

해상풍력시스템의 기초침하에 관한 연구

서동일* · 장원일† · 신성렬** · 임종세** · 윤지호**
(원고접수일 : 2007년 8월 24일, 심사완료일 : 2007년 11월 14일)

A Study on Subsidence of Offshore Wind Power System Foundation

Dong-Il Seo* · Won-Yil Jang† · Sung-Ryul Shin** · Jong-Se Lim** · Ji-Ho Yoon**

Abstract : As a national enterprise has been expanded over and over, the worldwide energy consumption has been growing necessarily. Moreover, as recently energy spendings are on the increase in countries such as BRICs, it has resulted that a rise in the price of both oil and mineral resources and instability between supply and demand become serious issue in the world resources market. The recent high price of oil and mineral resources have a deep influence on economy and threaten energy security and even national prosperity of Korea. In addition to these, exhaustion of fossil fuels and the enhanced greenhouse effect which results from gases emitted as a result of fossil fuels has been in serious questions which occur a great deal of effort to secure clean energy resources all around the world. As it is considerably possible for Korea that the Kyoto protocol may come into effect on and after 2013, it is essential to require the technological development to promote energy efficiency as well as to develop safe and renewable energy resources. The wind energy technology which converts kinetic energy into electrical energy has been in the focus of the world's attention. In this study, two-dimensional numerical analyses were conducted to observe subsidence aspects of the sea bottom on differently applied loads and various ground conditions.

Key words : Wind energy(풍력에너지), Subsidence(침하), Sea bottom(해저지반), Load(하중), Ground condition(지반조건)

1. 서 론

해상풍력발전은 풍부한 부지 활용 가능성과 내륙에 비해 풍속이 해상의 경우 20%정도로 높은 장점이 있으며, 해상에는 장애물이 없고 바다 표면의 거칠기가 낮아 좋은 품질의 풍력자원을 기대할 수

있다^[1]. 최근 유럽 여러 나라에서 풍력발전단지 개발에 많은 투자와 연구를 함에 따라 격자 인프라와 기초의 건설, 운영 그리고 유지 등에 대하여 기술적인 측면에서 크게 발전하였으며, 사업규모도 다양화, 대형화가 되고 있는 추세이다.

해상풍력발전의 개발에 있어서 가장 중요한 것은

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

* 한국해양대학교 해양개발공학부

** 한국해양대학교 해양개발공학부

해상에 구조물을 설치하는 것이다. 해상풍력발전시스템은 일반 육상용 풍차와 비슷하지만 풍차 지주대의 기초와 해수에 의해 발생하는 부식방지를 위한 풍력발전시스템의 해양화가 가장 핵심적이다^[1]. 이 가운데 가장 기술적이고 경제적인 요소가 되는 지주대의 기초는 다음과 같이 3가지로 분류된다^[2].

- 수심 0~30m: mono-piles, gravity bases
- 수심 30~60m: multiple pile, multiple caisson
- 수심 60m 이상: floating system

해상구조물의 기초는 육상기초와 달리 지반의 강도가 매우 약하기 때문에 시공 시 해저지반의 기초침하가 우려되고 있으며 그에 따른 적절한 보강공법이 제시되어야 할 것이다.

본 연구에서는 해상구조물의 기초에 대한 이론적인 내용과 유한차분 프로그램인 FLAC 2D를 이용하여 다양한 지반조건을 모델링하고 작용하중의 크기에 따라 각각의 해저지반 침하양상을 파악하고자 하였다.

2. 해상풍력단지의 기초

2.1 천해지역 기초

2.1.1 콘크리트 자중 기초

해상풍력발전단지에 가장 많이 사용하는 기초로서 상대적으로 수심 3~5m 지역에서 사용된다.

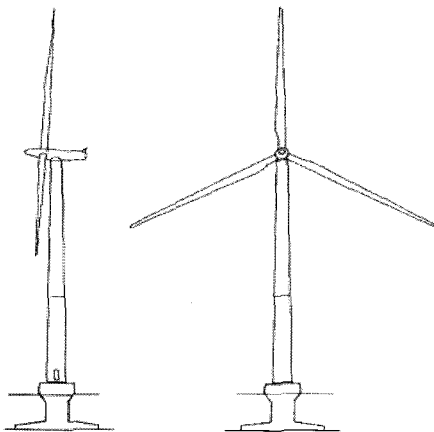


Fig. 1 Concrete gravity foundation

steel이나 concrete를 이용하여 자중에 의해 전복이 되지 않도록 하는 방식으로 터빈탑의 하중을 지반으로 직접 전달시키는 기초방법이다. 대표적으로 덴마크의 Nysted Windfarm과 스웨덴의 Middelgrunden에서 적용되었다. Fig. 1은 콘크리트 자중 기초의 모식도이다^[3].

2.1.2 mono-pile 기초

25m 이하의 깊이를 가지는 해상지역에서 사용하는 방식으로 미리 해상지반을 20~30m정도 pre-drilling을 실시하여 그라우팅을 하고 pile을 고정시키는 방식으로 제작과 설치가 간단하고 어느 정도 깊은 해상에서도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 덴마크의 Horns Rev에서 적용한 것이 대표적이다. Fig. 2는 mono-pile 기초의 모식도이다^[4].

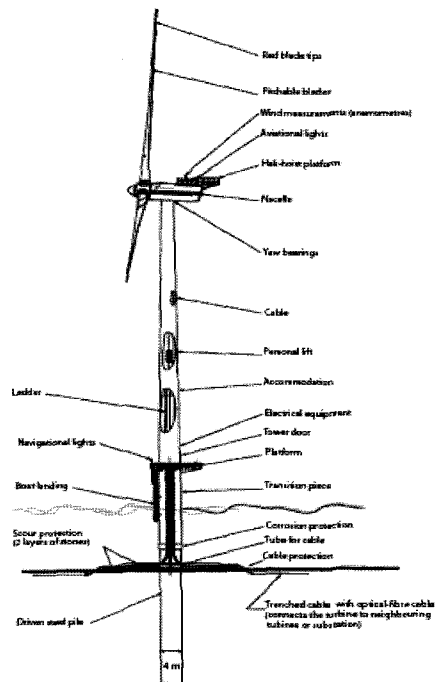


Fig. 2 Mono-pile foundation

2.2 수심 30~60m 지역 기초

2.2.1 tripod 또는 tetrapod pile(multiple pile) 기초

수심이 더 깊어질수록 mono-pile 기초는 현재의 기술력으로 설치하고 통제하는 것이 매우 어렵

고 비경제적이다. 따라서 더 깊은 해상에서는 보통 3개나 4개의 steel pile을 설치하여 건설하는 tripod 또는 tetrapod pile 기초를 사용한다. 3개의 pile 사이에 지지되는 강철제는 인장력과 압축력을 동시에 받으면서 바람이나 파도에 의한 하중에 저항을 하도록 설계하며 너울에 의한 터빈탑의 상하운동에 의한 하중을 분산시켜 기초를 안정화 시킨다. tripod, tetrapod pile 기초는 깊은 수심에서 설치가 가능한 장점이 있는 반면에 pile의 제조와 설치에 대한 비용이 매우 비싸다. 대표적으로 스코틀랜드의 Beatrice에서 2개의 풍력발전 해상구조물을 건설하였다. Fig. 3은 Multiple pile 기초의 모식도이다^[5].

2.2.2 Suction caisson 기초

큰 상승 양동이 같은 기초로서 해저에 기초를 내려놓으면 caisson 내부에 구속된 물이 pumping 되면서 지반 속으로 기초가 빨려 들어가 고정되는 방식이다. 이 방법은 이전의 pile이나 콘크리트 자중식 기초와 다르게 시공 시간과 재료비용에서 상당한 이득을 주는 반면 단단한 지반이 아닌 caly 지반에서는 편위가 발생되어 침하가 된다는 문제점이 있어 거의 사용하지 않는다. 대표적으로 덴마크의 Frederikhavn에서 적용되었다. Fig. 4는 Suction caisson 기초의 모식도이다^[5].

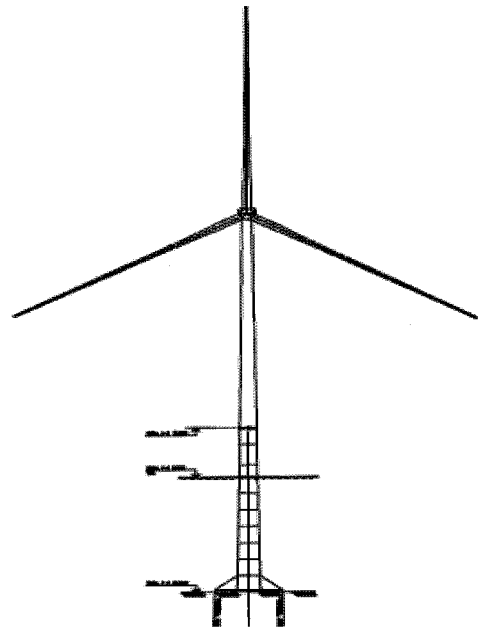


Fig. 4 Suction caisson foundation

2.2.3 multiple caisson 기초

multiple caisson 기초는 multiple pile 기초와 같은 방식으로 압축력과 인장력을 동시에 받으면서 유수에 의한 영향을 각각의 bucket에 분할하여 지지한다. bucket의 시공방법은 앞서 설명한 suction caisson 기초와 동일하다.

2.3 수심 60m 이상의 지역 기초

2.2.1 floating system

60m에서 최대 900m 정도의 깊은 수심에서 이용이 가능한 공법으로 floating법은 해상에서의 pitch, roll 등의 과격한 해상운동에서 터빈의 하중을 지탱하기 위해 와이어를 이용하는 것이 특징이며 반잠수식 floating법, 바지식 floating법, spar-buoy식 floating법, lef platform식 floating법, concrete TLP식 floating법, Deep water spar식 floating법으로 그 종류도 다양하다. Fig. 5는 Floating system의 모식도이다^[6].

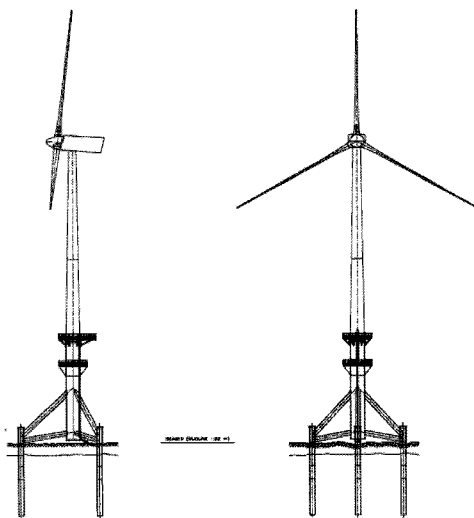


Fig. 3 Multiple pile foundation

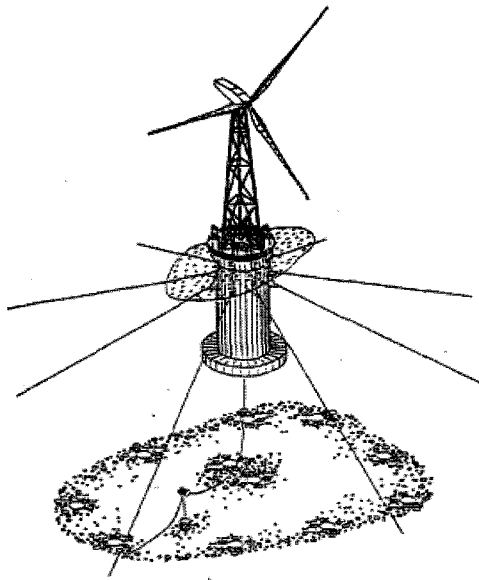


Fig. 5 Floating system

3. 유한차분법을 이용한 수치모사

3.1 모델의 구성 및 입력변수

앞에서 언급한 다양한 해상풍력시스템의 기초에서 가장 문제가 되는 것 중의 하나가 풍력시스템의 하중에 의한 지반침하이다. 그러므로 본 연구에서는 유한차분법에 근거하여 작성된 지반 해석용 프로그램인 FLAC-2D를 사용하여 해저지반의 침하양상을 모사하였다. 해석에 사용된 해석요소망은 Fig. 6와 같다.

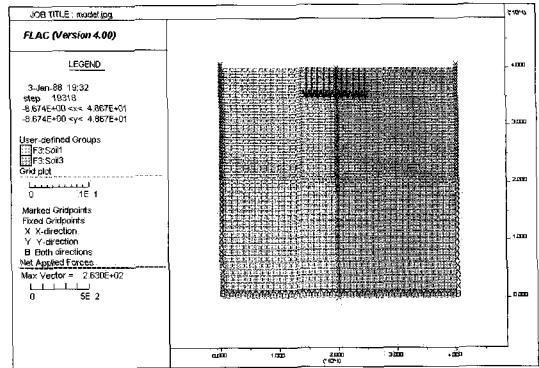


Fig. 6 Grid for analysis of subsidence in the bottom of sea

해석 대상 지반은 높이 40m, 폭 40m의 정사각형으로 모델링하였으며 중앙을 중심으로 각각 다른 물성값을 가지는 지반을 적용하였다. 적용하중은 콘크리트 자중 기초로 가정하여 모델의 상부 중앙에 10m의 길이로 하중을 적용하였다.

해석에 사용된 지반의 특성치는 Table 1에 주어진 바와 같다. Soil 1은 한국도로공사에서 제안한 토사지반의 물성을 사용하였으며 Soil2, Soil 3, Soil 4는 Soil 1지반의 탄성계수의 1/2, 1/5, 1/10으로 가정하였고 포아송비는 0.25로 통일하였다. 풍력발전의 생산 전력량(MW)에 따라 달라지는 하중의 크기에 따른 해저지반침하 양상을 분석하기 위해 하중의 크기는 국내에서 현재 생산되고 있는 육상 풍력시스템의 하중 데이터를 기초로 하여 각각 1배, 3배, 5배로 가정하였다. 2차원 해석에 사용된 변화 조건을 정리하면 Table 2와 같다.

Table 1 Strength and deformability parameters of Soil

	Soil 1	Soil 2	Soil 3	Soil 4
Young' modulus(GPa)	1.260	0.630	0.252	0.126
Bulk modulus(GPa)	0.84	0.42	0.168	0.084
Shear modulus(GPa)	0.50	0.252	0.1008	0.0504
Friction angle(deg)	26.5	26.5	26.5	26.5
Cohesion(kPa)	2.5e1	2.5e1	2.5e1	2.5e1
Density(kg/m ³)	2600	2600	2600	2600
Poisson's(kg/m ³)	0.25	0.25	0.25	0.25
Tensile Strength(kPa)	1.25e1	1.25e1	1.25e1	1.25e1

Table 2 Parameter combinations used in the analysis

Power Output	Weight	Geometry condition
1.0MW	171.6ton	Soil 1
		Soil 1, Soil 2
		Soil 1, Soil 3
		Soil 1, Soil 4
3.0MW	514.8ton	Soil 1
		Soil 1, Soil 2
		Soil 1, Soil 3
		Soil 1, Soil 4
5.0MW	858.0ton	Soil 1
		Soil 1, Soil 2
		Soil 1, Soil 3
		Soil 1, Soil 4

3.2 해석결과의 고찰

3.2.1 탄성 해석과 탄소성해석의 결과비교

지반의 침하는 보통 탄소성해석을 실시하지만, 탄성해석으로 지반침하 현상을 정확히 확인 할 수 있다면 탄성해석을 수행하는 것이 시간적으로 유리하다.

탄성해석으로 지반침하 양상을 올바르게 얻을 수 있는지 알아보기 위해 동일한 조건에서 탄성해석과 탄소성해석을 실시하여 그 결과를 비교하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 탄성해석과 탄소성해석을 통한 Soil 1의 침하양상이다. 침하의 양상은 비슷하지만, 침하량에서 상당한 차이가 발생하고 침하발생영역 역시 차이가 나는 것을 확인하였다. 따라서 탄소성해석으로 본 논문을 진행하였다.

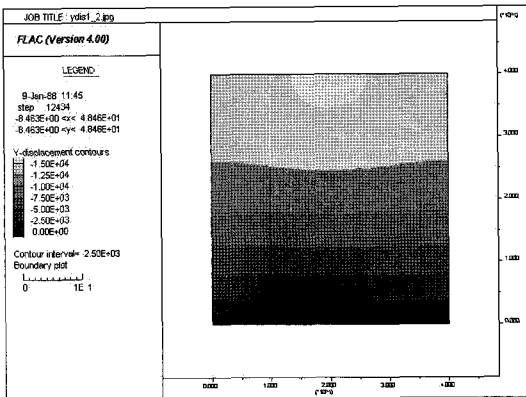


Fig. 7 Subsidence of Soil 1(Elastic analysis)

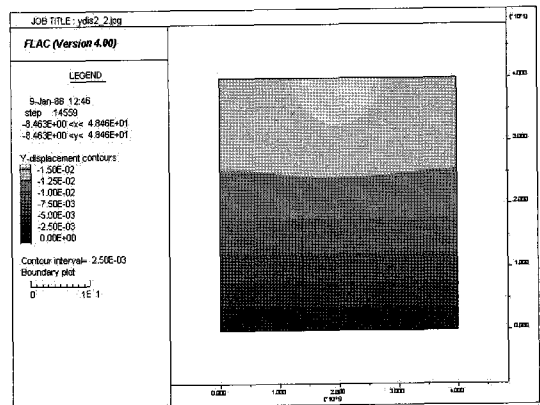


Fig. 8 Subsidence of Soil 1(Elastic-plastic analysis)

3.2.2 해저지반 조건에 따른 결과 비교

1.0MW의 풍력발전 구조물의 하중은 171.6ton으로 table 2에 제시한 해저지반 조건으로 침하의 양상을 검토하였다.

Fig. 8은 Soil 1로 이루어진 지반에 171.6ton의 등분포 하중을 10m의 길이로 가할 경우, 요소망의 중심을 대칭으로 침하가 발생하였다. 하중이 가해진 부분에서 약 15m 깊이까지 급격한 침하 경향이 나타나며 그 이하의 지층에서는 그 영향이 아주 미세한 것으로 나타났다(Fig. 8).

Fig. 9은 모델의 중심을 대칭으로 왼쪽은 Soil 1, 오른쪽은 Soil 2로 이루어진 지반에 171.6ton의 등분포하중을 10m의 길이로 가할 경우를 침하양상을 모사한 것이다. Soil 2가 존재하는 지반은

급격한 침하양상을 보이고 있으며 약 35m 깊이까지 급격한 침하 양상을 보이다가 점차 그 이하부터는 영향이 작아지는 것을 확인할 수 있다(Fig. 9). Fig. 10은 오른쪽 영역을 Soil 3으로 적용시킨 후, 해저지반의 침하양상을 확인하였다. 해저지반의 침하는 매우 넓은 범위에 걸쳐 발생 하고 있으며 상당히 급격한 침하양상을 보이고 있다. 다른 2개의 지반 사이에서 전단응력이 크게 발생하여 두 지반의 경계가 나타나고 있다(Fig. 10).

Fig. 11은 왼쪽 영역을 Soil 1, 오른쪽 영역을 Soil 4로 적용시킨 후 해저지반의 침하양상을 확인한 결과이다. 침하의 정도는 더욱 심하게 발생하며 두 지반의 경계가 확실히 들어나고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 11).

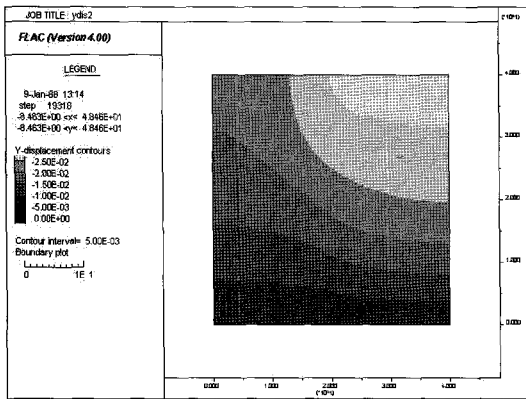


Fig. 9 Subsidence of Soil 1 and Soil 2

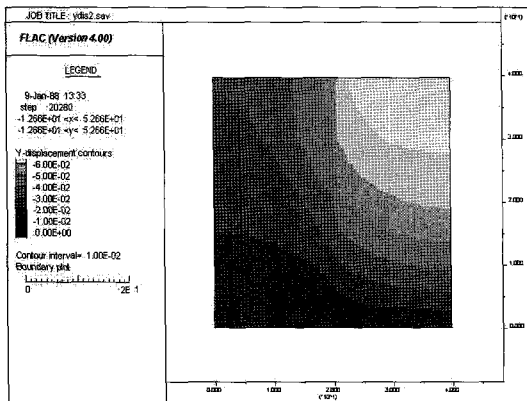


Fig. 10 Subsidence of Soil 1 and Soil 3

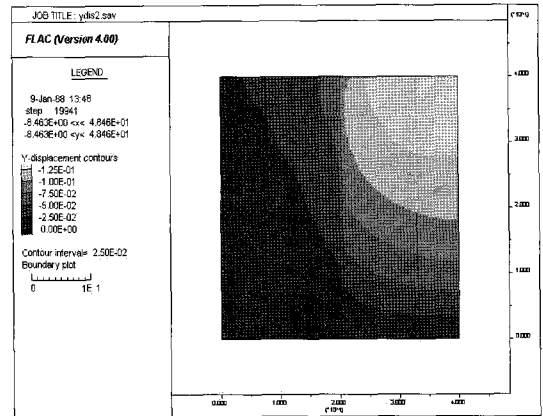


Fig. 11 Subsidence of Soil 1 and Soil 4

3.2.3 하중에 따른 결과비교

Soil 2, Soil 3, Soil 4의 탄성계수는 각각 Soil 1의 탄성계수의 1/2, 1/5, 1/10로 가정하였으며, 하중의 크기를 전력생산량에 따라 171.6ton, 514.8ton, 858.0ton을 가하였을 때 하중의 가운데에서 발생하는 해저지반의 침하발생량을 검토하였다.

Fig. 12은 Soil 1의 해저지반에서 171.6ton, 514.8ton, 858.0ton의 하중을 각각 제하 하였을 때, 나타나는 침하발생량으로 최소 침하량은 약 1.6cm이고 최대 침하량은 약 3.4cm로 나타났다. Fig. 13는 Soil 1과 Soil 2로 이루어진 해저지반으로 침하 발생량은 Soil 1로만 이루어진 지반의 침하량에 비해 약 1.5배 증가하여 최소 약 2.5cm이며 최대 약 5.0cm로 나타났다.

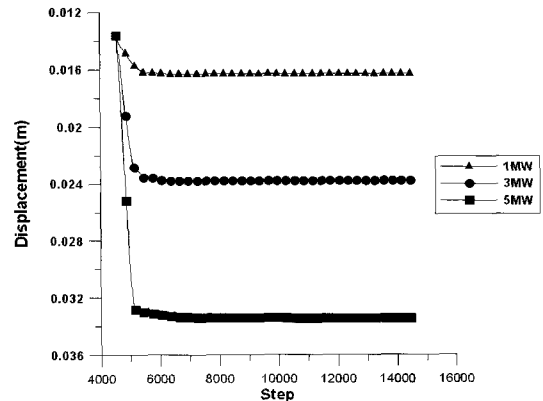


Fig. 12 Subsidence of Soil 1 by load

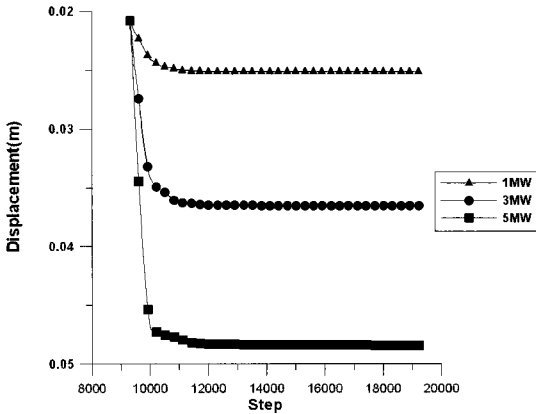


Fig. 13 Subsidence of Soil 1 and Soil 2 by load

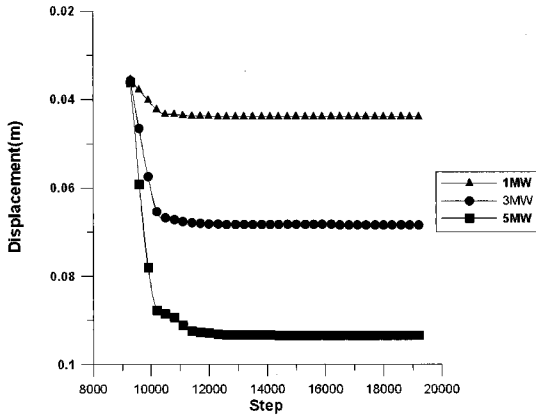


Fig. 14 Subsidence of Soil 1 and Soil 3 by load

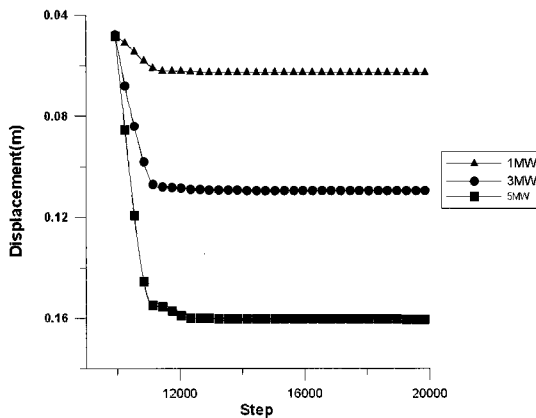


Fig. 15 Subsidence of Soil 1 and Soil 4 by load

Fig. 14은 Soil 1과 Soil 3으로 이루어진 해저지반으로 침하 발생량은 Soil 1과 Soil 2로 이루

어진 해저지반보다 약 1.8배 증가하여 최소 약 4.5cm이고, 최대 약 9.5cm로 나타났다.

Fig. 15는 Soil 1과 Soil 4로 이루어진 해저지반으로 침하 발생량은 Soil 1과 Soil 3으로 이루어진 해저지반보다 약 1.7배 증가하여 최소 7.0cm에서 최대 약 16cm로 가장 큰 지반 침하량을 보였다.

4. 결 론

[1] Soil 1로 이루어진 지반에 171.6ton의 등분포하중을 10m의 길이로 가할 경우, 하중이 가해진 부분에서 약 15m깊이까지 급격한 침하 경향을 나타나며 그 이하의 지층에서는 그 영향이 아주 미세하게 나타남을 확인하였다.

[2] Soil 1로만 구성된 지반에 하중을 가했을 경우 좌우 대칭으로 침하가 발생하였으나 이방성 지반에 하중을 가했을 경우 소성변형의 발생으로 두 지반의 물성치에 따라 각각 다르게 침하가 발생하였으며, 결국 두 지반의 경계면에서 전단파괴가 발생하였다.

[3] 171.6ton, 514ton, 858.0ton의 순으로 각각 다른 하중을 지반에 적용한 결과 하중의 크기가 증가함에 따라 침하발생량이 증가하였으며 해저지반의 상태에 따라 최소 약 1.6cm에서 최대 16cm까지 발생하였다.

후 기

“본 과제는 해양수산부 영남씨그랜트 대학사업단 지원금(YSG-RC0608)에 의해 수행되었습니다”

참고문헌

[1] 경남호, “해상풍력발전기술”, 한국태양에너지학회 Vol.3, No.3 pp. 56~68, 2005
 [2] Musial, W.; Butterfield, S.; Ram, B., “Energy from Offshore Wind: Preprint”, 2006
 [3] Henrik Stiesdal, “Middelgrunden

Offshore”, A newsletter for customers and business associates, 2001

- [4] Offshore Wind Energy and Industrial Development in the Republic of Ireland, SEI, 2004
- [5] Support Structures for Offshore Wind Turbines, DNV, <http://www.dnv.com/>
- [6] David Quarton, Float-Technical and economic feasibility of a floating wind turbine, energetics, <http://www.energetics.com/meetings/deepwater/pdfs/presentations/session4/davidquarton.pdf>



임중세(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 해양개발공학과 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

저 자 소 개



서동일(徐東一)

2006년 한국해양대학교 해양개발공학부 졸업. 현, 한국해양대학교 대학원 해양개발공학과 석사과정



장원일(張元一)

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



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 에너지자원신기술연구소 특별연구원, (주)쌍용건설 기술연구소 책임연구원 현, 한국해양대학교 해양개발공학부 부교수