조류발전 시스템용 쉬라우드의 형상각도별 일정 조류속도장 내 해수유동 특성연구 A Study on Seawater Flow Characteristics inside the Shrouds used in Tidal Current Generation Systems for Various Geometric Angles under Constant Tidal Current Velocity

김종원* · 이상호*

Jong Won Kim* and Sang Ho Lee*

요 지 : 수평축 조류발전 시스템에 사용되는 쉬라우드의 기하학적 형상각도별 해수의 유동장 특성을 전산유체역학을 통해 분석하였다. 쉬라우드를 포함한 전체 유동장 내 해수의 유속 분포는 일정한 조류속도조건에서 쉬라우드의 형상에 따라 크게 영향을 받으며 특히 발전성능에 직접적으로 영향을 미치는 쉬라우드 내 최대유속의 위치 및 크기는 형상 별로 큰 차이가 있다. 실린더와 디퓨저부분의 길이가 같은 실린더-디퓨저 형태의 쉬라우드에서는 실린더 영역에서 비교적 높은 유속분포가 형성되었으며 노즐과 디퓨저부분의 길이가 같은 대칭구조의 노즐-디퓨저에서는 내경이 최소인 지점에서 국부적으로 나타났다. 실린더-디퓨저 쉬라우드에서 조류속도에 비해 높은 유속이 형성되었으며 중심축상의 유속은 노즐-디퓨저와는 다르게 쉬라우드 입구 근처에서 점차 증가하기 시작하여 실린더부분의 중앙부근에서 피크값을 지나 디퓨저에서 급격히 감소한 후 다시 일정한 속도로 유지되어 가는 특성을 나타내었다. 이러한 쉬라우드의 형상과 해수유동장 변화특성에 대한 분석결과는 효율적인 조류발전시스템을 위한 쉬라우드의 최적 설계에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 조류발전시스템, 쉬라우드, 전산유체역학, 유동장특성

Abstract : Numerical analyses through Computational Fluid Dynamics have been performed to investigate the seawater flow field characteristics for various shrouds used in horizontal axis tidal current turbine systems. Seawater flow characteristics are largely influenced under constant tidal current velocity by the shroud geometry and there is considerable difference in fluid velocity distributions around the shrouds. Especially the location and magnitude of maximum seawater flow velocity directly affect turbine performance for power generation. For the cylinder-diffuser type shroud system whose cylinder and diffuser parts have the same length accelerated flow region is formed in the overall cylinder part while maximum velocity in the nozzle-diffuser type whose nozzle and diffuser parts have the same length with symmetry, locally appears near the minimum sectional area. In case of cylinder-diffuser type shroud fluid velocity increases rather high compared with current velocity. And fluid velocity at the centerline gradually increases from the entrance, and then decreases rapidly after reaching a peak close to the middle of the cylinder part unlike the nozzle-diffuser while there is not much variation near the rear of the shroud. These results of the seawater flow characteristics with various shroud geometries can be applied to optimal design for the development of efficient tidal current power generation systems.

Keywords : tidal current generation system, shroud, computational fluid dynamics, flow field characteristics

1. 서 론

최근 신·재생에너지에 대한 연구개발 투자 및 실용화가 활발히 이루어지고 있으며 이들 중 해양에너지는 청정도와 경제성이 높기 때문에 국내외에서 많은 개발이 진행되고 있다. 특히 해수의 유동을 이용한 조류발전은 조석의 주기성으로 인하여 발전량의 예측이 가능하고 계절의 변화에 대한 영향이

크지 않기 때문에 이에 대한 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 조류발전 시스템의 동력원이라고 할 수 있는 해저에 흐르는 조류의 속도는 주변 환경에 따라 많은 영향을 받으므로 이를 적절하게 제어하기 위해 발전시스템의 터빈주위에 쉬라우드가 설치되어 있다. 이러한 조류발전 시스템은 조류의 방향에 작용하는 터빈의 형태에 따라 수평축 터빈(HAT: Horizontal Axis Turbine)과 수직축 터빈(VAT: Vertical Axis

*원광대학교 기계자동차공학부(Corresponding author : Sang Ho Lee, Division of Mechanical and Automotive Engineering, Wonkwang University, 570-749 Ik-san, Cheonbuk, Republic of Korea. lsheagle@wonkwang.ac.kr)

Turbine) 시스템으로 나누어지며 이들 중에 HAT 방식은 주로 터빈 축 방향이 조류와 평행한 조건에 적합한 편이고 대부분 여러 가지 형상의 쉬라우드를 포함하고 있다. 따라서 조류발전의 효율을 증가시키기 위해서는 쉬라우드의 형상에 대한 최적화가 이루어져야 하며 이를 위해 다양한 기하학적 형상별 유동장 특성에 대한 체계적인 분석이 필요하다.

국내외의 연구를 살펴보면 조 등(2009)은 노즐-실린더 형태의 쉬라우드에서 쉬라우드의 해수 유입구의 노즐의 길이 변화에 따른 조류발전 성능특성을 전산해석을 통해 분석하였다. Kirte(2005)는 쉬라우드 내 압력과 유속의 분포가 쉬라우드의 형상과 함께 터빈이 차지하는 공간과 쉬라우드 내부의 체적비율에 의존함을 제시하였으며 Gaden(2007)은 강물의 유동에 의해 작동되는 발전시스템에 대해서 쉬라우드의 기하학적 형상구조에 따른 유체유동의 가속특성에 대하여 분석하였다. 유체의 흐름을 제어하는 쉬라우드는 조류발전뿐만 아니라 풍력발전에도 매우 광범위하게 사용되고 있는데 이에 대한 연구를 살펴보면 Toshiaki et al.(2004)은 풍력터빈에 사용되는 쉬라우드의 형태로 양방향 디퓨저(two-way diffuser)를 개발하였으며 이를 통해 디퓨저의 각도와 외경이 시스템의 발전성능향상에 크게 영향을 미치는 요소임을 보여주었다. Abe et al.(2004)은 소형 풍력터빈(small wind turbine)에 사용되는 플랜지 디퓨저(flanged diffuser)를 통과하는 공기의 속도와 압력 분포 특성에 대한 분석을 통해 디퓨저의 각도에 따른 쉬라우드 내 유속의 영향을 예측하였다. Yuji et al.(2008, 2010)은 풍력터빈에 사용되는 노즐, 실린더, 디퓨저, 그리고 플랜지 디퓨저 등을 포함한 여러 가지 형태의 쉬라우드 내 공기의 유동특성을 비교하였으며 윈드-렌즈형태의 쉬라우드(wind-lens type shroud)에 대해 출력계수($C_o = P/0.5\rho AU_\infty^3$)의 변화특성을 관찰하였다. 여기서 P 는 출력, ρ 는 유체밀도, A 는 터빈날개의 소해 면적, U_∞ 는 대기의 이동속도를 나타낸다. 또한 Toshio et al.(2006)은 풍력터빈에 사용되는 디퓨저형태 쉬라우드의 형상변화에 따른 최대속도의 변화특성에 대한 연구를 수행하였다. 이러한 기존의 연구들은 대부분 특정한 쉬라우드구조에 대한 유속분포변화의 분석에 치우쳐 있으며 일반적인 조류발전 시스템에 사용되는 쉬라우드의 기하학적 형상별 해수의 유동장 특성에 대한 연구는 아직까지 매우 부족한 상태이다. 특히 조류발전용 터빈 주위의 쉬라우드형상과 관련된 기존의 연구에서는 길이와 각도 등의 변수들에 대한 해수유동장의 영향을 주로 분석하였다. 유속의 증감과 직접적으로 관련된 쉬라우드 길이의 영향에 대한 연구는 많이 진행되었으나 이에 비하여 아직까지 쉬라우드 각도를 변수로 한 연구는 상대적으로 매우 부족한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 조류발전에 사용되는 쉬라우드의 기하학적 형상각도의 변화에 따른 유동장 내 해수의 속도분포 특성을 분석하였고 이를 통해 효율적인 쉬라우드시스템 설계에 필요한 기초적인 데이터를 제공하고자 하였다.

2. 수치해석

본 연구에서 분석하고자 하는 조류발전용 쉬라우드 주위에 흐르는 해수의 유동은 정상상태의 난류유동으로 가정하였으며 이와 관련된 유동장의 지배방정식들은 다음과 같다.

(a) 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

(b) 운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \rho g_i \quad (2)$$

(c) 난류운동에너지 및 소산율 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$G_k = \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

난류모델로서 일반적인 표준 k - ε 모델(Launder와 Spalding, 1974)이 사용되었으며 이에 대한 상수는 Table 1에 제시되었다. 여기서 x 는 좌표축상의 거리, ρ 는 유체의 밀도, u 는 축방향의 속도, p 는 압력, g 는 중력가속도, k 는 난류운동에너지, μ_i 는 난류점도, ε 는 난류소산율, 하첨자 i, j, k 는 각각 1, 2, 3으로 x, y, z 방향을 나타낸다. 본 연구에서는 조

Table 1. Constants suggested by Launder and Spalding (1974)

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_ε	σ_k
1.44	1.92	0.09	1.3	1.0

Fig. 1. Shroud geometry.

Fig. 2. 3-D CAD models of cylinder-diffuser and nozzle-diffuser type shrouds.

Table 2. Dimension of cylinder-diffuser type shrouds

Geometry	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	L (m)	D (m)
Cylinder-diffuser	0	$0 < \theta_1 \leq 0.525$	1.5	2

Table 3. Dimension of nozzle-diffuser type shrouds

Geometry	θ_1 (rad) = θ_2 (rad)	L (m)	D (m)
Nozzle-diffuser	$0 < \theta_1 = \theta_2 \leq 0.525$	1.5	2

류발전용으로 실린더와 디퓨저부분의 길이가 같은 실린더-디퓨저와 노즐과 디퓨저부분의 길이가 같은 대칭구조의 노즐-디퓨저 형태의 쉬라우드를 대상으로 하였으며 Fig. 1과 Fig. 2는 각각 쉬라우드의 기하학적 형상과 CAD 모델, 그리고 Table 2~3은 이들에 대한 주요 제원을 나타낸 것이다. 입구 경계조건으로 조류의 이동속도(u_∞)는 기존의 연구(조 등, 2008)를 참고하여 2 m/s로 설정하였으며 해수의 물성치는 온도 17°C 기준으로 일정하게 설정하였다. 지배방정식을 풀기 위해서 유한체적법(Finite Volume Method)을 채택하였으며 일반적인 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)알고리즘과 함께 2차 상류차분법(Second Order Upwind Scheme)을 사용하였다. 본 수치해석에 이용된 프로그램으로 상용 CFD 코드인 Fluent 6.3을 사용하였고 전체 계산 격자수는 약 500,000개로 설정하였다. 이는 해석결과와 계산격자수 의존성과 관련하여 보다 조밀한 약 750,000개와 1,000,000개인 경우들의 해석결과와 비교했을 때 유속 값의 차이는 1% 이내이며 계산시간(CPU time)은

Fig. 3. Simulation domain with mesh generation.

각 격자시스템의 케이스별로 약 4, 6, 8시간 정도가 소요되는 것을 고려한 것이다. Fig. 3은 유동장 전체에 대한 해석 도메인과 이를 구성하고 있는 계산격자를 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 쉬라우드 주변의 해수유동특성

Fig. 4는 쉬라우드각도(θ_2) 0.315 rad인 노즐-디퓨저와 실린더-디퓨저 형태의 쉬라우드에 대해 입구부터의 무차원거리가 $x/l = 0.315$ 인 지점에서 해수의 무차원 속도분포를 비교한 것이다. 여기서 x 와 l 은 각각 입구부터의 중심축거리와 쉬라우드의 전체길이를 나타낸다. 전체적으로 실린더-디퓨저 형태의 쉬라우드 내 유속은 노즐-디퓨저에 비해 높은 편으로 실린더-디퓨저 형태의 쉬라우드 내 단면의 평균 무차원 속도는 약 2.00 정도이고 노즐-디퓨저에서는 약 0.89로서 45%정도의 낮은 유속분포를 보여주고 있으며 특히 중심축에서는 약 2배 정도의 높은 속도차이를 볼 수 있다. 또한 실린더-디퓨저에서는 노즐-디퓨저에 비해 중심축부근에서 반경방향으로 상대

(a) Cylinder-diffuser

(b) Nozzle-diffuser

Fig. 4. Comparison of dimensionless seawater velocity distributions inside the cylinder-diffuser and nozzle-diffuser type shrouds in the section of $x/l = 0.315$ at $\theta_2 = 0.315$ rad.

Fig. 5. Maximum dimensionless velocity variation with shroud angle (θ_2).

적으로 급격한 속도구배를 보여주고 있으며 쉬라우드 벽으로 접근할수록 속도변화가 완만하게 이루어지는 경향을 나타내고 있다. Fig. 5는 θ_2 각도의 변화에 따른 쉬라우드 내 최대유속의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 u_{max} 와 u_∞ 는 각각 쉬라우드 내의 최대 유속과 조류의 속도를 의미한다. 실린더-디퓨저의 경우 최대유속은 0.315 rad까지 쉬라우드의 각도에 따라 전반적으로 증가하고 있으며 노즐-디퓨저에서는 0.105 rad까지 증가한 후 0.210~0.315 rad에서 약간의 부분적인 증가를 제외하고는 대부분 감소하는 경향을 보여주었다. 이와 함께 0.236~0.470 rad에서 실린더-디퓨저의 쉬라우드 내 최대유속이 노즐-디퓨저보다 높은 편이며 특히 0.315 rad 이상에서는 최대유속의 차이가 43%정도까지 현저하게 나타났다. 각 쉬라우드 별로 가장 높은 최대유속은 실린더-디퓨저의 경우 0.315 rad에서 조류속도 대비 약 2.4배 정도이고 노즐-디퓨저는 0.105 rad에서 약 1.8배 정도이며 각 최대유속의 쉬라우드 내 위치는 입구에서부터 각각 $x/l=0.315$ 와 $x/l=0.500$ 인 지점이다.

Fig. 6은 실린더-디퓨저와 노즐-디퓨저 형태의 쉬라우드에

Fig. 6. Dimensionless velocity distributions in the shrouds of cylinder-diffuser and nozzle-diffuser types at shroud angles of 0.315 rad and 0.210 rad.

대한 유동장 내 무차원 해수속도분포를 비교한 것이다. 쉬라우드를 포함한 전체 영역의 속도분포를 살펴보면 실린더-디퓨저에서 쉬라우드 내 속도가 상대적으로 높은 편이고 노즐-디퓨저의 경우 디퓨저 입구부근의 쉬라우드 직경변화가 시작하는 지역에서 유속이 빠른 영역이 국부적으로 좁게 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 쉬라우드 전반부의 유속변화를 살펴보면 실린더-디퓨저에서 실린더부분의 유속변화는 약 $0.40 u_\infty$ 정도, 노즐-디퓨저의 노즐부분에서는 약 $0.26 u_\infty$ 정도에서 쉬라우드 전반부에서 유속증가는 실린더-디퓨저 타입에서 노즐-디퓨저 타입보다 약 1.5배 정도 큰 편이며 디퓨저부분에서는 실린더-디퓨저의 경우 유속이 상대적으로 완만하게 변하는 것을 볼 수 있다. 이와 함께 쉬라우드의 외부에서는 노즐-디퓨저에서 유속이 전체적으로 낮은 편이고 특히 단면적이 최소인 벽부분에서 최저의 속도를 나타내었다.

3.2 속도벡터 및 축 방향 유속 분포 변화

Figs. 7~8은 쉬라우드 벽 부근의 해수 속도벡터를 여러 가

Fig. 7. Velocity vector distributions for various angles in cylinder-diffuser shrouds.

Fig. 8. Velocity vector distributions for various angles in nozzle-diffuser shrouds.

지의 각도 별로 나타낸 것이다. 실린더-디퓨저의 경우 쉬라우드각도 0.210 rad에서 디퓨저의 끝 부근에서부터 시계방향의 와류가 형성되기 시작하여 약 0.420 rad에 이르기까지 그 영역의 크기가 점차 증가하였다. 노즐-디퓨저의 경우는 0.315 rad 이상의 각도조건에서 와류가 형성되었으며 쉬라우드 내부의 단면적이 최소가 되는 부분의 바깥영역에서도 시계방향으로 회전하는 와류가 나타나기 시작하여 각도가 증가할수록 와류의 중심은 점차 위로 이동하여 회전유동영역이 넓어진 것을 볼 수 있다. 이와 함께 두 가지의 형태 모두 0.420 rad 부근에서부터 시계방향으로 회전하는 와류의 바로 밑 부근에 반시계 방향으로 회전하는 추가적인 강한 와류가 형성되어 쉬라우드 내부의

Fig. 9. Comparison of the velocity distributions around various shrouds.

유동에 적지 않은 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 이러한 유동특성은 0.525 rad부근에 이르러 실린더-디퓨저의 경우 와류의 중심이 위쪽으로 약간 이동하여 내부유동에 미치는 영향이 현저히 줄어들었으며 노즐-디퓨저에서는 이와 반대로 중심이 아랫방향으로 이동하였으나 와류의 크기가 비교적 작은 편이고 내부의 유동에도 거의 영향을 미치지 않는 편이다. Fig. 9는 쉬라우드의 각도변화에 따른 주변의 무차원 유속분포를 비교한 것이다. 실린더-디퓨저 형태에서는 0.315 rad까지 각도가 증가할수록 실린더영역의 유속이 증가하게 되고 그 이상의 경우 실린더영역을 포함하여 전체적으로 속도가 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 함께 노즐-디퓨저 형태에서는 각도의 증가에 따라 쉬라우드 입구부근의 유속이 점차 감소하는 경향을 보여주고 있으며 0.420 rad 이상에서는 노즐영역을 지난 후 중심축방향으로 유체의 유동이 가속되는 특성이 나타났다. 특히 두 가지 형태의 쉬라우드 모두에 대해 각도가 증가함에 따라 벽 안쪽부근의 유속이 현저하게 감소하는 현상이 나타났으며 노즐-디퓨저의 경우는 상대적으로 바깥부근에서도 유동의 정체가 부분적으로 이루어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 쉬라우드 내 해수의 축방향에 대한 유속변화를 각 쉬라우드형태의 각도별로 나타낸 것이다. 여기서 u_c 는 쉬라우드 중심축상의 해수속도를 나타낸다. 실린더-디퓨저 형태의 경우 쉬라우드 입구에서부터 축 방향으로 가 점차 증가하기 시작하여 $x/l = 0.25$ 부근에서 피크 값에 도달한 후 급격히 감소하게 되고 출구근처부터는 유속변화가 크게 줄어든 것을 볼 수 있다. 이러한 u_c/u_∞ 의 피크 값은 쉬라우드각도에 따라 크게 영향을 받게 된다. θ_2 각도가 커질수록 그 피크 값은 점차 증가하다가 0.315 rad에서 2.15정도에 도달한 후 다시 감소하는 경향을 보여주고 있다. 특히 0.315 rad에 접근할수록 피크 값은 θ_2 각도에 따라 급격한 변화를 나타내고 있으며 0.105 rad에 비하여 0.315 rad에서 피크 값은 약 54% 정도가 증가하였다. 노즐-디퓨저 형태의 경우 $0 \leq \theta_2 \leq 0.210$ rad에서는 실린더-디퓨저와 유사한 유속변화가 나타나고 있으나

Fig. 10. Dimensionless velocity variation along the centerline of the shrouds.

$\theta_2 \geq 0.315$ rad에서는 쉬라우드 입구에 근접할수록 유속이 감소하면서 입구를 지난 후부터 출구에 이르기까지 유속이 비교적 급격히 증가하여 피크 값에 도달한 후 다시 감소하다가 조류속도정도에서 완만하게 유지되는 경향이 나타나고 있다. 이러한 유속의 피크 값은 $0 \leq \theta_2 \leq 0.210$ rad에서 각도에 따라 점차 증가하였으며 0.105 rad 이하의 조건에서 유속분포의 급격한 변화가 발생하고 있음을 볼 수 있다. 또한 쉬라우드 각도가 0.315 rad 보다 커지면서 입구부근의 최저 유속은 점차 낮아지며 뒤에 나타나는 피크 값의 감소와 함께 위치가 점차 축방향으로 출구부근까지 이동하였다. 이와 같은 쉬라우드각도에 따른 u_c/u_∞ 피크 값의 변화는 실린더-디퓨저에서 상대적으로 크게 나타난 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 조류발전 시스템에 사용되는 쉬라우드 내 해수의 유동특성을 CFD를 이용한 수치해석을 통해 분석하

였다. 이에 대한 연구결과로부터 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

쉬라우드의 형상각도 변화에 따라 해수의 유속 분포는 크게 영향을 받게 되며 발전성능에 직접적으로 영향을 미치는 쉬라우드 내 최대 유속의 위치 및 크기는 일정한 조류속도 (2 m/s)장에서 많은 차이가 있다. 실린더 및 노즐과 디퓨저부분의 길이가 같은 쉬라우드의 경우 실린더-디퓨저 형태에서 노즐-디퓨저보다 유속이 조류속도에 비해 크게 증가한다. 이러한 실린더-디퓨저 형태의 쉬라우드에서는 실린더 내 대부분의 영역에서 높은 속도분포가 형성된 반면 노즐-디퓨저의 경우 내경이 최소인 위치에서 국소적으로 나타난다. 쉬라우드 내 최대 유속은 대체로 쉬라우드 각도에 따라 증가하다가 각 형상별로 일정한 각도 이상이 되면 오히려 감소하게 되며 이러한 변화는 실린더-디퓨저에서 더 크다. 쉬라우드의 각도가 증가할수록 디퓨저 끝 부근에서 나타나는 와류영역의 크기가 점차 넓어지며 회전중심도 쉬라우드 내로 이동한다. 쉬라우드 중심축상의 유속변화는 노즐-디퓨저보다 실린더-디퓨저 형태의 쉬라우드에서 더 큰 편이다.

본 연구를 통하여 단일 조류속도에서 길이와 최소내경이 일정한 쉬라우드의 각도의 변화에 따른 조류발전용 쉬라우드에 대해 터빈의 발전효율을 높이는 데 필요한 해수의 유동장특성에 대한 분석결과를 제시하였다. 이는 쉬라우드시스템의 기초적인 형상설계에 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대되며 향후 조류속도의 변화에 따른 해수 유동장의 영향 및 실험을 통한 비교와 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년 국토해양부의 해양에너지 및 자원이용 기술개발사업에 의해 수행된 연구임.

참고문헌

- 김종원, 최유현, 이상호 (2011). 조류발전 수평축터빈용 쉬라우드의 형상에 따른 유동특성 연구. 2011년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회(한국해양해양 공학회/한국해양학회/대한조선학회/한국해양공학회/한국해양환경공학회)논문집, 2106-2109.
- 조철희, 이강희, 임진영, 채광수 (2009). 유입구 덕트설치에 따른 조류발전 성능 예측. 한국해양환경공학회 2009년도 추계 학술대회논문집, 136-145.
- 조철희, 이영호 (2008). 국내외 해양에너지 기술 현황. 설비저널, 37(10), 14-37.
- 조철희, 임진영, 이강희, 채광수, 노유호, 송승호 (2009). CFD를 이용한 수평축 조류발전 로터성능의 기초연구. 한국신·재생에너지학회논문집, 2009-06-OE-001, 1-6.
- 한상훈, 이광수, 염기대, 박우선, 박진순 (2009). 조류발전용 헬리컬 터빈의 특성치 분석. 한국해안·해양공학회논문집, 21(4), 301-307.

- Abe, K. and Ohya, Y. (2004). An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92, 315-330.
- Bai, L., Spence, R.R.G. and Dudziak, G. (2009). Investigation of influence of array arrangement and spacing on tidal energy converter (TEC) performance using a 27. 3-dimensional CFD model. The 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, 654-660.
- Beller, C. (2007). Layout design for a venturi to encase a wind turbine, integrated in a high rise. Diploma Thesis, Risø National Laboratory Wind Energy Department DK-4000 Roskilde, 1-11.
- Gaden, D.L.F. and Bibeau, E.L. (2010). A numerical investigation into the effect of diffusers on the performance of hydrokinetic turbines using a validated momentum source turbine model. *Renewable Energy*, 35, 1152-1158.
- Gaden, D.L.F. (2007). An investigation of river kinetic turbines: performance enhancements, turbine modeling techniques and an assessment of turbulence models. Master's thesis at the University of Manitoba, 9-70.
- Kirte, B. (2005). Development in ducted water current turbine. Tidal paper, 25-04-06, 3-6. (<http://www.cyberiad.net/tide.htm>)
- Launder, B.E. and Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flow. *Computational Methods in Applied Mechanical Engineering*, 3, 269-289.
- Raj, U.I. and Nair, A.S. (2009). Development of 3D CFD model of a shrouded wind turbine. 10th National Conference on Technological Trends (NCTT09) 6-7 Nov 2009, 114-118.
- Toshiaki, S., Norimasa, S. and Kenji, K. (2004). Development of two-way diffuser for fluid energy conversion system. *Renewable Energy*, 29, 1757-1771.
- Toshio, M., Shinya, T. and Seiichi, M. (2006). Characteristics of a highly efficient propeller type small wind turbine with a diffuser. *Renewable Energy*, 31, 1343-1354.
- Yuji, O. and Takashi, K. (2010). A Shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology. *Energies*, 3, 634-649.
- Yuji, O., Takashi, K., Akira, S., Abe, K. and Masahiro, I. (2008). Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 524-539.

원고접수일: 2011년 9월 27일

수정본채택: 2012년 1월 17일(1차)

2012년 2월 17일(2차)

게재확정일: 2012년 3월 5일