서는 중간 격자(Medium grid)를 채택하였다.

격자의존도 평가결과를 바탕으로 입구가 1개인 경우(Case I)와 2개인 경우(Case II)에 대해 2차원 수치해석을 수행하였다(Fig. 4). Case II의 입구 간격은 0.6 m로 하였는데, 이는 월성 원자력 발전소의 배수구 형상을 토대로 하였다. 해석 결과로 입구로부터 거리가 증가함에 따라 각 위치( $x/D_F$ )에서의 속도 프로파일을 비교하였는데, 속도( $u$ )를 입구 중심 속도( $U_{max}$ )로 무차원한 속도비로 나타내었다(Fig. 5). Case I의 경우  $x/D_F$ 가 증가함에 따라 각 위치에서의 중심 속도가 감소하여 입구로부터 16배 떨어진 지점에서는 속도비가 절반으로 감소함을 알 수 있었다. 또한, 초기 입구에서 나오는 유량과 동일한 범위에서의 평균속도는  $x/D_F=1.0$ 에서 1.42 m/s, 2.0에서 1.31 m/s, 4.0에서 1.05 m/s로 조사되었다. 통상 조류발전용 터

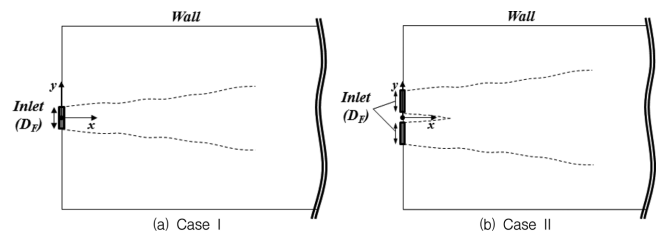


Fig. 4. Inlet conditions.

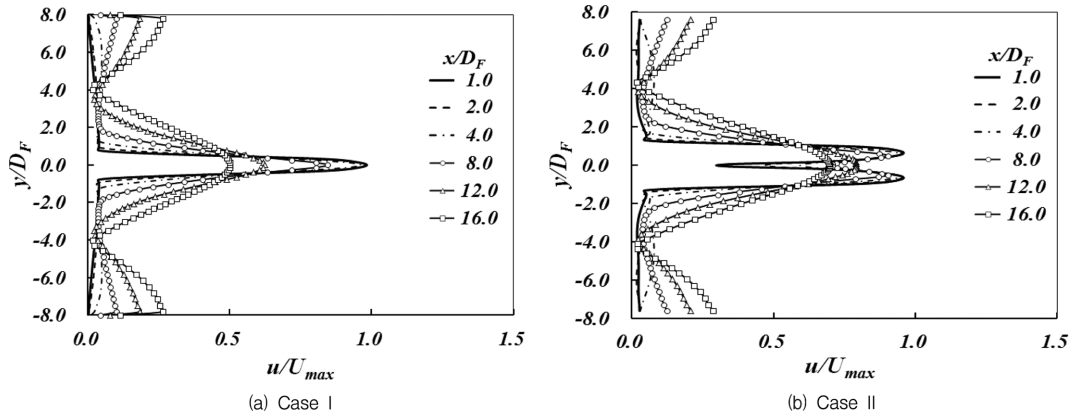


Fig. 5. Comparison of velocity profiles for various  $x/D_F$ 's.

빈 설계시 효율 및 발전량을 고려하여 최소 2 m/s 정도의 유속이 요구되는데,  $x/D_F=4.0$  이후에서는 중심 속도비가 1.0 이하로 감소하고, 평균 속도가 1.0 m/s 이하로 감소할 것이므로 터빈은  $x/D_F=4.0$  범위 내에 배치하는 것이 적절할 것으로 판단된다. Fig. 5(b)는 Case II에 대한 결과로 입구 2개가 인근에 위치함에 따라  $y/D_F=0.0$ 에서 속도가 점점 증가하는 자기보존유동현상이 예측되었고,  $x/D_F=12.0$ 에서는 각 입구의 속도가 하나로 모아지는 것을 확인하였다. 터빈은 입구 중심에서의 속도가 크게 낮아지지 않는  $x/D_F=4.0$  인쪽으로 배치하고, 각 입구의 중심을 기준으로 직경이 다른 터빈을 다배열 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2 수직축 터빈을 포함한 제트류 영역

통상 조류발전터빈은 조류에너지 즉, 터빈으로 유입되는 유속에 따라 성능이 달라지고, 수치해석시 각 터빈 날개는 균일한 유속을 받는다는 조건에서 수행하게 되며, 터빈이 일정한 속도로 회전함에 따라 토크가 발생된다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 제트류 영역에서 구동되는 터빈은 속도 프로파일을 갖는 유입류를 받게 되므로 그에 따른 터빈 성능을 2차원 수치계산을 이용하여 조사하였다. 수치계산은 터빈 직경( $D_T/D_F=0.25, 0.5, 1.0, 2.0$ ), x축 방향의 위치( $x/D_F=1.0, 2.0, 4.0, 7.5$ )에 따른 성능을 비교하였다. 터빈 격자는 제트류 영역 계산시 사용했던 계산영역에 수직축 터빈이 포함된 격자를 사용하였고, 전체 계산영역은 회전영역(Rotating zone)과 비회전영역(Non-rotating zone)으로 구분하였으며, 영역 간에 만나는 경계는 터빈 회전기법인 미끄러짐 격자법(Sliding Mesh Method)을 적용하기 위해 인터페이스(Interface) 조건을 부여하였다(Fig. 6). 터빈의 회전영역 중 날개 주위의 격자는 y+를 1근방으로 두기 위해 정렬격자로 레이어(layer)를 생성하고, 나머지 영역은 비정렬격자로 구성하는 혼합격자(Hybrid mesh)를 사용하였으며, 비회전영역의 경우 모두 정렬격자로 구성하였다. 총 격자수는 약 62,000개로 회전영역 32,000개, 비회전영역 약 30,000개로 구성하였고, 계산조건을 Table 2에 나타내었다. 또한, 끝단속도비(Tip speed ratio; TSR)는 3.0으로 고정하여 계산을 수행하였는데, 이는 터빈 설계 TSR을 바탕으로 결정하였다.

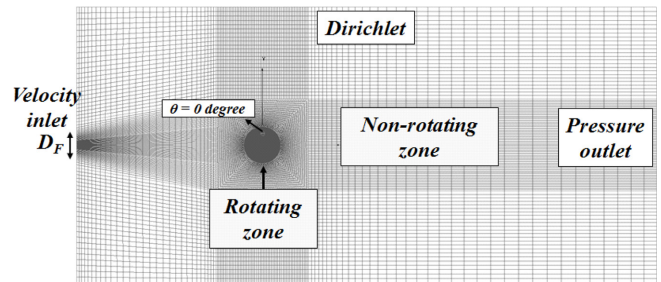


Fig. 6. Grid system in fluid domain with VAT.

Table 2. Test conditions for VAT

	Symbol	
Fluid		Water (single phase flow)
Flow condition		Unsteady (RANS Model)
Turbulence Model		k- $\omega$ SST
Turbine rotating method		Sliding mesh
Inlet velocity (m/s)	U	2
Inlet diameter (m)	$D_F$	2.5
Turbine to inlet diameter ratio	$D_T/D_F$	0.25, 0.5, 1.0, 2.0
Tip speed ratio (TSR)	$\lambda$	3.0
Reynolds number ( $UD_F/\nu$ )	Re	$5.0 \times 10^6$

### 3.3 거리비 영향

거리비의 영향을 알아보기 위해  $D_T/D_F=1.0$ 인 터빈을  $x/D_F=1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.5$ 에서  $TSR=3.0$ 일 때의 성능을 비교하였다. 입구와 터빈간 거리가 증가함에 따라 효율을 나타내는 평균동력계수(Mean power coefficient)와 발전량(Power; P)을 나타내었다(Fig. 7). 평균동력계수는 터빈 날개가 1회전시 얻게 되는 평균 동력과 터빈으로 유입되는 에너지와의 비를 의미한다. 각 지점에서의 효율은 0.301, 0.269, 0.260, 0.227, 0.185의 결과를 얻었는데, 이는 거리가 증가함에 따라 터빈으로 유입되는 평균 속도가 감소하게 됨에 따라 효율이 감소하는 것으로 조사되었다. 또한, 발전량은 7.5, 6.7, 6.49, 5.67, 4.61 kW를 보였는데  $x/D_F=5.0$ 에서는 1.0에 비해 약 25% 정도 감소함을 알 수 있었다. 이러한 차이는 2차원 터빈 날개 1매가 1회전할 때의 동력계수 결과(Fig. 8)에서 알 수 있는데, 거리가 증가함에

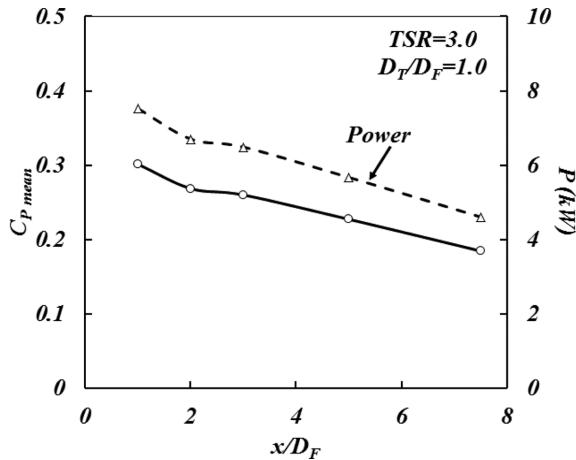


Fig. 7. Mean power coefficient and power with respect to  $x/D_F$ .

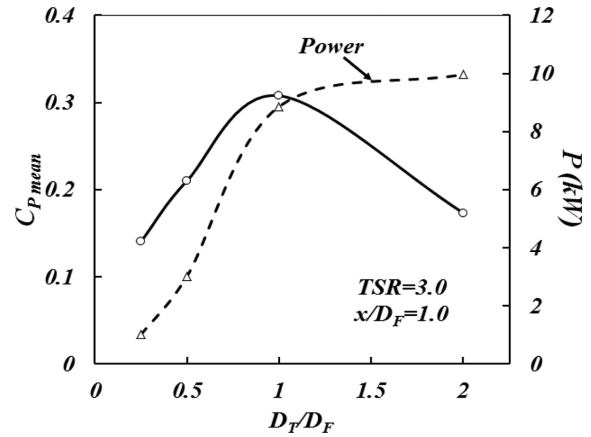


Fig. 9. Mean power coefficient and power with respect to  $D_T/D_F$ .

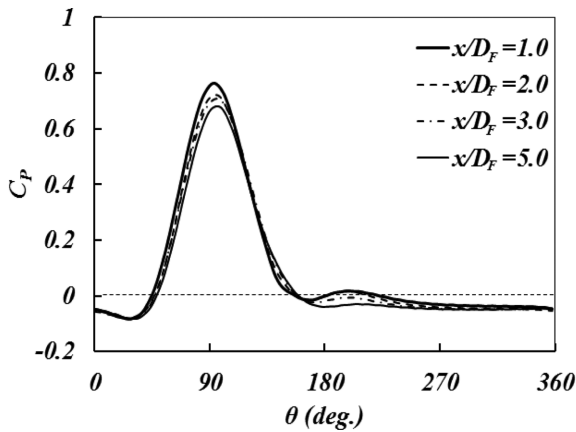


Fig. 8. Power coefficient of single blade for various  $x/D_F$ 's.

따라 동력계수가 낮게 예측되어 평균동력계수가 작게 예측됨을 확인하였다. 특히, 터빈 날개가 회전하면서 받음각을 가장 크게 받는 위상각 90도 근처에서 차이가 가장 현저하게 나타남을 확인하였는데, 터빈 날개가 회전속도는 동일하지만 거리가 멀어지면서 각 위상각에서 유입되는 속도가 작아져 받음각이 감소하게 됨에 따라 토크가 낮아지는 것으로 판단된다.

### 3.4 직경비 영향

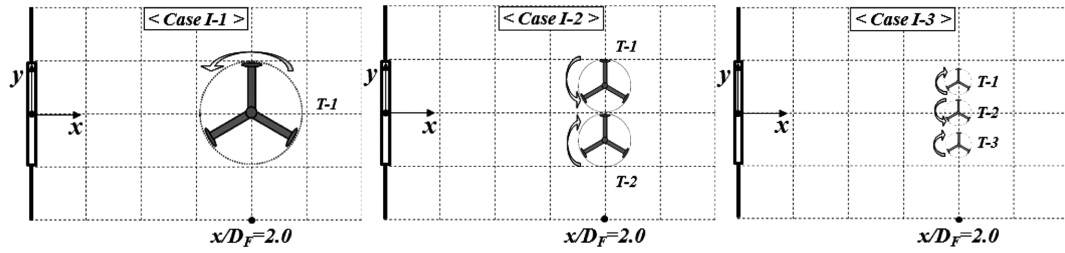
동일한 입구에 터빈의 직경 크기에 따른 직경비( $D_T/D_F$ )에 대한 영향을 알아보기 위해 거리비  $x/D_F=1.0$ 에서  $TSR=3.0$ 일 때의 평균 동력계수 및 발전량을 조사하였다(Fig. 9). 직경비가 0.25, 0.5, 1.0, 2.0까지 증가하므로 동일한  $TSR$ 에서 성능을 알아보기 위해서 직경에 따라 회전속도를 다르게 적용하였는데, 이는 터빈 직경이 두 배 증가하면 회전속도는 절반으로 줄어드는 것을 의미하며, 각 터빈은 반시계 방향으로 회전하도록 하였다. 직경이 증가함에 따라 효율은 각각 0.14, 0.21, 0.30, 0.17의 결과를 보였고, 직경비 0.25, 0.5, 2.0 터빈은 1.0에 비해 약 53%, 30%, 43% 낮게 얻어짐을 확인하였으며, 직경비 2.0 터빈의 효율이 낮아지는 것은 입구 직경보다 2배 크므로 터빈 날개가 입구로부터 형성된 흐름 밖에서 회전

하여 유속을 받지 못하게 됨에 따라 동력계수가 낮게 예측되는 것을 알 수 있었다. 또한, 각 직경비에 대한 발전량은 약 1, 3, 9, 10 kW를 얻을 수 있었는데, 발전량은 직경비 2.0인 터빈이 가장 많이 유리하지만, 효율을 고려하면 입구 직경과 동일한 크기의 터빈을 배치하는 것이 적절하다고 판단된다. 본 결과는 유속 2 m/s에 대한 것으로 원전 토출구에서의 유속이 더 빠르기 때문에 발전량은 더 크게 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

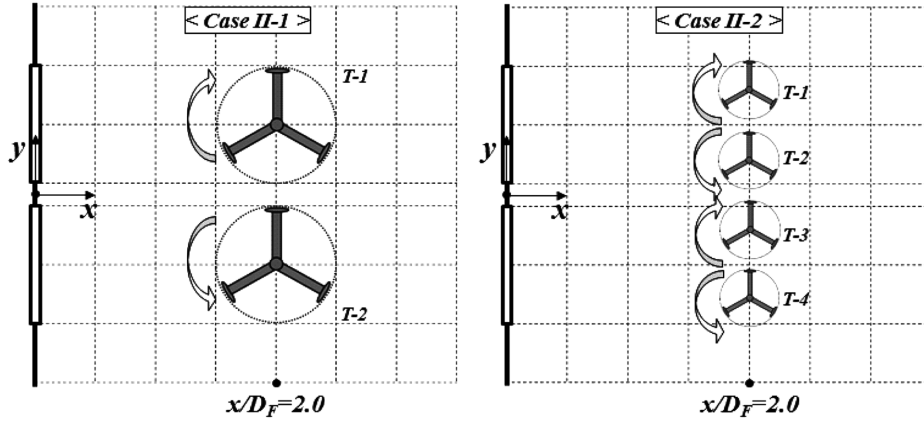
### 3.5 다배열 터빈의 성능

입구가 1, 2개인 경우 월성 원전의 토출구 유량을 토대로 유속 2.95 m/s 조건에서  $x/D_F=2.0$ 에 터빈을 1~4기까지 설치하는 것으로 하여 총 다섯 가지 경우로 나누어 성능 및 발전량을 비교해보고자 하였다. 입구 1개에 대해서는  $x/D_F=2.0$ 에  $D_T/D_F=1.0$ 인 터빈을 1기 설치할 경우(Case I-1)와  $x/D_F=2.0$ 에  $D_T/D_F=0.5$ 인 터빈 2기를  $0.2D_F$  간격으로 설치할 경우(Case I-2)와  $D_T/D_F=0.25$ 인 터빈 3기를  $0.1D_F$  간격으로 설치할 경우(Case I-3)로 나누었다. 입구 2개에 대해서는  $x/D_F=2.0$ 에  $D_T/D_F=1.0$ 인 터빈 2기를  $0.4D_F$  간격으로 설치할 경우(Case II-1)와  $D_T/D_F=0.5$ 인 터빈 4기를  $0.2D_F$  간격으로 설치할 경우(Case II-2)로 나누었으며, 각 case의 터빈 배치 및 회전방향, 터빈 번호를 Fig. 10에 나타내었다.

각 case에 대해 터빈의 평균동력계수와 발전량을 나타내었다(Fig. 11,12). Case I의 평균동력계수를 비교해보면 I-2의 T-1 효율은 I-1의 T-1에 비해 약 42% 감소함을 알 수 있었고, I-3의 T-2는 약 62% 감소함을 알 수 있었다. I-3의 경우 T-2, T-1, T-3 순으로 효율이 좋은 것을 확인하였다. T-1과 3은 T-2를 기준으로 유속이 동일하게 유입되는 위치에 있음에도 불구하고 효율이 상이함을 알 수 있었는데, T-1과 3은 T-2가 회전하는 방향(반시계방향)을 기준으로 서로 반대 방향으로 회전함에 따른 것이라 판단된다. 이러한 인접한 두 터빈의 성능에 대해 Li and Calisal[2010]이 실험 및 수치해석적 연구를 수행하였는데, 터빈이 인접하는 경우 터빈의 회전방향,  $TSR$ , 터빈간 거리에 따라 성능이 달라지고, 각 터빈의 효율이 단독터빈에 비해 20%정도 증가한다는 결과를 얻은 바 있다. 또한, 두 터빈이 동일한

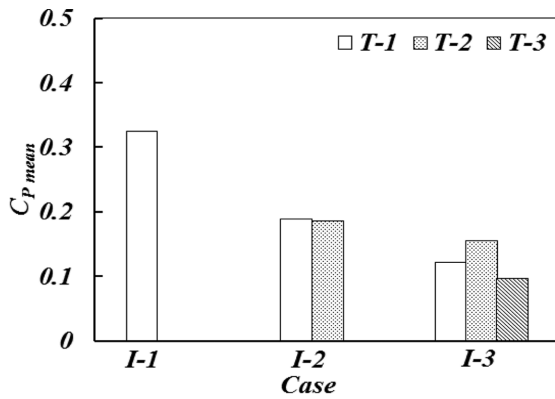


(a) Case I (w/ turbine)

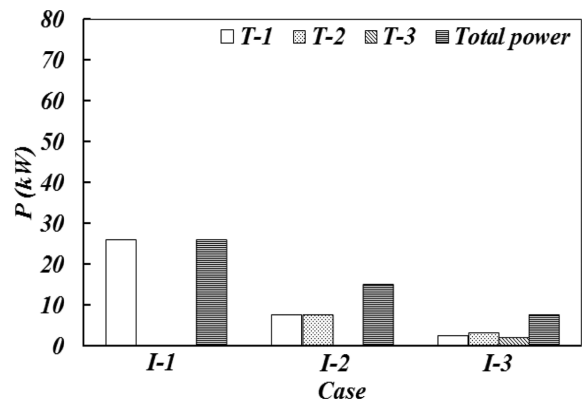


(b) Case II (w/ turbine)

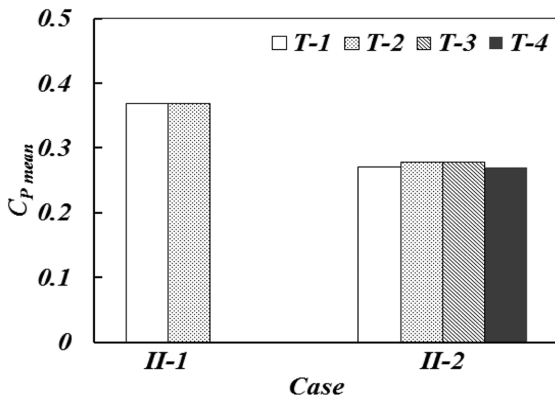
Fig. 10. Layout of turbine for case I and II.



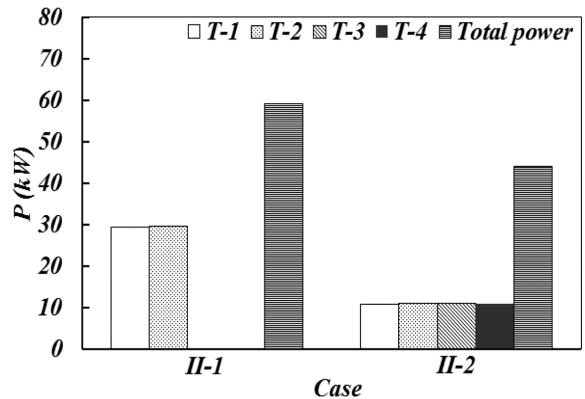
(a) Mean power coefficient for case I (w/ turbine)



(a) Power for case I (w/ turbine)



(b) Mean power coefficient for case II (w/ turbine)



(b) Power for case II (w/ turbine)

Fig. 11. Comparison of the mean power coefficients for all cases

Fig. 12. Comparison of the produced powers for all cases.

거리에 있을 때 터빈이 반시계-시계방향으로 회전하는 것이 시계-반시계 방향으로 회전하는 것보다 최대 약 10%정도 효율이 더 좋음을 확인한 바 있다. 그러나 I-3에서는 오히려 반대로 T-1이 T-3보다 효율이 약 25%정도 증가함을 확인할 수 있었는데, 이는 T-1은 터빈 날개가 회전할 때 상대적으로 유속이 높은 구간에서 낮은 구간으로 회전하는 반면, T-3은 유속이 낮은 구간에서 높은 구간으로 회전하기 때문인 것으로 판단된다. Case I-1~3의 총 발전량은 각각 26.0, 15.1, 7.5kW를 얻을 수 있었고, 적용된 터빈의 직경 범위 내에서 축적효과를 무시할 수 있다는 전제 하에 입구 직경과 동일한 직경의 터빈을 1기 설치한 Case I-1이 효율 및 발전량 측면에서 가장 유리할 것으로 판단된다. Case II-1의 각 터빈 효율은 I-1에 비해 약 14% 증가함을 알 수 있었는데, 이는 인접한 터빈의 영향으로 인해 효율이 증가한 것으로 판단된다. Case II-2의 T-1, 2와 I-2의 T-1과 T-2는 거의 동일한 유속 조건에서 작동하지만 I-3 결과에서 언급한 바와 같이 회전방향의 영향으로 인해 II-2의 효율이 I-2 대비 약 43% 증가되는 것을 확인하였다. Case II-1~2의 총 발전량은 각각 59, 44 kW를 얻을 수 있었고, Case II의 경우도 Case I과 마찬가지로 입구 직경과 동일한 직경의 터빈을 1기씩 배치하는 것이 더 유리함을 확인하였으며, 한 입구당 유속이 2.95 m/s일 때 약 30 kW 정도의 발전량을 예측할 수 있었다.

#### 4. 결 론

조류발전용 수직축 터빈에 대한 선행 연구결과를 바탕으로 제트류 영역 및 그에 설치된 수직축 터빈의 특성을 파악하기 위해 수치 해석을 수행하였고 다음의 결과들을 도출하였다.

(1) 제트류 영역에서의 흐름을 파악하기 위해 검증 및 수치해석을 수행하였다. 수치해석 검증은 실험결과와 잘 일치함을 확인하였고, 입구 1개인 경우  $x/D_f=4.0$ 부터 중심 속도가 감소하여 16.0에서는 절반으로 감소함을 확인하였다. 2개인 경우는 입구가 인접해 있음에 따라 자기보존유동현상이 예측되었고,  $x/D_f=12.0$ 에서는 입구 1개인 경우의 속도프로파일 형상과 유사해짐을 확인하였으며, 각 경우 터빈은 입구로부터 4배 떨어진 범위 내에 배치하는 것이 적절함을 알 수 있었다.

(2) 수직축 터빈을 포함한 제트류 영역에 대해 입구와 터빈간 거리, 터빈 직경에 따른 효율 및 발전량을 예측하였다. 거리비가 증가함에 따라 효율이 감소함을 확인하였고 이는 거리 증가로 인해 터빈 날개로 유입되는 유속의 차이가 동력계수의 차이에 기인함을 확인하였다. 또한 터빈 직경이 입구 직경과 동일할 때 효율이 가장 좋은 것을 확인하였고, 입구의 2배인 경우 터빈 날개가 입구로부터 형성된 흐름을 벗어나 회전함에 따라 효율이 오히려 낮아짐을 확인하였다.

(3) 입구가 1개와 2개인 경우에 대해 유속 2.95 m/s 조건에서 입구로부터 2배 떨어진 지점에 제트류 영역 내에 직경이 다른 터빈을 배치하여 성능 및 발전량을 예측하였다. 입구가 1개일 때 입구 직경의 0.25배인 터빈 3기, 0.5배인 터빈 2기, 그리고 1.0배인 터빈 1기를 배치한 결과 입구 직경과 동일한 크기의 터빈을 배치하는 것

이 효율 및 발전량 측면에서 가장 유리함을 확인하였고, 0.25배인 터빈 3기의 경우 터빈 회전방향에 따른 효율차이가 존재함을 알 수 있었는데, 시계-반시계 방향으로 회전하는 경우가 반시계-시계방향보다 효율이 더 좋음을 확인하였다. 입구가 2개인 경우 역시 입구 직경과 동일한 크기의 터빈을 각각 배치하는 것이 유리하고 터빈 1기당 약 30 kW 발전량이 예측됨을 확인하였다.

본 연구결과는 제트류 영역에 대해 터빈을 개념 설계하는데 유용할 것으로 기대된다. 향후 제트류 영역에서 구동하는 인접한 두 터빈의 성능 변화를 상세하게 파악하기 위해 터빈간 간격, 터빈 회전방향, TSR에 대한 체계적인 연구가 더 이루어져야 할 것으로 예상된다.

#### 후 기

본 연구는 2014년 한국수력원자력(주)이 지원한 “원전연계형 해양에너지 잠재자원 조사연구”의 일부를 바탕으로 하여 진행된 후속연구로서, 이 자리를 빌어 한국수력원자력과 한국해양환경·에너지학회에 감사드립니다.

#### Nomenclature

$D_T$	= turbine diameter
$D_f$	= inlet diameter
$c$	= chord length
$H$	= span length
$\theta$	= Azimuthal angle
$Z$	= number of blade
$\sigma$	= solidity ( $\sigma = Zc/\pi D_T$ )
$Re$	= Reynolds number
$U$	= free stream velocity
$\omega$	= rotational speed
$TSR$	= tip speed ratio ( $\lambda = R\omega/U$ )
$T$	= torque
$C_p$	= Power coefficient ( $C_p = T\omega/0.5\rho U^3 D_T H$ )
$C_{pmean}$	= Mean power coefficient
$\rho$	= fluid density

#### References

- [1] Fox, R.W. and Mcdolad, A.T., 1994, Introduction to Fluid Mechanics, 4th edn., Wiley.
- [2] Gareth, I.G., 2009, “The hydrodynamic analysis of a vertical axis tidal current turbine”, Thesis for the degree of doctor philosophy, The University of Edinburgh.
- [3] George, N.F., 1963, “Some entrainment properties of a turbulent axi-symmetric jet”, Research report, The Aerophysics Department Mississippi State University.

- [4] Hussein, J.H. et al., 1994, "Velocity measurements in a high-Reynolds-number, momentum-conserving, axisymmetric, turbulent jet", *J. Fluid Mech.*, Vol. 258, 31-75.
- [5] Hyun, B.S. and Lee, J.K., 2013, "Hydrodynamic aspects on three-dimensional effects of vertical-axis tidal stream turbine", *J. of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol.16, No.2, 61-70.
- [6] Hyun, B.S. et al., 2012, "Tidal Stream Energy Research", Final report, Tidal Stream Energy Research Center.
- [7] Jung, D.H. et al., 2004, "Down stream evolution of the most energetic modes in a turbulent axisymmetric jet at high Reynolds number. Part 1. The near-field region", *J. Fluid Mech.*, Vol.514, 173-204.
- [8] Kang, K.S. et al., 2007, "Installation of pilot plant and troubleshooting of horizontally linked helical turbines with unconfined free flow condition in artificial channel", *Proc. of The Korean Society for New and Renewable Energy*, 626-629.
- [9] Kim, J.Y. and Kang, K.S., 2008, "Analysis of impact on the circulating water system due to installation of low-head stream turbine at the discharge channel of the power plant", *Proc. of Korea Water Resources Association*.
- [10] Kwon, S.J. and Seo, I.W., 2005, "Reynolds number effects on the behavior of a non-buoyant round jet", *Experiments in fluids*, Vol. 38, 801-812.
- [11] Li, Y. and Calisal, M.S., 2010, "Modeling of twin-turbine systems with vertical axis tidal current turbines: Part I-Power output", *Ocean Engineering*, Vol.37, 627-637.
- [12] MTIE Notification, 2014, "Guidelines of management and operation manual of the renewable portfolio standard", #2014-30, Ministry of Trade, Industry and Energy (MTIE).
- [13] Song, M.S. et al., 2014, "Study on investigation of potential marine energy associated with nuclear power plant", Final report, The Korean Society for Marine Environment and Energy.
- [14] Walter, T., 1926, "Calculation of turbulent expansion processes", Technical memorandum, National Advisory Committee for Aeronautics.
- [15] Xu, G. and Antonia, R.A., 2002, "Effect of different initial conditions on a turbulent round free jet", *Experiments in Fluids*, Vol.33, 677-683.

---

Received 16 July 2015

Revised 10 September 2015

Accepted 26 October 2015