

해상풍력단지 기초에 관한 수치해석적 연구

김동호* · 장원일† · 김성윤** · 신성렬** · 임중세** · 윤지호**

(원고접수일 : 2008년 12월 18일, 원고수정일 : 2009년 3월 5일, 심사완료일 : 2009년 3월 23일)

Numerical Analysis on Offshore Wind Power System Foundation

Dong-Ho Kim* · Won-Yil Jang† · Seong-Yun Kim** · Sung-Ryul Shin** · Jong-Se Lim** · Ji-Ho Yoon**

Abstract : Onshore wind farms having several problems, difficult to secure a building site and incur the enmity of the people. Therefore, offshore wind farms are increasingly expected, because there are huge resource and large site in offshore. If huge wind turbines are constructed, the offshore wind power base is concerned about subsidence. In order to confirm the ground stability, estimation of subsidence is necessary. In this paper, the subsidence is predicted by continuity model when the gravity and the mono-pile base are constructed on soft ground. The FLAC 3D, three dimensional FDM program, was adopted to analysis subsidence. Input factors are yielded by geological information at the yeompo quay in ulsan and the results of laboratory experiments. It has been compared that the original ground with improved ground under the gravity base, and constructed mono-pile under the mono-pile base.

Key words : Offshore wind power system foundation(해상풍력단지기초), Subsidence(지반침하), FLAC 3D

1. 서 론

최근 지구온난화 등 환경문제와 화석에너지 자원의 고갈에 따라 국내에서도 신재생에너지를 개발 및 보급하기 위해 많은 노력을 하고 있다. 여러 신재생에너지 중 풍력에너지 기술은 중소규모의 분산형으로도, 혹은 대단위로도 유연하게 저가의 청정 에너지를 확보할 수 있는 가장 유망한 대안의 하나로 부상하고 있다. 최근에는 부지사용권과 민원 등

의 문제점을 가지고 있는 육상보다 부지를 확보하기 용이하고 높은 밀도의 풍력에너지를 가진 해상 풍력단지 개발이 더욱 각광 받고 있다.

해상풍력발전시스템은 일반 육상용 풍차와 비슷하지만 풍차 지주대의 기반부분과 해수에 의한 부식방지를 위한 풍력발전시스템의 해양화가 가장 핵심이다. 이 가운데 가장 기술적이고 경제적인 요소는 풍력발전기의 토목기초이다^[1]. 해상은 해수로 인해 작업이 용이하지 않고 대부분의 해양 저질이

† 교신저자(한국해양대학교 에너지자원공학과, E-mail:jwy@hhu.ac.kr, Tel:051)410-4438)

* 한국해양대학교 에너지자원공학과

** 한국해양대학교 에너지자원공학과

연약지반이기 때문에 Fig. 1과 같은 특별한 기초를 필요로 한다.

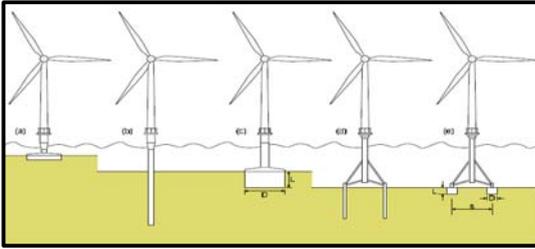


Fig. 1 Particular wind turbine bases in offshore^[1]

기초의 형태는 콘크리트자중방식, mono-pile기초방식, suction caisson 기초방식, floating 기초방식 등이 있는데 이중에서 기술적·경제적인 이유로 콘크리트자중방식과, mono-pile 기초방식이 가장 많이 쓰이고 있다. 풍력발전기와 같은 거대구조물이 해안에 설치될 경우 침하에 의한 사고발생 우려가 있으므로, 해상구조물 설치를 위한 안정성 해석을 선행 할 필요가 있고, 불안정하다고 판단될 경우 구조물을 충분히 지지할 수 있는 기초로 변경하거나 지반을 강화할 필요가 있다. 본 논문에서는 지반침하 거동을 예측하는 방법 중에서 비용이 적게 소요되고 정량적인 평가가 가능한 수치해석적방법을 사용하여 자중식과 mono-pile 기초를 설치하였을 경우 지반침하 특성에 대한 해석을 수행하였다.

2. 해석방법과 입력변수

2.1 해석방법

지반 거동의 해석은 연속체 해석과 불연속체 해석으로 나눌 수 있다. 연속체 해석은 암반을 거시적으로 포착하여 그 영역 내에서 불연속성에 의한 역학적 특성을 등가가 되는 연속체로 바꾸고 파괴와 변형 상태를 해석하는 방법이다. 본 연구에서의 해석 대상 영역은 해양 지질로 불연속면이나 파괴와 관련된 거동 특성과 관계없이 연속체 해석으로도 충분히 지반거동을 해석할 수 있다.

따라서 불연속체 해석의 경우 coulomb 모델 등

을 사용하나, 본 논문에서는 FLAC 3D를 이용하여 mohr-coulomb모델을 적용한 연속체 해석으로 얻어진 자료를 고찰 하였다. 지반 해석용 프로그램인 FLAC 3D는 공학적 계산을 위해 제작된 3차원 음해합수 유한차분 프로그램으로 3차원 연속체 공간을 유한차분망으로 분할하여 임의의 위치에서 각각의 지배방정식의 해를 구할 수 있다^[2].

2.2 입력변수

연약지반의 판정 기준은 굉장히 다양하기 때문에 임의의 변수 값을 연약지반의 특성이라 하기는 어렵다. 또한 풍력발전 시스템 기초가 연약지반에 직접 설치될 경우 구조물의 안정성에 문제가 있을 것으로 판단하여 연약지반 개량공법의 하나인 D.C.M(Deep Cement Method)공법을 적용하였다. 이 공법은 연약지반 내에 시멘트와 물을 혼합한 안정처리재를 저압으로 주입하면서 연약토와 안정처리재를 Fig. 2와 같은 특수 교반기의 회전에 의해 교반 혼합하고 시멘트의 경화반응을 이용하여 원지반 내에 고화시켜 원주형 및 직사각형의 말뚝을 조성하여 지반의 안정강화 등을 목적으로 다양하게 적용되는 공법이다.



Fig. 2 Mixing equipment of D.C.M method

현장에서 개량 필요성의 판단은 표준관입시험을 통한 N치를 기준으로, N치가 15 이하가 되는 심

Table 1 Input data of FLAC 3D

Properties	Clay A(0~-10m)	Clay B(-10~20m)	Bed rock(-20~40m)
Density(kg/m3)	2380	2380	2700
Poisson's ratio	0.396	0.388	0.337
Young's modulus(Pa)	1.03× e7	3.28× e7	5.61× e8
Bulk modulus (Pa)	1.65× e7	4.87× e7	5.73× e8
Shear modulus(Pa)	3.70× e6	1.18× e7	2.10× e8
Cohesion force(Pa)	1200	4600	2500
Friction angle(°)	29.1	28.8	26.5

Table 2 Input data after improvement in clay A

Properties	Original ground	Improvement	Improvement strength (× 1.2)
Density(kg/m3)	2380	1588	1588
Poisson's ratio	0.396	0.0599	0.0599
Young's modulus(Pa)	1.03× e7	1.37×e8	1.64×e8
Bulk modulus (Pa)	1.65× e7	5.17×e7	6.21×e7
Shear modulus(Pa)	3.70× e6	6.44×e7	7.73×e7
Cohesion force(Pa)	1200	83000	99600
Friction angle(°)	29.1	34.17	34.16

도까지만 개량을 실시한다. 본 논문에서는 연약지반을 D.C.M공법으로 개량한 '울산항 염포부두 3번전석'의 지질분석 자료의 물리적·역학적 특성과 동적 물성치를 토대로 해석에 사용할 입력변수들을 Table 1과 같이 결정하였다^[3]. Table 1의 점토층 A는 N치가 15이하인 점토층의 특성값들로 연약지반이라 할 수 있다. 따라서 개량한 후의 특성값들을 구하기 위하여 현장 시료를 채취하여 Fig. 3과 같이 실내실험을 실시하였다. 현장 시료를 현장배합비로 배합한 후 코어형 시험편을 양생하여 밀도, 일축압축강도, 압열인장강도, 변형률 등을 측정하여 Table 2와 같이 입력변수를 결정하였다.

연약지반을 개량하는 현장에서는 일축압축강도가 목표강도(일반적으로 30kg/cm²)를 만족하도록 시멘트 양을 조절한다. 따라서 필요에 따라 시멘트 양을 조절할 경우 강도값을 더 높이거나 낮출 수 있다. 그러한 관점에서 강도를 좀 더 강화 시킨다고 가정하고 개량 후 압축강도와 인장강도를 1.2배 하였고 그 값은 Table 2와 같다.



Fig. 3 Measurement of uniaxial compression strength and poisson's ratio

3. 자중식 기초의 침하해석

자중식 기초는 건설 이전에 연약지반을 개량하는 것이 효과적이며, 건설 이후에 안정감을 주기 위해 바닥짐용 자갈을 깔아준다.

감소 효과도 나타나 지반에 따라 강도를 변화하여 침하량을 조절할 수 있을 것으로 생각된다.

4. Mono-pile 기초의 침하해석

mono-pile 기초는 콘크리트 말뚝을 미리 해상 지역에 고정시키고 상부에 터빈을 설치하는 방법으로 그 설치과정은 Fig. 8과 같다. 말뚝이 상부 터빈을 단단하게 고정시켜 주는 방법으로 자중식 기초에 비해 수심이 깊은 지역에서 사용된다.

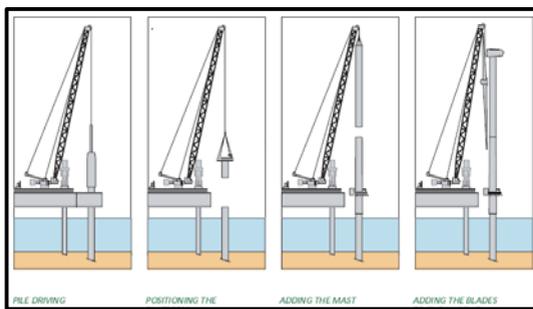


Fig. 8 Diagram of Mono-pile base^[5]

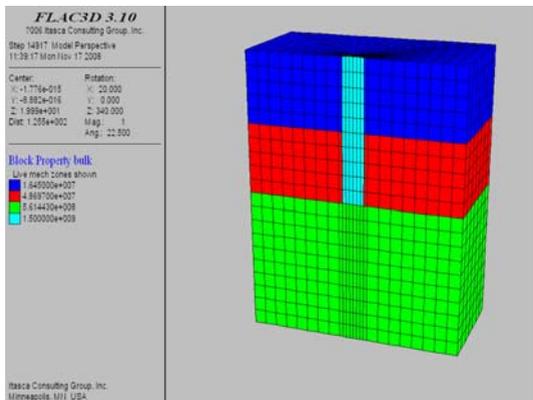


Fig. 9 Geometry of mono-pile base in FLAC 3D

4.1 지반 모델링

mono-pile 기초가 설치되기 전과 설치된 후의 지반침하 양상을 알아보기 위해 지반을 Fig.9와 같이 모델링하였다. 점토층A, 점토층B, 기반암이 자중식 기초와 같은 심도에 위치하도록 하고 각각의 입력값은 Table 1의 값을 사용하였다. 말뚝은

직경 3m로 심도 20m까지 설치하였다. 해석범위는 가로·세로 30m, 심도 40m로 총 13,440개로 분할하였다.

4.2 침하양상해석

mono-pile 기초는 상부에 터빈 구조물만 위치하기 때문에 그 무게가 130톤으로 자중식 기초에 비해 훨씬 작다^[6]. 따라서 지반이 안정된 후에 원지반에서는 말뚝이 위치하는 상부 단면적에, 말뚝을 설치한 후에는 말뚝의 상부에 130톤의 등분포 하중을 가하였다.

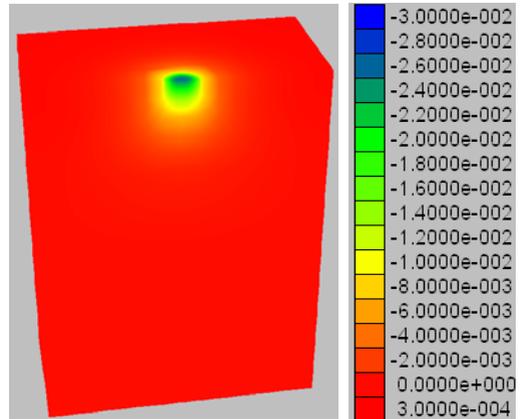


Fig. 10 Z-displacement of original ground

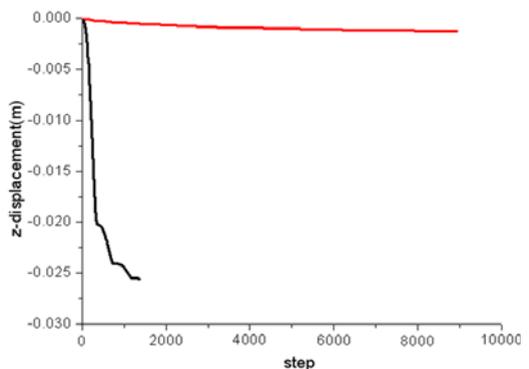


Fig. 11 Maximum z-displacement(mono-pile base)

Fig. 10은 원지반에서의 침하양상으로 하중이 가해지는 단면 주변으로 침하가 약하게 발생하는

것을 볼 수 있다. mono-pile을 설치한 후에는 원지반에서와 같은 변위 범위로 보았을 때 침하양상을 확인할 수 없었다. Fig. 11은 원지반에서와 mono-pile을 설치하였을 때 각각의 최대 침하량으로 원지반에서는 0.026m에서, mono-pile설치한 후에는 0.0012m로 나타났다. 따라서 mono-pile을 설치할 경우 구조물 하중에 의한 지반침하하는 거의 발생하지 않는다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 연약지반에서 해상풍력단지 기초 중 콘크리트 자중식 기초와 mono-pile 기초를 설치하는 경우를 대상으로 하여 지반을 연속체로 가정하여 원지반과 개량지반에 대하여 FLAC 3D해석을 실시한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 자중식 기초의 경우 본 연구에서 설정한 연약지반의 원지반 상태에서 설치할 경우 0.77m의 상당한 침하가 발생하였고, 연약지반을 현장 배합비로 개량한 후 자중식 기초를 설치했을 경우 0.39m로 약 50%로 감소하였다.

2) 강도를 1.2배 강화시킨 지반에 기초를 설치하였을 경우 0.2m의 침하량이 나타나 지반의 강도변화에 따라 침하 지지 효과가 달라질 수 있음을 알 수 있었다.

3) 침하량은 자중식에서 지반개량을 했을 경우 원지반의 50.6%, mono-pile에서 기초를 설치했을 경우 원지반의 4.6% 침하량을 보였다.

4) 터빈의 용량과 지반의 상태에 따라 지반개량 효과를 추정함으로써 침하량 예측이 가능하고, 이를 통하여 보다 안정적인 해상풍력발전 기초설계가 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] B. W. Byrne, G. T. Houlsby, "Assessing novel foundation options for offshore wind turbines", Oxford University, UK, pp. 1~3, 2005
- [2] Itasca Consulting Group, Inc, "FLAC

3D User's Guide"

- [3] (주)동아지질, "울산항 염포부두 3번선석 축조 공사 현지지질조사 보고서", pp. 16~29, 2008
- [4] Henrik Stiesdal, "Middelgrunden offshore", Bonus Energy, pp. 7~14, 2001
- [5] Warwick Energy, "Barrow offshore wind farm", pp.5, 2002
- [6] M. B. Zaaijer, "Foundation models for the dynamic response of offshore wind turbines", Marine renewable energy conference, pp. 1~4, 2002

저 자 소 개



김동호(金東昊)

2008년 한국해양대학교 해양개발공학부 졸업. 현, 한국해양대학교 대학원 해양개발공학과 석사과정



장원일(張元一)

1977년 서울대학교 자원공학과 졸업, 1980년 동 대학원 석사과정 졸업(공학 석사). 2008년 전남대학교 대학원 박사과정 졸업(공학박사) 현, 한국해양대학교 해양개발공학부 교수



김성윤(金聖閔)

1985년 부산대학교 지반지질학과 졸업, 1999년 동아대학교 산업대학원 석사과정 졸업(공학석사), (주)동아지질 현장소장, (주)강림건설 대표이사, 한국해양대학교 해양개발공학부 겸임부교수



신성렬(辛誠烈)

1987년 서울대학교 자원공학과 졸업, 1990년 동 대학원 석사과정 졸업(공학 석사), 1994년 동 대학원 박사과정 졸업(공학박사) 주요경력 : (주)한화, 서울대학교 에너지자원기술연구소 특별연구원, (주)쌍용건설 기술연구소 책임연구원 현, 한국해양대학교 해양개발공학부 부교수



임종세(林鍾世)

1991년 서울대학교 자원공학과 졸업, 1993년 동 대학원 석사과정 졸업(공학 석사), 1998년 동 대학원 박사과정 졸업(공학박사) 주요경력: 서울대학교 공학연구소 연구원, 한국과학기술평가원 연구원 현, 한국해양대학교 해양개발공학부 부교수



윤지호(尹志豪)

1990년 한국과학기술원(KAIST) 화학공학과 졸업, 1992년 동 대학원 석사과정 졸업(공학석사), 1996년 동 대학원 박사과정 졸업(공학박사) 주요경력 : 한전 전력연구원 선임연구원, AIST(일본) JSPS Fellow, LG화학기술연구원 차장 현, 한국해양대학교 해양개발공학부 조교수