

해양 조류발전단지 간섭 연구

조철희* · 임진영* · 채광수* · 박노식**

*인하대학교 선박해양공학과

**울산대학교 조선공학과

Ocean Current Power Farm Interaction Study

Chul-Hee Jo*, Jin-Young Yim*, Kwang-Su Chae* and Ro-Sik Park**

*School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

**School of Naval Architecture, Ulsan University, Ulsan, Korea

KEY WORDS: Tidal current power 조류발전, Renewable energy 신재생 에너지, Circulation water channel (CWC) 회류수조, Power farm 발전단지, Interference effect 간섭효과, Computation fluid dynamics (CFD) 전산유체역학

ABSTRACT: Several tidal current power plants are being planned and constructed in Korea utilizing the strong tidal currents along the west and south coasts. A tidal current reaches 9.7 m on the west coast; there are few potential regions for tidal current power generation. The construction of a dam to store water can prevent the circulation of water, causing a great environmental impact on the coast and estuary. The tidal barrage could produce a large amount of power, but it should be carefully considered. The purpose of developing renewable energies is to minimize the environmental impact and to maximize the utilization of clean energy. To produce a great quantity of power, tidal current farms require the placement of numerous units in the ocean. The power generation is very dependent on the size of the rotor and the incoming flow velocity. Also, the interactions between devices contribute greatly to the production of power. The efficiency of a power farm is estimated to determine the production rate. This paper introduces 3-D interaction problems between rotating rotors, considering the axial, transverse, and diagonal distances between horizontal axis tidal current devices.

1. 서 론

최근 조류발전 시스템의 적용에 대한 여러 연구들이 소개 되었고, Garbuglia et al.(1933), Young(1995), Bernshtein(1995)는 조류발전 시스템의 새로운 개념과 실 해역테스트 결과를 소개 하였다. 일본에서는 다리우스 방식이 연구되었으며(Shiono et al., 1999), Walsum(1999)은 Fundy에서의 조류발전시스템을 소개했다. Jo et al.(2002)는 3종류의 다른 로터들의 특성을 실험을 통해 비교 하고, 다중모듈에 설치된 로터들의 간섭효과를 연구 하였다. 또한 방수로에 적용 가능한 첫 조류발전 시스템(Jo et al., 2008)을 소개하였다.

조류발전단지를 조성하는데 있어, 발전장치들의 간섭은 발전 효율과 발전량에 큰 영향을 미친다. 따라서 여러 장치들이 설치 되는 조류발전단지 조성에는 발전장치의 간섭에 미치는 영향에 대한 이해가 충분이 이루어져야 한다.

여러 유속 조건하에서 복합 블레이드의 가로축, 세로축, 대각 위치의 간섭영향 실험(Jo et al., 2007)이 이루어졌으나 설치 해역의 해양환경에 따라 적용되는 로터의 형상이 다르고, 부가물 등이 고려되지 않았다. 회류수조에서의 실험은 고가의 장비와 숙련된 기술자의 상당한 시간을 요구한다. 특정 조류발전장치를 개발하기 위해 개념설계 단계부터 쓰일 수 있는 개발자에게

사용이 편리하고 효과적이면서도 신뢰할 수 있는 간섭 추정 모델이나 신뢰성 있는 자료가 필요하다.

수치모델을 통한 간섭해석은 특정 로터형상, 환경에만 적용 가능한 경험식이나 수조시설 및 모델제작 비용과 시간이 많이 요구되는 수리모형실험에 비하여 여러 조건에 따르는 간섭현상을 짧은 시간에 저비용으로 재현할 수 있는 장점이 있다. 설계 시 수치모델은 경험식과 함께 예비단계에서 여러 대안의 검토 안을 감소시킬 수 있으며 수리모형실험에서 직접 계속할 수 없는 물리량을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 수리모형실험의 시행 횟수를 줄이는데 사용될 수 있다. 역으로, 수리모형실험의 결과는 수치모델에 포함된 경험식의 계수를 검증하는데 사용될 수 있다.

본 연구에서는 멀티 해류발전 블레이드 간섭 연구(Jo et al., 2007)의 수리실험 중 가로축, 세로축, 대각위치 각각의 1가지 경우에 대한 수치유체역학(CFD)해석을 수행하였다. 동일한 발전 장치가 일정한 간격으로 배치되는 대단위 조류발전단지 수치모델을 생성하는데 있어 발전장치 각각의 동일한 격자(Mesh)생성을 위한 (1) Discontinue mesh 및 Offset mesh merge 방법, (2) 수리실험과 비교 및 해석결과의 분석을 통한 CFD해석의 신뢰성 검토, (3) CFD해석결과로부터 얻어진 물리량으로부터 조류 발전장치의 간섭에 영향을 미치는 요소에 대해 살펴보았다.

교신저자 조철희: 인천광역시 남구 용현4동, 032-860-7342, chjo@inha.ac.kr

본 논문은 기 제출된 ISOPE-2009 "Multi-Arrayed Tidal Current Power Interaction Study"의 학술대회 논문을 참고 및 인용하였다.

2. Numerical Modeling

본 논문에서는 정적 및 동적인 영역에서 광범위한 수치해석을 수행하였다. 정적해석은 로터가 고정된 상태에서 일정한 유량이 유입될 때이며, 동적해석은 일정한 유량에 따라 로터가 회전하는 경우의 해석이다. CWC의 세부사항에 맞추어 수치해석 모델의 기초사양과 해석영역을 설정하였다. 상용코드인 SC/Tetra v7을 사용하여 CFD해석을 수행하였으며, MP k-EPS 난류모델을 사용하여 해석영역($L = 2.3\text{m}$, $B = 2.6\text{m}$, $H = 0.9\text{m}$)에 대한 해석을 하였다. 수치모델은 Octree 기법을 적용하여 격자 생성을 하였으며, 동적해석은 이동격자법(Moving mesh method)과 Discontinue mesh method를 사용하여 로터의 회전에 따른 간섭해석을 수행하였다.

2.1 Experiment method

멀티 해류발전 간섭연구(Jo et al., 2007)의 28가지 경우의 간섭실험 중 유사한 RPM영역대의 유속인 0.6m/s 일 때의 가로축, 세로축, 대각위치의 첫 번째 경우와 로터 단독일때를 비교하여

Table 1 Analysis domain specification

Description	Specification
Length	2.3m
Breath	2.6m
Height	0.9m

Table 2 Analysis condition

Analysis condition	Value
Time step	0.004sec
Cycles	500
Size of mesh	Max. 50mm Min. 0.78mm
Input water velocity	0.4m/s
Water density	998.2kg/m ³
Roter moment of inertia	0.005kg·m ²

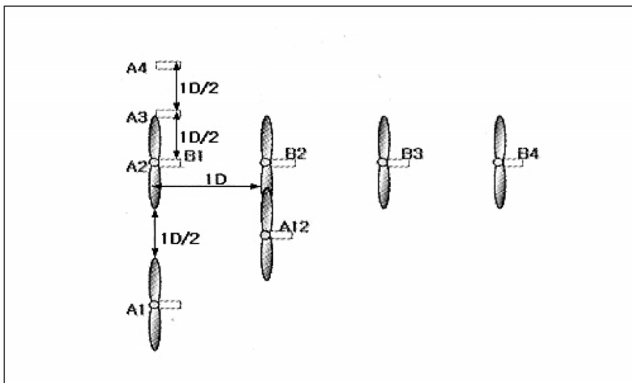


Fig. 1 Rotor arrangement

Table 3 Analysis case

	Case 0	Case 1	Case 4	Case 7
Rotor	A2	A1, A2	A2, B2	A1, A2, A12

Table 4 Elements & nodes

	Case 0	Case 1	Case 4	Case 7
Elements	2,690,350	4,669,986	4,625,019	6,598,472
Nodes	502,261	875,525	867,884	1,240,003

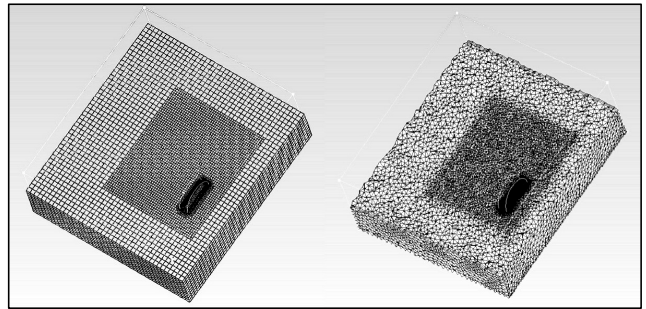


Fig. 2 Octree mesh generation method

실험하였다. Table 1은 해석 영역을 Table 2는 해석조건을 요약하였다. Fig. 1의 7가지 배치중 Table 3과 같이 4가지 경우에 대한 해석을 수행하였다. Table 4는 각 배치에 따른 수치해석 격자범위를 요약하였다.

2.2 Mesh generation

SC/Tetra v7은 Octree를 이용한 강력한 격자생성기능을 제공한다. Octree mesh 생성기법은 해석모델을 작은 육면체들로 분할한뒤 육면체의 크기에 따라 격자를 생성하는 방법이다. Fig. 2와 같이 해석시간의 단축을 위하여 로터에 비하여 상대적으로 변화율이 적은 수조영역은 점도가 낮은 Octree를 생성하여 격자를 생성하고, 로터가 배치될 영역은 Rotation volume을 생성하여 로터영역 외각과 같은 점도의 조밀한 Octree를 생성하여 격자를 생성한다. 로터는 로터헤드와 날개바깥부분 Octree 점도를 높여 격자를 생성하고 특히 유동이 빠른 로터팁은 가장 세밀한 격자를 생성하여 해석하였다.

2.3 Offset mesh merge

동일형상의 조류발전장치모델이 다중배열된 수치모델을 한번에 격자를 생성하게 되면 각각의 장치마다 격자의 생성이 동일하지 않을 뿐만 아니라, 격자생성을 위한 많은 시간과 노력이 소요된다. 따라서 1개의 발전장치만 격자를 만들고 이를 수조영역에 Offset을 주어 Merge를 시킴으로써 동일한 격자의 해석모델을 해석영역에 배치시킬 수 있다. 그리고 이동격자법과 Discontinue mesh method를 이용하여 로터가 수조영역에 Merge될 때 발생하는 격자의 균열과 Rotate volume의 회전에 따른 격자의 균열을 해소하였다.

3. Results

3.1 CFD reliability

본 연구에서 수행된 CFD 해석 중 모니터링 되는 과정을 Fig. 3과 4에 나타내었다. 유량의 흐름방향인 x축방향의 속도값의 오차범위가 정적해석에서는 40cycle 이후로 10^{-4} 이내의 범위로 수렴함을 알 수 있다. 또한 동적해석에서는 300cycle 이후부터 일정한 패턴으로 변수들이 반복되어 나타나며, 이는 초기 정지 상태에서 불안정한 흐름이 300cycle 이후에 안정되어 수렴함을 알 수 있다.

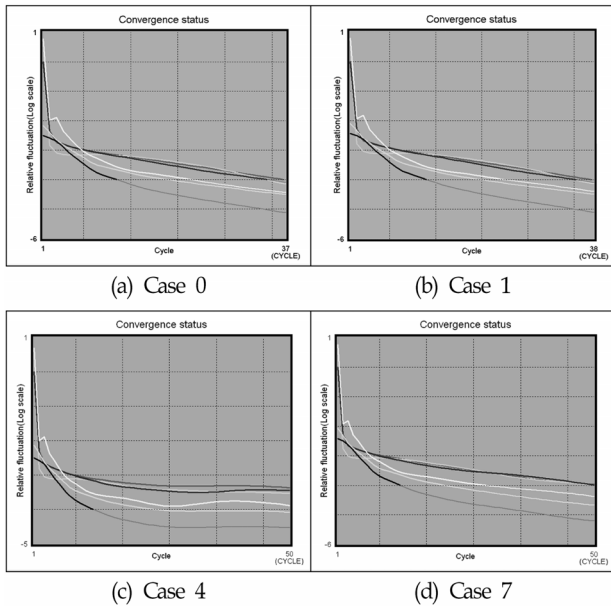


Fig. 3 Steady analysis convergences status

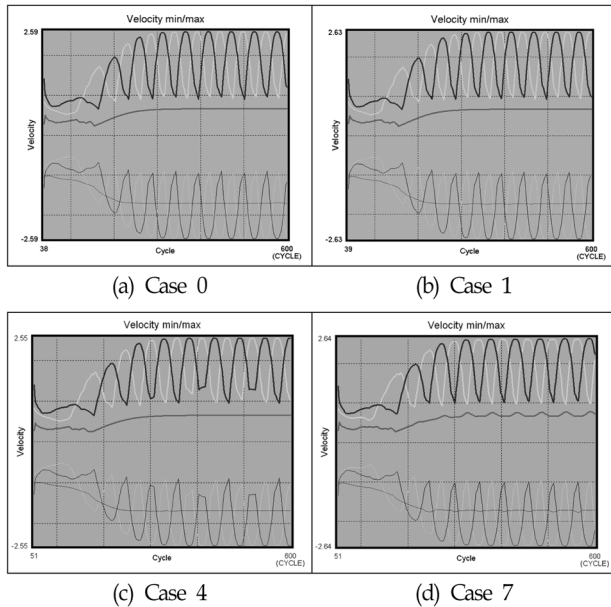


Fig. 4 Transient analysis velocity min/max

Table 5 RPM descreasing rate

	Case 0	Case 1	Case 4	Case 7
A1	1.00(1.00)	1.00(0.96)	-	0.99(0.96)
A2	-	1.00(0.96)	0.97(0.96)	0.99(0.96)
B2	-	-	0.48(0.77)	-
A12	-	-	-	0.99(0.95)

CFD result (experiment result)

CFD 해석결과는 Table 5에 나타난 바와 같이, 멀티 해류발전 간섭연구(Jo et al., 2007)의 결과에 비하여 다소 높은 간섭율을 보이고 있다. 수리실험 로터의 날개형상은 바깥면이 넓고 중심이 얇은 형상이고 수치실험은 로터중심의 날개가 두껍고 끝으로 갈수록 얇아지기 때문에 수리실험에 비하여 수치실험의 가로방향에 대한 간섭이 크게 나타나며, 수치모델 로터는 로터헤드쪽의 날개 면적과 받음각이 수리모델에 비하여 크기 때문에 축방향의 간섭영향이 수리실험보다 크게 나타난다. 또한 수리실험의 경우 유입되는 유량에 약간의 난류가 포함되어 있고, 부가물에 의해 난류가 발생한다는 점을 감안할 때 CFD 해석 결과는 수리실험결과와 유사한 경향을 보인다. 따라서 수행된 CFD 해석에 사용된 방법과 결과는 신뢰할 수 있다.

3.2 Pressure distribution

로터표면에 작용하는 압력은 Fig. 5와 같이 날개 끝으로 갈수록 압력이 증가한다. 최대압력(2258.95pa)은 회전방향 전면끝단

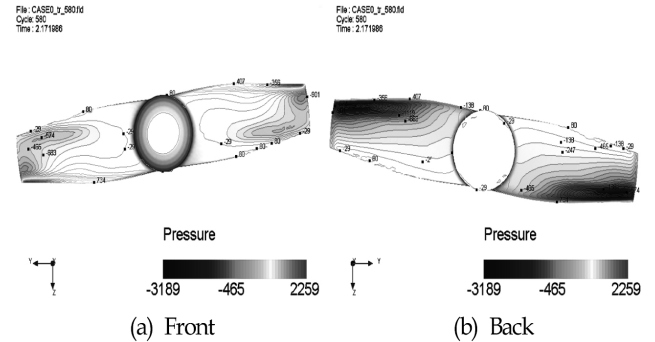


Fig. 5 Rotor pressure distribution

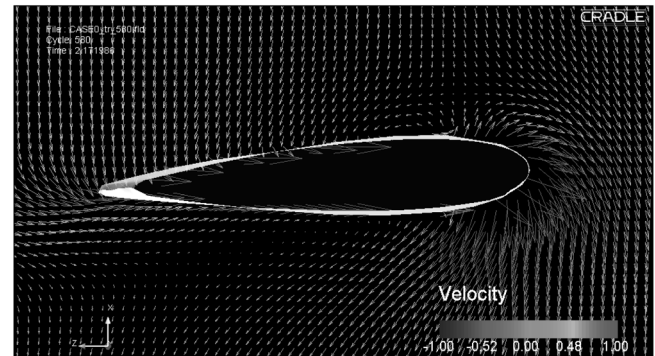


Fig. 6 Velocity vector around rotor

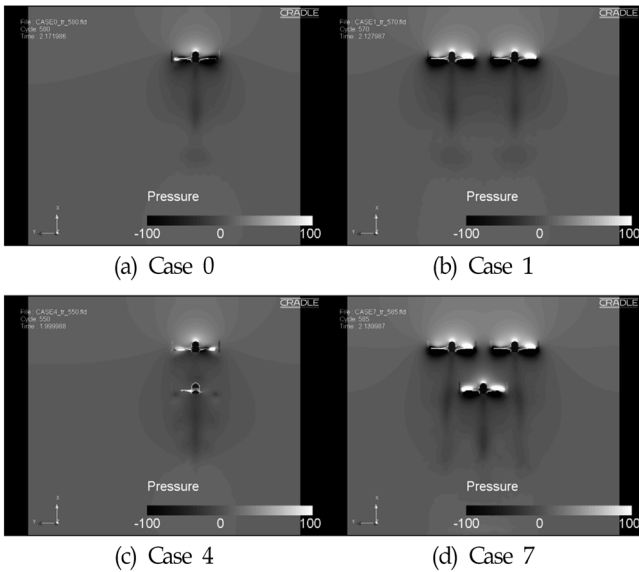


Fig. 7 Pressure distribution

에서 발생하며, 최저압력(-3188.89pa)은 로터뒷면의 회전방향 끝단에서 발생한다. Fig. 6의 속도벡터 분포는 Inlet을 통해 유입되는 유체와 로터날개 윗면의 회전방향전면에서의 받음각으로 인해 발생한 유체가 만나면서 발생한 압력이 로터날개 윗면에 높은 압력으로 작용하게 됨을 보여준다. 또한 날개 교란에 의한 날개밑면의 낮은 압력영역으로 날개 뒤쪽의 유량이 유입되면서 난류가 발생하여 후류에 영향 미치게 된다.

축방향의 압력변화(Fig. 7)를 살펴보면, 로터 전방에서는 로터헤드에서 높은 압력이 발생하며 헤드를 중심으로 압력이 점차 증가한다. 또한 날개윗면에서 압력이 증가하였다가 날개를 지나면서 급격히 감소하며, 날개에서 멀어짐에 따라 압력이 점차 증가함을 알 수 있다. 가로방향으로 배열된 로터는 중복되는 영역을 서로 공유하며, 축방향으로 배열된 로터는 단독일때 보다 넓은 범위의 중첩된 압력분포 영역을 나타낸다.

3.3 Flow distribution

로터 주위의 유속은 로터헤드와 로터뒤쪽에서 급격히 감소하며, 로터날개 끝에서 최대 유속(최대 1.7m/s)이 발생한다. 또한 유속은 로터헤드에 가까워짐에 따라 감소하며, 로터를 지나 로터 뒤쪽에서는 유속이 급격히 감소한다. Fig. 8은 로터 뒤쪽의 유속의 단면을 나타낸 것으로 로터의 뒷면에서부터 발생하는 와류는 로터의 회전에 의해 연속적으로 발생하면서 중첩되어 로터직경과 같은 크기의 유속감소영역이 나타나게 된다.

로터회전에 의한 유체의 교란은 Fig. 6의 스트림라인에서 알 수 있듯이 로터 중심에서 크게 나타나며 로터끝부분에서는 유선의 변화가 작게 나타난다. 조류발전용 로터는 로터헤드쪽의 받음각이 크고 날개끝으로 갈수록 받음각이 작아지기 때문에 중심부분에서의 유선의 변화가 크게 나타난다.

로터배치에 따른 각각의 간섭영향은 Fig. 7의 Case 1과 같이 가로방향으로는 로터의 후류에 의한 간섭영향이 없으며 Case 4와 같은 수직방향으로는 후류에 의한 간섭범위가 최대 3D까지

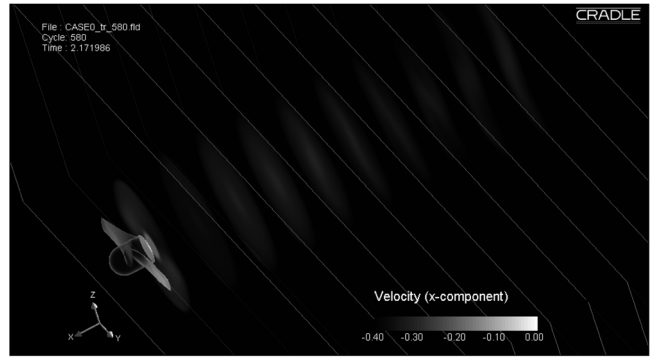


Fig. 8 Velocity tomographic

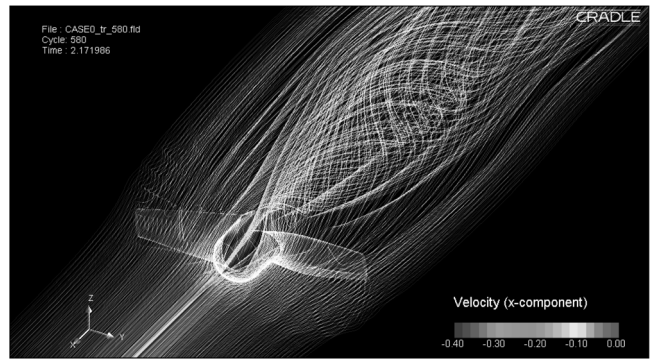


Fig. 9 Streamline around rotor

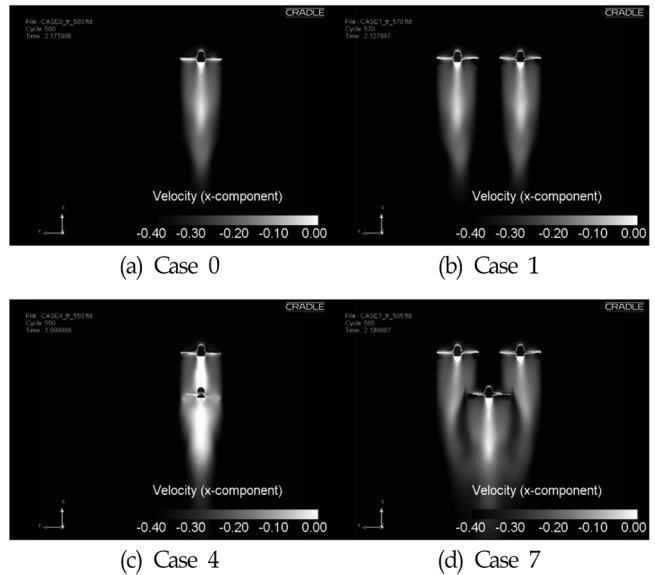


Fig. 10 Velocity distribution

작용하였다. Case 7의 대각선 배치의 경우 전방로터의 후류가 A12로터의 끝부분에만 작용하기 때문에 로터 회전에 미치는 영향이 적으며, 전방로터의 간격이 좁아져 중심에 가까워질수록 영향이 커지게 된다. Fig. 9는 로터 후방의 스트림라인을 보여주고 Fig. 10은 여러 배치에 따른 속도분포를 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 상용프로그램(SC/Tetra v7)을 이용하여 설계된 로터를 모델링하고, Octree mesh 생성기법을 통하여 격자생성 후 Offset mesh merge방법을 이용하여 해석모델을 생성하여 CFD 해석을 수행하였다. CFD 해석결과로서 로터표면의 압력, 주변압력, 유속분포 및 RPM값이 얻어졌으며, 이에 대한 분석을 수행하였다. 수행된 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 초기발전단지설계에서 발전장치의 간섭영향을 추정할 수 있는 CFD 해석방법은 기존에 사용되는 경험식과 비교하여 타당성이 검증되었고, 지지구조물 및 부가물이 부착된 복잡한 형상에 대해서도 보다 정확하고 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

(2) 반복되는 동일형상의 해석모델을 offset mesh merge방법을 통하여 보다 간편하게 생성할 수 있음을 보였다.

(3) CFD 해석을 통해 로터 주변에 작용하는 압력과 유속이 간섭에 미치는 영향을 살펴보았으며, 발전기의 상호 간섭으로 인한 효율감소로 조류발전단지화시 발전기의 효과적인 배치가 매우 중요함을 보였다.

본 연구에서는 회류수조실험으로 얻기 어려운 로터주변의 속도, 속도벡터 및 압력분포 등을 CFD 해석으로부터 얻을 수 있었으나, 지지구조물의 간섭영향이 고려되지 않았다. 지지구조물의 형상과 배치도 간섭에 상당히 중요하다고 판단됨으로 추후 이런 사항을 고려한 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었다.

참 고 문 헌

Bernshtein, Lev B. (1995). "Tidal Power Development -A

Realistic, Justifiable and Topical Problem of Today", IEE Transactions on Energy Conversion, Vol 10, pp 591-599.
 Garbuglia, E., Rosa, A.D. and Berti, D. (1993). "Exploitation of Marine Current Energy", Offshore Technology Conference, pp 509-519.
 Jo, C.H., Kim, K.S., Min, K.H., Yang, T.Y. and Lee, H.S. (2002). "Study on HAT Current Generation Rotor", Journal of Ocean Engineering and Technology, The Korean society of Ocean Engineers, Vol 16-1, pp 78-82.
 Jo, C.H., Par, K.K. and Im, S.W. (2007). "Interaction of Multi Arrayed Current Power Generations", International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, pp 302-306.
 Jo, C.H., Lee, C.H., Rho, Y.H. and Yim, J.Y. (2008). "Floating Tidal Current Power Application in Cooling Water Channel", The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies Conference, Jeju, pp 2184-2187.
 Shiono, M., Suzuki, K. and Kiho, S. (1999)., "Experiments on the Characteristics of Darrious Turbine for the Tidal Power Generation", Proceeding of the ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 1, pp 123-128.
 Walsum, W. (1999). "Offshore Engineering for Tidal Power", Proceeding of the ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol 1, pp 777-784.
 Young, R.M. (1995). "Requirements for a Tidal Power Demonstration Scheme", Journal of Power and Energy, Vol 209, pp 215-220.

2009년 1월 5일 원고 접수

2009년 1월 21일 최종 수정본 채택