한국해양공학회지 제28권 제1호, pp 47-54, 2014년 2월 / ISSN(print) 1225-0767 / ISSN(online) 2287-6715

Journal of Ocean Engineering and Technology 28(1), 47-54, February, 2014 http://dx.doi.org/10.5574/KSOE.2014.28.1.047

# 원심모형실험을 이용한 모래지반에 관입된 계류선 거동 평가

이훈용<sup>\*</sup> · 김수린<sup>\*</sup> · 김재현<sup>\*</sup> · 김동수<sup>\*</sup> · 추연욱<sup>\*\*</sup> · 권오순<sup>\*\*\*</sup> <sup>\*</sup>한국과학기술원 건설 및 환경공학과 <sup>\*\*</sup>공주대학교 건설 및 환경공학과 <sup>\*\*</sup>한국해양과학기술원

# Evaluation of Behaviors on Mooring Line Embedded in Sand Using Centrifuge Test

Hoon Yong Lee<sup>\*</sup>, Surin Kim<sup>\*</sup>, Jaehyun Kim<sup>\*</sup>, Dong-Soo Kim<sup>\*</sup>, Yun Wook Choo<sup>\*\*</sup> and Osoon Kwon<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejon, Korea <sup>\*\*</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Cheonan, Korea <sup>\*\*\*</sup>Korea Institute of Ocean Science Technology, Ansan, Korea

KEY WORDS: Centrifuge test 원심모형 실험, Mooring line 계류선, Sand ground 모래 지반

**ABSTRACT:** When an anchor penetrates and is installed under a seabed, a portion of the mooring line connected to the anchor is also embedded under the seabed. This embedded mooring line affects the capacity of the anchor in two ways. First, the frictional resistance that occurs between the mooring line and the seabed reduces the pulling force acting on the anchor. Second, the embedded part of the mooring line forms a reverse catenary shape due to the bearing resistance of the soil, so that an inclined pulling force is applied to the anchor. To evaluate the mooring line's effect on the capacity of an anchor in sand, centrifuge model tests were performed using two relative sand densities of 76% and 51% while changing the anchor depths. The test results showed that the load is reduced much more in deep and dense sand, and the inclination angle of the load is lower in shallow and loose sand.

# 1. 서 론

기존의 해양공간은 주로 수심이 얕은 해역에 매장된 석유와 천연가스의 개발을 목적으로 이용되었다. 하지만 현재 해양공 간의 활용은 자원개발 뿐만 아니라, 인공섬, 해상풍력, 부유식 원유저장하역설비 등 그 이용이 증가하고 있다. 이에 따라, 기 존의 유전지역인 얕은 해역의 점토지반뿐만 아니라, 한국의 서 해안, 북해 등 수심이 깊은 모래지반으로 구성된 해양공간까지 그 활용지역이 확대되고 있다.

수심이 깊은 해역에는 주로 부유식 구조물이 설치된다. 해저 지 표면에 설치된 기초에 바로 연결되는 고정식 구조물과 다르게, 부 유식 구조물은 해수면 위에 부유하며, 해저에 설치된 기초와 계류 선으로 연결된다. 부유식 구조물과 함께 해저 지표면에 설치되는 해양기초는 중력식 앵커와 같이 지표면 위에 설치되어 자중으로 하중을 지탱하기도 하지만, 보다 일반적인 앵커는 석션 앵커나 드 래그 앵커와 같이 해저 지표면 아래로 관입되어 지반과 기초 사이 의 마찰과, 지반의 지지력으로 하중을 지탱한다(O'Neill et al., 2003; Andersen et al., 2005; Supachawarote, 2006).

Fig. 1에 도시한 바와 같이 앵커가 해저 지표면 아래로 관입 되어 설치되는 경우, 앵커에 연결된 계류선의 일부 역시 해저 지표면 아래에 묻히게 된다. 해저 지반에 묻힌 계류선은 해저 지표면 아래에서 지반의 지지 저항력에 의해 뒤집어진 현수선 의 모양을 형성하게 된다(Neubecker and Randolph, 1995). 이 때, 해저 지표면에서 수평으로 놓여 있는 계류선의 각도는 지중 에 묻힌 깊이가 깊어질수록 증가하며, 해저 지표면 아래의 앵커 에서 특정한 각도로 연결된다. 앵커에 연결된 계류선의 연결 각 도로 인해, 해저 지표면에서 수평으로 작용하는 하중이 지중에 묻힌 앵커에서는 경사하중으로 작용하게 된다. 앵커에 작용하 는 하중의 경사각은 석션 앵커의 파괴모드와 드래그 앵커의 관 입 궤적을 결정하며, 이는 석션 앵커와 드래그 앵커의 극한 지

Received 11 December 2013, revised 6 January 2014, accepted 13 February 2014

Corresponding author Dong-Soo Kim: +82-042-350-3619, dskim@kaist.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2012 in Daegu



Fig. 1 General feature of mooring system

지력에 영향을 미친다(Neubecker and Randolph, 1996; Zdravkovic et al., 1998; Elkhatib et al., 2002). 또한, 해저 지표면 아래에 묻힌 계류선과 지반 사이에 발생한 마찰 저항력으로 인해 앵커에 전달 되는 하중의 크기를 감소시킨다. 점토지반의 경우, 감소된 하중 은 해저 지표면에서 발생한 하중의 최대 50% 까지 줄어들 수 있 다(Degenkamp and Dutta, 1989).

본 연구에서는 모래 지반에 묻힌 계류선의 거동을 평가하기 위하여 모래의 상대밀도를 76%, 51%로 유지하고, 깊이를 달리 하여 4종의 원심모형실험을 수행하였다. 계류선에 작용하는 하 중을 측정하기 위하여 소형 로드셀을 개발하였다. 본 연구는 모 래 지반에 묻힌 계류선이 하중-전이 매커니즘에 의해 얼마의 하 중을 지반으로 전달하며 최종적으로 앵커에 전달하는 하중의 크기와 각도에 초점을 맞추었다. 앵커의 지지 메커니즘을 고려 하지 않았기 때문에, 앵커는 실제 형상을 따라 모사하지 않고, 수평, 수직 방향의 개발된 소형 로드셀이 부착된 사각 박스로 제작하여 앵커 깊이에서의 계류선의 장력과 경사각을 측정하였 다. 실험 결과, 지반 조건에 따라 계류선의 거동은 큰 차이를 보 였으며, 앵커를 경제적으로, 효율적으로 설계하기 위해 해저 지 반에 묻힌 계류선 거동에 대한 분석의 필요성을 나타냈다.

# 2. 지배 방정식

해저 지반 아래에 묻힌 계류선은 지반상태에 따라 거동이 달 라지며, 계류선 거동은 앵커의 지지력에 큰 영향을 미친다. 때 문에, 계류선의 거동을 분석하는 것은 앵커를 설계하는데 매우 중요하다. 해저 지반 아래에 묻힌 계류선의 거동을 분석하기 위 하여, 지반의 저항력을 고려한 계류선 지배 방정식이 제안되었 다(Vivatrat et al., 1982). 제안된 방정식에서 해저 지표면 아래 의 계류선은 여러 요소로 나뉘며, Fig. 2에 도시한 바와 같이 계 류선 요소에는 다양한 하중이 작용한다. 식 (1)과 (2)를 이용한 힘의 평형 방정식에 의해 요소 하부에 작용하는 하중의 크기  $(T + \Delta T)$ 와 하중의 각도 $(\theta + \Delta \theta)$ 가 계산된다. 첫 번째 요소 에서 계산된 하중 $(T + \Delta T)$ 과 각도 $(\theta + \Delta \theta)$ 는 두 번째 요소 의 상부에 작용하는 하중(T)과 각도 $(\theta)$ 가 되어 계산을 반복한



Fig. 2 Free-body diagram of mooring line element

다. 식 (3)과 (4)를 이용하여 해저 지반 아래의 계류선의 형상을 계산할 수 있으며, 계류선 형상의 수직방향 투영길이와 앵커의 관입깊이가 동일한 값을 갖게 되면 계산을 멈춘다. 마지막 요소 의 하부에 작용하는 하중과 각도는 계류선에 의해 앵커에 작용 하는 하중과 그 경사각이 된다(Degenkamp and Dutta, 1989; Dutta et al., 1989).

$$T + \Delta T = T - \Delta s \left( F + W sin\theta \right) \tag{1}$$

$$\theta + \Delta \theta = \theta + \Delta s \left( P - W \cos \theta \right) / T + \Delta T \tag{2}$$

$$\Delta x = \Delta s \cos\theta + \cos(\theta + \Delta \theta)/2 \tag{3}$$

$$\Delta y = \Delta s \sin\theta + \sin\left(\theta + \Delta\theta\right)/2 \tag{4}$$

계류선의 지배방정식은 계류선에 작용하는 여러 힘들의 합력 을 이용하여 하중-전이 매커니즘을 풀어내며, 최종적으로 앵커 에 작용하는 하중과 하중의 경사도를 예측한다. 기존의 연구는 주로 점토 지반에 관입된 계류선의 거동을 분석하였으며, 모래 지반에 설치되는 앵커의 효율적인 설계를 위하여 점토지반과 마찬가지로 모래 지반에 대한 계류선 거동의 분석이 필요하다. 본 연구는 원심모형실험을 통하여 지반조건에 따른 계류선의 거동 특성을 평가하였고, 추후 연구될 모래 지반의 계류선 지배 방정식 검증을 위한 실험 데이터를 획득하였다.

## 3. 원심모형실험

원심모형실험은 지반공학 분야에서 사용되는 대표적인 모형 실험기법으로, 1/N로 축소한 지반구조물 모형이 중력가속도의 N배로 가속하여 발생한 원심력장 안에서 실제 현장과 동일한 응력상태를 갖도록 하는 모형실험기법이다(Kim et al., 2013). 본 연구에서 수행한 원심모형실험은 한국과학기술원에 설치된 KOCED(Korea construction engineering development) 지오센 트리퓨지 실험센터에서 수행되었으며, 반경 5m의 빔 형식 원심 모형실험기를 사용하였다 (Fig. 3). 원심모형실험기의 제원 및 특성은 Table 1과 같다.



Fig. 3 Geotechnical centrifuge at KAIST

<b>Table I</b> operation of geolecinical continues at ranot	Table	1	Specification	of	geotechnical	centrifuge	at	KAIST
---	-------	---	---------------	----	--------------	------------	----	-------

Item	Specification		
Platform radius	5.0m		
Max. capacity	240 g-tons		
Max. acceleration	130g with 1,300kg payload		
Max. model payload	2,400kg up to 100g		

### 3.1 모래시료

시료는 깨끗한 모래인 규사를 사용하였다. 모래의 역학적 성 질을 나타내는 대표적인 공학적 지수로는 내부 마찰각과 단위 중량이 있으며, 이는 지반의 밀도에 많은 영향을 받는다. 내부 마찰각은 수직응력과 전단강도의 비례상수인 tanφ의 φ이며, 단위중량은 단위체적당 흙의 무게로서 각각 계류선에 작용하는 모래의 저항력 크기에 큰 영향을 준다. 직경 900mm, 높이 700mm의 원형 토조에 균일한 밀도의 모래 지반을 조성하기 위 해서 낙사를 이용하였다. 낙사 높이와 낙사 장비의 이동속도를 달리 하여 조밀한 모래 지반과 느슨한 모래 지반을 모사하였으 며, 각각의 상대밀도는 76%와 51%에 해당한다. 상대밀도란 조 성된 모래의 조밀함과 느슨함을 나타나내는 정도이며, 가장 느 슨한 상태일 때 0%이며, 가장 조밀할 때 100%로 나타낸다. 앵 커는 깊이 210mm, 110mm에 설치되었다. 일반적으로 모래지반 에 설치되는 석션 앵커의 관입 깊이는 2~12m이며(Byrne, 2000), 실험 깊이를 현장의 설치 깊이와 유사하게 조성하기 위해서 50g의 가속도에서 원심모형실험이 수행되었다. 상사법칙에 의 해 두 앵커의 깊이는 10.5m, 5.5m의 깊이로 모사된다. Table 2 에 각각의 상대밀도에 해당하는 모래의 특성을 나타내었다.

#### 3.2 실험 장치

일반적으로 체인이 계류선으로 사용되지만, 본 실험에서는 2.4mm의 스틸 와이어를 사용하였다. 모래의 저항력이 계류선 에 작용하는 면적은 다르지만, 하중이 작용함에 따라 지반 아래 에서 뒤집어진 현수선의 형상을 갖으며, 지반과 계류선 사이의

Table 2 State parameters of sand

Case	Anchor depth (mm)	Relative density (%)	Internal friction angle (Degrees)	Submerged unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
Test 1	210	76	40	9.5
Test 2	110	76	40	9.5
Test 3	210	51	35	8.9
Test 4	110	51	35	8.9

마찰에 의해 앵커에 전달되는 경사 하중의 크기를 감소시킨다 는 점에서, 체인과 와이어의 거동 특성은 유사하다 (Bang et al., 2000). 본 실험에서 하중을 지지하는 앵커의 매커니즘은 연구 주제와 거리가 있기 때문에, 앵커는 실제와는 다른 형상으로, 와이어를 특정 깊이에 고정하고. 하중과 각도를 측정하기 위한 용도로 제작되었다(Fig. 4). 와이어의 한 쪽 끝은 앵커(길이 20mm의 사각박스)에 고정되어 있으며, 앵커는 수평방향과 수 직방향의 소형 로드셀로 구성되어 토조 벽면에 설치되었다. 모 래 지반에 묻힌 와이어에 의한 하중감소를 측정하기 위하여, 모 래 표면의 계류선과, 모래 지반 아래의 앵커에 설치되는 소형 로드셀은 직경 10mm, 길이 30mm의 두랄루민으로 제작되었으 며, 4개의 스트레인 게이지가 부착되어 소형 로드셀에 작용하는 하중을 측정하였다(Fig. 5(a)). 제작된 소형 로드셀은 하중 재하 장치(Universal testing machine)를 이용하여 캘리브레이션을 하였으며, 하중은 소형 로드셀의 강도를 고려하여 0.1mm/s의 속도로 2.5kN까지 재하 하였다(Fig. 5(b)). Fig. 5(c)에 하중과 전 압과의 관계를 나타내었다.

#### 3.3 실험 절차

Fig. 6에 네 단계로 이루어진 실험 절차를 도시하였다. 수평, 수직 방향의 소형 로드셀(Load cell)이 설치된 앵커는 토조 한 쪽 벽에 고정되고, 와이어는 앵커에 연결되어 토조 밖으로 나오 게 된다. 이때, 와이어는 수직으로 고정되어 있다(Fig. 6-a). 다음 으로 낙사를 통해 모래를 토조에 목표 밀도로 균질하게 조성한



Fig. 4 Anchor model





(b) Calibration test



Fig. 5 Calibration of load cell

다. 시료가 쌓인 높이에 따라 앵커의 관입깊이가 결정된다. 낙 사가 끝난 뒤, 토조 밖으로 나온 와이어는 모래 표면에 수평하



Fig. 6 Test procedure

게 놓이며, 제작된 소형 로드셀이 수평 와이어의 중앙에 연결된 다(Fig. 6-b). 소형 로드셀이 연결되면, 토조 반대쪽에 부착된 도 르래를 통해 토조 상부에 설치된 하중 재하 장치에 연결되며, 실험 전, 모래를 완전히 포화시킨다(Fig. 6-c). 원심모형실험기를 이용하여 50g로 가속한다. 가속하는 동안, 하중의 증가로 앵커 에 연결된 수직 로드셀의 측정값은 계속해서 증가하며, 목표 가 속도인 50g에 도달한 뒤, 소형 로드셀에서 계측되는 하중이 증 가하지 않고 일정한 값을 유지할 때, 실험을 시작한다. 하중은 0.1mm/s의 속도로 재하 하며, 소형 로드셀의 강도를 고려하여 모래 표면의 소형 로드셀의 계측값이 원형 스케일로 6,000kN에 도달할 때까지 재하 한다(Fig. 6-d).

실험이 수행되는 동안 와이어에 작용하는 장력은 모래 표면 에 위치한 소형 로드셀과, 앵커에 부착된 수평, 수직 방향의 소 형 로드셀에서 측정되었다. 또한, 앵커의 수평, 수직 방향의 소 형 로드셀로부터 측정된 분력을 이용하여, 앵커에 연결된 와이 어의 경사각의 변화를 계산하였다. 실험이 끝난 후 시료의 반을 주의 깊게 제거해 모래지반에 묻힌 계류선의 형상을 기록하였 다.(Fig. 7).



Fig. 7 Mooring line configuration after soil removal

1

0

1

0.9

0.8

0.1

0

0.1

--- Horizontal (a)

Vertical (b)

-Resultant (c)

Seabed

0.2

0.3--0.4

0.2-0.3--0.4--0.5-0.6

(b) Test 2

Normalized tension at surface of sand

0.5 0.6

Normalized tension at surface of sand

(d) Test 4

0.7 0.8

### 51

(c)

(b)

(c)

(b)

(a)

0.9

(a)

0.7 0.8 0.9

# 4. 결과 분석

#### 4.1 앵커에 작용하는 하중

앵커에 부착된 소형 로드셀을 통해 앵커에 작용하는 하중의 수평, 수직 분력을 계측하였고, 이를 이용하여 앵커에 작용하는 하중의 합력을 계산하였다. Fig. 8에 모래 표면에서 계측된 하중 의 증가에 따른 앵커에서 계측된 수평 분력, 수직 분력, 합력의 변화를 정규화(계측된 하중/모래 표면에서 계측된 최대 하중) 하여 나타내었다. 모래 표면에서 계측된 하중과 앵커에서 계측 된 하중의 차이는 모래 지반에 묻힌 계류선에 의한 하중감소량

이며, 모래 표면에서 하중이 증가할수록 계류선에 의한 하중감 소량이 증가하는 것을 보여준다. 또한, 계류선에 의한 하중감소 량은 모래 지반의 밀도가 높을수록 증가한다. 밀도가 높을수록 내부마찰각과 유효응력이 증가하고, 이는 계류선에 작용하는 마찰력을 증가시키기 때문이다. 지반에 묻힌 계류선은 또한, 앵 커의 깊이가 증가할수록 더 많은 하중을 감소시킨다. 깊이가 깊 어질수록 계류선에 작용하는 구속압이 증가하고, 모래 지반에 묻힌 계류선의 길이가 증가하면서 마찰력이 작용하는 면적도 늘어나기 때문이다.

Fig. 8에 도시한 것과 같이 원심모형실험을 통해 앵커에 작용

-• Horizontal (a)

Vertical (b)

- Resultant (c)

Seabed



Fig. 8 Variation of tension at anchor

하는 하중을 합력이 아닌 수평, 수직 방향의 분력으로 각각 계 측하였다. 모래 표면에 하중이 가해지면 앵커에 작용하는 수평 분력은 0에 가깝거나 음의 값을 갖는데, 이는 초기에 앵커는 수 직방향으로만 하중을 받는 것을 의미한다. 수직방향으로만 하 중이 가해지기 때문에, 수평으로 설치된 소형 로드셀은 벤딩 효 과에 의해 압축이 되고, 이는 음의 값으로 계측되어 수평분력이 감소하는 것으로 계측하였다. 모래 표면에서의 하중이 증가할 수록, 초기에 수직으로 매립되어있던 계류선의 경사가 기울며, 앵커에 작용하는 수평분력을 증가시킨다. 실험2, 3, 4의 경우, 모래 표면의 하중이 일정 수준 증가함에 따라 수평분력이 증가 하는 것을 보였지만, 실험1의 경우, 실험이 종료 될 때까지 수 평분력이 계속 감소하였다. 이는 앵커와 연결된 지점의 계류선 이 수직을 유지하여 계속하여 수직분력이 증가함을 나타내었다. 하지만, 모래 표면의 하중이 증가할수록 일정한 기울기를 갖고 증가하다가, 수평분력이 증가함에 따라, 수직분력의 증가율이 감소하였다. 실험1의 경우, 지반이 조밀하고, 앵커의 관입깊이 가 깊어 초기의 수직으로 매설된 계류선이 앵커의 매설깊이까 지 기울지 않아 수평분력이 증가하지 않았지만, 상대밀도가 낮 고, 앵커의 매설깊이가 얕은 실험4의 경우, 앵커에 연결된 계류 선이 크게 기울어 상대적으로 수평분력이 크게 증가하였다.

실험 결과는 계류선의 거동을 고려하는 것이 효율적인 앵커 설계를 위해 필요하다는 것을 보여준다. 계류선에 의해 앵커에 전달되는 하중은 지반상태에서 따라서 모래표면에서 보다 크게 감소 될 수 있기 때문에, 작은 크기의 앵커도 지지할 수 있으며, 제작, 설치비용을 줄일 수 있다. 또한, 같은 크기의 하중이 앵커 에 전달된다 하더라도, Fig. 8에 도시한 바와 같이, 수평과 수직 방향의 분력의 비가 다르게 작용한다. 석션 앵커의 경우 깊은 곳에 설치할수록, 계류선의 의해 감소되는 하중의 비율은 늘어 나지만, 앵커에 작용하는 하중의 수직 분력이 증가하게 된다. 석션 앵커는 수직방향의 힘에 매우 취약하기 때문에, 계류선 거 동의 분석을 통해, 계류선과 앵커의 연결지점을 신중하게 결정 하여야 한다.

#### 4.2 연결 지점에서의 계류선 각도

원심모형실험에서 초기 와이어는 수직으로 매립되어 있으나, 하중이 재하 되면서 점차 모래지반을 가르며 끌려 나오게 된다. 모래의 지지 저항력이 깊이에 따라 증가하기 때문에, 와이어는 모래지반 아래에서 뒤집어진 현수선의 형상을 갖는다. 와이어의 경사각은 모래 표면에서 수평이며, 깊어질수록 증가한다. FIg. 9 는 앵커와 연결지점에서의 와이어 경사각의 변화를 실험 조건에 따라 도시하였다. 앵커에서 계측된 수평, 수직분력으로부터 하 중 재하 각도를 계산하였으며, Fig. 9은 앵커의 관입 깊이와, 지 반의 밀도가 와이어와 앵커의 연결 각도에 큰 영향을 주는 것을 보여준다. 일반적으로 모래 지반의 지지력은 깊이가 깊을수록 증가하기 때문에, 와이어는 깊이가 증가할수록 적게 움직였다. 또한, 와이어는 밀도가 낮은 지반에서 지반을 가르는 정도가 커 지는데, 이는 모래 지반의 지지력이 밀도가 낮을수록 감소하기 때문이다. 모래 지반의 밀도가 높고, 앵커의 관입깊이가 깊은 실 험1의 경우, 와이어는 실험 종료 후에도 여전히 수직으로 앵커 와 연결되어 있으며, 반대로 모래 지반의 밀도가 낮고, 해저 표 면과 가까운 위치에 앵커가 설치된 실험4의 경우, 상대적으로 적은 하중에서 와이어의 경사각이 변하기 시작하였다.

계류선에 작용하는 하중이 증가할수록 초기 수직의 계류선은 점점 뒤집어진 현수선의 형상을 띄게 된다. 또한, 하중이 일정 하게 앵커에 작용하면, 계류선의 경사각은 일정한 값을 유지한 다. 석션 앵커가 해저지반 아래에 설치가 되면, 계류선은 수직 을 유지하며 석션 앵커와 연결된다. 석션 앵커에 하중이 급격히 증가하게 되면 초기에 석션 앵커는 수직의 하중을 받게 되는데, 석션 앵커는 수직 하중에 매우 취약하다. 이러한 이유로, 석션 앵커가 설치되고 해상구조물과 연결되기 전에, 인위적으로 계 류선에 하중을 가해 초기 각도를 경사지게 한다. Fig. 9에 도시 한바와 같이, 하중에 따른 계류선 경사각의 변화는 앵커의 설치 위치와, 지반상태에 따라 다르다. 모래 지반에 묻힌 계류선의 거동 분석을 통하여, 계류선의 초기 각도를 조절할 수 있으며, 이를 토대로 앵커를 보다 효율적으로 설계 할 수 있다.

#### 4.3 계류선 형상

실험이 끝난 후, 시료의 반을 제거하여 모래 지반에 묻힌 실 제 와이어의 형상을 기록하였다. 기록된 형상으로부터 계측된 앵커와 와이어의 실제 연결각도를 수평, 수직 분력의 합력으로 계산된 연결각도와 비교하여, 모래 표면 아래의 앵커에 부착된 소형 로드셀의 계측 결과를 검증하였다. 계측된 수평분력은 앵 커에 부착된 수평방향의 소형 로드셀에 작용하는 벤딩 효과로 인한 오차를 포함한 값이기 때문에, 비교 전 보정 작업을 통해 오차를 제거하였다. 보정 작업은 빈 토조에 앵커를 설치하고 와 이어를 연결 한 뒤, 연결된 와이어의 경사를 특정 각도로 유지 하여 하중을 가한다. 앵커에 부착된 수평, 수직 방향의 소형 로 드셀로부터 각각의 분력을 측정하여, 합력의 기울기를 계산한



Fig. 9 Variation of angle at anchor



Fig. 10 Relation between calculated angle and actual angle

다. 실제 와이어의 경사각과 계산된 경사각의 관계를 도출한다. Fig. 10에 실제 각도와 계산된 각도의 관계를 도시하였다. 점선 은 실제 각도를 나타내며, 각각의 포인트는 실제 각도로 계류선 에 하중을 가하였을 때, 계측된 수평, 수직 분력으로부터 계산 된 합력의 각도이다. 벤딩에 의해 실제 경사각과 계산된 경사각 은 약간의 차이를 나타내며, Fig. 10에 도시한 관계를 통해 합력 으로부터 계산된 각도는 실제 각도로 보정되었다. 실험이 끝난 후, 모래를 제거하여 얻은 계류선의 형상으로부터 계측한 계류



Fig. 11 Embedded wire configuration

선의 경사각은, 보정되어 계산된 계류선의 경사각과 동일한 값 을 나타내었다. 실험1과 실험3의 경우, 앵커의 깊이가 210mm이 며, 실험2와 실험4는 앵커를 110mm 깊이에 설치하였다. 기록된 와이어의 형상을 길이 방향과 깊이 방향을 정규화 하여 Fig. 11 에 도시하였다 (X = 계류선 수평 길이 / 앵커 관입 깊이(Z), Y = 계류선 수직 길이 / 앵커의 관입 깊이). 계측된 하중 결과와 유사하게 모래 지반의 밀도가 낮을수록, 앵커 설치 깊이가 낮을 수록 와이어는 모래 지반을 쉽게 가르며 형상이 변하였다. 그 결과 와이어의 경사가 줄어들어 완만한 현수선의 형상이 계측 되었다.

원심모형실험 결과는 계류선의 깊이와, 지반조건에 따라서 계 류선의 거동이 달라짐을 보였다. 계류선의 거동은 앵커에 전달 하는 하중과 각도를 변화시키며, 이는 앵커의 지지력에 직접적 으로 영향을 미친다. 해상구조물로부터 발생할 최대 하중이 결 정되면, 앵커의 설치 깊이와, 지반조사를 통한 계류선 거동 분 석을 통해 실제 앵커에 작용하는 하중을 예측할 수 있다. 계류 선의 거동분석을 통해 예측한 실제 하중 정보를 이용하면 앵커 의 크기를 줄여 설계할 수 있으며, 크기가 줄어듦에 따라 제작, 운반, 설치비용을 크게 줄여 앵커를 보다 효율적이며, 경제적으 로 설계할 수 있다.

# 5. 결 론

본 논문은 모래 지반에 묻힌 계류선의 거동을 원심모형실험 을 통해 평가하였다. 모래 지반의 밀도와 앵커의 설치 깊이를 달리하여, 모래 표면에 위치한 계류선에 작용하는 장력과 해저 지표면 아래의 앵커에 전달되는 하중의 차이를 측정하였으며, 앵커에 연결된 계류선의 경사각을 계측하였다. 실험 결과 지반 조건에 따라 계류선의 거동이 달라지며 이는 앵커에 전달되는 하중에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

(1) 해저 지표면 아래에 묻힌 계류선에 작용하는 지반 저항력 은 앵커에 작용하는 하중을 감소시키며, 해저 지반 아래의 계류 선 형상을 뒤집어진 현수선의 형상으로 만들어 앵커에 경사하 중을 전달하게 된다. 하중의 경사각은 석션 앵커의 파괴모드를 결정하고, 드래그 앵커의 관입궤적에 영향을 미치며, 이는 앵커 의 성능에 큰 영향을 준다.

(2) 모래 표면 위의 계류선에 작용하는 장력과 지반 아래의 앵커에 작용하는 하중의 차는 계류선에 작용하는 마찰 저항력 에 의한 하중감소이며, 모래의 밀도가 높을수록, 앵커의 설치 깊이가 깊일수록 계류선에 의해 감소되는 하중의 비율이 증가 하였다. 또한, 동일한 지반 조건에서 모래 표면에서 작용하는 하중이 증가할수록, 계류선에 의해 감소되는 하중 역시 증가하 였다.

(3) 하중 초기 앵커는 수직방향의 하중만 받으며, 하중이 증가 할수록 계류선이 지반을 가르면서 뒤집어진 현수선의 형상을 띈다. 앵커에 연결된 계류선의 각도의 감소로 수평분력이 작용 하게 되며, 수평분력이 증가함에 따라 수직분력의 증가 기울기 는 감소하게 된다. 지반의 밀도가 낮고, 앵커의 관입 깊이가 얕 을수록, 계류선의 움직임이 쉽기 때문에 수평 분력이 빠르게 증 가한다.

(4) 해상 구조물로부터 동일한 하중이 발생할 지라도, 계류선 의 거동에 따라 앵커에 전달되는 하중은 크게 달라진다. 앵커에 전달되는 경사 하중의 크기와 각도는 앵커를 설계하는데 중요 한 정보이며, 경제적이며 효율적인 고용량 앵커설계를 위해 모 래지반에 작용하는 지반의 저항력과 계류선 지배방정식을 통한 계류선 거동의 분석이 필요하다.

# 후 기

본 연구는 한국해양과학기술원의 주요사업(PE98942)의 연구 비 지원과, 한국연구재단(NRF-2009-0080575)의 지원을 받아 수 행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### References

- Andersen, K.H., Murff, J.D., Randolph, M.F., Clukey, E.C., Erbrich, C.T., Jostab, H.P., Hansen, B., Aubeny, C., Sharama, P., Suspachawarote, C., 2005. Suction Anchors for Deepwater Application. Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics(ISFOG), 3-30.
- Bang, S., Han, H., Taylor, R.J., 2000. Calibration of Analytical Solution Using Centrifuge Model Tests on Mooring Lines. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 10(3).
- Byrne, B.W., 2000. Investigations of Suction Caissons in Dense Sand. ph.D. Thesis, Oxford University.
- Degenkamp, G., Dutta, A., 1989. Soil Resistance to Embedded Anchor Chain in Soft Clay. Journal of Geotechnical Engineering, 115(10).

Dutta, A., E.T.P.M., Degenkamp, G., 1989. Behavior of Embedded

- Dutta, A., E.T.P.M., Degenkamp, G., 1989. Behavior of Embedded Mooring Chains in Clay during Chain Tensioning. Proceedings of the 21th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Tex.
- Elkhatib, S., Lonnie, B., Randolph, M.F., 2002. Installation and Pull-Out Capacities of Drag-In Plate Anchors. Proceedings of the twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, 648-654.
- Kim, D., Kim, N., Choo, Y.W., Cho, G., 2013. A newly Developed State-of-the-Art Geotechnical Centrifuge in Korea. KSCE journal of Civil Engineering, 17(1), 77-84.
- Neubecker, S.R., Randolph, M.F., 1995. Profile and Frictional Capacity of Embedded Anchor Chains. Journal of Geotechnical Engineering, 121(11), Paper No. 9173.
- Neubecker, S.R., Randolph, M.F., 1996. The Performance of Drag Anchor and Chain Systems in Cohesive Soil. Journal of Marine and Geotechnology, 14, 77-96.
- O'Neill, M.P., Bransby, M.F., Randolph, M.F., 2003. Drag Anchor Fluke-Soil Interaction in Clays. Canadian Geotechnical Journal, 40(1), 78-94. Canadian Geotechnical Journal
- Supachawarote, C., 2006. Inclined Load Capacity of Suction Caisson in Clay. Ph.D. Thesis, The University of Western Australia.
- Vivatrat, V., Valent, P.J., Ponterio, A.A., Brian Watt Associates, Inc., 1982. The Influence of Chain Friction on Anchor Pile Design. Proceedings of the 14th Annual Offshore Technology Conference, Paper 4178, Houston, Tex., 153-163.
- Zdravkovic L., Potts D.M., Jardine R.J., 1998. Pull-Out Capacity of Bucket Foundations in Soft Clay. Proceedings of the International Conference on Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour, 301-324.