

인접한 조류발전용 수직축 터빈의 배치방식에 따른 성능 변화

이정기 · 현범수[†]

한국해양대학교 조선해양시스템공학부

Study on Performance Variation According to the Arrangements of Adjacent Vertical-Axis Turbines for Tidal Current Energy Conversion

Jeong-Ki Lee and Beom-Soo Hyun[†]

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

요 약

조류발전단지는 유망한 해역에 터빈을 복수로 다배열하여 발전하는 시스템을 말한다. 이러한 단지는 각 터빈이 최대 효율로 작동하고, 최대 발전량을 얻을 수 있도록 설계되어야 하는데, 이를 위해서는 터빈 사이의 간섭으로 인한 성능 저하가 발생하지 않도록 터빈은 일정 거리를 두고 배치되어야 한다. 수평축 터빈의 경우 EMEC(European Marine Energy Centre)에서 배치거리를 제안하고 있으나, 수직축 터빈은 그러한 규정이 제안된 바 없다. 여러 연구 결과들에 따르면 수직축 터빈이 인접할 경우 성능의 향상까지 도모될 수 있으므로, 그 배치는 수평축 터빈보다 더욱 중요하게 검토될 필요가 있다. 본 논문에서는 수직축 터빈에 대하여 수평축 터빈과 같이 일정 거리를 두고 배치하는 것과 터빈을 인접하도록 배치하는 것과의 차이를 조사하였다. 이를 위해 두 터빈간의 거리와 회전방향을 파라미터로 하여 그에 따른 성능 차이를 수치해석적으로 연구하였고, 그 이유를 파악하고자 하였다. 본 연구를 통하여 가장 적절한 수치해석 영역과 조건을 설정할 수 있었으며, 인접한 두 터빈이 각각 반시계-시계방향으로 회전하는 것이 단독 터빈 2기 대비 약 9.2%의 성능 향상이 예측되었다. 터빈이 대각으로 배치된 경우는 최대 약 5.6%정도 성능이 향상됨을 확인하였다. 본 연구는 수직축 터빈을 이용한 조류발전단지를 설계시 유용한 정보가 될 것으로 기대된다.

Abstract – Tidal farm is a multi-arrayed turbine system for utilizing tidal stream energy. For horizontal-axis turbine(HAT) system, it is recommended that each unit has to be deployed far apart in order to avoid hydrodynamic interference among turbines, as proposed by the European Marine Energy Centre(EMEC). But there is no rule for the arrangement of vertical-axis turbine(VAT) yet. Moreover it has been reported that a proper arrangement of adjacent turbines can enhance the overall efficiency even greater than an arrangement without mutual interference effect. This paper suggests the layout of VATs showing the better performances, which turned out to be quite different from HATs' arrangement. Numerical calculations were performed to investigate the performance variation in terms of the rotational direction as well as the distance between turbines. It has been shown that the best combination of rotational direction and distance between turbines can increase its performance higher about 9.2% than that of two independently operated turbines. It is likely that such improvement is due to the increased velocity between adjacent turbines. For diagonally arranged turbines, the maximum normalized mean power coefficient was obtained to be higher about 5.6% than that of two independent turbines. It is expected that the present results can be utilized for conceptual design of tidal farm to harness the tidal stream energy.

Keywords: Vertical-axis turbine(수직축터빈), Tidal farm(조류발전단지), Multi-arrayed turbine(다배열 터빈), Interaction(상호작용), Rotational direction(회전방향)

[†]Corresponding author: bshyun@kmou.ac.kr

1. 서 론

조류발전은 다양한 해양에너지원 중 조류에너지를 이용하여 발전하는 것으로, 터빈 방식은 수평축 터빈(Horizontal Axis Turbine; HAT)과 수직축 터빈(Vertical Axis Turbine; VAT)이 있으며, 풍력 발전에 이용되는 것과 흡사하다. 이러한 터빈장치를 유속이 좋은 유망해역에 일정 간격을 두고 다배열한 것을 조류발전단지(Tidal farm)라고 하는데, 이러한 단지는 조류발전 뿐만 아니라 파력이나 풍력발전에서도 흔히 볼 수 있다.

단지는 각각의 터빈 장치들을 최대 효율로 작동되도록 배치하고 그에 따라 단지 전체의 최대 발전량을 얻을 수 있도록 하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서는 단지 내 작동하는 각 터빈의 상호간섭에 의한 성능 저하가 발생하지 않도록 적절히 배치하는 것이 중요하다. 해상풍력의 경우 오랜 시간에 걸친 연구와 실험을 통해 단지 터빈시스템 및 단지배치와 관련된 기준을 정립하였다. 그 예로 International Electrotechnical Commission(IEC)에서 정한 국제표준인 IEC-61400 시리즈가 있고, 터빈 배치에 대한 기준으로 난류강도를 고려하여 터빈 폭방향(Lateral direction)으로 터빈 직경의 3배 정도의 간격을 두기를 제안하고 있다. 또한, 조류발전단지와 관련된 배치 기준으로는 수평축 터빈의 경우 터빈간 거리를 종방향으로 터빈 직경의 10배, 폭방향으로 2.5배만큼 배치하기를 제안하고 있다(European Marine Energy Centre report[2009]). 다른 연구자들은 폭방향으로 3~5배, 종방향으로 6~10배 정도의 간격을 두기를 제안하고 있다(Daribi[2011], Kinzel *et al.*[2012]).

이러한 배치기준들은 수평축 터빈에 대한 언급들이며, 수직축 터빈과 관련된 기준은 특별히 제시된 바 없다. 수직축 터빈의 경우 그 작동원리상 수평축 보다 더 큰 상호간섭이 예상되는바, 터빈이 인접하는 경우 터빈간 상호작용으로 인한 성능변화가 유리해 질 수도, 불리해 질 수도 있기 때문에 단독 터빈의 성능에 영향을 주지 않도록 배치하는 수평축 터빈 배치방법과는 근본 개념을 달리해야 한다. 이러한 예로 Daribi[2011]는 직경 1.2 m의 수직축 풍력터빈을 다발로 묶어 배열하는 실험을 수행한 바 있는데, 인접한 두 터빈이 서로 반대로 회전할 경우 5%의 효율이 향상됨을 보고하고 있다. 또한 Li and Calisal[2010]은 조류발전용 수직축 터빈에 대해 예인 수조 실험과 수치해석을 이용하여 그 성능을 연구하였는데, 실험 결과 인접한 두 터빈의 경우가 단독 터빈에 비해 최대 약 10%까지 효율이 증가하였고, 수치해석으로는 최대 25%까지 효율이 증가할

수도 있음을 예측하였다. 이들의 결과는 여타 연구결과들과 비교해 볼 때 지나치게 낙관적인 결과이기는 하지만, 인접한 터빈들을 다발로 묶어서 배치하는 것에 대한 추가연구를 필요성을 강하게 시사해 주고 있다.

본 연구에서는 현재 제안되어 있지 않은 수직축 터빈의 적절한 배치방법을 찾기 위한 연구의 일부로서 수치해석을 이용하여 두 개의 터빈이 인접하게 되는 경우에 대해 터빈 회전방향 및 거리를 주요 변수로 하여 파라메트릭 스터디를 통한 성능변화를 알아보고 그 원인에 대해 조사하고자 하였다.

2. 문제 정식화 및 검증

2.1 대상 영역 및 터빈

수평축 터빈의 일반적인 배치 방법은 터빈간 상호간섭으로 인해 각 터빈의 성능 저하가 없도록 일정 간격을 두고 배치하지만, 수직축 터빈의 경우 인접한 터빈을 설치하였을 때 단독 터빈을 설치하였을 때보다도 더 좋은 성능을 얻을 수 있도록 배치하는 것이 필요하다. Fig. 1은 EMEC에서 제안하고 있는 수평축 터빈 배치방식을 나타낸 것으로 폭방향으로 직경의 2.5배만큼, 종방향으로 10배만큼 간격을 보여준다. 한편 수직축의 경우 터빈이 인접함에 따른 성능의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 2(a)와 같이 각 터빈간 영향이 없도록 충분히 멀리 떨어진 경우와 Fig. 2(b)와 같이 터빈이 인접하는 경우로 나누어 생각해 본다. 전자의 경우에는 터빈간의 간격을 증가시키면서 단독 터빈의 성능과 거의 동일해지는 거리를 구해보고자 하였고, 후자의 경우는 동일한 간격을 둔 상태에서 터빈의 간격과 회전방향에 따른 성능 차이를 알아보고자 하였다. 또한, 회전방향을 고정된 상태에서 인접한 터빈이 대각으로 배치될 경우 성능 차이도 확인해 보았다.

본 논문에서 다루는 대상 터빈은 수직축 형식으로 Hyun *et al.* [2012]이 다양한 설계변수에 따른 연구를 통해 가장 성능이 우수하도록 설계한 수직축 터빈이며, 주요 제원은 Table 1과 같다.

2.2 수치해석 검증

수직축 터빈의 성능을 검증하기 위해 수치계산을 수행하였다. 수직축 터빈은 형상이 단순하여 2차원 수치계산으로도 수 시간 내에 그 성능을 조사할 수 있으나, 터빈 날개(Blade)의 3차원 효과로 인해 실험 결과와 비교할 때 비교적 잘 일치하지 않고, 3차원 수치해

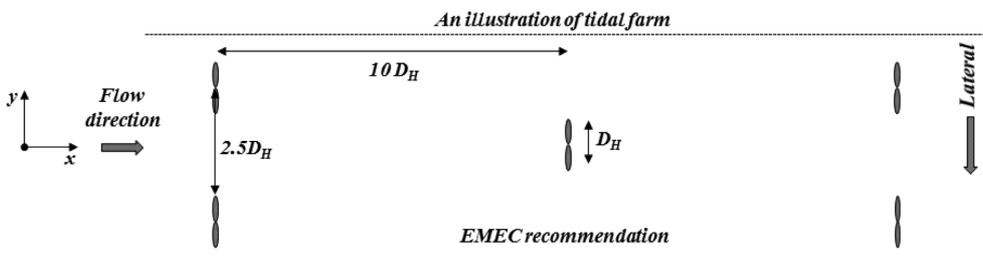


Fig. 1. Illustration of tidal farm : HAT.

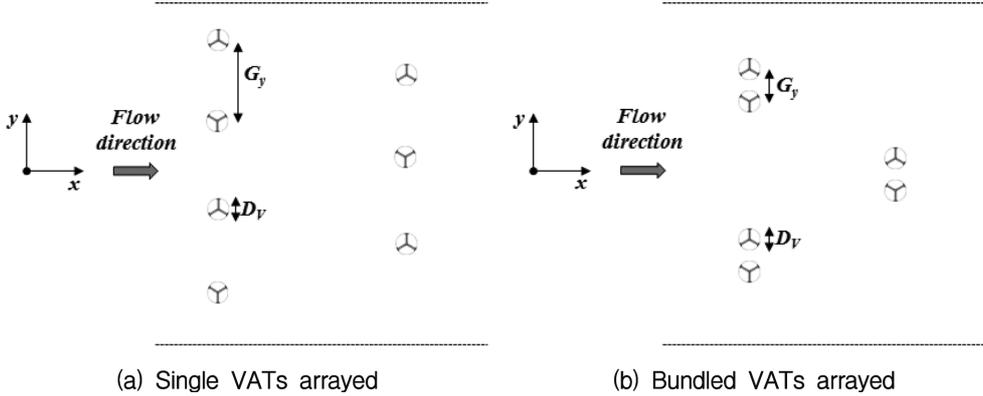


Fig. 2. Illustration of tidal farm : VAT (2-D).

Table 1. Principle particulars of VAT selected

Designation	Symbol	Values
Diameter (m)	D_V	5.0
No. of blade	Z	3
Chord length (m)	c	0.44
Solidity	σ	0.085
Span length to diameter ratio	H/D	1.2
TSR (Tip speed ratio)	λ	3.0
Blade section		NACA65 ₃ -018

석은 2차원에 비해 계산시간이 상당히 소요되는 단점이 있다(Hyun and Lee[2013]). 또한, 수직축 터빈 시스템은 터빈 날개, 중축(Center shaft), 이들을 연결하여 지지하는 구조물인 스트럿(Strut)으로 구성되어 있는데, 통상 성능해석시 격자의 간편함을 위해 축과 스트럿을 제외하고 해석하므로, 이는 실험 결과와의 차이에 대한 또 다른 원인으로 볼 수 있다. 그러므로 비교적 단순한 2차원 계산에 대한 정성적인 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 Rawlings[2005]의 실험 및 수치계산 조건(Table 2)을 바탕으로 하여 일련의 검증과정을 수행하였다.

2차원 수치계산을 위한 계산 영역은 Fig. 3에서와 같이 터빈 전방으로 터빈 직경(D_V)의 10배, 후방으로 15배, 상방으로 10배만큼 구성하였고, 영역은 크게 회전영역(Rotating zone)과 비회전영역(Non-rotating zone)으로 나누어 구성하였으며, 솔버(Solver)는 범

Table 2. Experiment and calculation conditions (Rawlings[2005])

Designation	Symbol	Values
Turbine diameter (m)	D_V	0.91
Number of blade	Z	3
Span length (m)	H	0.6858
Span length to turbine diameter ratio	H/D	0.754
Chord length (m)	c	0.065
Free stream velocity (m/s)	V_∞	1.5 (Constant)
TSR	λ	2.0, 2.25, 2.5, 2.75, 3.0
Rotational speed (rad/s)	ω	6.59, 7.42, 8.24, 9.07, 9.89
Reynolds number	Re	$2.2 \times 10^5 \sim 3.1 \times 10^5$
Blade section		NACA 63 ₄ -021

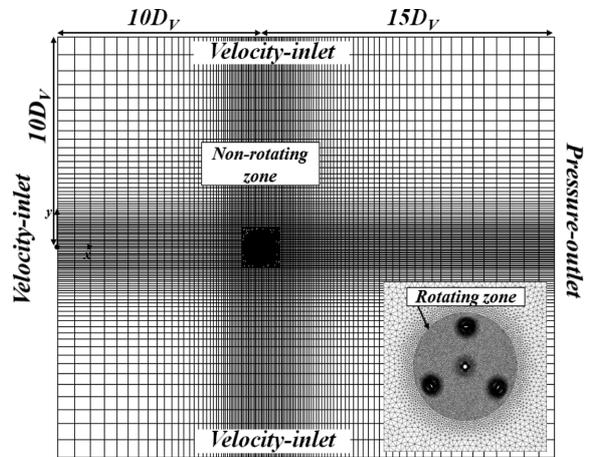


Fig. 3. Grid system with VAT (2-D).

용 해석툴인 FLUENT를 이용하였다. 터빈 회전 기법은 미끄러짐 격자법(Sliding mesh)을 사용하였고, 난류모델은 $k-\omega$ SST 모델을 사용하였으며, 터빈 날개 주위 격자의 y^+ 는 5이하로 구성하였다. Time step의 크기는 Marsh *et al.*[2015]의 결과를 바탕으로 한 time step당 약 1도가 되도록 하였고, 계산조건은 Rawlings[2005]의 조건과 동일하게 적용하였다.

2차원 수치계산 결과를 바탕으로 식 (1)을 이용하여 Rawlings [2005]의 실험결과와 비교하였다. 식 (1)에서 $C_{pmean(2-D)}$ 항은 TSR에 따른 2차원 계산결과를 의미하고, $a_{3-D\ effect}$ 항은 2차원으로 계산된 평균동력계수를 3차원으로 보정해주는 계수를 의미하는데, 이는 Hyun and Lee[2013]의 결과에서 Rawlings[2005] 실험 터빈의 H/D 에 해당하는 값을 이용하였다. 또한, $C_{pmean(strut)}$ 은 Rawlings[2005]의 결과에서 터빈 날개를 제외한 스트럿으로 인해 감소되는 평균동력 계수 결과를 이용하였다.

$$C_{p\ present\ CFD} = C_{p\ mean(2-D)} \times a_{3-D\ effect} + C_{p\ mean(strut)} \quad (1)$$

식 (1)을 이용해 얻은 TSR에 따른 평균동력계수($C_{p\ present\ CFD}$)와 Rawlings[2005]의 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었고, 정성적으로 현재 계산된 결과의 신뢰성을 확보한 것으로 판단된다(Fig. 4).

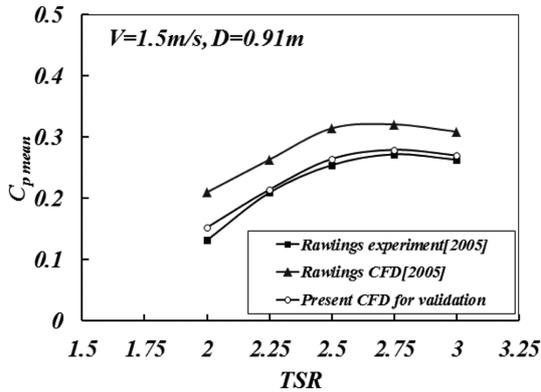


Fig. 4. Validation of present calculation with Rawlings (2005).

3. 해석 결과

3.1 회전방향의 영향

인접한 두 터빈의 회전방향에 따른 영향을 알아보기 위해 TSR=3.0에서 Fig. 5에 나타난 것과 같이 T-1, 2순으로 반시계-시계방향(Counter-rotating inward; CRI), 반시계-반시계방향(Co-rotating; CR), 시계-반시계방향(Counter-rotating outward; CRO)으로 구분하고, 터빈 축간 y축 방향 거리비(G_y/D_v)가 2.0이 되도록 배치하여 성능을 비교하였으며, 계산조건은 Table 3에 나타내었다.

각 case에 대해 각 터빈의 평균동력계수와 합을 Table 4에 나타내었고, 결과에서 보인 것과 같이 CRI인 경우가 가장 효율이 높은 것을 확인하였다. 여기서 $C_{Pn}((C_{PT-1}+C_{PT-2})/2C_{Psingle})$ 은 T-1, 2의 평균동력계수의 합을 단독 터빈 2기의 평균동력계수로 나눈 값을 의미하고, $C_{Pn}=1$ 인 경우 단독 터빈과 평균동력계수가 동일함을 말한다. 각 case는 단독 터빈 2기 대비 CRI, CR, CRO 순으로 약 9.2%, 7.5%, 6.7% 향상됨을 확인하였다. 또한, 회전방향에 따른 동력계수의 변화를 확인하기 위하여 T-1, 2의 날개 1매에 대하여 위상각(Azimuthal angle; θ)에 따른 동력계수를 나타내었다(Fig. 6). 통상 수직축 터빈은 터빈의 중심을 기준으로 상류 방향(Upstream)과 하류 방향(Downstream)에서의 출력이 다르게 나타나는데, 120도 간격으로 위치한 날개가 3매인 터빈의 각 날개는 1회전시 상류방향에서 가

Table 3. Calculation conditions

Designation	Symbol	Values
Each turbine diameter (m)	D_v	5.0
Free stream velocity (m/s)	V_∞	2
Tip speed ratio	λ	3.0
Rotational speed (rad/s)	ω	2.4
Turbulence model		$k-\omega$ SST
Gap ratio of y-axis direction between turbines	G_y/D_v	2.0

Table 4. C_{Pmean} and C_{Pn} as rotational direction ($G_y/D_v=2.0$)

$G_y/D_v=2.0$	C_{Pmean}		Total	C_{Pn}
	T-1	T-2		
Single	0.382	0.382	0.764	-
CRI case	0.417	0.417	0.834	1.092
CR case	0.409	0.412	0.821	1.075
CRO case	0.407	0.408	0.815	1.067

장 큰 출력을 내고, 하류방향에서는 날개의 후류영향으로 인해 출력이 낮게 나타나며, 그에 따라 동력계수는 180도 기준으로 반복하게 된다. 인접한 터빈에 대한 결과에서도 유사하게 T-1, 2의 날개가 상류방향인 위상각 약 120도에 위치했을 때 가장 큰 동력계수의 차이를 확인할 수 있었으며, 이러한 차이는 Fig. 7에 나타난 압력계수 비교 결과에서 120도일 때 CRI인 경우가 압력차이가 가장 큼에 따라 발생한 것임을 확인할 수 있었다.

3.2 터빈 폭방향 거리 영향

터빈간 거리에 따른 성능 변화를 알아보기 위해 TSR=3.0에서 CRI인 경우에 대해 G_y/D_v 를 2.0~15.0까지 변화해가며 평균동력계수를 확인하였고 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 최초 $G_y/D_v=2.0$ 에서부터 거리가 증가함에 따라 효율이 점차 감소하여 12.0 이상에서는 영향이 없어지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 인접한 두 터빈의 거리에 따른 효율 변화는 속도분포 결과에서 그 차이를 알 수 있었는데, Fig. 8은 위상각 120도 일 때 $G_y/D_v=2.0, 4.0, 6.0, 12.0$ 에서 터빈 주위의 속도분포를 나타낸 것으로 거리가 멀어짐에 따라 터빈과 터빈 사이에 흐르는 유속이 증가하는 성분이 없어지는 것을 확인할 수 있었다.

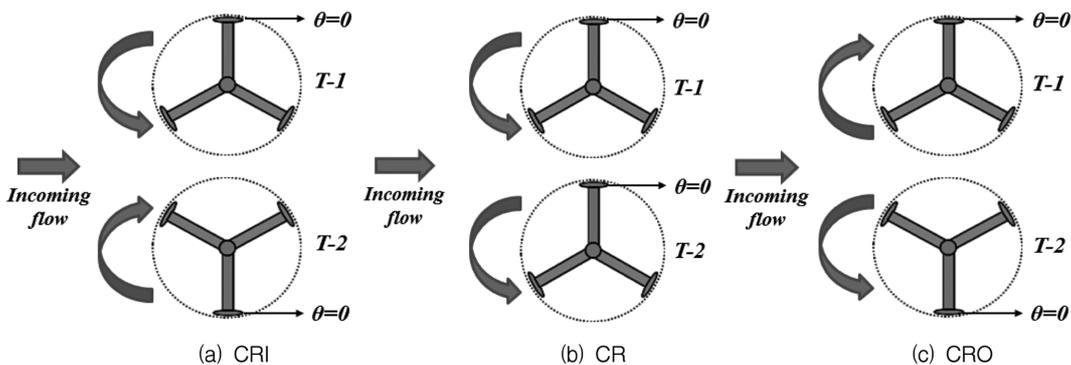


Fig. 5. Schematics for rotational direction of twin turbine.

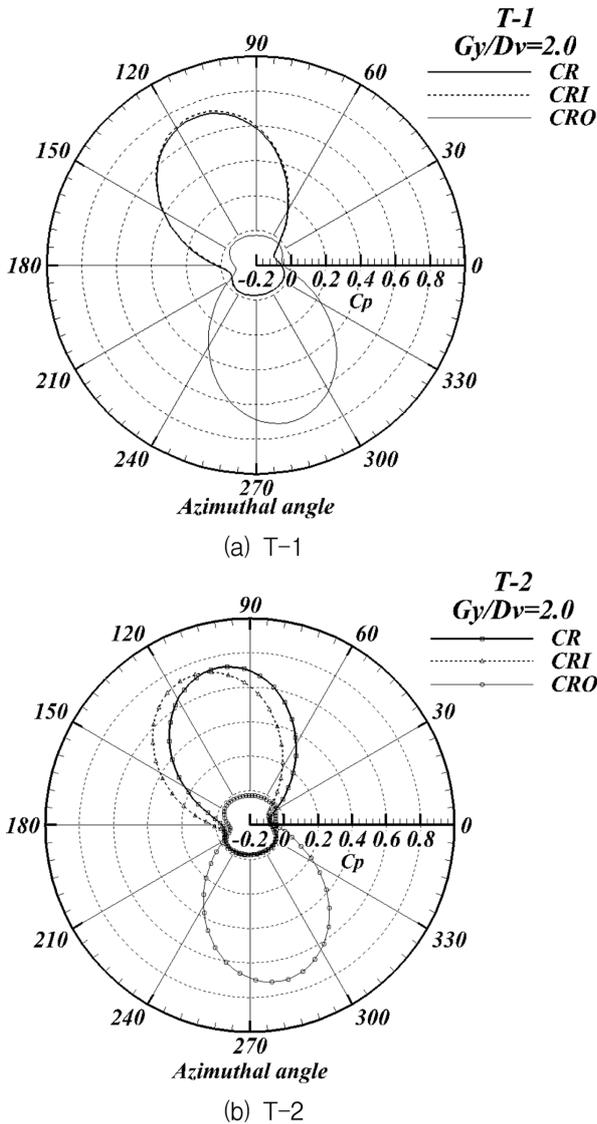


Fig. 6. C_p of single blade with respect to rotational direction ($G_y/D_v=2.0$).

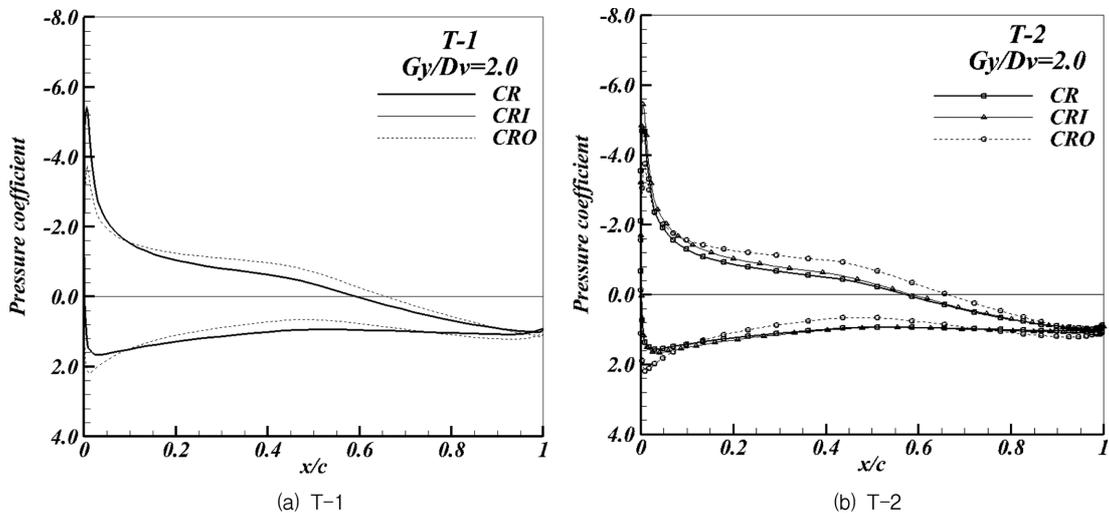


Fig. 7. Pressure distributions on a blade at $\theta=120$ degrees.

Table 5. C_{Pmean} and C_{Pn} with respect to G_y/D_v for CRI

G_y/D_v	C_{Pmean}		Total	C_{Pn}
	T-1	T-2		
2.0	0.417	0.417	0.834	1.092
3.0	0.413	0.413	0.826	1.081
4.0	0.406	0.406	0.812	1.063
6.0	0.398	0.398	0.796	1.042
12.0	0.385	0.385	0.770	1.008
15.0	0.385	0.385	0.770	1.008

CRI의 거리에 따른 성능 결과를 바탕으로 CR과 CRO인 경우에 대해서도 TSR=3.0에서 $G_y/D_v=2.0\sim 6.0$ 에 따른 효율 변화를 알아보았다. CR과 CRO도 동일하게 거리비가 증가함에 따라 효율이 점차 감소함을 확인하였고, 세 가지 경우 중에서는 CRI가 가장 효율이 좋음을 확인하였으며, 전반적으로는 터빈이 인접하게 되는 경우 그 성능은 단독터빈 2기의 성능보다 유리함을 확인하였다(Fig. 9). 또한 거리비 6.0에서는 회전방향과 무관하게 효율이 거의 유사하게 나타남을 확인하였으며, 인접한 두 터빈을 직경의 6배에 해당하는 간격 내에 배치하는 경우 반시계-시계방향으로 회전하도록 배치하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

3.3 터빈 종방향 거리 영향

두 터빈이 폭방향으로 나란히 배치하지 않고 일정 거리를 두고 배치되는 경우에 대해 그 영향을 알아보기 위하여 터빈 회전방향은 CRI를 기준으로 하여 터빈간 x축 방향 거리비(G_x/D_v), y축 방향 거리비를 Fig. 10과 같이 세 가지 경우로 나누어 성능변화를 알아보 고자 하였다.

세 가지 경우에 대하여 전방 터빈(T-1)과 후방 터빈(T-2)의 평균 동력계수를 Table 6에 나타내었다. 후방 터빈의 위치에 따라 전방 터빈의 영향이 있음을 알 수 있었는데, CRI-1은 단독 터빈 2기 대비 약 8% 성능이 감소함을 확인하였고, CRI-2는 3%, CRI-3은

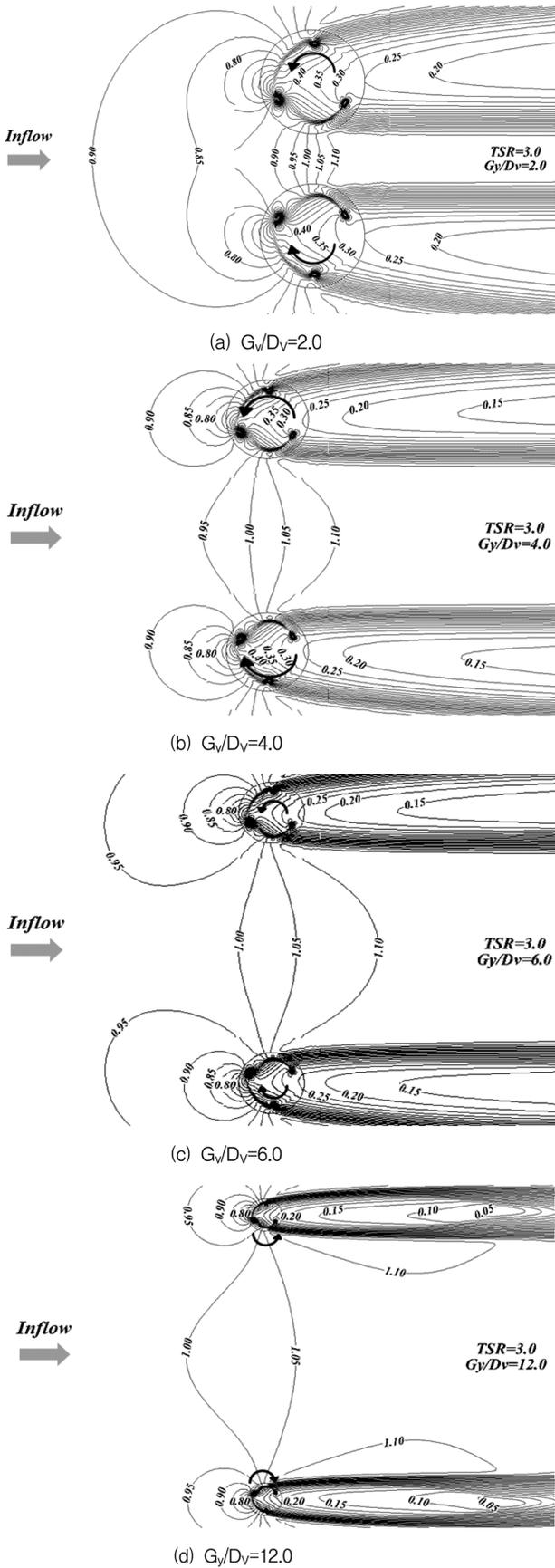


Fig. 8. V/V_∞ contours with respect to G_y/D_v for CRI.

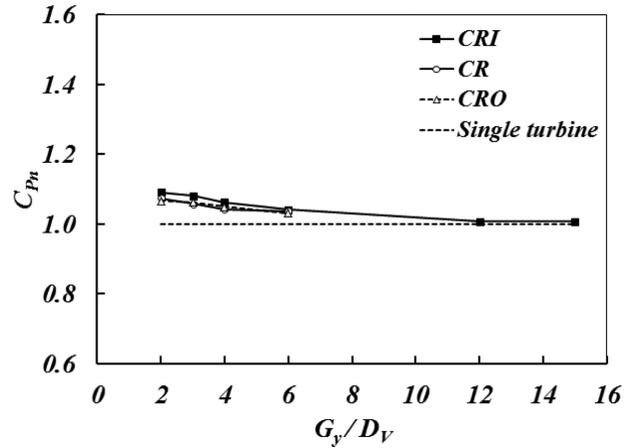


Fig. 9. C_{pn} with respect to G_y/D_v .

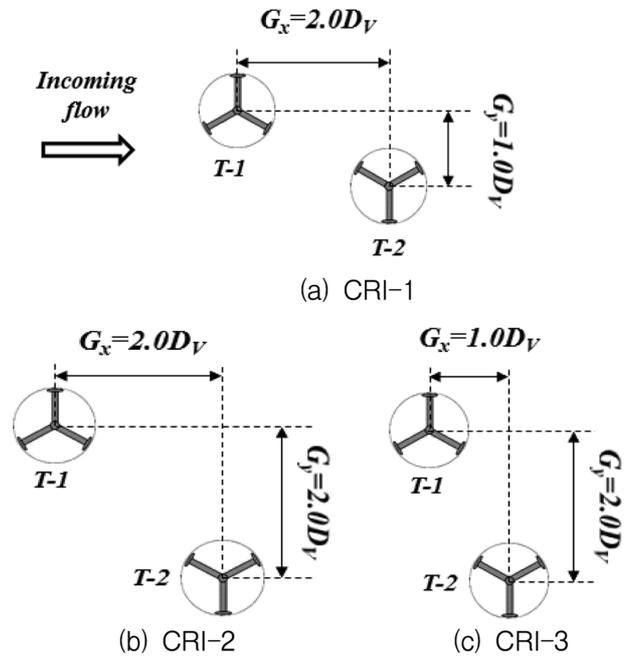


Fig. 10. Schematics for CRI cases as gap ratio.

Table 6. C_{pmean} and C_{pn} for CRI 1, 2, 3

G_y/D_v	C_{pmean}		Total	C_{pn}
	T-1	T-2		
CRI-1	0.317	0.385	0.702	0.919
CRI-2	0.359	0.428	0.787	1.030
CRI-3	0.381	0.426	0.807	1.056

5.6%의 성능이 향상됨을 확인하였다. Fig. 11은 각 경우에 대해 터빈 주위의 속도분포를 나타낸 것인데, CRI-3의 경우 전방 터빈에서 발생한 후류가 후방 터빈에 의해 방해를 받지 않음을 확인할 수 있고, 터빈이 인접함에 따른 속도 증가로 인해 성능이 가장 유리한 것으로 판단된다.

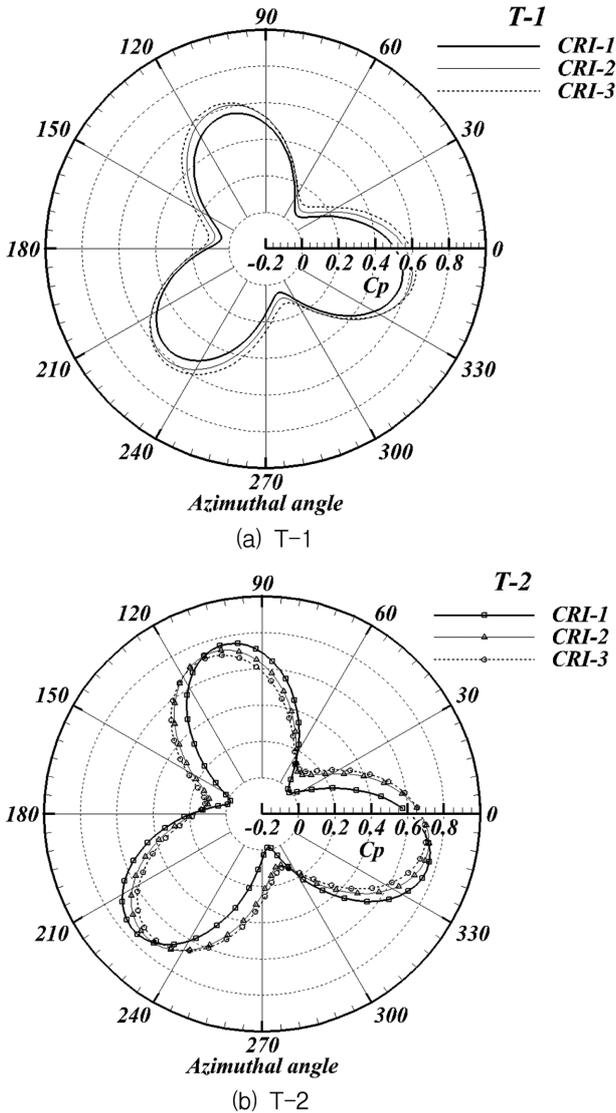


Fig. 11. C_p of three blades for CRI-1, 2, 3.

4. 결 론

본 연구에서는 인접한 두 수직축 터빈의 회전방향과 거리에 따른 성능 변화 및 그 원인을 조사하여 다음의 결과를 도출하였다.

1) 인접한 두 터빈의 회전방향에 따른 영향을 조사하기 위해 각 터빈의 회전을 반시계-시계방향, 반시계-반시계방향, 시계-반시계 방향으로 나누어 수치해석을 수행하였다. 세 경우 중 반시계-시계 방향으로 회전하는 터빈이 가장 효율이 좋은 것을 확인하였고, 단독 터빈 2기 대비 약 9% 정도 성능이 향상됨을 확인하였다. 이러한 차이에 대한 원인을 파악하기 위해 동력계수 차이가 현저히 나타나는 위상각 120도에서의 날개 표면의 압력계수를 비교해본 결과 반시계-시계방향으로 회전하는 경우 압력면과 흡입면의 압력차가 가장 큰 것을 확인하였다.

2) 두 터빈간의 거리에 따른 영향을 알아보기 위해 반시계-시계 방향으로 회전하는 경우에 대해 터빈 축간 거리를 직경의 2~15배

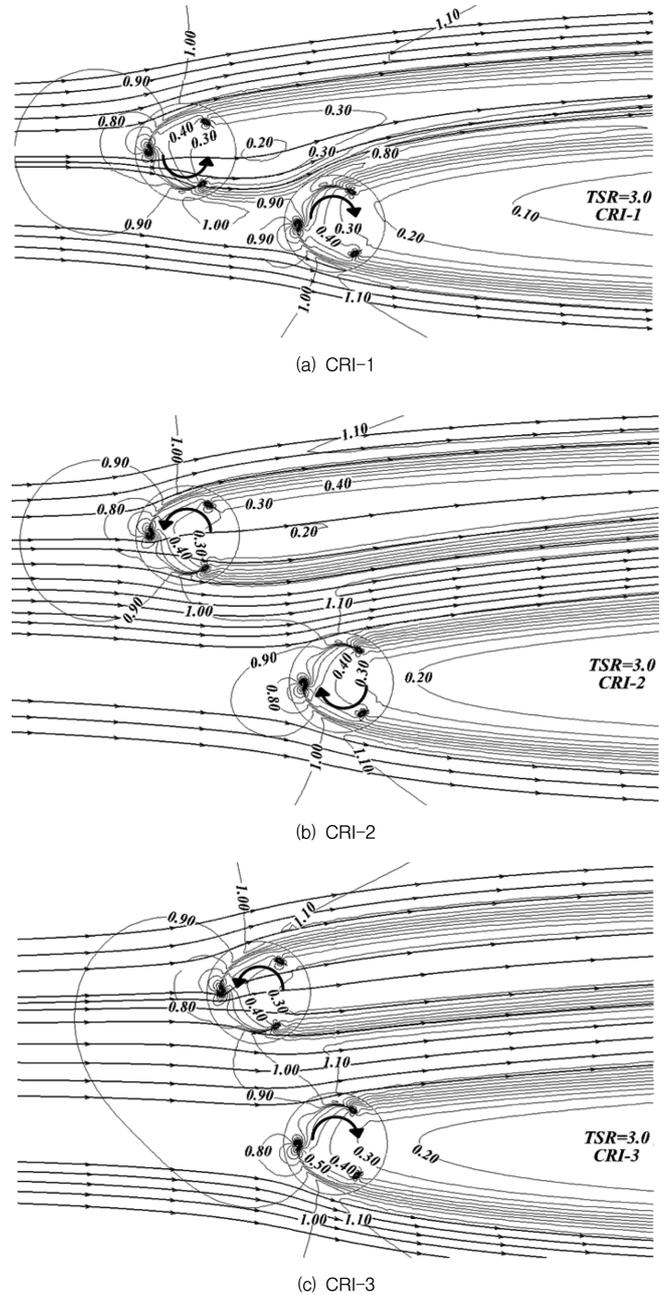


Fig. 12. V/V_∞ contours for CRI-1, 2, 3.

까지 변화시켜 성능변화를 조사하였다. 그 결과 터빈 축간 거리가 직경의 12배 이상 멀어질 경우 인접한 터빈의 영향이 없음을 확인하였으며, 이 때 터빈과 터빈 사이에 흐르는 유속이 증가하는 성분이 없어지는 것을 확인하였다. 또한, 터빈간 거리와 터빈 회전방향에 따른 영향을 알아보기 위해 터빈 축간 거리를 직경의 2~6배까지 증가시키면서 세 가지 회전방향에 따른 성능변화를 조사하였다. 세 가지 회전방향에 대해서 터빈간 거리가 증가함에 따라 성능이 점차 감소함을 확인하였고, 거리가 멀어지더라도 반시계-시계방향으로 회전하는 경우 가장 효율이 좋은 것을 확인하였다.

3) 두 터빈간의 거리가 폭방향으로 나란히 배치되지 않고 일정거

리를 두고 배치되는 경우에 대한 영향을 알아보기 위하여 반시계-시계방향으로 회전하는 터빈에 대해 세 가지로 나누어 성능 변화를 조사하였다. 첫 번째는 전방 터빈을 기준으로 후방 터빈이 종방향으로 터빈 직경의 2배, 폭방향으로 1배 떨어진 경우, 두 번째는 종방향으로 2배, 폭방향으로 2배인 경우, 세 번째는 종방향으로 1배, 폭방향으로 2배인 경우이다. 첫 번째의 경우 전방 터빈으로부터 형성된 후류가 후방 터빈으로 인해 제대로 빠져나가지 못함에 따라 성능이 감소하게 됨을 확인하였고, 세 번째인 경우 전방 터빈이 후방 터빈에 의한 영향이 없어짐에 따라 단독 터빈 2기 대비 약 5.6%의 성능이 향상됨을 확인하였다.

본 연구결과를 통해 수평축 터빈을 이용한 단지배치는 터빈간 간섭으로 인한 성능 저하를 피하기 위해 일정거리를 두어야 하는 반면 수직축 터빈은 터빈이 인접할 때 성능이 향상되는 면이 있으므로, 이를 고려한 배치가 반드시 필요할 것이다. 향후 3기 이상 터빈이 인접한 경우에 대한 추가연구가 진행된다면, 수직축 조류발전 단지 설계에 보다 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

NOMENCLATURE

D_v	= turbine diameter
c	= chord length
H	= span length
θ	= Azimuthal angle
Z	= number of blade
σ	= solidity ($\sigma = Zc/\pi D_v$)
Re	= Reynolds number
V_∞	= free stream velocity
ω	= rotational speed
TSR	= tip speed ratio ($\lambda = R\omega/V_\infty$)
T	= torque
C_p	= Power coefficient ($C_p = T\omega/0.5\rho U^3 D_T H$)
C_{pmean}	= Mean power coefficient
$C_{psingle}$	= Mean power coefficient of single turbine

$$C_{pn} = \text{Normalized } C_{pmean} (C_{pn} = (C_{PT-1} + C_{PT-2})/2C_{psingle})$$

ρ = fluid density

References

- [1] Dabiri, O.J., 2011, "Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays", *J. Renew. Sustain. Energ.*, Vol. 3, 043104.
- [2] EMEC, 2009, "Assessment of Tidal Energy Resource - Marine renewable energy guides", the European Marine Energy Centre (EMEC).
- [3] Hyun, B. S. et al., 2012, "Tidal Stream Energy Research", Final report, Tidal Stream Energy Research Center.
- [4] Hyun, B. S. and Lee, J. K., 2013, "Hydrodynamic aspects on three-dimensional effects of vertical-axis tidal stream turbine", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, Vol. 16, No. 2, 61-70.
- [5] IEC, 2005, "Wind turbines - Part 1: Design requirements (IEC-61400-1)", Committee Draft, International Electrotechnical Commission (IEC).
- [6] Kinzel, M. et al., 2012, "Energy exchanging in an array of vertical-axis wind turbines", *J. Turbulence*, Vol. 13, No. 38, 1-13.
- [7] Li, Y. and Calisal, M.S., 2010, "Modeling of twin-turbine systems with vertical axis tidal current turbines: Part I-Power output", *J. Ocean Eng.*, Vol. 37, 627-637.
- [8] Marsh, P. et al., 2015, "Three-dimensional numerical simulation of straight-bladed vertical axis tidal turbines investigating power output, torque ripple and mounting force", *J. Renew. Energ.*, Vol. 83, 67-77.
- [9] Rawlings, W.G., 2005, "Parametric characterization of an experimental vertical-axis hydro turbine", Thesis for master degree, University of British Columbia.

Received 15 March 2016

Revised 11 April 2016

Accepted 28 April 2016