

조류발전용 터빈 주위의 유동 특성에 관한 연구

김부기* · 양창조**†

* 목포해양대학교 실습선, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부

A Study on the Flow Characteristics around Tidal Current Turbine

Bu-Gi Kim* · Chang-Jo Yang**†

* Training Ship, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

** Division of Marine Engineering System, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 세계는 지금 본격적인 에너지·기후시대 도래했으며 녹색성장을 이끌 강력한 에너지 정책이 선진국가 진입의 초석으로 신재생에너지를 활용하여 미래의 에너지 자원으로 동력화하는 것이 21세기 에너지 수요를 충족시키는 개발 목표가 되고 있다. 최근 신재생에너지 개발의 필요성에 따라 해양에너지가 주목을 받고 있다. 해양에너지는 아직 개발되지 않은 가장 유망한 재생 및 청정에너지 자원 중 하나이다. 이에 따라 각 해역에 적합한 조류에너지 변환장치의 개발이 매우 필요하다. 본 연구에서는 조류발전용 터빈에 작용하는 유입각, 해저면 효과 및 공동현상 발생에 따른 효율의 변화를 후류유동특성을 통해 파악하였다. 계산 조건하에서 해저면 효과에 의한 효율저하는 크게 나타나지 않았고, 유입각은 10도 이상부터 효율 저하가 나타났고 45도에서는 출력계수가 7% 낮게 계산되었다. 유입속도가 증가할수록 토크와 출력계수가 증가하였으나, 공동현상이 발생하는 3 m/s 이상부터 오히려 출력저하가 나타났다. 또한 유동특성의 고찰을 통해 유입각이 크고 공동현상이 나타날수록 출력감소의 원인이 됨을 확인하였다.

핵심용어 : 해저면 효과, 공동현상, 해양에너지, 출력계수, 조류발전 터빈

Abstract : All the countries in the world is currently facing the full scale of energy-climate era currently, and making strong energy policy that will lead to green growth of the future energy resources by utilizing renewable energy as the basis of entering the advanced country becomes the goal of development that satisfies the demand for energy in 21st century. Recently, ocean energy attracted the attention along with the necessity of developing renewable energy. Ocean energy is the one of most prominent recyclable and clean resources that has not been developed yet. So, it is highly required to develop good tidal current energy conversion system in coastal area. The inflow angle that acts against tidal current turbine, seabed effect and the change of efficiency along the occurrence of cavitation were investigated through the wake flow characteristics in this study. Power coefficient degradation by seabed effect did not appear in the condition of this calculation. Efficiency degradation appeared from above 10° regarding inflow angle and power coefficient was calculated as lower by 7% at 45°. Torque and power coefficient increased as inflow velocity rose, but power coefficient degradation appeared from above 3m/s when the cavitation happened. So, it was recognized that the larger inflow angle and occurrence of cavitation become the reason for power degradation through the flow characteristics.

Key Words : Seabed effect, Cavitation, Ocean energy, Power coefficient, Tidal current power turbine

1. 서 론

세계 각국은 지금 본격적인 에너지·기후시대 도래 했으며 녹색성장을 이끌 강력한 에너지 정책이 선진국가 진입의 초석이다. 이에 따라 신재생에너지를 활용하여 미래의

에너지 자원으로 동력화하는 것이 21세기 에너지 수요를 충족시키는 개발 목표가 되고 있다.

전 세계 총 에너지소비는 2030년까지 총 40% 증가할 전망이다. 그러나 그렇수록 환경 문제 및 석유 등의 고갈, 지구온난화에 따른 기후변화 및 해수면 상승 등의 문제가 야기되고 있다(Kim et al., 2012b). 이처럼 에너지확보가 산업과 문명의 주도권을 결정함에 따라 우리나라도 녹색기술과 청정에

* First Author : kim60091@mmu.ac.kr, 061-240-7462

† Corresponding Author : cjyang@mmu.ac.kr, 061-240-7228

너지를 통한 저탄소 녹색성장을 국가비전으로 제시하는 등 녹색경제의 흐름에 뒤처지지 않을 정책을 개발하고 있다.

조류발전은 환경오염이 거의 없는 무공해 에너지로서 주목받고 있으며, 우리나라의 서남해안은 세계적으로 보기드문 조류발전의 적지로 손꼽히고 있다(Lee and Yang, 2011). 영국을 비롯한 유럽 선진국은 실해역에서 실증시험을 수행하였고, 우리나라도 실증 및 보급을 위한 조류발전 상용화 실증실험이 진행되고 있다(Hyun et al., 2011).

태양광이나 풍력발전과 달리 조류발전은 날씨의 변화에 관계없이 지속적이고 발전량 예측이 가능하다는 장점이 있으며, 조력발전에 비하여 대규모 방조제를 건설하지 않기 때문에 친환경적이고 해저에 설치할 경우 선박의 운항이 자유롭다. 그러나 조류발전은 바다 속에 터빈을 설치하여 조류의 운동에너지를 이용하여 발전시키는 원리이므로 지역적인 제한과 에너지 변환기술의 한계가 있다. 특히, 수위차에 따른 블레이드에서 발생하는 캐비테이션 발생영역 및 유동현상이 터빈성능에 미치는 영향에 관한 연구에서 “수위가 낮을수록 날개 끝과 전연에서 캐비테이션이 더 발생되어 출력과 효율이 7% 감소한다”고 발표하였다(Nam et al., 2008).

또한, 조류발전기의 성능에 밀접한 관계가 있는 유향 변화에 관한 연구에서는 “해수의 유입각에 따라 실시간 변화하는 조정장치의 필요성을 강조하며 유입각 30°까지는 이론값과 유사한 성능을 보이다 그 이상부터는 유효유량 감소와 비선형적인 와류 발생으로 인해 성능이 크게 저하된다”고 보고하고 있다(Jo et al., 2010).

이와 같이 조류발전용 터빈에 대하여 유입각의 영향과 해저면의 영향, 특히 공동현상에 관한 연구는 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 날개요소 운동량 이론으로 최적 설계한 블레이드를 이용하여 조류발전용 터빈 주위의 유동 특성을 파악하여 출력감소가 작은 최적 설치환경의 조건을 제시하고자 한다.

2. 수치해석 및 설정조건

2.1 날개요소 운동량 이론과 형상 설계

선박용 프로펠러는 엔진동력이 프로펠러에 전달되어 유체를 가속시킴으로써 추력을 발생시킨다. 이때 후류의 유속은 가속되고 유관의 반경은 감소된다. 그러나 조류발전용 터빈의 경우 조류로부터 전달된 에너지가 터빈을 회전시키는데 소비되므로 후류의 유속은 감소되거나 유관의 반경은 증가하게 된다. 따라서 조류발전용 터빈과 선박용 프로펠러를 통과한 유체의 흐름은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

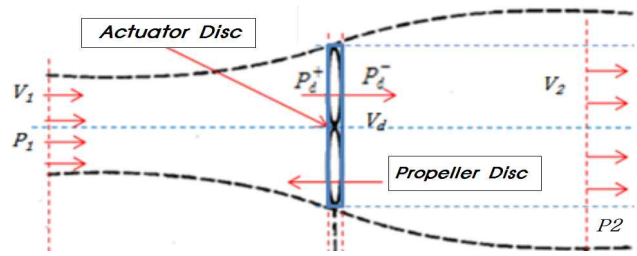


Fig. 1. Actuator disc theory(Tony et al., 2010).

터빈 블레이드를 단순한 디스크로 가정한 운동량 이론과 달리 각속도로 회전하는 조류발전 터빈 블레이드의 형상은 조류발전 전체 효율에 영향이 크므로 최대 효율과 안정적인 운영에 필수적인 블레이드의 설계는 매우 중요하므로 양항비가 최대가 되는 받음각을 구하고 반경방향으로의 피치각을 구한다. 또한 터빈 블레이드의 설계인자로 출력, 날개 길이, 날개 매수 및 날개끝 속도비를 결정한 자료를 바탕으로 최적형상 설계자료를 계산할 수 있다(Yang, 2011).

2.2 격자 생성

최근 전산해석 기술의 발달로 다양한 물리적 변수를 포함한 유체기계의 수치해석 연구가 활발히 진행중이다. 본 연구에서는 상용코드인 ANSYS CFX V-11.0을 이용하여 터빈을 대상으로 유동해석을 수행하였다. 격자의 생성은 블레이드에서 발생하는 토크의 정확한 예측을 위해 블레이드 내·외부로 구성하였으며 두 영역의 경계면은 피라미드 격자로 처리하였다. 블레이드 팁 부분에 프리즘 격자를 집중시켜 주변의 테트라 격자와 밸런스를 유지하였으며, 전체 계산격자 108만 노드 중 약 94%를 로터 블레이드 주위에 구성하였다. 격자계는 테트라-헤드라, 트라이앵글, 펜타곤, 쿼드, 피라미드이고 전체 엘리먼트 수는 약 400만개이다.

경계조건으로 입구, 상부와 하부까지의 거리는 로터 블레이드 직경의 3D, 출구는 7.5D로 설정하였다. 본 해석에 사용된 난류모델은 블레이드 주위에 발달하는 2차 유동에 대해 비교적 정확한 예측이 가능하고 회전체에 수렴성이 좋은 SST 모델을 적용하였고, Table 1에 격자정보를 나타내었다.

Table 1. Mesh statistics

Mesh statistics	
Total number of nodes	1,082,944
Total number of tetrahedra	2,852,881
Total number of pyramids	7,048
Total number of wedges	1,058,980
Total number of elements	3,918,909

2.3 계산 및 설정조건

본 연구에서는 유입각과 공동현상 등이 조류발전용 블레이드에 미치는 요소로 실해역에 설치될 조류발전시스템은 해저상태, 수심, 도서 등의 형태에 따라 이상적인 수평흐름을 방해하므로 이들의 조건이 터빈에서 발생하는 토크와 출력계수에 미치는 영향을 연구하기 위해 유효받음각을 0°~ 60°까지 10°또는 15°간격으로 유입각의 변화를 주어 출력계수를 계산하였다. 조류발전시스템은 선박의 항해 등 해수면을 이용하기에 용이하도록 해저에 설치하는 경우가 많다. 이러한 경우 해저면의 형태에 따라 유향과 유량에 영향을 미칠 수 있는 해저면 효과가 나타나므로 해저면 효과에 따른 터빈의 성능을 분석하였다.

또한, 고속의 유체 흐름이 존재하는 선박의 프로펠러, 펌프의 임펠러, 터빈의 날개 등에서 공동현상이 많이 나타나므로, 조류발전용 터빈 블레이드에서는 어떠한 조건에서 발생되고 그에 따른 효율저하의 정도를 계산해 보았다. 계산에 사용된 컴퓨터는 5대를 병렬로 구성하였으며 20Core CFX 클러스터 시스템으로 CPU 모델은 INTELx64bit, Q9400-2.66GHz, 60GB Quad-core Processor이며 RAM은 8GB, HDD 800GB이다. 조류발전용 터빈의 제원은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Specification of rotor

Parameters	Value
Rated power [kW]	100
Number of blade	3
Rated current vel. [m/s]	2
TSR (Tip speed ratio)	2.0 ~ 7.0
Dia. of blade, D [m]	8

3. 결과 및 고찰

3.1 유입각

자연적인 조류의 흐름을 이용하여 회전에너지를 얻는 조류발전시스템은 조차와 주변 환경에 따라 다양하게 변화한다. 조류발전용 터빈의 성능은 이러한 조류의 유효흐름과 방향, 받음각 등의 영향이 크므로 조류발전시스템의 효율적인 측면에서 유입각에 대한 연구가 선행되어야 한다(Kim et al., 2012a). Fig. 2는 조류발전용 로터의 상류 유입흐름을 도시한 것으로 해저면의 형태나 인근 도서로 인해 유입흐름이 달라질 수 있다. Fig. 3에서는 조류의 방향과 해저면의 형상 등에 따라 조류발전용 로터 블레이드에 유입되는 조류 흐름의 수직성분을 속도분포로 나타내었다. 유입각이 0°인 (a)와 비교해서 (b), (c)와 같이 유향각이 커질수록 유효

흐름이 감소하고 터빈 후방의 유속이 급격히 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 유입각의 영향은 조류발전기의 성능과 밀접한 관계가 있으므로 유입부 덕트의 취부나 능동적인 조향장치를 설치하여 유효흐름의 감소를 최소화할 필요가 있다.

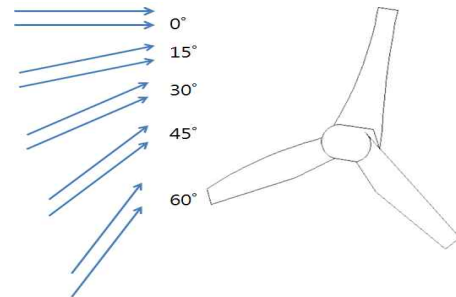


Fig. 2. Inflow angles in front of the tidal current turbine.

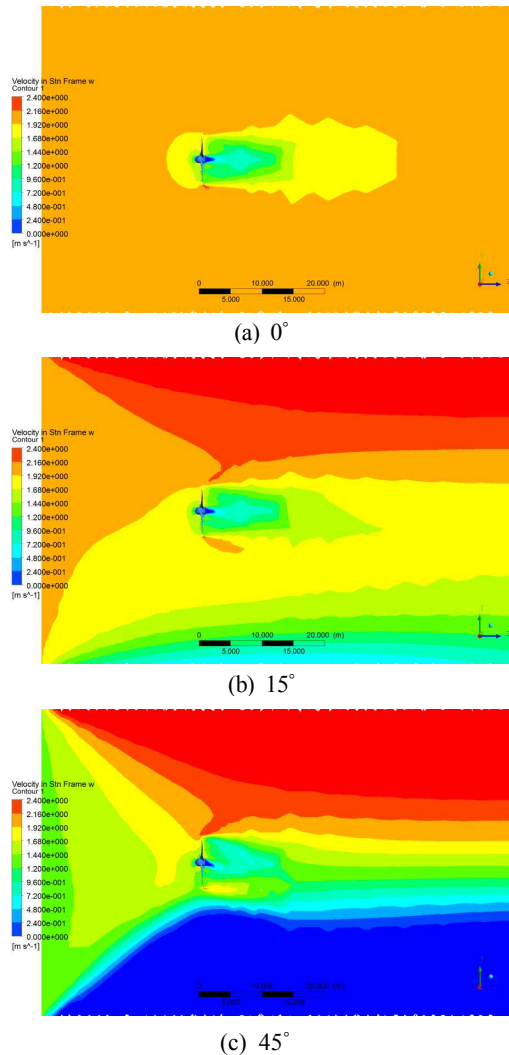


Fig. 3. Velocity distribution of various angles at TSR 5.5.

조류발전용 터빈 주위의 유동 특성에 관한 연구

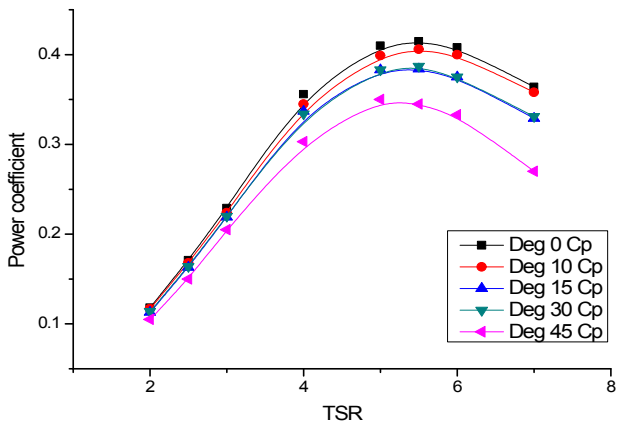


Fig. 4. Power coefficient as a function by angles of inlet flow.

조류발전기의 성능에 밀접한 관계가 있는 조류의 유입 방향에 따른 출력계수의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 수평 흐름에 비해 유입각이 커질수록 로터에 걸리는 토크가 작아지고 45° 이상부터는 출력계수가 급격히 저하됨을 알 수 있다.

3.2 해저면 효과

해수면은 유속이 빠르고 관성이 크기 때문에 높은 압력에 견디면서 하류까지 진행할 수 있으나, 해저면에 가까운 흐름은 하류방향으로 갈수록 압력상승이 일어나고 유속이 느려지는 경계층이 형성된다.

해저면에 설치되는 조류발전용 로터에 작용하는 조류의 흐름도 이러한 영향을 받을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 해저면의 효과가 조류발전용 로터에 미치는 영향을 파악하기 위해 수치해석을 수행하였다. 해저에서 허브중심까지의 수심은 블레이드 직경의 3D, 전방 3D와 후방 7.5D로 설정하였다. 계산시 입구 유입각은 블레이드와 수직 조건으로 설정하였다. 밀도는 1,024 kg/m³, 상부와 옆면은 자유흐름이다. 난류모델은 SST이며, 난류강도는 5%이다.

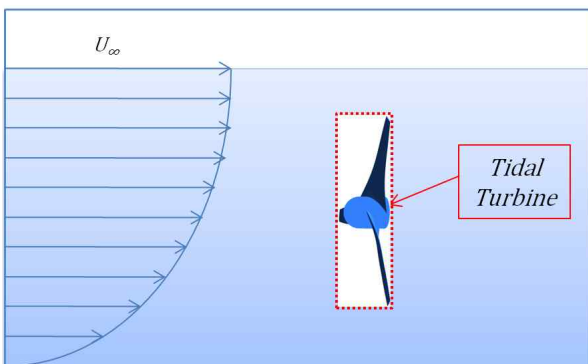
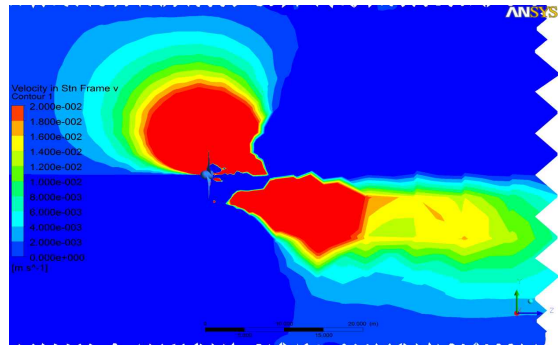
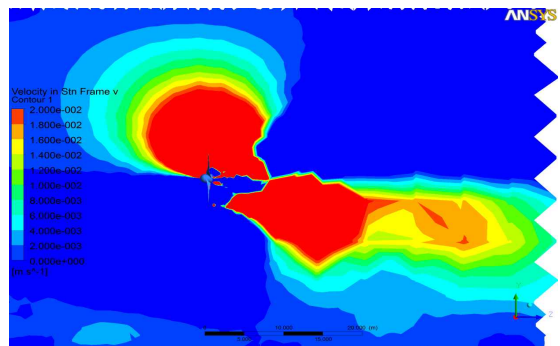


Fig. 5. CFD definition for sea-bed effect.

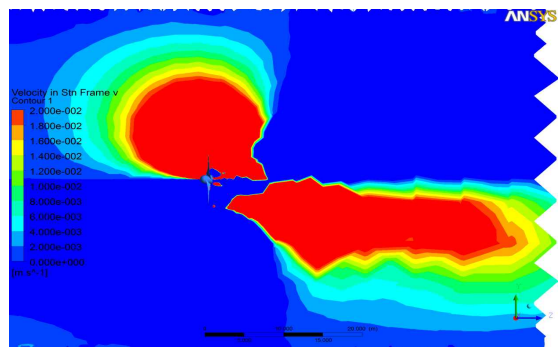


(a) Non-seabed effect

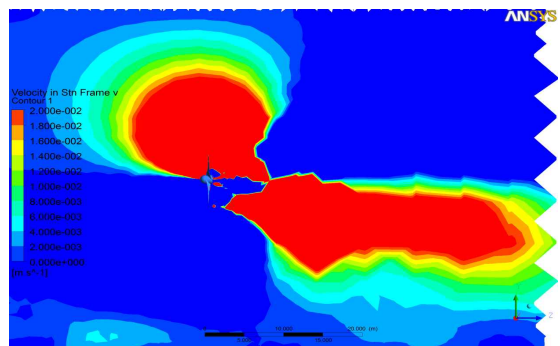


(b) Seabed effect

Fig. 6. Comparisons by condition of seabed effect in 2 m/s.



(a) Non-seabed effect



(b) Seabed effect

Fig. 7. Comparisons by condition of seabed effect in 3 m/s.

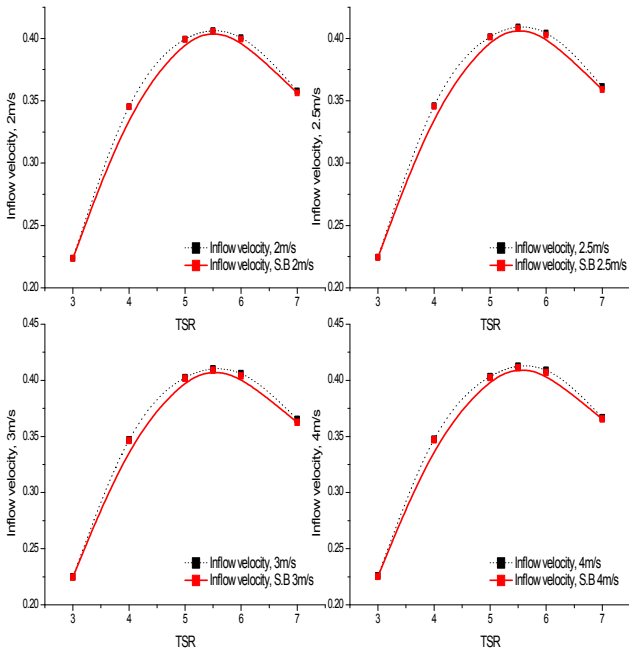


Fig. 8. Comparisons of power coefficient as function of TSR by seabed effect.

Fig. 6 과 Fig. 7에서는 해저면 효과 유무에 따른 상태에서 유속 2 m/s와 3 m/s의 속도 분포도를 나타낸 것이다. 해저면 효과를 설정하지 않은 조건의 Fig. 6과 Fig. 7의 (a)보다 해저면 효과를 설정시킨 Fig. 6과 Fig. 7의 (b)에서 터빈 블레이드로 유입되는 하부의 유효 흐름이 감소하면서 블레이드의 상부 부근에서 수직방향 속도성분이 상승함을 알 수 있고 이로 인해 수평 유효흐름이 감소한다. 이는 앞 절에서 언급한 것처럼 유입각에 따른 수평흐름이 감소하는 영향과 유사한 경향을 보인다.

Fig. 8은 동일한 유속 조건에서 TSR별 해저면 유무에 따른 출력계수의 변화를 나타내었다. 해저면 효과로 인해 터빈의 출력계수가 다소 감소하였으나 전체적인 출력에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

3.3 공동현상

프로펠러형 터빈의 매우 취약한 문제점은 회전수, 수위와 유속에 의해 날개에 공동현상이 발생하여 터빈의 성능저하의 요인이 된다. 공동현상의 발생은 액체의 압력이 포화증기압보다 낮아진 영역에서 증기로 상변화를 일으키는 과정에서 나타난다. 조류발전용 터빈의 경우 비교적 낮은 해수 온도와 회전수, 수중의 수압이 존재하는 경우 공동현상을 고려하지 않지만 실해역 저수심 소형고속화 등을 고려하여 공동현상 발생영역 및 유동현상이 터빈의 성능에 미치는 영향을 평가하였다.

공동현상의 가시화를 높이기 위해 물성치를 Water vapour at 25 °C와 Water at 25 °C로 설정 및 표준기압 조건을 설정하고 난류모델은 회전체 해석에 있어서 표준이 되는 SST 모델로 설정하여 계산을 수행하였다(ANZINE, 2012).

Fig. 9와 Fig. 10은 공동현상을 나타내기 위해 TSR 4, 5.5, 7에서 유속의 변화에 따라 흡입면을 Vapour의 값이 0.1인 지점에서의 Iso-surface를 나타내었다. 3 m/s 이하의 낮은 유속에서는 Vapour 생성이 거의 나타나지 않았으나 TSR이 증가할수록 블레이드 끝단을 중심으로 Vapour 생성이 다소 증가되고 있음을 확인할 수 있다.

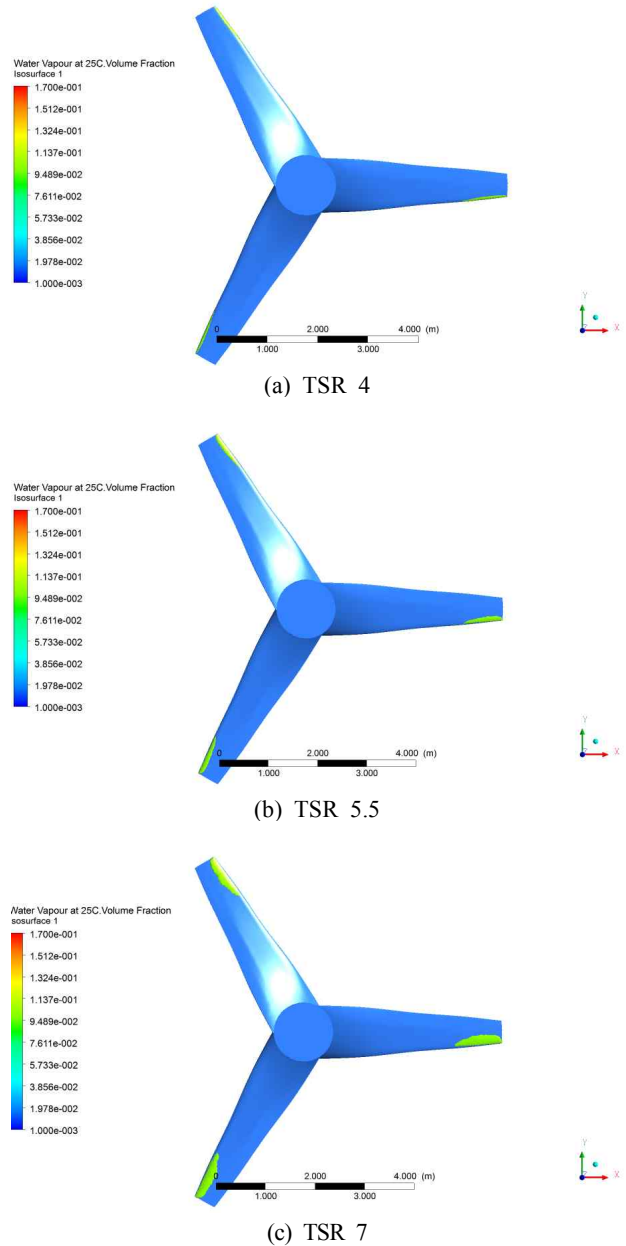


Fig. 9. Distributions of water vapour volume fraction in 3 m/s

조류발전용 터빈 주위의 유동 특성에 관한 연구

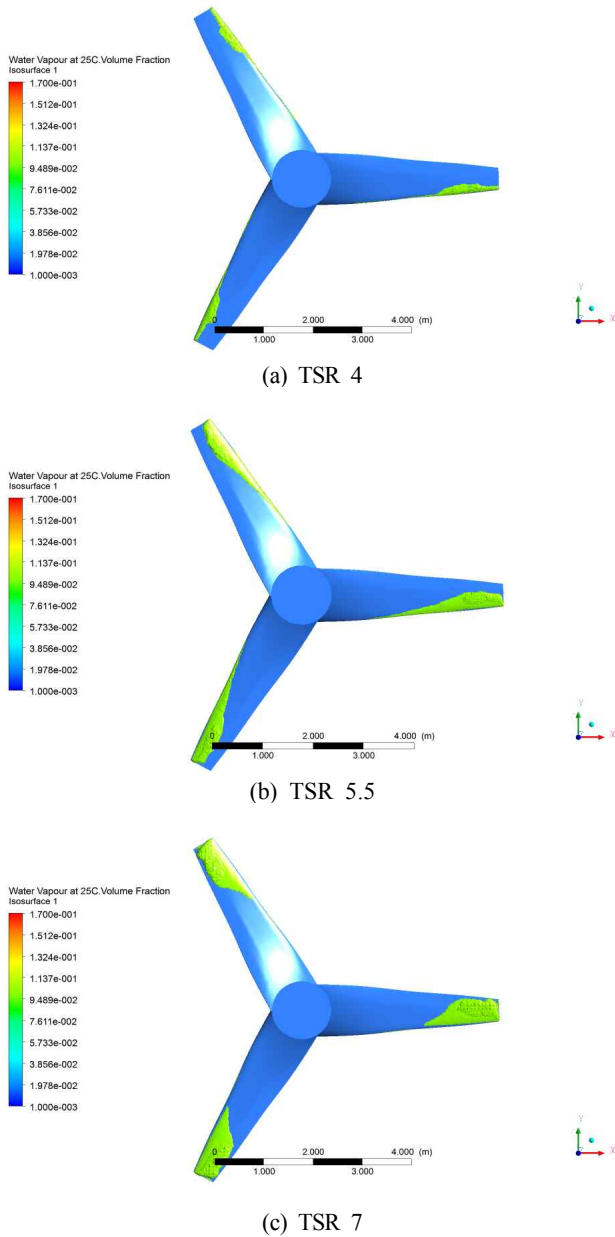


Fig. 10. Distributions of water vapour volume fraction in 4 m/s.

Fig. 10의 유속이 4 m/s에서는 출력의 대부분을 발생시키는 허브로부터 70% 부근까지 캐비테이션이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

한편, 조류발전 터빈의 성능을 저해하는 요소인 유효받음각, 해저면 효과, 공동현상 등이 있으나 이를 고려하지 않은 조건에서 조류의 유속에 따른 출력계수를 Fig. 11에 나타내었다. 유속이 증가할수록 날개 끝 속도비 5.5까지는 이론과 동일하게 비례적으로 증가하는 경향을 보였지만 설계유속보다 낮은 1 m/s는 상대적으로 낮음을 알 수 있다.

또한, Fig. 12에서는 공동현상 조건을 설정한 상태에서 유속별 출력계수를 나타내었다. Fig. 11에서 보여진 유속별로 비례적 증가하는 것과는 다르게 유속이 증가할수록 출력계수는 감소하는 결과를 보였고 특히, 3 m/s 이상에서 부터는 출력계수가 현저히 낮아지는 대조적인 것으로 나타났다. 이는 공동현상에 의한 출력저하로 평가된다.

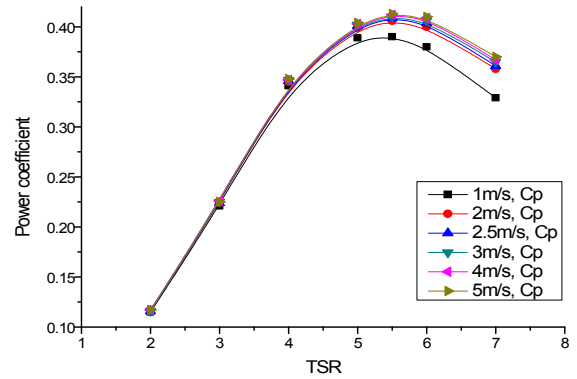


Fig. 11. Power coefficient as a function by inflow velocity.

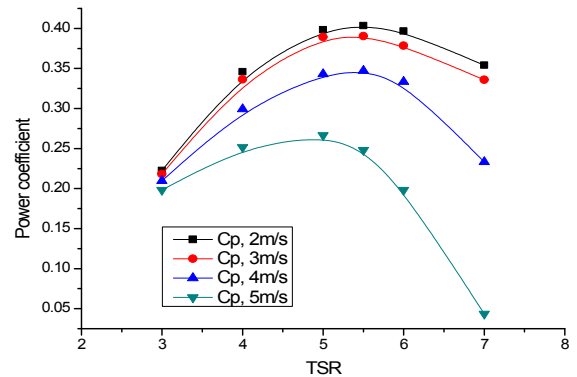


Fig. 12. Power coefficient as a function by cavitation.

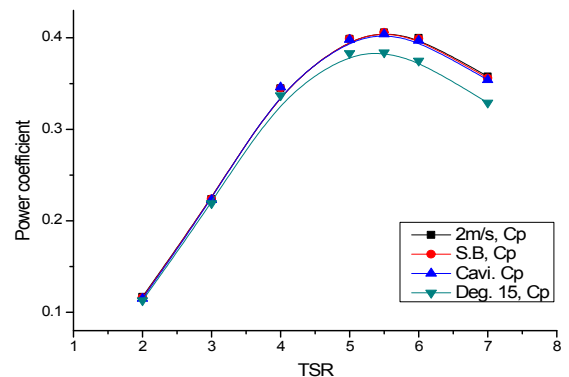


Fig. 13. Power coefficient as a function of various conditions at 2 m/s.

Fig. 13은 유입유속을 일정히 한 다음 해저면 효과, 유입각 변화와 공동현상을 주어진 조건에서의 출력계수의 변화를 비교한 것으로 해저면 효과나 공동현상 발생에 따른 효율저하 보다 유입각에 따른 출력저하가 크게 나타났다.

4. 결론

조류발전용 터빈 후류의 유동특성을 파악하고자 해저면 효과, 유효받음각의 변화 및 공동현상이 발생하는 경우 그에 따른 출력특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 계산 조건하에서 해저면 효과는 조류발전용 터빈의 전체적인 출력저하에는 크게 영향을 미치지 않고, 유입각이 커질수록 효율 저하가 점차 나타나다가 TSR 5.5 기준, 45도에서는 출력계수가 7% 낮게 나타났다.

2. 유입속도 증가시 토크와 출력계수가 증가하였으나, 공동현상 조건의 3 m/s이상부터 오히려 로터에 걸리는 토크가 낮게 나타났고, 4 m/s 이후부터는 공동현상 발생하면서 출력계수도 급격히 낮아지는 것으로 나타났다.

3. 일정한 유속에서 해저면 효과가 나타나고 공동현상이 발생할수록 특히, 유입각이 클수록 출력계수가 더 크게 감소하는 것으로 확인되었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부, 한국연구재단, 전남과학기술진흥센터에서 지원하는 “전남 과학연구단지 기초원천연구개발지원사업”에 의해 이루어졌으며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] ANZINE(2012), ANSYS Workbench R14.0 Design Exploration, ANSYS FLUENT R14.0 Update - Reacting Channel Model, A Study on the Analysis of Propeller cavitation using FLUENT Mixture Model, Vol. 21, pp. 41-45.

[2] Hyun, B. S., C. H. Jo, M. C. Kim and C. J. Moon(2011), Technology Status and Prospects of Tidal Current Power Generation, Journal of The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 48, No. 3, pp. 12-19.

[3] Jo, C. H., R. S. Park, J. Y. Yim and K. H. Lee(2010), Performance of a Horizontal-axis Turbine Based on the Direction of Current Flow, Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, of Mechanical

Engineers, Vol. 24, No. 4, pp. 8-12.

[4] Kim, B. G., C. J. Yang and M. S. Choi(2012a), A Study on the Performance of Tidal Turbine by Inflow condition, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, p. 154.

[5] Kim, J. H., G. T. Kim, S. H. Park, W. Y. Oh and H. J. Kim(2012b), A Feasibility Study on Thermal Energy Resource in Deep Ocean Water, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 9-18.

[6] Lee, S. Y. and C. J. Yang(2011), A Study on Characteristics of a Vertical Axis Tidal Turbine, Journal of the Korean Fluid Machinery Association, pp. 15-16.

[7] Nam, S. H., J. M. Kim, Y. T. Kim, Y. D. Choi and Y. H. Lee(2008), Cavitation Characteristics for Variable Water Level of Horizontal-Axis Tidal Current Generation, Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 387-390.

[8] Tony B., S. David, J. Nick and B. Ervin(2010), Wind Energy Handbook, John Wiley and Sons Ltd., p. 43.

[9] Yang, C. J.(2011), Optimal Rotor Blade Design for Tidal In-Stream Energy, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 17, No. 1, pp. 75-82.

원고접수일 : 2012년 12월 03일

원고수정일 : 2012년 12월 20일

게재확정일 : 2012년 12월 27일