



[2016-9-WD-001]

원심모형실험을 이용한 해상풍력발전기 전문설치선의 스퍼드캔 제팅 시스템 성능 분석

조철희¹⁾ · 김도엽¹⁾ · 김명주¹⁾ · 구찬회^{1)*}

Evaluation of the Spudcan Jetting System for Wind Turbine Installation Vessel Using Centrifuge Model Test

Chul H. Jo¹⁾ · Do-Youb Kim¹⁾ · Myeong-Joo Kim¹⁾ · Chan-Hoe Goo^{1)*}

Received 30 May 2015 Revised 8 August 2016 Accepted 9 August 2016

ABSTRACT Wind energy is an important alternative clean energy source that will contribute to solving the renewable energy needs. In particular, higher wind speeds are available offshore compared to that on land. Therefore the offshore wind power generator can be adopted to generate much power. The wind turbine installation vessel (WTIV) is a new type of mobile jack-up vessel that is designed for the requirements of the offshore wind power industry. The elevating process for the jack-up legs of WTIV can be quite difficult because of the high extraction resistance caused by clay. In soft clay, a high suction force can develop around the spudcan attached to the end of the jack-up legs. Therefore, a jetting system is required to break the suction to pull out the legs. It is important to design a jetting system with an optimized piping and nozzle arrangement to allow easy operation. To evaluate the jetting system performance, it is essential that the model test be performed within the soil base. Spudcan jetting tests were performed in a geotechnical centrifuge. This study introduces the design of the jetting system considering the soft foundation and the centrifuge model test to verify the performance of the spudcan jetting system.

Key words Wind turbine installation vessel(해상풍력발전기 설치선), Centrifuge model test(원심모형실험), Spudcan(스퍼드캔), Jetting system(제팅 시스템), Penetration(관입), Extraction(인발)

Nomenclature

A	: area of the under side of the spudcan	W_{soil}	: weight of the soil on the spudcan
Q	: jetting flow rate	Δu	: excess hydrostatic pressure
Q_{shear}	: shear resistance of the soil on the spudcan	s_u	: undrained shear strength
Q_{side}	: friction between the spudcan and the soil	p_0'	: effective vertical stress at the penetration depth
Q_{base}	: resistance of the under side of the spudcan	k_0	: coefficient of earth pressure
$Q_{breakout}$	: sum of the resistance	α	: scale factor
		n	: centrifuge accelerate rate
		D_{model}	: diameter of the model spudcan
		$D_{prototype}$	: diameter of the prototype spudcan
		Q_{model}	: flow rate of the model spudcan
		$Q_{prototype}$	: flow rate of the prototype spudcan

1) Department Naval Architecture & Ocean Engineering,
Inha University E-mail: chanhoegoo@gmail.com
Tel: +82-32-860-8849 Fax: +82-32-860-8849

subscript

WTIV : wind turbine installation vessel

RPS : renewable portfolio standard

SPEnJ : single layer penetration and extraction without jetting

MPEnJ : multi layer penetration and extraction without jetting

SPEJ : single layer penetration and extraction with jetting

1. 서론

최근 환경 문제와 더불어 에너지 고갈에 대한 이슈가 부각되면서 풍력발전이 친환경 대체에너지원으로 각광받고 있다. 이에 따라 풍력발전은 세계적으로도 에너지 산업 가운데 가장 활발히 성장하고 있으며, 그 중 해상풍력발전은 육상풍력발전에 비해 주기적이고 강한 풍속을 이용한 대용량 발전이 가능하다. 또 소음 및 지리적 제약이 적어 전 세계적으로 대규모 해상풍력발전단지 개발이 빠르게 진행되고 있다(Vazques et al., 2005).^[1] 국내의 경우 신재생에너지 의무할당제(RPS; Renewable Portfolio Standard)가 시행됨에 따라 신재생에너지원에 대한 수요가 증가하고 있으며 의무할당제 충족을 위해 대규모 해상풍력발전단지 건설이 논의되고 있다.

해상풍력발전기 설치 공사 시 해상풍력발전기전문설치선(WTIV)의 작업 레그를 해저면으로 내려 선체를 해수면 위로 올려 고정시켜 조류력 및 파력 등의 해양 외력의 영향



Fig. 1. 해상풍력발전기 설치선(Wartsila and Aker Solutions)

을 최소화시킬 수 있다. WTIV의 레그가 지반에 깊이 관입되거나 오랜 기간 관입되어 있는 경우 레그 회수 시 지반의 저항으로 인해 어려움이 따른다. 이 때 레그 하단부 스퍼드캔에 설치된 제팅 시스템으로 해수를 분사시켜 지반의 저항을 감소시킬 수 있다. 그러나 현재 국내에서 스퍼드캔 제팅 시스템 설계가 소개된 사례(조철희 등, 2013)^[2]는 있으나 본격적인 실험으로 검증된 연구 사례가 부족하다.

본 연구에서는 국내 서남해안 연약지반에 적용 가능한 WTIV의 제팅 시스템을 설계하고, 원심모형실험을 통해 스퍼드캔 제팅 시스템의 성능을 검증하였다.

2. 토양저항력 산정

작업을 마친 WTIV는 부양된 선체를 낮추어 수면에 부유하게 하고 레그 회수를 진행하게 된다. 레그 회수를 위한 인발력은 토양 저항력을 극복해야 한다. 인발력 및 토양 저항력은 가이드라인 “InSafeJIP”을 근거로 산정하였다(Osborne et al., 2011).^[3]

2.1 인발력(Uplift Force) 산정

WTIV의 레그 인발 가용 용량은 선체의 부력 및 작업 rack & pinion의 성능에 영향을 받고, 선체 부력에 의해 가장 큰 영향을 받는다. WTIV의 선체 주요요목 및 작업 rack & pinion의 용량이 결정되면 해당 선박의 인발력 산정이 가능하다. 본 연구에서는 개념설계 단계인 WTIV 주요요목(Table 1)을 고려하여 인발력(uplift force)을 산정하였다.

설계 주요요목에 따라 산정된 부력은 약 25,789톤이며 4

Table 1. 설계 WTIV 주요요목

Length [m]	124.8
Breadth [m]	40.0
Depth [m]	11.0
Draught [m]	6.0
Block Coefficient	0.84
DWT [ton]	6,000
LWT [ton]	12,000
기타 [ton]	2,000

개의 레그에 각각 6,447톤이 작용한다. 작업 rack & pinion의 용량 278톤을 고려한 인발력은 레그 당 6,725톤이다.

2.2 토양 저항력(Breakout Force) 산정

토양 저항력을 산정하기 위한 계산 조건은 다음과 같다.

- Pre-loading : 레그 당 8,000톤
- 스퍼드캔 형상 : 팔각, 높이 3.77m
- 스퍼드캔 아랫면 면적 : 112.8m^2

2010년 전력연구원에서 수행한 서해안 해상풍력발전단지 예정부지의 8공에 대한 표준관입시험 결과를 토대로 토양 저항력을 산정하였다. 토양 저항력 산정의 주요인자는 스퍼드캔의 면적, 토질 물성 및 관입 깊이이다. 스퍼드캔의 관입깊이는 공동연구기관(서울대학교)에서 수행한 관입 깊이별 bearing capacity 자료와 pre-loading 8,000톤을 기준으로 스퍼드캔의 관입깊이를 결정하였다.

Osborne^[3]이 제안한 스퍼드캔에 작용하는 토양 저항력 $Q_{breakout}$ 은 다음의 식으로 표현된다.

$$Q_{breakout} = Q_{shear} + Q_{side} + W_{soil} + Q_{base} \quad (1)$$

여기서 Q_{shear} 는 스퍼드캔 상부 토질의 수직면에 대한 전단저항력, Q_{side} 는 스퍼드캔 측면에 발생하는 마찰력, W_{soil} 는 스퍼드캔의 상부토적 토질의 무게, Q_{base} 는 스퍼드캔 바닥면의 저항력이며 각각의 저항력은 표준관입시험 데이터 중 깊이별 토질의 비배수 강도, 유효 단위 무게 및 스퍼드캔 형상 정보를 이용하여 산정하였다.

관계식에 의해 산출된 최대 토양 저항력은 pre-loading에 의해 36m까지 관입된 상황에서 발생하며 약 5,500톤으로 계산되었다. 8공의 지질조사 지점의 경우 약 5,500톤의 토양 저항력이 산정되었으나, 서남해안 해저 지질은 인접한 구간일지라도 매우 다른 다층 해저토 구간으로 구성되어 있고, 토질 물성 또한 상당한 편차를 보인다. 따라서 정확한 해상풍력발전 단지 예정 지역의 지질조사가 필요하고, 레그의 설치와 인발에 더욱 불리한 구간이 존재할 수 있다. 따라서 제팅 시스템 설계 시 최소 5,500톤 이상의 토양 저항력을 고려하여야 한다.

WTIV의 인발력이 토양 저항력보다 작아 레그 회수가 어려울 시, 작업 rack & pinion의 구조적 하중 과다 발생 시, 또는 해상풍력발전 단지 조성을 위해 신속한 작업 필요 시, 비상상황의 WTIV 신속한 피항 등의 경우에 제팅 시스템을 이용하여 레그의 인발을 보조할 수 있다.

3. 제팅 시스템 설계

3.1 제팅 유량 산정 및 펌프 결정

레그 인발 시 스퍼드캔 하부의 토질 접촉면에서는 간극이 형성되고 부의 간극 수압이 발생하여 인발저항이 발생한다. 이를 제팅 시스템을 통해 스퍼드캔 하단부에 해수를 분사시키게 되면 부의 간극 수압이 해소되고 인발저항이 감소한다(Gaudin et al., 2011).^[4] 연속 방정식에 따라 제팅 분사 유량은 다음 식을 통해 산정된다.

$$Q = A \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

여기서 A 는 스퍼드캔의 하단면 면적($= 112.8\text{m}^2$)을 뜻하고, dz/dt 는 스퍼드캔의 인발속도($= 4\text{m/hr}$)로 스퍼드캔 한기 당 약 $451\text{m}^3/\text{hr}$ 의 제팅 유량이 요구된다.

WTIV는 일반적으로 하나의 제팅 펌프로 2기의 스퍼드캔에 해수를 동시 공급한다. 본 연구에 해당하는 WTIV는 4기의 레그를 갖고 있으며 총 2기의 제팅 펌프가 필요하다. 또한 2기의 스퍼드캔에 각각 $451\text{m}^3/\text{hr}$ 의 제팅 유량을 확보하기 위해서는 $902\text{m}^3/\text{hr}$ 이상의 펌프가 요구되고 펌프의 목표 제팅 유량을 $1,000\text{m}^3/\text{hr}$ 로 결정하였다. 이에 해

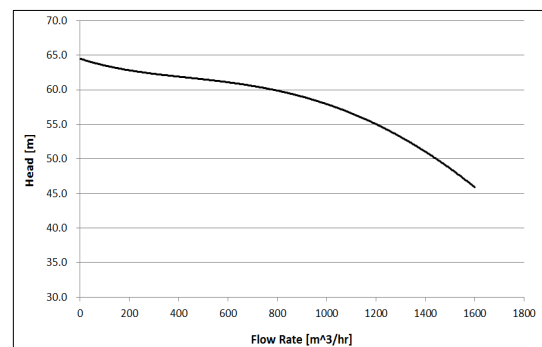


Fig. 2. 제팅 시스템 펌프의 성능곡선

당하는 대용량 해상용 펌프의 성능곡선은 다음의 Fig. 2와 같다. 유량 $1,000m^3/hr$ 로 작동 시 분사되는 유압은 약 $5.7bar(= 58m)$ 이다.

3.2 제팅 유압 산정

강한 제팅 분사에 의해 스퍼드캔 주변의 지층에 균열이 발생하면 음압이 발생하는 스퍼드캔 면으로 제팅 유체가 전달되지 못하고, 균열된 경로로 유출될 수 있다. 따라서 스퍼드캔 주변 지층의 전단파괴를 발생시키지 않는 범위 내에서 제팅 유압이 결정되어야 한다. 점성토 지반에서의 천공 벽면이 전단파괴를 일으키는 과잉수압은 Aldridge^[5]이 제안하였으며 다음의 식과 같다.

$$\Delta u = 2 \cdot s_u + p_o' \quad (3)$$

$$\Delta u = s_u + k_o \cdot p_o' \quad (4)$$

$$\Delta u = 2 \cdot s_u + p_o' (2k_o - 1) \quad (5)$$

여기서 Δu 는 과잉수압, s_u 는 비배수 전단강도, p_o' 는 수직유효응력, k_o 는 정지토압계수를 나타내며 현장 표준관입시험에 의한 토질의 비배수 강도, 유효 단위 무게, 유효응력 해석에 의한 마찰각 및 관입 깊이 정보를 이용하여 산정하였다.

스퍼드캔 주변 지층의 전단파괴 유발 압력은 위의 세 가지 식을 모두 만족시키는 범위로 설정하여야 하므로 결과 값 중 최소의 과잉수압을 선택하여야 한다.

WTIV 목표 구동환경의 토질 물성 및 스퍼드캔 관입심도를 기준으로 스퍼드캔 주변 토질의 전단파괴 유발 압력이 $2.38bar$ 로 산정되었으며 제팅 노즐에서의 분사 유압 상한치 또한 $2.38bar$ 로 결정하였다.

3.3 제팅 배관 설계

제팅 시스템의 구동 환경은 수심 약 45m, 스퍼드캔 관입심도 약 15m 및 WTIV의 상갑판에 배치된 펌프를 고려한 제팅 수직 배관의 길이는 약 70m이나, 서남해안의 수심 및 해저질의 편차를 고려하여 배관 해석을 위한 수직 배관의 길이를 80m로 설정하였다. 상갑판의 펌프로부터 레그까지의 거리는 약 32m로 설정하였으며, 1기의 펌프에서 2기의 레그로 분관이 이루어진다. 제팅 펌프의 성능, 각 배관의

내경, 분기관, 곡관, 밸브, 배관의 길이 등을 설정하였으며 압력손실에 의해 노즐에서의 압력과 유량 강하가 발생하지 않도록 제팅 배관을 설계하였다.

스퍼드캔 1기 당 총 18개의 노즐이 배치되고, 각 노즐에서는 약 $27.78m^3/hr$ 의 유량으로 해수가 분사된다. 스퍼드캔 관입 시 노즐에 침투된 토질은 약 $5.5bar$ 의 강한 유압 분사로 해소시키고, 레그 인발을 시작할 때는 최대 유압 $2.38bar$ 이하로 제팅을 수행함으로써 음압 발생 방지 및 상승력을 유도한다. 설계된 제팅 시스템은 배관 해석 프로그램 PIPENET Standard module을 이용하여 관내 유동 및 노즐에서의 유체 특성을 분석하였으며 제팅 시스템 배관해석의 예는 다음의 Fig. 3과 같다.

4. 원심모형실험

비선형 특성이 강하고 예측이 어려운 비배수 상태 토질에서의 스퍼드캔의 거동을 파악하기 위해서는 실스케일의

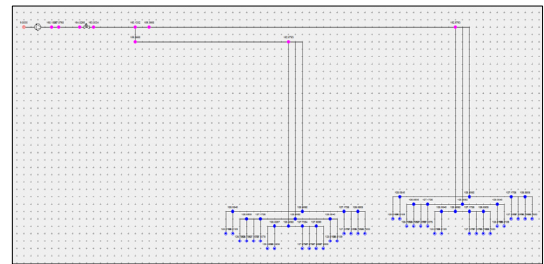


Fig. 3. PIPENET을 이용한 제팅 배관해석 예



Fig. 4. K-water 지오센트리퓨지 실험센터

스퍼드캔을 이용한 지질공학적 모델 실험이 요구되지만 실험해역에서의 실험에는 모델 크기, 실험장비, 모니터링 시스템, 해양환경, 연구 개발비 등의 많은 제약이 따른다.

이와 같은 제약은 원심모형실험을 이용하여 축척에 따른 자중 응력의 차이를 원심가속도를 통하여 보완하고, 실스케일과 동등한 실험조건을 모사할 수 있다(Fig. 4).

4.1 모형 스퍼드캔의 제팅 시스템 설계

설계된 스퍼드캔 및 제팅 시스템의 성능 검증을 위해 K-water 연구원의 원심모형실험기를 이용하였으며 100g의 환경 구현을 통해 스퍼드캔 모형을 1/100로 축소시켰다(Fig. 5, Fig. 6). 축소모형의 제팅 노즐 직경 및 유량 산정은^[6](Gaudin et al., 2011)에 소개되었으며 다음의 식과 같다.

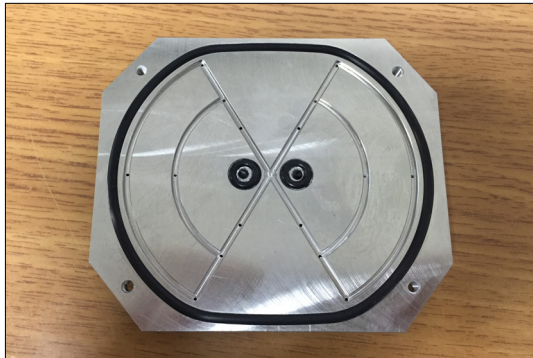


Fig. 5. 1/100 모형 스퍼드캔 노즐 배치

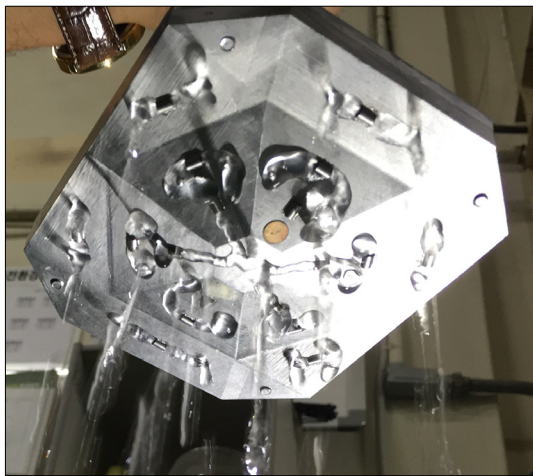


Fig. 6. 1/100 모형 스퍼드캔

$$D_{model} = \alpha \frac{D_{prototype}}{n} \quad (6)$$

$$Q_{prototype} = \frac{n^2}{\alpha^3} Q_{model} \quad (7)$$

여기서 D_{model} , $D_{prototype}$ 은 각각 실험모형 및 실스케일 모델의 등가면적에 대한 직경을 뜻하며 $Q_{prototype}$, Q_{model} 은 실스케일 모델 및 실험모형의 제팅 유량을 뜻한다. α 는 노즐 직경 축소에 따른 감소 계수를, n 은 원심가속 지수이다. 위 관계 식에 따라 설계된 모형 스퍼드캔의 제팅 노즐 직경은 1mm, 제팅 유량은 $0.05m^3/hr$ 이다.

관입된 스퍼드캔의 인발 거동 시 스퍼드캔 하부 면에 발생하는 전압력 및 공극압력의 변화를 측정하기 위하여 스퍼드캔 모형의 하부 면에 1MPa 용량의 TPT(Total Pressure Transducer)와 PPT(Pore Pressure Transducer)를 각각 대칭으로 설치하였으며, 제팅 분사 유/무 실험 비교를 통해 제팅 성능 검증을 위한 데이터로 활용한다.

4.2 원심모형실험 준비

서남해안의 연약지반 토질에서의 제팅 시스템의 성능을 검증하고 신뢰성을 확보하기 위해서 실험 토질 조성이 중요하다. 실제로 서남해안 토질 조사 결과 지층 깊이별 다양한 토질로 구성되어 있으며, 모래질의 토질에서는 스퍼드캔 인발 시 스퍼드캔 하단 면의 토질에 배수 작용이 상대적으로 빠르게 발생하여 점착력 및 인발 저항력이 크게 발생하지 않는다. 반면 점토질의 지반에서는 스퍼드캔 하단면에 인발 저항력이 크게 발생하므로 본 연구에서는 점토질

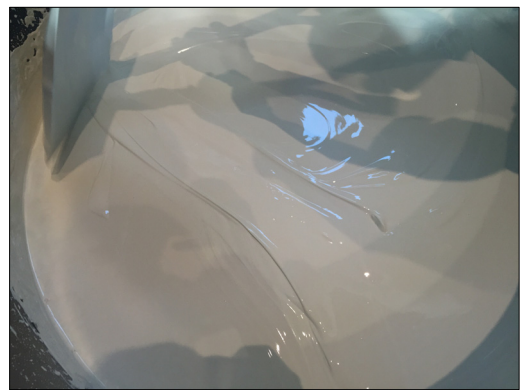


Fig. 7. 토질 조성을 위한 슬러리 배합

을 모사하여 제팅 시스템 유무를 비교하는데 중점을 두었다. Fig. 7과 같이 인도네시아 산 kaolin과 물을 1:1.5의 중량비로 혼합하여 슬러리를 조성하였으며 배합된 슬러리를 loading actuator를 이용하여 100kPa의 일정한 하중으로 선행압밀을 진행하였다. 선행압밀이 완료된 토질은 원심모형실험기의 100G의 환경에서 토질 침하가 발생하지 않는 시점까지 추가 압밀을 진행하였으며 조성된 토질의 함수비는 60%로 포화단위 중량이 약 16kN/m^3 이며 이는 서남해안 연약 지반의 점토질 물성과 유사한 결과다.

실험을 위해 직경 900mm, 높이 600mm의 1단 토조, 직경 900mm, 높이 400mm의 2단 토조를 준비하였다. 1단 토조와 2단 토조를 결합하여 압밀을 진행하였고, loading actuator를 사용한 선행 압밀이 완료된 후 2단 토조를 분리하고 main actuator 등이 설치되는 지그를 결합하였다. 압밀이 완료된 최종 토질의 높이는 약 350mm로 설정하였다. 지그 위에는 5ton 용량의 main actuator와 cone-penetrometer를 위한 sub-actuator, 각 actuator의 위치 데이터를 수집하기 위한 LVDT를 설치하였으며 제팅 콘트롤을 위해 수조, 배관 및 밸브 등으로 구성된 제팅 유닛을 설계하여 목표한 제팅 실험 제팅 유량 $0.05\text{m}^3/\text{hr}$ 을 제어하였다. 각 실험 시에 조성된 토질의 물성을 확인하기 위하여 cone-penetrometer를 관입하여 토질의 전단 강도를 확인한 후 실험을 진행하였다.

4.3 원심모형실험 프로그램

축소모형 스퍼드캔의 관입 및 인발에 대한 원심모형은 총 3회로 계획되었으며, 첫 번째 실험 SPEnJ은 단일 점토층에 대해 관입/인발이 수행되는데 제팅이 적용되지 않은 경우, 두 번째 실험 MPEnJ은 모래층 아래에 점토층이 존재하는 지층에 대한 관입/인발을 수행하되 제팅이 적용되지 않은 경우, 세 번째 실험 SPEJ은 첫 번째와 동일한 단일 점토층에서의 관입 및 인발을 수행하되 인발 시 제팅을 수행하는 경우이다. 세 가지 케이스의 실험 모두 관입 깊이 300mm를 목표로 진행하였다. SPEnJ와 SPEJ를 통해 동일 지층에 대해 제팅 분사를 통한 토양 저항력 감소영향을 평가할 수 있고, SPEnJ와 MPEnJ를 통해 층상구조에 따른 관입 시 지지력 및 인발 시 저항을 비교 평가할 수 있으나 MPEnJ는 다른 두 케이스와 토질 구성이 다르므로 제팅 시

Table 2. 원심모형실험 프로그램

Test name	Soil	Total jetting rate
SPEnJ	Clay	N/A
MPEnJ	Sand-Clay	N/A
SPEJ	Clay	$0.05\text{ m}^3/\text{hr}$

스텝 자체만의 성능 검증과 무관하여 본 연구 논문에서는 다루지 않는다.

모든 케이스에서 동일하게 0.37mm/s 의 속도로 관입하였으며, 스퍼드캔이 목표 깊이에 도달 후 다시 관입과 같은 속도로 회수하였다.

4.4 원심모형실험 결과

각 실험 진행 전 cone-penetrometer를 이용하여 콘에 작용하는 저항을 토질 깊이별로 측정하였다. 관입 깊이가 깊어질수록 선형적으로 저항이 증가하는 것을 확인하였으며 최종 관입 깊이 300mm에서 약 0.9MPa 로 측정되었다. 깊이별 콘의 저항 측정 데이터를 이용하여 산정된 비배수 전단강도는 콘의 저항과 같이 관입 깊이에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며 평균 비배수 전단강도는 약 18kPa 로 서남해안 해저지질조사 구간의 연약지반 비배수 전단강도 평균 22kPa 과 유사한 범위를 확인하였다. 탄성계수 또한 평균 약 6MPa 로 측정되었으며 연약점토의 탄성계수 범위 $2\sim 15\text{MPa}$ 에 충족됨으로써 서남해안 점토질으로의 적정성을 확인하였다.

점토층에서의 제팅 유무에 따른 모형 스퍼드캔의 관입 및 인발 시 스퍼드캔 하단면에 부착된 공극압력계의 결과를 Fig. 8에, 스퍼드캔 축 상단에 설치된 로드셀의 결과를 Fig. 9에 각각 나타내었다.

Fig. 8은 스퍼드캔 거동 시간별 스퍼드캔 하단면에 설치된 PPT의 압력 변화를 나타내고 있다. 스퍼드캔의 관입 시에는 SPEnJ와 SPEJ 모두 제팅이 작동하지 않고 동일한 조건으로 토질에 관입되고, 스퍼드캔의 인발 시 SPEJ에만 제팅을 수행하여 인발력의 변화를 비교 관찰하였다. 스퍼드캔이 관입되자 두 가지 실험 경우 모두 관입깊이에 선형적으로 공극압이 증가하는 것을 확인하였다. SPEnJ는 관입으로부터 약 750초에서 315mm까지 관입한 후 변위가 고정되었고, SPEJ는 SPEnJ가 중지한 이후에도 계속해서

관입하여 약 900초까지 340mm 관입한 후 변위가 고정되었다. SPEJ는 SPEnJ의 관입 시험을 통해서 관입 깊이에 선형적으로 공극압이 증가함을 확인할 수 있었으며 SPEnJ는 최대 440kPa, SPEJ는 최대 540kPa의 공극압이 측정되었다.

스퍼드캔의 관입이 중지 되어 변위가 고정되었을 때는 토질이 침강되며 배수 작용이 발생하여 압력이 서서히 감소하는 것을 두 실험을 통해 확인할 수 있다. 인발 시에는 스퍼드캔 하단면과 토질 사이에 간극이 발생하고 이에 의해 흡입력이 발생하여 압력이 급격히 강하하고 로드셀에 장력이 발생하는 것을 관찰하였다.

스퍼드캔 인발 시 SPEnJ의 경우 약 360kPa에서 50kPa으로 급격히 공극압력이 감소하였으나, 인발과 동시에 제팅을 수행한 SPEJ의 경우 약 490kPa에서 300kPa으로 공극압력이 감소하여 SPEnJ에 비해 단기간 공극압력 감소량이 120kPa 적게 측정되었다. 제팅 분사를 통해 스퍼드캔 하단면에 인발저항력으로 작용하는 부의 간극 압력이 약 30% 감소한 효과를 도출하였다.

Fig. 9은 스퍼드캔 거동 시간별 스퍼드캔 상단에서 측정 한 하중 변화를 나타내고 있다. 인발이 시작됨과 동시에 최

대 인장력이 발생하고, 이후 인발이 진행되면서 스퍼드캔 상부 토질의 수직면에 대한 전단저항력, 상부토질 토질의 무게, 스퍼드캔 측면 마찰력 및 바닥면의 저항력이 점차적으로 감소하여 최대 인장하중 이후 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 스퍼드캔 인발 시 SPEnJ의 경우 약 1,500N의 압축 하중에서 2,450N의 인장 하중으로 급격히 전환하였으며, 인발과 동시에 제팅을 수행한 SPEJ의 경우 약 1,150N의 압축 하중에서 2,300N의 인장 하중으로 측정되었다. 스퍼드캔 인발 시 제팅 분사를 통해 지면과의 직접적인 반력이 작용하지는 않으나 스퍼드캔 하단면에 발생하는 공극을 해소하여 약 150N의 인발 하중을 감소시키는 것을 확인하였다. 하중 상사법칙을 적용하면 100배 크기의 실제 스퍼드캔의 경우, 제팅 적용을 통해 약 152.9ton의 인발하중 감소 효과를 예측할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 서해안 해상풍력발전단지 예정지에서 운용될 해상풍력발전기 전문설치선의 스퍼드캔 제팅 시스템 설계하고 원심모형실험을 통해 검증함으로써 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

스퍼드캔 인발 시 발생하는 토양 저항력은 1기의 스퍼드캔 당 약 5,500톤으로 계산되었으며, 서남해안 해저 지질의 복잡 다양성을 고려하면 5,500톤 이상의 저항력이 발생할 수 있다.

WTIV의 스퍼드캔 인양력은 1기의 레그 당 약 6,725톤으로 토양 저항력보다 높아 인발이 가능한 것으로 예측되지만, 구조적 하중 감소 및 신속한 인발 작업 수행을 위해서 제팅 시스템이 보조적 기능이 될 수 있다.

제팅 분사 유량은 스퍼드캔 1기당 $500m^3/hr$ 으로 결정되었고, 전단파괴를 고려하여 제팅 최대 분사 압력은 2.38 bar로 결정되었다. 설계된 제팅 시스템을 배관해석 전용프로그램을 이용하여 압력 및 유량 검증을 수행하였다.

설계된 제팅 시스템 제원은 원심모형실험을 통해 제팅 시스템 성능을 분석하였다. 스퍼드캔 인발 시 제팅 시스템 적용을 통해 스퍼드캔 하부 면에 발생하는 음의 압력을 30% 감소시키는 효과를 확인하였으며 점토질과의 접촉면

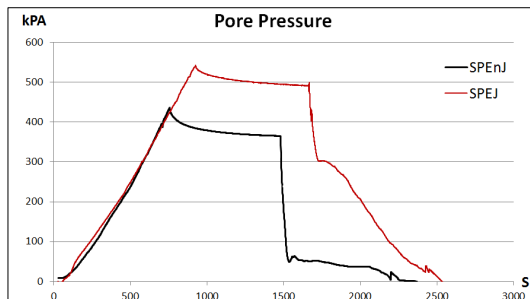


Fig. 8. SPEnJ와 SPEJ의 공극압력 변화

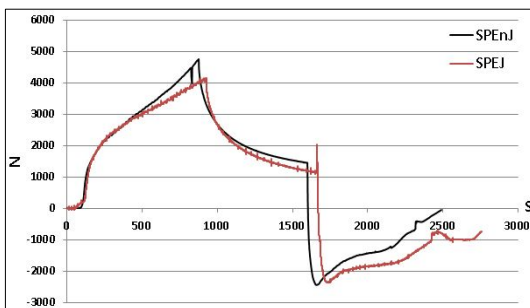


Fig. 9. SPEnJ와 SPEJ의 로드셀 변화

에서의 부의 간극 수압 해소 결과로 인발 하중이 152.9ton (실제 스케일 기준) 감소한 결과를 도출하였다. 이는 실제 WTIV 작업 현장에서 스퍼드캔 인발 시 인발 하중을 감소시켜 잭업 레그의 구조적 하중 감소, 안전성 확보 및 작업 시간의 단축에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

서남해 연약지반은 압축성이 낮은 점토뿐만 아니라 풍화토 및 연암 등으로 복합적으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 단일 점토층만을 고려하여 더욱 깊은 관입 심도와 높은 인발 저항을 고려하였지만, 본 연구 성과를 통해 다양한 지층을 고려한 제팅 시스템 설계 기술 연구의 기반이 될 것으로 기대한다. 또한 스퍼드캔 형상, 제팅 시스템 성능 및 배치 등의 제원 특성에 따라 부의 간극수압 및 인발 저항력 감소 영향에 대한 추가 연구를 진행할 계획이다.

후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20123010020090).

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(해양에너지 융복합 인력양성).

References

- [1] Vazques, L.H., Michel, R.P., Alford, F.H., Quah, M., Foo, K.S., 2005, "Jack up primer, Jack up units : A technical primer for the offshore industry professional".
- [2] 조철희, 이준호, 채상아, 김도엽, 2013, "해상풍력발전기 설치선의 제팅 시스템 설계 소개", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp. 2092-2095.
- [3] Osborne, J.J., Teh, K.L., Houlsby, G.T., Cassidy, M.J., Bienen, B., Leung, C.F., 2011, "InSafeJIP : Improved Guidelines for the prediction of geotechnical performance of spudcan foundations during installation and removal of jack-up units".
- [4] Gaudin, C., Bienen, B., Cassidy, M.J., 2011, "Investigation of the potential of bottom water jetting to ease spudcan extraction in soft clay", Geotechnique. Vol. 64, No. 12, pp. 1043-1054.
- [5] Aldridge, T.R., Haland, G., 1991, "Assessment of conductor setting depth", Proc. of Offshore Technology Conference, pp. 167-176.
- [6] Gaudin, C., Cassidy, M.J., Bienen, B., Iossain, M.S., 2011, "Recent contributions of geotechnical centrifuge modeling to the understanding of jack-up spudcan behavior", Ocean Engineering, Vol. 38, pp. 900-914.