Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 13, No. 3 pp. 1346-1351, 2012

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.3.1346

FLOW-3D를 이용한 해상풍력발전기초의 세굴 평가

오명학[1*], 권오순[1], 정원무[1], 이광수[1]
[1]한국해양연구원 연안개발에너지연구부

FLOW-3D Analysis on Scouring around Offshore Wind Foundation

Myounghak Oh[1*], Osoon Kwon[1], Weon-Mu Jeong[1] and Kwang-Soo Lee[1]
[1]Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute

요 약 해상풍력발전기초의 국부세굴을 평가하기 위하여 3차원 수치해석인 FLOW-3D를 이용하여 모노파일과 자켓기초에 대해 해석을 수행하였다. 수치해석 결과에 의하면 모노파일과 자켓기초 레그 주위에서 국부적으로 유속이 증가하는 것으로 나타났으며, 그 후면에서는 후류 및 와류로 인하여 유속의 감소가 나타났다. 자켓기초의 경우에는 모노파일에 비해 단일 레그의 직경이 작고, 자켓레그 사이의 간섭효과 및 자켓구조물의 복잡한 형상으로 인하여 모노파일에 비하여 국부적인 유속 증가가 더 크게 나타났으며 세굴심이 더 깊게 형성되는 것으로 나타났다. 따라서, 해상풍력발전 기초의 세굴 평가 및 세굴방지공 설계시 하부구조물의 형상에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

Abstract In order to evaluate the local scour around offsshore wind foundation, mono pile and jacket foundation were simulated by using FLOW-3D. Numerical analysis results show that local increases of velocity around mono pile and jacket foundation was developed but velocity decreases in backward of pile and leg due to the wake vortex was observed. Local increases of velocity around foundation and scouring of jacket is more significant than that of mono pile, since jacket is the complex structure and has the interference effect with legs. Therefore, in order to evaluate the scour and design the scour protection method, the form and shape of substructures of offshore wind should be considered.

Key Words : Offshore wind, Scouring, Mono pile, Jacket foundation, FLOW-3D

1. 서론

최근 유럽, 중국, 미국 등이 국가적으로 해상풍력발전단지 개발을 추진중이다. 해상풍력발전은 육상 풍력발전에 비하여 기술적・경제적 고려사항이 많지만, 해상이 육상보다 풍력자원이 풍부하고 풍력감소가 상대적으로 작아 전기출력량이 크기때문에 신재생에너지원 확보를 위하여 해상풍력단지 사업계획이 국가 또는 지자체를 중심으로 수립되어 추진되고 있다[1].

국부세굴은 구조물로 인해 발생하는 교란된 흐름의 결과로서[2] 해상풍력발전 하부구조물이 해양에 설치되면 구조물 주변의 흐름패턴이 변화되어 국부적인 유사수송능력을 증가시켜서 세굴을 유발하게 된다. 교각이나 해상풍력타워와 같은 원형 수직기둥에 발달하는 세굴형태는 흐름이 기둥 전면에 부딪혀 아래로 향한 후 발생하는 말발굽 와류(horseshoe vortex)에 의한 세굴공이 가장 깊게 발달한다. 그리고 기둥 옆면을 돌아가면서 발생하는 후류와류(wake vortex)에 의해 길게 세굴공이 발달한 후 일정거리 후에 퇴적층이 발달한다. 이러한 세굴은 구조물의 안정을 위협하는 요소가 된다. 따라서 세굴에 대한 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 구조물 주변에 저항성이 높은 재료를 부설하여 세굴을 방지 또는 감소시키는 공

본 논문은 한전 전력연구원의 지원과 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 2010건설기술혁신사업(과제번호: 10기술혁신E04)으로 수행되었음.
*교신저자 : Myounghak Oh
Tel: +82-10-4153-8119 e-mail: omyhak@kordi.re.kr
접수일 12년 02월 02일 수정일 12년 02월 20일 게재확정일 12년 03월 08일

법을 적용한다. 이러한 공법에는 사석, 콘크리트 블록, 테트라포드 등을 채워 넣는 채움 공법이 있으며, 최근에는 급격한 유속에 저항하고 방지공 하부의 입자 부상 및 유실에 대해 대처할 수 있는 돌망태, 케이블 콘크리트 블록, 기초사석 주변의 잠재, 소단 설치 등도 고려되고 있다. 세굴방지공이 제기능을 하기 위해서는 세굴현상을 정확히 예측하여 설계에 반영해야 한다. 그 동안 해양구조물의 안정설계를 위해 많은 연구들이 진행되어 왔지만, 해양구조물 기초의 세굴에 대한 연구는 여전히 미흡한 상태이며 해상세굴 평가 및 대책에 대한 설계기준 등이 완전히 수립되어 있지 않은 실정이다.[3],[4]

일반적으로 직경이 큰 원형 기둥에서는 회절이 중요한 변수로 작용하지만, 해상풍력타워의 경우에는 상대적으로 직경이 크지 않기 때문에 회절 영향을 고려하지 않아도 된다[5]. 그러나, 해양환경에서의 세굴의 진행은 조류 및 파랑의 작용 등이 추가적으로 발생하기 때문에 하천의 정상흐름의 경우보다 훨씬 더 복잡하다[4].

본 연구에서는 3차원 수치해석인 FLOW-3D를 이용하여 해상풍력발전기초에서의 세굴을 평가하고자 하였다. 해상풍력발전의 하부구조로 많이 고려되고 있는 모노파일과 자켓기초형식에 대하여 각각 국부세굴을 평가하였다.

2. FLOW-3D

2.1 FLOW-3D 개요

FLOW-3D는 미국 Flow Science, Inc에서 개발한 범용 CFD 프로그램이다. FLOW-3D는 기본적으로 비정상 유동상태에 대하여 연속방정식 3차원 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 유체 및 열 유동 해석에 사용하고 있다. 그리고 자유표면 해석을 위해 유체체적법(VOF, Volume of Fluid)을 사용되고 있으며 한 계산영역내의 복잡한 경계를 표현하기 위하여 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 방법을 이용하여 모델 영역내의 구조물과 경계의 변화를 모의할 수 있다. 따라서 구조물의 방향 및 위치 변화 또는 해저면의 변화 등을 모의하는데 활용할 수 있다.

FLOW-3D에서는 기본 유한차분방식에 FAVOR (Fractional Area/Volume Representation)를 도입한 유한체적법(FVM; Finite Volume Method)을 사용하고 있다. 일반적으로 해석영역을 격자(mesh)로 나누어 격자단위로 계산을 수행하며, 각 격자에 주어진 압력은 시간단계에서 계산된 속도로부터 Poison equation 형태의 압력방정식의 해를 구하여 계산한다. 또한, 자유표면해석이 요구될 때는 유체체적법(VOF) 방정식을 통해 풀어나간다.

FLOW-3D에서 사용되고 있는 유체체적방법(VOF)은 다른 방법과는 달리 정확한 압력 및 운동학적 경계조건을 적용하고 있으며, 유한차분시 경계면의 오점을 방지하기 위해 특별한 수치차분법을 사용함으로 두 유체 사이의 운동을 기술할 수 있는 수치해석방법이다.

2.2 FLOW-3D의 세굴모형

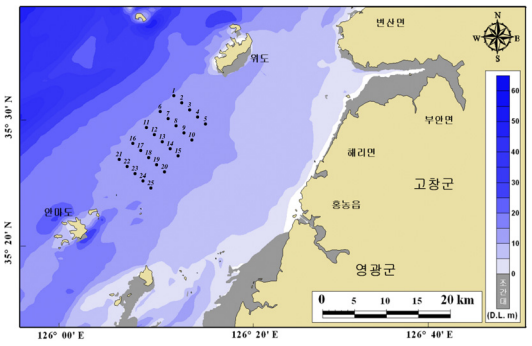
FLOW-3D의 세굴모형은 부유사 및 고형퇴적물의 공간적인 농도분포를 이용하여 해석된다. 부유사는 국지적인 압력경사의 영향으로 인해 유체와 함께 부유, 이동한다. 부유사는 경계에서 유입되거나 또는 고형퇴적물의 침식으로부터 발생한다. 고형퇴적물은 이류하지 않으며, 주변 퇴적물 입자와 결합되어 있는 퇴적물을 말한다. 고형퇴적물은 셀 내에 퇴적물이 차지하는 부피의 비율이 임계압축농도 값보다 크거나 같으며, 유체와의 경계면에서 유체에 의해 부유사 형태로 침식이 일어날 때만 움직인다. 부유사는 퇴적물이 고화되어 침식조건에 비해 침강조건이 우세할 때 고형퇴적물이 될 수 있다. 고형퇴적물의 표면 및 내부에서는 유체의 흐름이 없으며, 항력이 무한대로 가정된다. 유체의 흐름에 의해 부유사가 발생하면 유체의 평균 점성이 증가하는 것으로 가정한다. 이러한 점성의 증가가 계속되어 퇴적물 농도가 일정값에 도달하면 점성은 더 이상 증가하지 않으며 입자들이 서로 고체와 같은 상호작용을 하기 시작한다. 이런 고체와 같은 움직임은 투과성 매체를 통한 흐름으로 가정하여 각 고체 입자의 선형 항력항을 운동량 방정식에 대입함으로써 산정된다.

3. 수치모형실험방법

3.1 대상현장

본 연구에서는 2.5GW급의 대규모 해상풍력발전단지 개발 계획이 발표되어 추진중인 우리나라 서남해안의 부안·영광지역의 위도와 안마도 사이 해상을 대상으로 하였다(그림 1). 부안영광지역 해역은 바람등급이 Class 3(6.9～7.5m/s)이고, 수심이 20m 이내이며 변전소 이격거리가 15km 정도로 대규모 단지 개발이 가능한 최적지로 고려되고 있다.

대상해역의 25개 정점에서 해저 표층의 퇴적물을 채취하여 분석한 결과, 실트 섞인 세립질 모래로 분류되었으며, 각 정점에서 채취된 퇴적물의 입경은 0.0090mm～0.0614mm의 분포로 평균 0.0353mm로 분석되었다.



[그림 1] 대상현장 및 해저퇴적물 조사 정점
[Fig. 1] Target area and points of sediment investigation

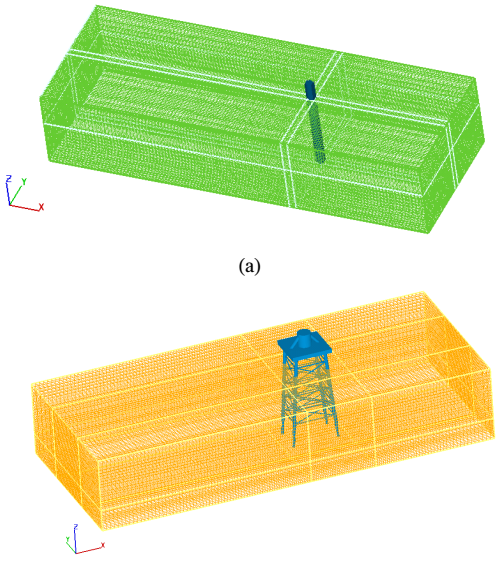
3.2 수치해석방법

해상풍력발전 하부구조물 설치에 따른 유동 및 세굴을 평가하기 위한 FLOW-3D 해석을 위한 격자망도를 그림 2에 제시하였다.

모노파일의 경우에는 파일의 직경을 5m로 가정하였으며, 계산영역은 조류 흐름방향(x 방향)을 따라서 300m, 직각인 y 방향으로 100m, 수직인 z 방향으로 55m의 영역으로 설정하였다. 원형말뚝 기초형상을 재현을 위해 기초 주변 지역은 1.0m, 경계에서는 3.6m의 가변격자를 사용하였고, 수직방향으로는 1.0m의 등간격 격자를 사용하였다(그림 2(a)).

자켓기초 구조물 주변의 해수유동 및 세굴을 산정하기 위해 구성된 3차원 격자망도는 그림 2(b)와 같다. 본 연구에서는 자켓 레그(leg)의 직경을 1m로 가정하였으며, 레그 사이의 간격은 해저면을 기준으로 조류 흐름방향(x방향)으로는 20m, 흐름방향의 직각방향(y방향)으로는 18m인 것으로 가정하였다. 모노파일에 비해 자켓구조물이 크기 때문에 계산영역은 조류 흐름방향(x방향)을 따라서 500m, 직각인 y 방향으로 200m, 수직인 z 방향으로 60m로 모노파일의 격자망 영역보다 크게 설정하였다. 자켓기초형상을 재현하기 위해 기초주변 지역을 2.0m, 경계에서는 4.7m의 가변격자를 사용하였고, 수직방향으로는 1.0m의 등간격 격자를 사용하였다.

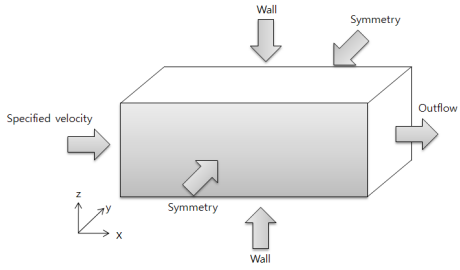
국부세굴 수치모형실험에서의 해수유동장은 대상해역에 대해 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 모델을 사용한 해수유동수치실험 결과를 사용하였다[5]. 해수유동수치실험에서 얻어진 대조기 창조 최강유속인 1.0m/s를 입사경계에서의 외력조건으로 사용하였으며, 유출조건은 강제유출로 설정하였다. 해저표층 입력조건으로는 현장관측(25개 정점)의 평균입경인 0.0353mm를 입력하였다. 그림 3은 본 연구에서 적용된 FLOW-3D 해석의 경계조건을 개략적으로 도시한 것이다. 수치실험은 평형세굴심에 도달할 때까지를 모의하여 결과를 도출하였다.



(a)

(b)

[그림 2] FLOW-3D 격자망도 구성. (a) 모노파일, (b) 자켓기초
[Fig. 2] Grid of FLOW-3D. (a) monopile, (b) Jacket foundation



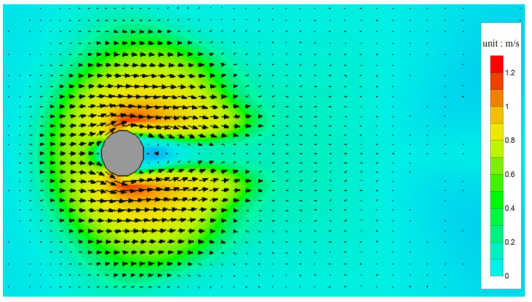
[그림 3] FLOW-3D 경계조건
[Fig. 3] Boundary condition of FLOW-3D

4. 수치해석결과 및 분석

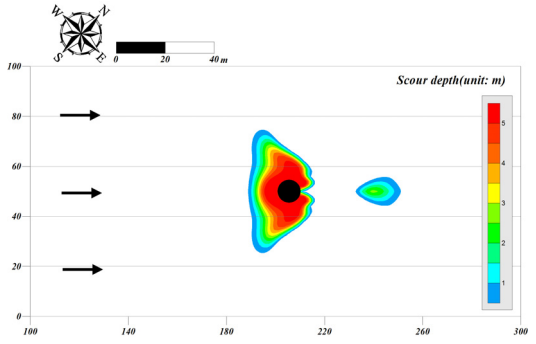
4.1 모노파일

FLOW-3D 수치실험을 통해 계산된 해저면에서의 유속분포를 그림 4에 나타내었다. 모노파일 주위에서 1.0~1.2m/s 정도로 유속이 증가하는 경향이 보였으며, 모노파일 후면에서는 와류로 인해 유속이 감소되는 경향을 나타내었다. 모노파일 주변 세굴심의 수평분포와 단면을 그림 5와 6에 도시하였다. 수치해석 결과 기초주변에서 0~

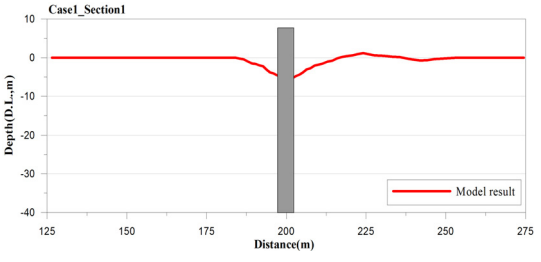
5m 정도의 국부세굴이 발생하였으며, 최대 세굴심은 5.24m로 나타났다. 이러한 국부세굴은 기초의 지지력을 감소시키므로 해상풍력타워의 안정성에 큰 영향을 초래할 수 있다.



[그림 4] 모노파일 주변 해저면에서의 유속 분포
[Fig. 4] Velocity distribution around the monopile at seabed



[그림 5] 모노파일 주변 세굴심 수평 분포
[Fig. 5] Plane distribution of scouring around mono pile



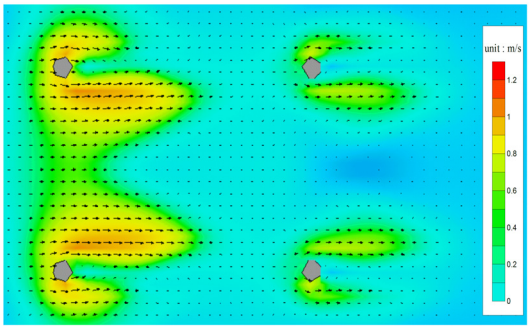
[그림 6] 모노파일 세굴심 단면 분포
[Fig. 6] Cross-sectional distribution of scouring around mono pile

4.2 자켓기초

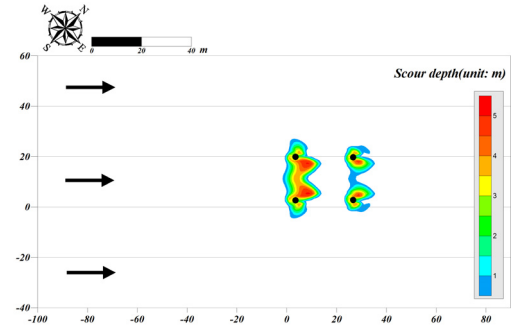
FLOW-3D 수치실험을 통해 계산된 자켓기초가 설치된 해저면에서의 유속 분포를 그림 7에 나타내었다. 모노파일의 경우와 마찬가지로 자켓 레그 주위에서 국부적으로 1.0~1.4m/s 정도로 유속이 증가된 것으로 나타났으며, 자켓 레그 후면에서는 후류 및 와류로 인하여 유속의 감소가 나타났다. 유동 실험 결과 자켓구조물의 영향으로 인해 내측 유속이 외측보다 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 흐름의 전면부에 있는 레그 주변에 비해 뒤에 있는 레그 주위의 유속변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

자켓기초 주위 세굴심의 평면 및 단면 분포를 그림 8과 9에 제시하였으며, 세굴심의 3차원 분포를 그림 10에 제시하였다. 자켓기초 구조물 주변을 따라 0~5m 전후의 세굴심이 발생하였으며, 최대 세굴심은 5.81m로 나타났다. 자켓기초의 경우에는 모노파일과 다르게 개별 파일의 직경이 작으며 자켓레그 사이의 간섭효과가 있을 수 있고, 수중 자켓구조물의 복잡한 형상으로 인해 자켓 레그 내측에서 모노파일에 비해 0.2m/s 정도 더 큰 유속을 보였으며 이러한 유속 변화로 인하여 내측에 더 깊은 세굴심이 발생한 것으로 판단된다. 그리고 유속방향에 따라 자켓기초 구조물 레그 사이에서는 1m 전후의 해저질이 퇴적되는 경향이 보이며, 후면 자켓기초 구조물을 따라서 침식되는 경향이 나타났다.

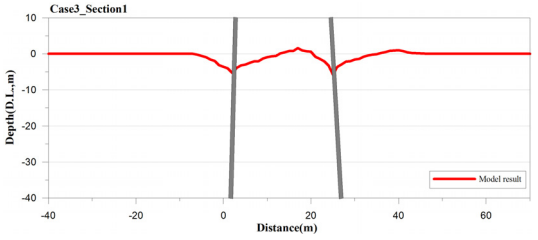
자켓기초의 경우에는 자켓 레그 사이의 간섭효과 및 자켓구조물의 복잡한 연결구조물 형상이 유속분포 및 세굴심에 영향을 줄 수 있으므로 세굴 평가 및 세굴방지공 설계시 이에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서의 국부세굴 검토는 3차원 해수유동 수치실험 결과와 FLOW-3D를 이용하여 예측한 것이므로, 향후 대상지역을 모사한 수리모형실험과 현장관측을 통해 보다 정밀하게 검토되어야 할 필요가 있다.



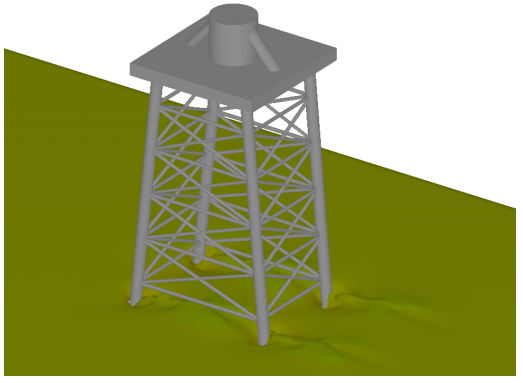
[그림 7] 자켓기초 주변 해저면에서의 유속분포
[Fig. 7] Velocity distribution around the jacket foundation at seabed



[그림 8] 자켓기초 주변 세굴심 수평 분포
[Fig. 8] Plane distribution of scouring around jacket foundation



[그림 9] 자켓기초 세굴심 단면 분포
[Fig. 9] Cross-sectional distribution of scouring around jacket foundation



[그림 10] 자켓기초 주변 세굴심 3차원 분포
[Fig. 10] 3-dimensional scouring distribution around jacket foundation

5. 결론

본 연구에서는 모노파일과 자켓기초에 대해 세굴을 평가하였다. 모노파일과 자켓 레그 주위에서 국부적으로 증가된 유속이 분포하는 것으로 나타났으며, 그 후면에서는 후류 및 와류로 인하여 유속의 감소가 나타났다. 모노파일의 경우 기초주변에서 0~5m 정도의 국부세굴이 발생하였으며, 최대 세굴심은 약 5.24m로 나타났다. 이러한 국부세굴은 기초의 지지력을 감소시키므로 해상풍력타워의 안정성에 큰 영향을 초래할 수 있으므로 도출된 세굴범위와 세굴심을 고려하여 세굴방지공이 설계되어야 한다. 자켓구조물에서는 모노파일보다 최대유속이 약 0.2m/s 정도 크게 나타났으며, 최대 세굴심은 약 0.5m 정도 더 깊게 형성되는 것으로 나타났다. 또한, 자켓기초의 경우에는 유속방향에 따라 자켓 레그 사이에서 1m 전후의 해저질이 퇴적되는 경향이 보이며, 후면 자켓기초 구조물을 따라서 침식되는 경향이 나타났다. 자켓기초의 경우에는 모노파일과 다르게 개별 파일의 직경이 작으며 자켓레그 사이의 간섭효과가 있을 수 있고, 수중 자켓구조물의 복잡한 형상으로 인하여 유속분포 및 세굴심에 영향을 줄 수 있으므로 세굴 평가 및 세굴방지공 설계시 이에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 FLOW-3D를 이용한 수치해석을 통해 국부세굴을 검토하였으나, 향후 대상지역을 모사한 수리모형실험과 현장관측 등의 비교연구를 통해 보다 정밀하게 검토되어야 할 것으로 생각된다.

References

[1] M. H. Oh et al. "Overview on Suction Bucket Foundation Technology for Offshore Wind Turbines" Korea Geotechnical Society Fall National Conference, pp. 88-95, 2011.

[2] H. S. Oh et al. "Parameter Analysis for Influence on the Scour Width around Submarine Pipelines in Waves", Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 21(6), pp. 470-479, 2009.

[3] W. K. Yeo et al. "Pier-Scour Characteristics of the Marine Bridge with Ship Impact Protection - Incheon Bridge Case", Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 20(2), pp. 203-211, 2008.

[4] J. H. Park et al. "The Local Scour around a Slender Pile in Combined Waves and Current", Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 22(6), pp. 45~414, 2010.

[5] Korea Ocean Research & Developement Institute, Analysis on ocean characteristics and design for offshore wind plant, 2011.

오 명 학(Myounghak Oh) **[정회원]**

- 1998년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 2000년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 한국해양연구원 선임연구원

<관심분야>
지반환경공학, 해양에너지

권 오 순(Osoon Kwon) **[정회원]**

- 1990년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1998년 4월 ~ 2002년 4월 : 한국해양연구원 선임연구원
- 2002년 5월 ~ 현재 : 한국해양연구원 책임연구원

<관심분야>
해양지반조사, 해양구조물기초

정 원 무(Weon-Mu Jeong) **[정회원]**

- 1984년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 명지대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1985년 10월 ~ 2000년 2월 : 한국해양연구원 선임연구원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 한국해양연구원 책임연구원

<관심분야>
해양환경조사, 항만계획·설계

이 광 수(Kwang-Soo Lee) **[정회원]**

- 1977년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1985년 9월 : 네덜란드 델프트 국제수리연구소 (공학석사)
- 1998년 7월 : 영국 리버플대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1980년 10월 ~ 현재 : 한국해양연구원 책임연구원

<관심분야>
해양에너지, 연안공학