제주 연약지층 특성을 고려한 해상풍력기초의 수치해석적 연구

Numerical Analysis of Offshore Wind Turbine Foundation Considering Properties of Soft layer in Jeju

양기호¹, 서상덕², 조예선³, 박정준^{4*}

Ki-Ho Yang¹, Sang-Duk Seo², Yee-Sun Cho³, Jeong-Jun Park⁴

¹Non-Member, Director, Offshore Wind Energy Research Division, GK Engineering, 91, LS-Ro, Dongan-gu, Anyang City, Kyunggi Province, Republic of Korea

²Non-Member, Vice President, Geotechnical Division, GK Engineering, 91, LS-Ro, Dongan-gu, Anyang City, Kyunggi Province, Republic of Korea

³Non-Member, Director, Geotechnical Division, GK Engineering, 91, LS-Ro, Dongan-gu, Anyang City, Kyunggi Province, Republic of Korea

⁴Member, Head Manager, Research Institute, GK Engineering, 91, LS-Ro, Dongan-gu, Anyang City, Kyunggi Province, Republic of Korea

ABSTRACT

Recently, offshore wind farms are increasingly expected, because there are huge resource and large site in offshore. Jeju island has optimum condition for constructing a wind energy farm. Unlike the mainland, Jeju island has stratified structure distribution between rock layers sediments due to volcanic activation. In these case, it can be occur engineering problems in whole structures as well as the safety of foundation as the thickness and distribution of sediment under top rock layer can not support sufficiently the structure. In this paper, the settlement and stress distribution is predicted by numerical analysis when the mono-pile base are constructed on various soft layer between stratified structure. To determine the settlement of the pile foundation supported on stratified rock layer, the geological investigation at the 3 regions and the results of laboratory experiments of the stratified rock layer is required.

요 지

최근 해상풍력발전 단지 조성은 많은 양의 에너지를 창출할 수 있어 그 기대는 점차적으로 증가하고 있다. 특히 제주도는 풍황이 우수하여 해상풍력발전 시스템 운영을 위한 최적의 대상지이기는 하나, 화산활동에 의해 형성된 지형으로 육지부와 달리 기반암인 현무암층 사이에 연약층인 화산쇄설물 및 공동이 불규칙하게 발달된 층상구조로 이루어져 있다. 즉, 해상풍력발전기 기초라면 기반암에 연약한 화산쇄설물이 존재하는 경우 풍력발전기의 주기적인 진동으로 지반의 강도가 저하됨은 물론 장기침하로 인하여 풍력발전기의 장기적인 안정성 확보가 어려울 수도 있다. 본 논문에서는 제주도의 3개 지역에 대한 지표지질조사와 실내실험을 통해 도출된 설계정수를 파악한 후, 수치해석을 통하여 층상구조로 이루어진 연약지층에 모노파일 설치시 연직변위와 응력분포 결과를 도출하였다.

Keywords : Offshore wind turbine foundation, Stratified structure, Soft layer, Numerical analysis, Settlement

1. 서 론

최근 해상풍력은 기존 육상풍력이 가지고 있는 소음, 경관 및 건설지의 부족 등으로 인한 개발상의 한계를 극복할

수 있는 에너지 산업이 기반을 제공할 수 있을 것으로 기대되어 그 규모가 세계적으로 점차 증가하는 추세에 있다. 현재 우리나라에서도 해상풍력발전 시스템 구축을 위한 원천기술 확보 및 향후 대규모단지 조성을 위한 최적 입지 분석에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 여러 대상 지역중 제주도 해상은 풍황 조건이 우수하여 향후 해상풍력발전 시스템의 운영을 위한 대상지로서 적합하다고 판

Received 22 Nov. 2013, Revised 11 Dec. 2013, Accepted 12 Dec. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-31-343-1005; Fax: +82-31-343-1004

E-mail address: smearjun@hanmail.net (J. J. Park)

단되어 현재 해상풍력발전 조성 및 계획이 집중되고 있다 (Jang et al., 2012).

제주도는 오랜 기간 화산활동에 의해 형성된 지형으로 육지부와 달리 기반암인 현무암층 사이에 연약층인 화산쇄설물 및 공동이 불규칙하게 발달된 층상구조로 이루어져 있다(Kim, 2006). 이러한 연약층은 점토, 모래층의 미고결 고토양층과 화산분출에 의해 생성된 다공질의 스킨리아층, 그리고 용암이 흐르면서 용암 경계부를 중심으로 생성된 클링커층과 수cm~수m의 용암동굴의 공동 등을 말하는데 이러한 연약층이 제주도 기반암내 층상으로 발달하는 사실이 확인되었다. 따라서 해상풍력발전기 기초라면 기반암에 연약한 화산쇄설물이 존재하는 경우 풍력발전기의 주기적인 진동으로 지반의 강도가 저하됨은 물론 장기침하로 인하여 풍력발전기의 장기적 안정성 확보가 어려울 수도 있다.

이에 해상풍력발전기 하부 기초 기반암의 안정성 확보를 위하여 기반암내 연약층을 제거하거나, 필요한 강도로 개선 요구시 지반보강이 필요하다. 즉, 해상풍력발전시스템의 설계수명 동안 상부 구조물을 풍력, 조력, 파력 등에 의한 수평하중과 블레이드의 회전에 의해 발생하는 진동하중 등으로부터 안정적으로 지지할 수 있는 기초구조물의 설계 뿐만아니라 향후 대형 항만구조물 공사나 육상부토목공사가 예상되므로 이러한 기반암내 특수한 층상구조로 발달된 연약층에 대하여 제주도 지반조건에 적합한 지반설계기술 연구의 필요성이 대두되고 있다.

본 논문은 제주도 연약층의 공학적 특성을 파악하기 위하여 연구지역의 현장조사와 실내시험을 수행하였다. 연구지역 3개소에 대하여 유수지 단면에 대한 지표지질조사 후, 시추조사공에 대하여 공내재하시험 및 물리검층 등의 현장조사와 더불어 채취된 시료로 전단강도시험 등 실내시험을 실시하여 수치해석시 입력자료로 활용하였다. 또한, 연약지층이 분포하는 층상구조에 모노파일기초를 설치함에 있어 암반 및 기초의 영향, 상부 하중 작용시 파일 기초 선단부의 응력 및 변형에 대한 거동특성을 규명하기 위해 연약지층의 분포위치를 다양한 유형으로 달리하여 3차원 유한요소해석을 실시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 제주도 연약층의 지질학적 특성

제주도 해저 지반은 수차례 용암 분출에 의해 생성된

층상구조를 이루며, 층상구조내 스킨리아(scoria), 클링커층(clinker), 응회암 퇴적층(tuff)과 공동과 같은 연약층이 발달하는 특성이 있어 해상풍력발전기 기초나 대형 구조물이 설치될 시 지반개량이 필요하다.

스킨리아층은 마그마가 대기중으로 방출되어 그 내부의 휘발성 성분이 빠져나가 많은 기공이 생긴 화산분출물의 일종으로 괴상의 다공질, 어두운색을 띠며 화학 성분상으로 주로 안산암질에서 현무암질을 나타낸다. 대부분의 스킨리아는 비중이 1보다 커서 물에 가라앉으며, 낮은 마그마 점성도, 급속한 휘발성분의 확산, 거품 성장, 응집력과 거품 터짐에 의해 조직적인 차이가 발생한다.

제주도의 스킨리아층은 각 분석구(오름) 지역을 중심으로 불규칙하게 제주도 전역으로 광범위하게 분포하며, 화산분출의 특성에 따라 성분 및 고결정도 등에 의해 다양한 양상을 보인다.

Nam et al.(2008a, 2008b)은 스킨리아의 지반공학적 특성으로서 점착력은 2.22~2.33MPa, 내부마찰각은 37.05~47.60°, 일축압축강도는 13.37(습윤)~20.79MPa(건조), 압열인장강도는 1.67(습윤)~2.86MPa(건조)임을 나타내었다. 또한 스킨리아는 색상에 있어서 적갈색, 황갈색, 검정색 및 암회색으로 크게 구별 할 수 있으며 이들 중 적갈색 스킨리아가 가장 많이 분포 하는 것으로 조사되었다.

클링커층은 일반적으로 아아용암에서 생성되는 약층으로써 용암이 흐르는 동안 상부와 하부는 굳게 되는데, 표면은 굳어 있고 내부는 계속 유동이 일어나 상부에 굳은 표면은 쉽게 깨져서 용암과 함께 운반되어 용암의 상부에 굳어 있는 암석이 깨진 것을 클링커라 한다. 이러한 클링커층은 계속된 화산작용에 의해 지중에서 다공질성의 지층으로 발견되기도 하며 용암류의 표면부에 해당하는 암석이 부스러진 것으로 다량의 기공을 함유하고 있는 것이 특징이다.

클링커층을 생성하는 아아용암 중에 암괴상 아아용암류를 곱자왈(gotjawal)이라 하는데 이는 대력(256mm이상), 중력(64~256mm), 소력(2~64mm), 미세력(2mm이하)의 암괴를 포함하며 용암판-클링커성 조직과 클링커-블록성 조직으로 나누기도 한다(Song and Yoon, 2002).

제주도 지역의 응회암퇴적층은 부분적으로 준고결 퇴적층이며 풍화가 진행되어 기반암인 용암층과 층상으로 발달하여 지반공학적으로 연약층에 해당한다. 용암층 내 발달하는 연약층의 주요 퇴적층은 연장성이 일정하지 않으며 곳에 따라 구성물질의 차이가 많다. 대부분 화산회와

Fig. 1. Geological condition of settlement calculation for foundation on isotropic, layered and transversely isotropic rock

이암, 사질응회암층이며 용암층과 접촉부에는 클링커층과 역암들이 발달하기도 하며 대부분 준고결층에 해당한다.

또한, 주요 지질학적 특징중 하나인 용암동굴은 점성이 낮은 용암의 표면이 고결되고, 내부는 미고결 상태에서 연속적인 흐름이 발생하여 굳은 표면과 내부 사이에 틈이 생겨 공동이 형성되었다. 용암동굴은 일반적으로 파호이호이 용암에 흔히 형성되며, 제주도 곳곳에 용암동굴의 붕락에 의한 함몰지가 분포한다. 대부분 지표에서 관찰되는 용암동굴은 길이 2~3m, 폭 0.5m인 타원형으로 규모가 작고, 현무암질 용암 내 다양한 형태의 소규모 동굴이 확인되었다.

2.2 층상지반 형태 및 응력분포

해상 풍력발전 시스템의 기초는 상부 구조물로부터 전달되는 자중에 의한 고정하중 외에도, 풍력, 조력, 파력 및 블레이드의 회전에 의해 지속적으로 발생하는 동적 진동 등을 고려하여야 하므로, 대부분 암반상에 지지되는 암반 지지 기초를 적용하고 있다.

암반상의 기초는 두 가지의 차별화된 특성을 갖는데, 암석이 지반보다 큰 하중을 지지할 수 있다는 점과 암반 내부에는 불연속면 등의 영향으로 암반은 무결암에 비해 현저하게 작은 강도를 갖는다는 것이다. 암반에서 침하 및 지지력에 기인되는 유형의 파괴는 작은 강도의 암반층 또는 풍화, 세굴이나, 용해작용에 의해 형성되는 공동이 구조물 하부에 분포되는 경우이다. 가장 큰 위험 잠재성을 갖는 조건은 용해공동이 구조물 하부에 근접하여 형성될 수 있는 석회암 지대에서 존재하며, 이런 환경에서는 기초 영역이 주로 얇은 조개껍질 모양의 암석으로 이루어진다. 이런 조건하에 있는 기초의 파괴거동은 편칭 및 전단파괴, 또는 비교적 드물게 휨 및 인장파괴를 보일 수 있다. 또한, 상대적으로 압축성이 큰 두꺼운 암반층 상부에 단단하고

얇은 암반층이 분포되는 조건에서도 존재 되는데, 이런 경우에는 하부 압축성 층의 압축으로 인하여 침하가 발생할 수 있기 때문이다.

상당한 두께로 분포되는 약한 암층 위에 놓인 얇은 두께의 강한 암층 상에 기초가 설치되는 경우에는 3가지의 파괴 메커니즘이 있다. 기초가 상부의 강한 암층을 관통하는 편칭 파괴, 상부 암층이 좌굴 또는 휨에 의한 파괴, 복합된 두 층 시스템의 침하에 의한 파괴가 있다. 상부층 암이 하부층보다 현저히 더 큰 변형계수를 갖는 경우, 상부층이 대부분의 하중을 지지하게 되며, 기초의 안정성은 주로 상부 층의 지지력에 의해 좌우된다.

층상 구조를 이루는 기초의 침하량 산정시 각층의 변형 특성을 고려하여 탄성이론으로 침하량을 산정할 수는 있으나, 변형계수비와 층 두께가 침하크기에 미치는 영향을 검토하기 위해서는 정밀해석을 수행하여야 하며, 층상지반이 경사지고 불균질하게 분포하는 경우에는 수치해석적 방법이 요구된다. 층상구조를 이루는 기초의 분포형태는 Fig. 1과 같다.

Peattie(1962)는 강한 암층이 상대적으로 약한 암층 위에 놓이는 층 구조의 암반에서는 상부층이 하중의 대부분을 지지하게 되므로 이 층의 응력수준은 하부층보다 더 큰 응력이 유도됨을 제시하였다. Fig. 2는 두층으로 이루어진 시스템에서 연직방향 응력분포와 상대 변형계수의 변화를 나타낸 것으로서, 변형계수비가 100인 경우에는 상부층에서 실질적으로 전 하중이 지지되는 것을 알 수 있다 (Winterkorn & Fang, 1975).

포장층에 대해 구해진 응력분포 계산법의 제한성은 층들이 서로 수평을 이루며 균등한 두께를 가져야 한다는 점이다. 이런 조건들을 적용할 수 없는 많은 지질학적 환경에서 층상의 암반내에 유도되는 응력을 구하기 위해서는 본 연구에서는 수치해석적 방법을 적용하였다.

Fig. 2. Vertical normal stress beneath center of uniformly loaded circular area at the surface of two-layer elastic system

3. 제주도 연약층의 현장조사 및 실내시험

본 연구에서는 해상풍력발전기가 설치될 제주 해역이 육지부 해역과 달리 화산분출과정에서 수차례 용암의 작용으로 다양한 형태의 지질 및 지형특성을 가지고 있으며, 특히 해저면에 노출된 불규칙한 암반분포와 국지적인 퇴적물이 복잡하게 혼재되었고, 층상의 암반내 연약층이 발달하는 것으로 나타났다. 해상시추조사 시 연약층 중 점토층은 코어 회수가 어느 정도 되었으나, 스코리아나 클링커층 등의 화산쇄설층은 시추시 코어 회수가 매우 불량하였다. 따라서 연약층의 공학적 특성을 파악하기 위하여 제주도 동북해안 인근의 도로공사 현장의 유수지 지역을 선정하여 육상부에서의 시추조사를 수행하였다.

3.1 조사지역 현황

제 2 유수지는 지표면에서 유수지 바닥까지 약 7.3m 깊이로 되어 있으며 회색~암회색의 현무암 용암층이 2~3매 발달하며 용암층 사이에는 다양한 클링커층이 발달하였다. 제 4 유수지는 지표면에서 유수지 바닥까지 약 8.2m 깊이로 되어 있으며 회색~암회색의 현무암 용암층이 상부에 발달하며 하부 용암층과의 경계부는 스코리아층과 클링커층이 불규칙하게 발달하였다. 제 10 유수지는 지표면에서 유수지 바닥까지 약 5.7m 깊이로 되어 있으며 회

색~암적색의 현무암 용암층이 여러 매 발달하며 용암층 내에는 소규모 공동이 여러 곳에서 발달하였다. 제주도의 대표적인 연약층인 스코리아 층의 지반공학적 물성값을 도출하기 위하여 부대오름지역의 스코리아층에서 시료를 채취하였고, 그 결과 암적갈색의 스코리아층으로 다공질의 스코리아층이 스펀터층으로 발달하기도 하며, 스코리아층내 용암판이 발달하기도 하였다.

3.2 현장조사 및 결과

제주도 연약층의 공학적 특성을 파악하기 위하여 연구지역에 대하여 현장조사를 수행하였다. 현장조사는 연구지역 3개소에 대하여 유수지 단면에 대한 지표지질조사와 시추조사를 수행하였으며 시추조사공에 대하여 공내재하시험 및 물리검층 등을 실시하였다.

3.2.1 제 2 유수지

제 2 유수지 지역에서는 유수지 단면 정밀지표지질조사를 실시하여 연약층의 특성을 조사하였으며 시추조사 2공을 수행하여 지반상태 파악과 공내시험을 수행하였다. 시추결과 연약층에 해당하는 클링커층과 클링커에 의한 파쇄구간이 있으며, 암회색에서 갈색의 현무암과 연경암이 교호하고 있다.

연약층에 대한 상세지표지질조사 결과, 암회색 현무암으로 상부 지표면이 거의 기반암으로 구성되었고, 일부구간은 오목형의 토층이 불규칙하게 분포, 기반암인 현무암 용암층 사이에 협재된 클링커층과 스코리아층이 혼합된 연약층이 발달하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 연약층은 유수지 바닥부를 중심으로 상부에 약 1.0~2.0m 두께로 발달하며, 연약층 상부는 용암층 이동에 의해 용암층이 부스러지며 형성된 클링커층이 발달하였다. 이는 경계가 거의 수평 N30~50E/10NW 방향으로 경사지면서 발달하는데 경계부는 명확하며 미립의 토사층으로 구성되었다.

연약층은 클링커층과 다공질의 스코리아와 혼합되어 경계가 불분명하게 발달하였다. 용암층 하부 연약층은 용암이 흐르면서 파쇄되어 갈리면서 형성된 미립의 클링커성 연약층이 발달하며 하부는 용암판에 의해 불규칙하게 발달하고 있다. 또한 상부 지표에서 시추작업시 용암층내 균열면을 따라 시추용수가 유출되기도 하여 분리면은 개구성이며 약한 공동의 발달을 암시한다.

(a) Scoria in lava bed

(b) Boundary on upper and lower of scoria

(c) Coexistence of scoria and clinker

Fig. 3. Progress of soft layer in 2 reservoir

(a) Columnar joint of upper on soft layer

(b) Irregular conjugation of soft layer

(c) Ellipse Cave

Fig. 4. Progress of soft layer in 4 reservoir

(a) Lava bed of various color

(b) Vesicle band in basalt

(c) Ellipse Cave

Fig. 5. Progress of soft layer and bed rock in 10 reservoir

3.2.2 제 4 유수지

제 4 유수지 지역에서는 유수지 단면 정밀지표지질조사를 실시하여 연약층의 특성을 조사하였으며 시추조사 1공을 수행하여 지반상태 파악과 공내시험을 수행하였으며, 시추결과 연약층에 해당하는 파쇄대와 클링커층이 혼재하였다.

연약층에 대한 상세지표지질조사 결과, 본 유수지는 암회색~연회색의 조면암질 현무암이 우세하게 분포하며 상부 지표면은 자갈 등의 매립층으로 암반 노두와 직접 접하고 있다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 연약층은 매우 불규칙하게 분포하고 있으며, 조면암질현무암층 내에서는 높이 10cm, 폭 80cm, 길이 100cm의 타원형태의 소규모의 공동이 발달하였다. 이는 용암이 지표면을 따라 흐르면서 온도차에 의한 상부부분이 굳고 용암 내부에는 유동성 흐름으로 용암동굴이 형성되게 된 것으로 판단되며, 용암의 층은

성분의 차로 인하여 약 3~10cm의 두께를 나타내었다. 상부 연약층 상부는 상부 용암과의 경계부가 분명하며 접촉면은 미세력의 클링커층이 발달하며 연약층은 매우 불규칙하게 발달하고 용암 상부는 용암 냉각에 의해 생성된 주상절리가 개방된 균열로 발달하고 있다.

3.2.3 제 10 유수지

제 10 유수지 지역에서는 유수지 단면 정밀지표지질조사를 실시하여 연약층의 특성을 조사하였으며 시추조사 1공을 수행한 결과, 절리면에 점토로 충전되었고 소규모 공동이 위치하는 지반상태를 파악할 수 있었다.

상세지표지질조사 결과, 본 지역은 회색, 암회색과 암갈색의 현무암으로 구성되며 Fig. 5에서와 같이 스크리아나 클링커층의 연약층은 발달하지 않고 있으며 단지 여러개

Table 1. Experimental result of in-situ test in soft layer

In-situ test		Properties of engineering		
		2 reservoir	4 reservoir	10 reservoir
Pressuremeter test	Deformation modulus (E_s , MPa)	21,92	31,71	155,26
Down hole test	Velocity of P wave (V_p , m/s)	1,085	717	986
	Velocity of S wave (V_s , m/s)	502	319	459
	Dynamic elastic modulus (E_d , MPa)	1,396	569	1,166
	Shear modulus (G_d , MPa)	512	207	428
	Bulk modulus (K_d , MPa)	1,709	769	1,404
	Possion ratio (ν_d)	0,364	0,377	0,362
In-situ bulk density test	Bulk density (ρ_b , kN/m ³)	20,4	20,3	20,3

Fig. 6. Velocity of Elastic wave using Down hole test

의 용암층이 복잡하게 발달하였고, 소규모 공동이 여러 개 소 확인되었다. 암회색의 치밀한 현무암내 기공의 층이 대 상으로 발달하며 그 경계는 명확하게 구분되기도 한다.

Table 1에 나타난 바와 같이 연약층에 대하여 현장시험 및 물리검층을 실시한 결과, 유수지 절취면에서 확인된 연 약층(클링커, 스코리아, 공동)이 지표에서 수행한 시추조 사에서 확인되었다. 공내 물리검층을 실시한 결과 연약층 구간이 다른 구간과 공학적 특성 차이를 뚜렷하게 보여주 었다. Fig. 6은 다운홀시험에 의한 시추깊이에 따른 탄성 파 속도를 나타낸 것이다.

3.3 실내시험 결과

연구지역의 화산쇄설물 연약층인 스코리아 및 클링커 층에 대한 공학적 특성을 분석하기 위하여 조천우회도로 (함덕~동북) 건설공사 구간내 제 2유수지와 제 4유수지 및 제주시 조천읍 선흘리 부대오름 등 4개소에서 시료를 채

취하여 입도분석, 투수시험, 전단강도시험을 수행하였다.

3.3.1 현장 시료채취

화산쇄설물의 입도, 전단강도, 투수성을 평가하기 위하 여 교란시료를 채취하여 시험을 수행하였으며, 시료성형 시 현장의 단위중량과 함수비를 일치시키기 위하여 링 샘플러를 사용하여 불교란시료를 채취하였다. Fig. 7은 연약 층이 존재하는 지역의 사진전경으로서 제 2 유수지는 굴 착중 기반암 하부에 출현한 스코리아와 클링커층의 단면 을 나타내고 있으며, 입자크기가 자갈~호박돌 크기로 다 양하며, 매우 거친 상태를 보여주고 있다. 또한, 제 4 유수 지 굴착중 기반암 사이에 출현한 클링커 풍화대로서 제 2 유수지에 분포하는 스코리아층에 비해 단위중량이 무겁고 육안으로 볼 때 입자가 더 큼을 알 수 있다.

제주시 조천읍 선흘리에 위치하는 부대오름은 전형적 인 스코리아에 의해 형성된 오름으로 제주지역 여러곳에 서 출현하는 스코리아의 공학적특성을 분석하기에 가장

(a) Scoria of 2 reservoir

(b) Clinker weathered zone of 4 reservoir

(c) Scoria nearby Boodae-Orum

Fig. 7. A whole view of soft layer sampling

Table 2. Shear strength of pyroclastic material

Sample No.	c (kPa)	ϕ (°)	USCS
S-1	104	52.5	GP-GM
S-2	218	51.6	GP-GM
S-3	76	42.2	GP-GM
S-4	23	36.9	SW

적합한 시료를 채취할 수 있는 곳이라 할 수 있다. 따라서 부대오름 인근에서 2개의 교란시료와 링 샘플링을 실시하였고, 본 지역에 분포하는 스코리아는 조천우회도로 유수지 굴착공사시 출현한 연약층에 비해 입자크기가 작고 단위중량이 작게 나타났다.

3.3.2 전단강도 시험 결과

화산쇄설물인 스코리아와 클링커 풍화대는 자갈 또는 호박돌 크기의 입자를 포함하고 있어서 30cm×30cm 크기의 중형 직접전단시험기를 사용하여 시험을 실시하였다. 시험방법은 링 샘플링 결과로부터 현장시료의 함수비와 습윤단위중량을 구하고, 전단시험기내에 성형한 시료가 균등한 밀도를 가지도록 준비한 시료에 대하여 3회로 나누어 층다짐을 한 후, 수직응력을 각각 다르게 하여 강도정수를 산정하였다. Table 2에 나타난 바와 같이, 화산쇄설물의 전단강도는 점착력이 23~218kPa, 내부마찰각은 36.9~52.5°의 범위를 나타내었으며, 점착력과 내부마찰각은 비례하여 증가하는 경향을 보이는데 그 이유는 흙 입자의 형상과 관계가 깊은 것으로 판단된다.

4. 연약층 분포 특성을 고려한 수치해석

조사결과, 현무암의 기반암내 스코리아, 클링커, 공동 등 다양한 종류의 연약층이 발달하는 것으로 나타났다. 이러한 연약층이 발달하는 기반암에 해상풍력시스템의 기초

를 고려할 때 어떠한 영향을 미치는지에 대해 수치해석을 수행하여 연약 지층 구성에 따른 결과를 평가하여 연약층의 개량 여부와 적용성에 대한 평가를 수행하였다.

해상풍력시스템의 하부기초 구조물 설계는 지반지지력 확보를 위하여 해양지반조건뿐만 아니라 해양 하중조건에 대한 고려를 필요로 한다. 해상풍력 구조물은 일반적인 육상구조물과 비교하여 상부구조물로부터 전달되는 자중에 의한 고정하중이 상대적으로 적은 반면, 해상에서 발생하는 풍력, 조력, 파력 및 블레이드의 회전에 의해 지속적으로 발생하는 동적 진동이 주요 하중으로 작용한다. 따라서 해상풍력구조물을 설계 연한동안 안정적으로 지지할 수 있도록 하기 위해서는 사업지역의 해저지형 및 지질특성을 조사 분석하여 정확한 지질자료를 획득하는 것이 선행되어야 한다. 따라서, Fig. 8에서와 같이 말뚝기초 선단부를 기준으로 연약지층 위치를 각각 유형(case)별로 나타낸 것이다.

제주도는 기반암이 조기에 출현하고 있어, 퇴적층이 두껍게 분포하는 서남해안에 비해 연직방향 지지력 확보 측면에서는 유리하나, 연약층이 중간에 분포하는 충상구조를 이루고 있어 기초 설계시 충상구조의 영향에 따른 기초 침하를 고려하여야 한다.

해상풍력 기초에서는 지반특성 및 설계조건에 대한 분석이 필요하며, 기초 설계시 일반적으로 고려하여야 할 사항은 연직응력 및 변형(연직방향 반복하중 고려), 수평응력 및 변형(수평방향 반복하중 고려), 시공조건(말뚝 항타

Fig. 8. Stratified structure as Case of bed rock and soft layer

Table 3. Analysis condition as stratum

Type of case	Base layer	Soft layer distribution	Site of soft layer	Remarks
CASE 1	Soft rock	X	—	
CASE 2	Hard rock	X	—	
CASE 3	Soft rock	○ (thickness 1.0m)	GL(—) 15.0m	Distributed pile tip
CASE 4	Soft rock	○ (thickness 1.0m)	GL(—) 17.5m	Distributed pile tip 0.5D
CASE 5	Soft rock	○ (thickness 1.0m)	GL(—) 20.0m	Distributed pile tip 1.0D
CASE 6	Soft rock	○ (thickness 1.0m)	GL(—) 22.5m	Distributed pile tip 1.5D
CASE 7	Soft rock	○ (thickness 1.0m)	GL(—) 25.0m	Distributed pile tip 2.0D

분석, 공벽 안정성 및 그라우팅, 기타조건(내진, 해저면 안정성, 세굴 등) 등이다.

4.1 해석 조건 및 모델링

암반이 조기에 출현하는 제주지역의 특성상 연직방향 지지력 확보에는 무리가 없을 것으로 판단되나, 현장조사 결과 일부지역은 기반암층의 중간에 연약층이 1.0m 정도 층상구조로 분포하고 있는 것으로 파악되었다. 따라서, 모노파일의 층상지반에 위치하는 경우에 대해 MIDAS GTS 유한요소해석 프로그램을 사용하였으며, 상부 하중 작용 시 기초설치에 따른 하부 지반의 변위분포 및 응력분포 등을 예측하기 위해 연약층 분포위치를 달리하여 3차원 수치해석을 실시하였다.

즉, 기초형식은 20m 내외의 수심조건에서 적용성이 우수한 모노파일 기초를 대상으로 선정하였으며, 층상구조

상의 기초 설치시 기초 영향범위 등을 검토하여 기초 안정성 확보여부 등을 평가하였다. 기초 모델링시 모노파일을 빔요소로 적용하는 경우 해석시간 및 모델링이 간편한 장점이 있으나, 모노파일의 직경이 4,800mm로 대형이고 모노파일 주변의 그라우팅에 대한 효과 및 기초의 크기효과 등을 고려하기 어려워 침하량이 크게 산정되는 단점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 하부지반, 속채움 콘크리트 및 그라우팅은 솔리드(solid) 요소를 적용하였으며, 모노파일은 셸(shell)요소를 적용하여 모노파일의 실제 거동과 부합도록 모델링 하였다. 하부 지반은 Mohr-Coulomb 모델의 솔리드 요소로 모델링 하였으며, 속채움 콘크리트는 탄성모델의 솔리드 요소, 모노파일은 탄성모델의 셸 요소로 모델링 하였다.

Table 3에 나타난 바와 같이 해석 유형(case)은 연약층의 분포위치를 변수로 총 7가지 경우에 대하여 해석을 실시하였다.

Fig. 9. Diagram of pile cross section

Table 4. Dimensions of mono-pile

Diameter (mm)	Size of pile	Thickness (mm)	Elastic modulus (MPa)	Moment of inertia (m ⁴)
4,800	SPS 400	65	2,10E5	2,490

Table 5. Input soil properties of numerical analysis

Stratum	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	E_s (kPa)	ν
Soft layer	18	0	35	200,000	0.38
Soft rock	23	100	33	20,000,000	0.27
Hard rock	24	500	35	60,000,000	0.25
Grout	23	—	—	6,500,000	0.27
Filling reinforced concrete	23	—	—	25,181,000	0.27

본 연구에서의 해석 모델링은 Fig. 9에서와 같이 모노파일 내부는 속채움 콘크리트를 타설, 파일 외부는 그라우팅을 하는 것으로 하여 실제 시공조건이 적용된 인터페이스를 고려하였다. 3차원 수치해석시 수심이 20m이고, 모노파일이 수심에서 5.0m 돌출되어 있으며, 지지층에 15m 근입되는 조건으로 모델링 하였다. 층상구조가 기초 설치시에 미치는 영향을 검토하기 위해 연약층 위치를 변수로 하여, 지지층 하부에 연약층이 1.0m 층후로 0.5D, 1.0D, 1.5D, 2.0D 위치에 분포하는 것으로 가정하였다. Table 4

와 Table 5는 각각 모노파일의 설치제원과 지반조사 결과를 토대로 도출된 적용 물성치를 나타낸 것으로서 상부에서 3MW급으로 가정하여 작용하중인 16,500kN을 상부에서 재하하였다.

4.2 해석결과

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 3차원 수치해석을 통한 시공단계별 모델링과 해석 유형에 따른 하중재하시 전체변위

Fig. 10. Step of numerical analysis

Fig. 11. Displacement distribution as loading

Table 6. Vertical displacement with pile sector

Type of case	Vertical displacement (mm)			Remarks
	Pile head sector	Ground sector	Pile end sector	
CASE 1	2,97	0,86	0,55	Supported soft rock
CASE 2	2,95	0,86	0,55	Supported hard rock
CASE 3	3,72	1,51	1,28	Distributed pile tip
CASE 4	3,50	1,31	1,00	Distributed pile tip 0,5D
CASE 5	3,41	1,19	0,91	Distributed pile tip 1,0D
CASE 6	3,35	1,16	0,84	Distributed pile tip 1,5D
CASE 7	3,22	1,11	0,81	Distributed pile tip 2,0D

분포도를 도출한 결과이며, Table 6은 말뚝의 위치별 연직 변위 결과를 나타낸 것이다. 상부하중 재하시 모노파일의 침하량 검토결과 연약층이 존재하지 않는 기반암에 근접

되는 경우 암반의 강도에 의한 침하영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

결과, 모노파일 하부에 연약층이 분포하는 경우 선단부

에서 이격거리가 작을수록 침하량은 증가하였고(연약층이 존재하지 않는 유형 대비 침하량 8.4%증가), 이격거리가 증가할수록 연직변위는 연약층이 존재하지 않는 지반의 말뚝거동과 유사한 양상을 보이는 것으로 나타났다. 즉, 기초 하부의 연약층 존재는 말뚝기초 지반의 연직변형 및 응력 분포에 일정한 영향을 받는 것으로 판단된다.

또한, 연약층이 선단부에 분포하는 경우와 층상지반이 아닌 경우를 비교하면, 침하량의 차이가 말뚝 선단부의 경우 최대 0.75mm, 말뚝 선단부의 경우 최대 0.73mm로서, 암반지하 기초의 허용 침하량 기준에 의거 기초의 근입깊이 증가 및 추가 보강공법의 적용성 등을 판단하기에는 무리가 있다. 따라서, 연약층의 층후, 분포형태, 강도 특성에 따라 달라질 수 있을 것으로 판단되며, 해상풍력기초의 전체적인 거동이 연직방향의 하중조건 보다 수평방향의 하중조건에 의해 지배됨을 고려할 때 말뚝의 수평방향 안정성과 더불어 평가가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

제주도는 기반암이 조기에 출현하고 있어, 퇴적층이 두껍게 분포하는 서남해안에 비해 연직방향 지지력 확보 측면에서는 유리하나, 암반층 중간에 기공 및 클링커 등의 연약층이 분포하는 층상구조를 이루고 있어 기초 설계시 이런 스코리아층 존재의 영향에 따른 기초침하에 대한 고찰이 필요하다. 따라서, 모노파일의 스코리아 층에 위치하는 경우에 대하여 기초설치에 따른 암반 및 기초의 영향 및 상부 하중 작용시 파일기초 선단부의 응력 및 변형에 대한 거동특성을 규명하기 위해 기초하부 지반의 스코리아 층 분포위치를 변수로 3차원 유한요소해석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 조사지역에 대한 현장조사결과, 연약층은 클링커층과 다공질의 스코리아와 혼합되어 경계가 불분명하게 발달하였다. 또한, 용암층 하부 연약층은 용암이 흐르면서 파쇄되어 형성된 미립의 클링커성 연약층이 발달하였고, 용암 상부는 용암 냉각에 의해 생성된 주상절리의 개방 균열도 보였으며, 소규모 공동이 확인되었다.
- (2) 상부하중 재하시 모노파일의 침하량 검토결과, 연약층이 존재하지 않는 기반암에 근입되는 경우 암반의 강도에 의한 침하영향은 크지 않은 것으로 나

타났다. 모노파일 하부에 연약층이 분포하는 경우 선단부에서 이격거리가 작을수록 침하량은 증가하는 것으로 나타났으며, 이격거리가 증가할수록 연직변위는 연약층이 존재하지 않는 지반의 말뚝거동과 유사한 양상을 보였다. 즉, 기초 하부의 연약층 존재는 말뚝기초 지반의 연직변형 및 응력 분포에 일정한 영향을 받는 것으로 판단된다.

- (3) 암반에 근입된 모노파일지반의 연약층의 이격거리 변화를 가정하여 분석한 것으로서 연약층의 층후, 분포형태, 강도 특성에 따라 달라짐을 확인하였다. 따라서, 해상풍력기초의 전체적인 거동이 연직방향의 하중조건 보다 수평방향의 하중조건에 의해 지배됨을 고려할 때 상부에 연직하중 작용시 말뚝과 그라우트와의 거동에 대한 상세 모델링 기법 연구, 연약층 규모 및 위치에 따른 지반의 변형 및 응력 영향 범위 분석으로 제주지역 암반 특성에 맞는 기초 거동 규명 및 수평거동의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Jeju Institute for Regional Program Evaluation through the Leading Industry Development for Economic Region.

References

1. Jang, Y. E., Lee, J., Cho, S., Yoo, D. W., Choi, C. (2012), "A study on p-y curves for nearshore seabed of Jeju Island", *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, Vol.13, No.6, pp.73-81.
2. Kim, J. H. (2006), *A study on the mechanical characteristics and the strength in Pyoseonri basalt*, Thesis, Cheju National University.
3. Nam, J. M., Yun, J. M., Song, Y. S., and Kim, J. H. (2008a), "Analysis of engineering properties to basalt in Cheju island", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.17, No.1, pp. 13-21.
4. Nam, J. M., Yun, J. M., Song, Y. S., and Kim, J. H. (2008b), "Analysis of influence factors to compressive and tensile strength of basalt in Cheju Island", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.18, No.2, pp.205-215.

5. Peattie, K. R. (1962), *Stress and strain factors for three layer elastic systems*, Highway Research Board Bulletin, No. 342.
6. Song, S. T. and Yoon, S. (2002), "Lavas in Gotjawal terrain, Jeju Island, Korea No. 1. Jocheon-Hamdeok Gotjawal terrain", *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol.38, No.3, pp. 377-389.
7. Winterkorn, H. F. and Fang, H. F. (1975), *Foundation engineering handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York.