

# 모래지반에 근입된 석션파일의 인발저항력 및 변위거동 분석

## Analysis of Load Capacity and Deformation Behavior of Suction Pile Installed in Sand

김 유 석<sup>1</sup> Kim, You-Seok

장 연 수<sup>2</sup> Jang, Yeon-Soo

### Abstract

A series of centrifuge model tests to investigate the suction pile pullout loading capacity in sand have been performed. The main parameters that affect the pullout loading capacity of a suction pile include the mooring line inclination angle and the padeye position of the suction pile. With respect to the padeye position, the maximum pullout loading capacity is obtained when the padeye position is near 75% of the pile length from the top. The direction of the pile rotation changes when the padeye position reaches somewhere near 50~75% for all mooring line inclination angles. The translation displacement of suction pile to develop the time of maximum pullout loading capacity decreased as the mooring line inclination angle increased. In addition, the vertical displacements of the center of a suction piles for all cases appeared to develop toward the ground surface.

### 요 지

모래지반에서 석션파일의 최대인발저항력 산정을 위한 일련의 원심모형실험이 수행되었다. 최대인발저항력 산정을 위한 실험인자인 석션파일의 인발각과 인발작용점의 위치에 대하여 실험을 수행하였다. 인발작용점의 경우 75%에서 최대인발저항력이 관찰되었다. 모든 경사각에 대하여 전체파일 높이에서 50%에서 75%사이에 석션파일의 회전각이 변함을 알 수 있었다. 인발각이 증가함에 따라 최대 인발저항력 발생 시까지의 변위가 점점 작아짐을 알 수 있었다. 석션파일의 형상중심의 수직변위를 최대인발저항력이 작용한 시점에서 관찰한 결과 모두 지표 쪽으로 이동한 것을 알 수 있었다.

**Keywords :** Centrifuge, Displacement, Inclination angle, Padeye position, Pullout loading capacity, Rotation, Sand, Suction pile

### 1. 서 론

석션파일은 해상에서 사용하는 기초형식의 하나로 석유시추선의 지지를 목적으로 1970년대부터 사용되고 있다. 또한 이를 지지기초로 뿐 아니라 심해에서의 원유시추를 위한 해상플랫폼의 계류를 위한 앵커로서 사

용되고 있으며 국내에서도 침매터널의 계류를 목적으로 사용한 바 있다(Cho et al., 2008). 이와 같이 계류를 목적으로 하는 석션파일은 석션파일의 상부 중앙이나 측면에 인발작용점(padeye)을 설치하여 석션파일 및 석션파일 내부의 지반이 같이 거동하게 하여 인발저항력의 증진을 도모하게 된다. 이와 관련 국외에서는 Allersma

1 정회원, 대우건설기술연구원 책임연구원 (Principal Research Engineer, Institute of Construction Technology, DAEWOO Engineering & Construction Co. Ltd.)

2 정회원, 동국대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Dongguk University-Seoul, ysjang@dgu.edu, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

et al.(2000)이 공기진조 모래지반에 석션파일을 설치하고 인발각 10°~25°와 인발작용점의 위치를 석션파일 길이에 대해서 상부 5%~80%까지에 위치하도록 조합하여 8가지의 실험을 실시하였다. 그러나 수평에서 수직까지의 인발각에 대한 체계적인 실험을 수행한 사례는 전무한 실정이다.

석션파일의 인발저항력에 대한 연구의 목적은 궁극적으로 주어진 조건에서 최대인발저항력을 구하는데 있다. 즉, 주어진 조건에서 최대 인발저항력을 수직과 수평 성분으로 나누어 각각에 대해 최대 인발저항력을 결정하고 이 두 성분의 비율을 결정하는데 인발각과 파일길이 대 직경비의 영향을 더하여 하나의 식을 구성한다(Cho and Bang, 2002; Supachawarote et al., 2004). 수평인발부터 수직인발까지의 파괴포락선을 구하는 방법은 첫째, 유한요소법과 같은 수치해석적인 접근방법(Supachawarote et al., 2004), 둘째, 실험에 의하되 일반 제안식을 이용해 실험결과를 일반화하는 방식(Bang et al., 2011), 셋째, 소성이론에 의한 한계해석적 접근 방법(Randolph et al., 1984; Cho 2001; Aubeny et al., 2003)이 있다.

본 연구에서는 두 번째 방식에 의한 연구로 실험에 의하여 먼저 최대인발저항력을 결정하는 중요한 인자 중에서 인발각과 인발작용점을 변화시켜 실험적으로 석션파일의 인발저항거동을 구하는데 목적이 있으며 수평인발(0°)에서 수직인발(90°)까지, 인발작용점도 석션파일 길이의 상부 5%에서 하부 95%까지에 대하여 원심모형실험을 실시하였다.

실험은 모형토조에 포화된 모래지반을 조성하고 모형 석션파일을 관입기를 사용하여 설치하였다. 100g level로 가속한 상태에서 서보모터로 구동되는 인발기를 사용하여 모형석션파일과 연결된 견인줄을 인발하여 최대 인발저항력을 Load cell로 측정하였다. 최대인발저항력을 인발각과 인발작용점별로 비교 분석하였고, 실험 전 석션파일의 초기 위치와 실험 후 최종 위치를 자로 측정하여 석션파일의 이동 및 회전에 대하여 계산하고 최대 인발저항력과 그 변위특성을 비교 검토하였다.

## 2. 모형실험

### 2.1 실험장비

실험에 사용된 Actidyn사의 C65-20 원심모형실험기는 회전반경 3m에 최대 200g level까지 가속이 가능한 원심모형실험장치(Park et al., 1998)이며 상세 제원은 그림 1 및 표 1과 같다. 본 기기는 빔형 원심모형실험기

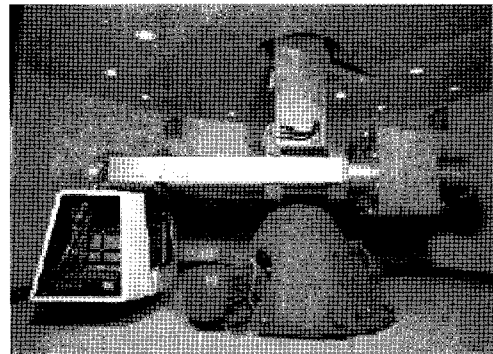


그림 1. C65-20 원심모형실험기

표 1. C65-20 원심모형실험기 제원

Centrifuge radius	platform radius	3.0m		
	nominal radius	2.7m		
Usable payload dimension	platform width	0.8m		
	nominal depth	1.0m		
	usable height	0.8m		
Performances	Maximum payload	1,200kg		
	Acceleration at maximum payload	100g		
	Acceleration range	10 to 200g		
	Speed range	25 to 265rpm		
Electrical slipring	Signal line	46		
	Power line	12		
	Video line	2		
Rotary joint	Oil	200bars	working pressure	each 2ports
	Water	20bars		
	Air	20bars		

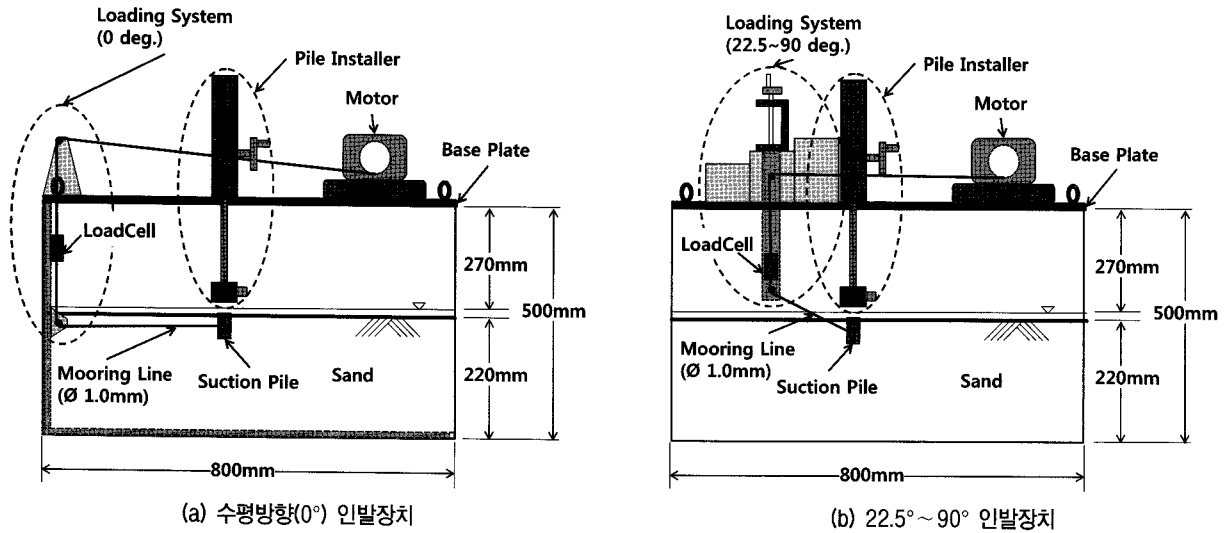


그림 2. 석션파일 인발장치

표 2. 모형석션파일 제원

형상	길이 $L_0$		직경 $D$		두께 $t$		탄성계수 $E$ (GPa)	관성모멘트 $I$		g level
	모형 (mm)	원형 (m)	모형 (mm)	원형 (m)	모형 (mm)	원형 (m)		모형 (cm <sup>4</sup> )	원형 (m <sup>4</sup> )	
원형	60	6	30	3	1	0.1	200.0	0.959	0.959	100

로 외팔보의 단일 바스켓 형이며 용기를 설치하는 바스켓의 반대방향 빔에는 평형 카운터웨이트가 있어 길이 방향의 무게중심을 맞추게 되어 있다.

실험용기는 가로 80cm 높이 50cm 폭은 20cm의 강체로 제작되었으며 전면에는 두께 40mm의 플라스틱 재질의 창을 설치하여 내부 관찰이 가능하다. 실험에 사용된 인발장치를 그림 2에 나타내었는데 수평(0°)인발 시에는 수직벽체에 도르래를 설치하여 도르래를 통하여 견인줄이 당겨짐에 따라 인발저항력을 load cell을 이용하여 측정하였다. 인발각 22.5°, 45°, 67.5°, 90°의 경우는 각도조절용 이동식도르래를 이용하여 각도를 조절하였으며 마찬가지로 인발시 load cell을 이용하여 인발저항력을 측정하였다. 측정은 초당 4회를 기준으로 측정하였으며 인발속도는 0.6mm/sec로 하였고 실험은 100g level로 하였다.

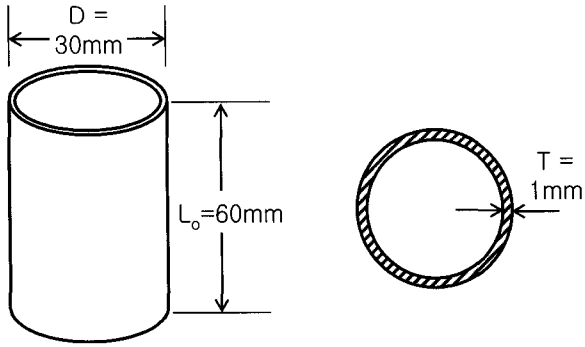
## 2.2 모형석션파일

모형석션파일의 직경 및 길이는 각각 30mm, 60mm이다(표 2). 100g level 가속 시 상사성의 원리에 따라 직경 3m, 길이 6m와 같은 특성을 가진다. 인발작용점의 위치는 석션파일 길이의 상부 5%에서 95%까지 25% 간격으

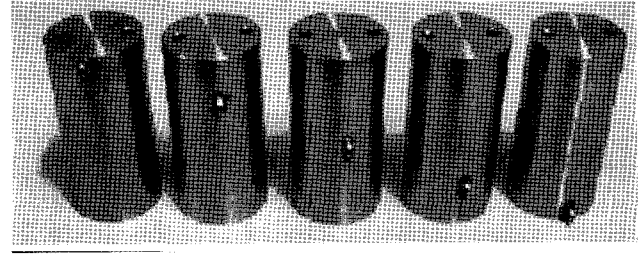
로 5가지로 하였으며 각 인발작용점(padeye)을 장착한 모형석션파일도 5개로 실험을 실시하였다. 그림 3의 상부 구멍은 석션파일 설치 시 내부의 물을 배수하기 위한 배수구멍이다.

## 2.3 실험절차

실험에 사용된 모래는 비중이 2.62, 내부마찰각이 37.8°인 주문진표준사이며 그림 4와 표 3과 같은 빈입도의 특성을 가진다. 일반적인 포화된 지반의 조성은 공기진조 상태의 모래를 강사기를 이용하여 상대밀도를 조절하여 가며 지반을 조성하고 나중에 지반의 하부에 CO<sub>2</sub> 가스를 넣은 후 탈기수를 주입하는 방식으로 수행한다. 그러나 강사기만을 이용해 조성된 지반은 모든 위치에서 목표 상대밀도를 나타내는 경우가 드물어 용기의 위치별로 다른 상대밀도를 나타내는 것이 일반적이다(Katagiri et al, 1998). 조성지반의 상대밀도가 불균질하게 되는 이유는 용기의 벽체로 인하여 강사기로 모래를 강사 시킬 때 상승기류가 발생하고 모래가 벽면을 맞고 떨어지는 등의 문제 때문이다(岡村 et al., 2004). 이 방법으로 조성된 지반면은 요철이 지게 되며 나중에 지반면을 고르는 작업이 필요하다.



(a) 모형석선파일 모형 치수도



(b) 고리위치가 다른 모형석선파일

그림 3. 모형석선파일

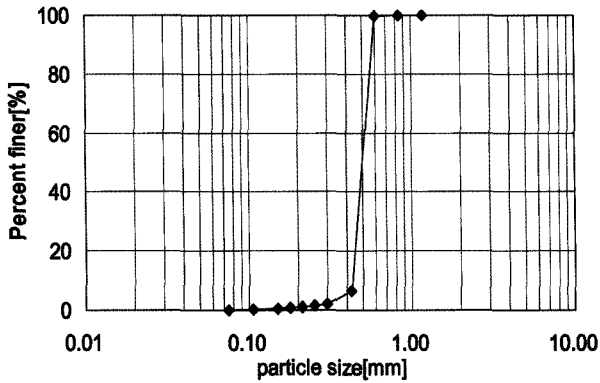


그림 4. 모래의 입도분포

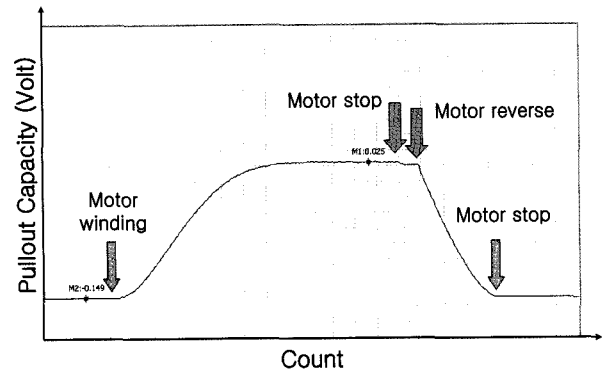


그림 5. 시간에 따른 인발저항력과 인발모터의 구동절차

표 3. 주문진 표준사의 특징

지반정수	값
최대 건조밀도(g/cm <sup>3</sup> )	1.67
최소 건조밀도(g/cm <sup>3</sup> )	1.38
비중	2.62
내부마찰각(°)	37.8°
유효경, D <sub>10</sub> (mm)	0.435
균등계수, C <sub>u</sub>	1.196
곡률계수, C <sub>g</sub>	0.965

본 연구에서의 모형지반은 실험용기에 탈기된 물을 20mm넣은 후 라인살포식 강사기(김택곤, 1999)를 사용하여 주문진표준사를 높이 1.0m에서 낙하시켜서 두께 10mm씩 조성하였다. 이렇게 조성된 지반은 낮은 상대 밀도지반을 높은 상대밀도 지반으로 변경하고 지면을 고르게 조성하기 위하여 두께 12mm, 무게 7.7N의 직사각형 강재판을 높이 5cm에서 낙하시켜 지반전체에 걸쳐서 다시 다짐을 실시하였다. 조성된 지반면에 탈기수를 다시 넣어 물높이를 20mm로 만든 후 표준사를 10mm로 추가 포설하며 이와 같은 절차를 반복하여 최종 22cm높이의 지반을 조성하였다. 조성된 지반에는 석선파일 타입기를 석선파일 상부가 지반면과 동일하게

설치하였다.

조성된 지반에 대하여 원심모형실험기를 이용하여 5분간 100g level에서 안정시킨 후 정지시킨다. 1g 상태에서 석선파일 인발라인에 load cell을 연결한 후, 실험용기 상부에 인발시스템을 설치하고 석선파일 인발라인을 모터에 연결한 다음 모터가 작동하는지 여부를 체크한다. 1g 상태에서 초기 석선파일 위치를 자로 측정하고 원심모형실험기를 작동하여 100g level에 도달하면 5분 후에 모터를 회전시켜 석선파일을 인발시키며 시간으로 load cell의 값을 체크한다. 그림 5와 같이 측정된 인발저항력결과가 최고치를 넘어 하향곡선을 그리게 되면 모터회전을 정지시킨다. 그 후 모터를 역회전하여 g level 저하시의 석선파일 움직임을 방지한다. load cell의 값이 안정화를 이루면 원심모형실험기의 g level을 낮추어 정지시킨다.

## 2.4 실험조건

파일의 직경(D)대비 길이(L<sub>o</sub>)비율을 형상비(L<sub>o</sub>/D)로 할 때 실험에 사용된 석선파일의 형상비는 2이다. 석선파일은 해상에서 해저에 자중에 의하여 일부 관입된

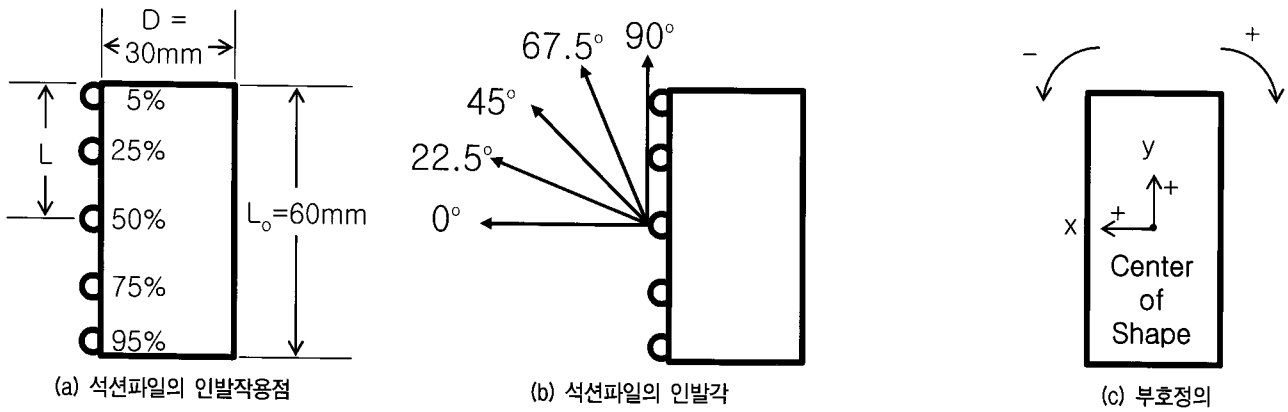


그림 6. 석선파일의 인발저항력 측정시 실험변수 및 부호정의

다음 석선파일 상부의 석선펌프를 작동하여 설치되는 파일로서 파일 길이대비 직경비의 값이 일반파일처럼 크지 않다. 이는 석선파일이 주로 앵커로 사용되기 때문에 최대의 인발저항력 확보를 위해서 파일의 지중 및 파일내부 지반무게의 저항이 중요하기 때문이다. 따라서 파일의 길이를 키워 저항하기 보다는 직경을 키워 저항하는 형태로 파일이 제작된다. 석선파일의 인발저항력 산정에서 중요한 변수로 지반의 종류, 인발방향, 인발 작용점의 위치, 매입깊이, 앵커크기 등이 있으며 (Bang and Cho, 1999, 2002; Cho et al., 2002; Kim et al., 2010) 그 중에서 인발작용점의 위치와 인발각은 매우 중요한 변수이다.

본 연구에서도 인발 작용점의 위치 및 인발각을 실험 변수로 사용하였으며(그림 5) 인발 작용점은 파일의 전체길이 대비 상부에서 5%, 25%, 50%, 75%, 95%의 총 5가지 변수로 하였다(그림 6(a)). 인발각은 그림 6(b)와 같이 각 인발작용점마다 수평인발(0°)에서 수직인발(90°)까지 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90°로 22.5°씩 증가시켜 총 5가지를 사용하였다(표 4). 인발작용점의 위치와 인발각을 조합하여 총 25가지 조건의 실험을 실시하였는데, 동일조건에서 실험은 2회 이상 실시하여 최대인발저항력 결과 중에 중앙값(median value) 또는 그 중 작은 값을 대표 값으로 결정하였다.

그림 6(b)에 나타난 바와 같이 회전각의 부호는 석선파일의 왼쪽에서 견인을 했을 때를 기준으로 회전방향이 시계방향이면 회전각은 +로 하였다. 변위는 그림 6(c)와 같이 석선파일 측면형상에서 가로 및 세로의 1/2인 형상의 가운데를 기준으로 하였다. 수평변위는 초기보다 왼쪽으로 진행한 경우가 +이며, 수직변위는 상부로 움직인 것이 +이다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 인발각과 인발저항력

일련의 실험을 실시한 결과를 표 5, 그림 7에 나타내었다. 표 5에는 실험조건에 대하여 최대인발저항력, 회전각, 중심수평변위, 중심수직변위, 중심이동거리를 나타내었으며 그림 7은 다양한 인발각에 대해 인발작용점에 따른 최대인발저항력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 동일한 심볼은 같은 실험조건에서 구한 최대인발저항력의 결과들이며 그 중에서 내부가 채워진 심볼은 샘플링된 데이터로서 중앙값(Median Value)이거나 동일조건의 실험결과 중 작은 값이다. 상사성의 법칙에 따라 최대인발력은 측정된 결과에 10,000배(n g의 자중)를 곱한 결과를 기재하였다.

수평인발(0°)이나 인발각 22.5°에서는 인발작용점이 75% 부근에서 최고점이 나타나는 거동을 보였다. 주어진 인발각과 인발작용점에 대하여 석선파일이 최대인발저항력을 발휘하기 위해서는 지반의 저항에 대해 순수이동(pure translation)을 해야 한다(Cho, 2001). 이것은 석선파일이 초기에는 회전을 하지만 인발작용점이 75%부근에서 지반의 저항과 인발저항력이 조화를 이루게 되며, 결국 당기는 방향에 직각을 이루는 석선파일 저항체의 단면에서 힘의 평형을 이루기 때문이다. 이것은 견인줄과 직각방향으로 석선파일이 위치할 때 지반에 저항하는 단면이 가장 크게 되기 때문에 0°가 가장 큰 저항단면이고 그 다음이 22.5°가 된다.

또한 표 5에서 보는 바와 같이 파일의 인발각과 인발작용점에 따라 석선파일의 회전방향이 다르게 나타나기 때문에 석선파일이 왼쪽으로 인발되었을 때 반시계

표 4. 모형실험 계획

형상	g level	길이 $L_o$		직경 $D$		인발각 (°)	인발작용점 (%)	실험명 <sup>1)</sup>
		모형 (mm)	원형 (m)	모형 (mm)	원형 (m)			
원형	100	60	6	30	3	0.0	5	I000-P05
							25	I000-P25
							50	I000-P50
							75	I000-P75
							95	I000-P95
						22.5	5	I225-P05
							25	I225-P25
							50	I225-P50
							75	I225-P75
							95	I225-P95
						45.0	5	I450-P05
							25	I450-P25
							50	I450-P50
							75	I450-P75
							95	I450-P95
						67.5	5	I675-P05
							25	I675-P25
							50	I675-P50
							75	I675-P75
							95	I675-P95
90.0	5	I900-P05						
	25	I900-P25						
	50	I900-P50						
	75	I900-P75						
	95	I900-P95						

1) I225-P05는 인발각 22.5° 및 인발작용점 5%를 의미함

방향으로 회전을 하게 되면 인발방향으로의 저항영역이 점점 작아지게 되는 반면 시계방향으로 회전하게 되면 저항영역이 점점 커지게 된다. 즉, 지반의 파괴영역이 깊이가 깊어질수록 저항력은 점점 증대되는 효과가 있게 되기 때문에 시계방향으로 석션파일이 회전을 하게 되면 지반저항이 더 커지는 효과를 가지게 된다. 이를 석션파일을 이용한 계류방식에 응용하면 현수선식 계류방식의 경우 10°~20°의 인발각을 가지므로(Randolph et al., 2005) 인발작용점을 75%에 설치하는 것이 가장 효율적인 것으로 나타난다.

인발각이 22.5° 이하에서는 석션파일의 왼쪽에서 인발했을 때 인발작용점이 파일의 아래로 내려가면서 반시계방향에서 시계방향으로 회전방향이 변경될 때 최대인발저항력을 보인 반면, 인발각 45° 이상에서는 최대인발력이 증가하는 경향은 나타났으나 그 이하의 각

도에서 나타난 것과 같은 침투현상을 보이지는 않았다.

인발각이 커지게 되면 지반을 밀어내려는 인발력의 수평성분이 줄어들게 되며, 결국 인발력이 작용함에 따라 지반을 인발력 방향으로 밀어내기 보다는 인발력의 수직성분이 발달하여 석션파일을 지표면으로 빠르게 인발하는 효과를 가져 오게 된다. 표 5의 결과에서도 인발각 22.5° 이하에서는 회전각의 변화가 최대인발력에 주는 영향이 인발작용점이 석션파일의 상단에서 하단으로 내려갈수록 확연하게 나타난 반면, 45° 이상에서는 석션파일을 수직으로 인발시키려는 힘이 크기 때문에 인발작용점 95%를 제외하고는 회전각의 변화가 최대인발력에 주는 영향이 크지 않았다. 결국 인발방향의 직각방향으로의 저항단면적이 작아 인발저항이 극소화되기 때문이다.

수직인발(90°)의 경우는 인발작용점이 상부 5%에서

표 5. 최대인발저항력 및 석선파일 변위 결과

실험명	인발각 (°)	인발작용점 (L/L <sub>0</sub> )	최대인발저항력 (MN)	회전각 <sup>1)</sup> (°)	중심수평변위 <sup>1)</sup> (m)	중심수직변위 <sup>1)</sup> (m)	중심이동거리 (m)
I000-P05	0.0	0.05	2.789	-12.5	0.664	0.446	0.800
I000-P25	0.0	0.25	3.053	-12.5	0.314	0.396	0.506
I000-P50	0.0	0.50	4.339	-12.5	0.664	0.696	0.962
I000-P75	0.0	0.75	6.636	3.8	0.455	0.307	0.549
I000-P95	0.0	0.95	5.171	16.5	0.556	0.048	0.558
I225-P05	22.5	0.05	2.057	-6.7	0.140	0.345	0.373
I225-P25	22.5	0.25	1.820	-7.7	0.287	0.477	0.557
I225-P50	22.5	0.50	2.236	-4.8	0.395	0.435	0.588
I225-P75	22.5	0.75	3.615	8.6	0.317	0.659	0.731
I225-P95	22.5	0.95	2.238	8.6	0.017	0.059	0.061
I450-P05	45.0	0.05	1.384	-2.9	0.149	0.379	0.407
I450-P25	45.0	0.25	1.278	-2.9	0.099	0.329	0.343
I450-P50	45.0	0.50	1.397	-1.0	0.100	0.275	0.293
I450-P75	45.0	0.75	2.009	1.9	-0.149	0.202	0.251
I450-P95	45.0	0.95	2.037	12.5	0.086	0.046	0.098
I675-P05	67.5	0.05	0.946	-1.0	-0.100	0.125	0.160
I675-P25	67.5	0.25	0.953	0.0	-0.050	0.100	0.112
I675-P50	67.5	0.50	0.993	0.0	0.000	0.120	0.120
I675-P75	67.5	0.75	1.211	1.0	-0.150	0.125	0.195
I675-P95	67.5	0.95	1.611	8.6	-0.183	0.359	0.403
I900-P05	90.0	0.05	0.831	1.5	-0.094	0.111	0.146
I900-P25	90.0	0.25	0.867	1.0	-0.149	0.225	0.270
I900-P50	90.0	0.50	0.900	1.0	-0.125	0.175	0.215
I900-P75	90.0	0.75	1.022	1.0	-0.150	0.125	0.195
I900-P95	90.0	0.95	1.065	2.9	-0.099	0.179	0.204

1) 회전각 시계방향이 +임, 수평변위 인발방향이 +임, 수직변위 상부방향이 +임.

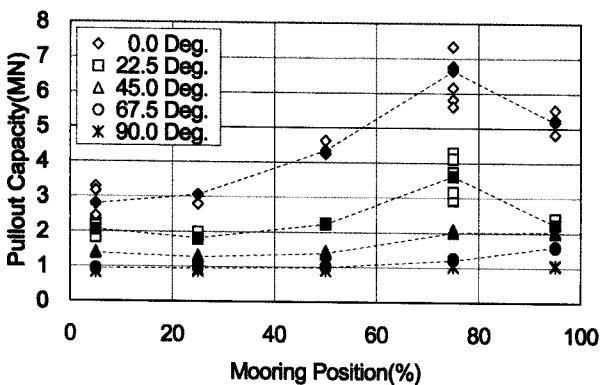


그림 7. 인발작용점에 대한 최대인발저항력 결과

하부 95%에 이르기 까지 최대인발저항력이 큰 차이는 없었으나 인발작용점이 파일의 하부로 내려갈수록 최대인발저항력은 조금씩 증가하는 경향을 보였다. 이것은 석선파일의 무게중심이 한가운데 위치하게 되는 데 인발작용점은 왼쪽에 있어 시계방향으로 회전하면서

위로상승하게 되는 때문으로 사료된다. 표 5에서 보는 바와 같이 석선파일의 수평변위는 파일의 회전에 의해 항상중심에서 인발방향과 반대로 나타났고 인발각은 시계방향으로 진행되었다. 인발작용점이 하부로 내려갈수록 석선파일을 회전시키기 위해 많은 지반저항을 받아 최대인발저항력은 증가하나 그 값은 인발작용점 5%에서 0.831MN이고 인발작용점 95%에서 1.065MN으로 큰 차이를 보이지는 않았다.

### 3.2 하중이력곡선의 특성

그림 8은 시간에 따른 석선파일의 인발저항력 변화를 나타낸 것으로 초기에는 인발라인이 석선파일의 인발작용점(padeye)과 그림 2의 하부도르래사이에서 직선을 이루기까지 하중이 증가한다(위치 a). 이후에는 석선파일 자체가 움직이게 되어 시간에 대한 인발저항력 기울

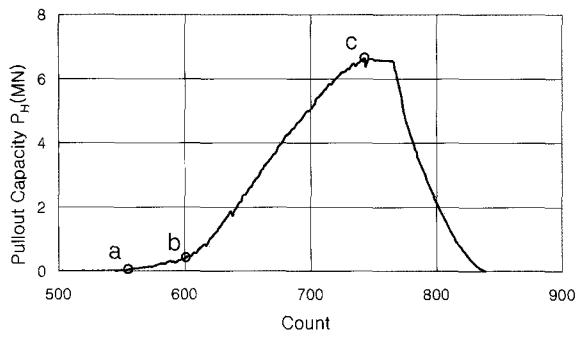


그림 8. 시간에 따른 하중 이력곡선

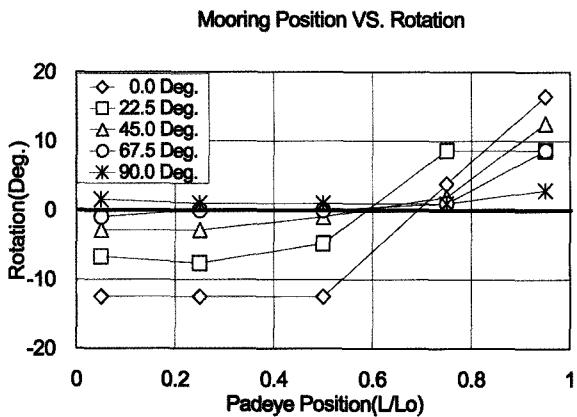
기가 높아지게 된다(위치 b). 그리고 최종적으로 최고인발저항력을 보이다가 점점 작아지게 된다(위치 c).

### 3.3 석션파일 변위거동

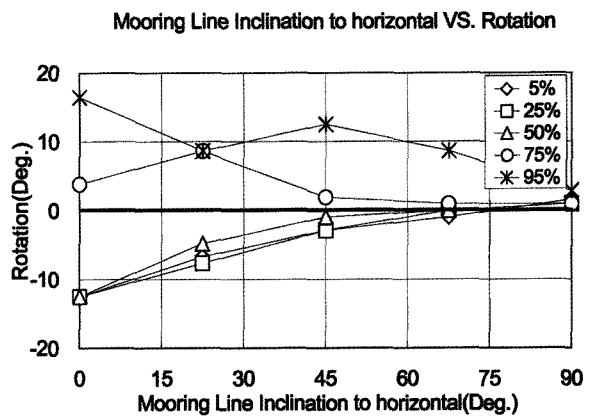
하중이 최대값에 도달했을 때 바로 견인되고 있는 석션파일을 멈추는 것은 매우 어렵기 때문에 하중이 극한에 도달하고 난 후 떨어질 때를 관찰하여 견인모터를 정지하여 견인줄의 인발을 멈추었다. 본 실험에서 극한하

중 상태에서의 정확한 앵커의 위치나 형상을 측정하는 것은 불가능했지만 대부분 하향곡선이 나타나면 견인줄의 인발을 멈추어서 변위결과에 큰 차이를 보이지는 않았다. 모든 실험조건에서 석션파일은 위치가 변하였고 회전되었는데 인발작용점과 인발각의 변화에 따른 석션파일의 거동결과를 그림 9 및 그림 10에 나타내었다.

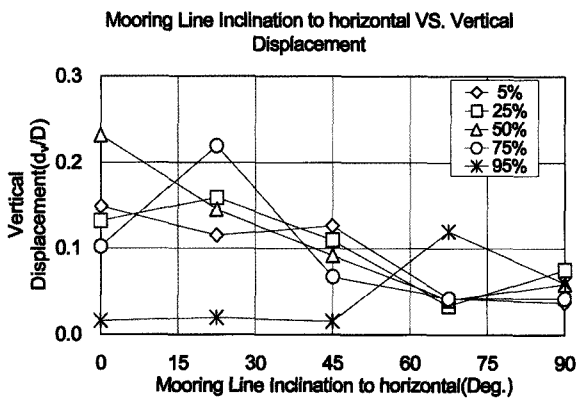
그림 9(a)는 인발작용점의 위치와 석션파일의 회전각 간의 관계를 도시한 것이다. 모든 경우에 있어 인발작용점의 위치 50%와 75%사이에서 회전방향이 반대로 변화하였다. 즉, 실험결과들 사이에서는 선형적 거동을 보인다고 가정할 때 0°와 90°를 제외하고 인발작용점이 상부에서 대략 60% 이하인 경우와 이상인 경우에 따라 석션파일의 회전각이 바뀌고 있다. 인발각의 변화에 상관없이 인발작용점 위치가 60% 부근에서는 석션파일이 회전하지 않고 거의 인발방향으로 견인될 것임을 알 수 있다. 수평인발의 경우는 인발작용점 위치가 약 70% 부근에서 석션파일이 회전하지 않고 거의 인발방향으로 견인됨도 추론할 수 있었다. 인발작용점이 변화할 때 회전방향이 바뀌는 것은 석션파일의 인발력(수직성분과



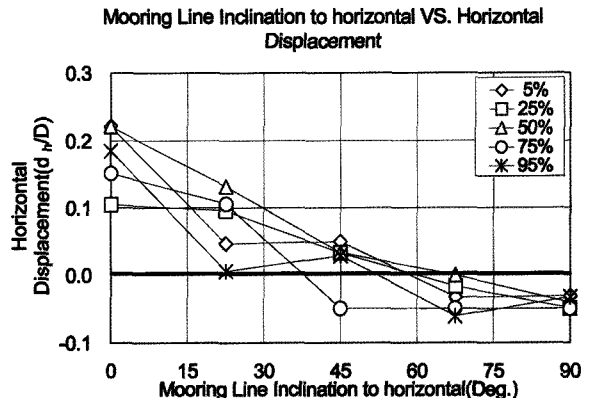
(a) 인발작용점의 변화와 회전각



(b) 인발각 변화와 회전각



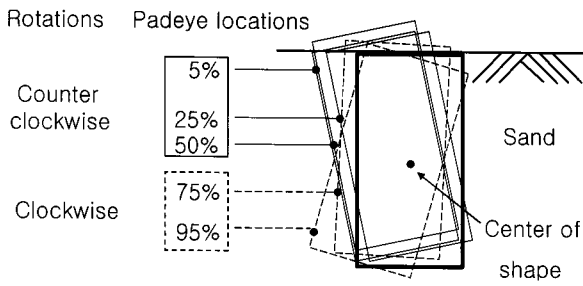
(c) 인발각 변화와 수직변위



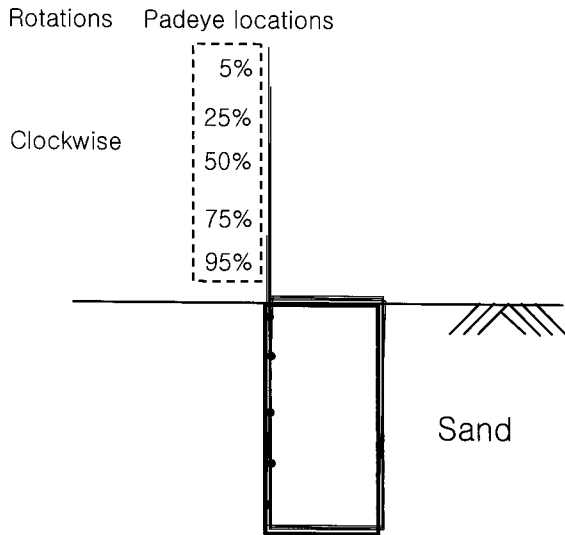
(d) 인발각 변화와 수평변위

그림 9. 인발작용점과 인발각의 변화에 따른 실험종료 후 석션파일의 거동





(a) 수평인발



(b) 수직인발

그림 10. 수평 및 수직 인발에 따른 석선파일 최종 거동형상

수평성분의 합)과 지반의 인발저항력(Rankine의 토압이론을 적용한다면 석선파일 하단 아래에서 부터 위 방향으로 1/3지점에서 작용하는 수평방향의 힘) 그리고 자중(연직)이 서로 작용하여 인발작용점(padeye)이 낮아지면서 석선파일의 회전방향을 변경시키려고 하기 때문이다. 즉, 인발력의 수평성분이 수직성분보다 크면서 석선파일의 무게중심보다 상부에 작용한다면 석선파일을 반시계방향으로 회전시키려 하게 되지만 석선파일의 무게중심보다 하부에 작용한다면 석선파일을 시계방향으로 회전시키는 방향으로 작용하게 된다.

그림 9(b)는 인발각과 석선파일의 회전방향을 나타낸 것이다. 실험결과에 의하면 대부분의 경우 인발작용점이 5%, 25%, 50%와 같이 형상중심점보다 위에 있을 경우 앵커는 반시계방향(-)으로 움직였고, 인발작용점이 75%, 95%와 같이 형상중심점보다 아래에 위치할 경우 시계방향(+)으로 회전하는 양상을 보였다. 인발각이 90°인 경우는 모든 석선파일이 시계방향으로 회전한 것을 알 수 있었다.

그림 9(c)는 인발각에 따른 석선파일의 수직이동거리

를 나타낸 것이며, 이때 이동거리라 함은 석선파일의 형상중심점이 인발 전의 초기위치에서 최대 인발저항력 발생 시 형상중심 위치까지의 이동거리를 의미한다. 인발각이 증가함에 따라 인발작용점 95%를 제외하고 수직이동거리가 작아지는 것을 알 수 있었다. 수직이동거리가 작아지는 이유는 인발각이 증가할수록 인발력의 수직성분이 커지면서 석선파일을 지표면 방향으로 더 빠르게 인발하게 되며 최대인발저항력이 발현되는 시간이 줄어들게 되기 때문이다. 또한 모든 경우에 있어서 수직변위는 +값을 가져 시간이 경과함에 따라 인발에 의해 파일이 지표방향으로 나오게 되는 것을 알 수 있다.

그림 9(d)는 인발작용점에 따른 수평이동거리를 나타낸 것으로 인발각이 67.5° 이상에서는 수평방향의 변위가 인발방향의 반대방향으로 수평이동 되는 것으로 나타났다. 표 5 및 그림 9(b)에서 나타난 바와 같이 인발각이 고각이 되면 인발각 67.5°에 인발작용점 5%를 제외하고는 모두 시계방향의 회전을 가지게 되어 석선파일이 시계방향으로 회전함에 따라서 수평변위가 인발작용방향의 반대로 이동하게 된 것으로 사료된다.

그림 10(a)에는 수평인발에 따른 석선파일의 최종 변위형상을 나타내었다. 굵은실선의 직사각형이 석선파일 초기위치이며 얇은 실선은 수평인발시 인발작용점의 위치에 따른 최대인발저항력이 발생하였을 때의 최종 변위를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 인발작용점이 75%인 경우와 95%인 경우 석선파일이 시계방향으로 회전을 하였고 그 외에는 반시계방향으로 회전을 한 것을 알 수 있다.

수평인발에서 시계방향으로 회전한 인발작용점이 75%, 95%에서 최대인발저항력의 값이 다른 인발작용점의 최대인발저항력의 값보다 크게 나타난 것은 그림 7에 소개한 것과 같다. 이것은 파일이 시계방향으로 회전을 하게 되면 최대한 지반을 파괴하면서 저항하게 되지만(그림 11(a) 반시계방향으로 회전을 하게 되면 지반의 파괴는 상대적으로 작게 나타나는 때문이다(그림 11(b)). 그림 10(b)는 수직인발 후 최종변위결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타난바와 같이 수직인발에서는 모두 시계방향으로 회전을 하였으며 변위량은 다른 실험에 비하여 작은 값을 보였다. 시계방향으로 회전하게 된 것은 석선파일 형상중심에서 볼 때 인발작용점이 모두 왼쪽으로 배치되어 수직인발시 석선파일이 한쪽으로 들리는 현상이 나타나기 때문이며, 중심수평변위도 회전에 따라 오른쪽으로 움직인 것으로 나타났다.



그림 11. 석션파일인발에 의한 지반파괴양상(Allersma et al., 1999)

#### 4. 결론

모래지반에 매설된 최대인발저항력에 대한 석션파일의 거동을 원심모형실험에 의거하여 제시하고 최대인발저항력 작용 시 인발작용점, 인발각의 변화에 대한 파일의 거동을 분석하였다. 실험 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 인발작용점이 75%일 때 인발각  $0^\circ$  및  $22.5^\circ$ 에서 최대인발저항력이 뚜렷하게 나타났다. 현수선식 계류(catenary mooring)방식에서는 주로 인발각이  $10^\circ \sim 20^\circ$  범위에서 사용되므로 이때 석션파일의 인발작용점이 75%일 경우 최대의 인발저항력을 발휘할 수 있음을 알 수 있다.
- (2) 인발각  $45^\circ$  이상으로 인발하는 경우도 모래지반에서 인발작용점을 가능한 낮게 설치하는 것이 최대인발저항력을 얻는데 유리하였다. 다만, 인발작용점을 파일하부로 내릴수록 석션파일 설치 시 지반의 저항이 커지므로 실질적인 인발작용점은 75%가 최적인 것으로 사료된다.
- (3) 최대인발저항력 작용시점에서 인발작용점의 위치 및 인발각에 따라 석션파일의 회전이 이루어지며, 인발각이 증가함에 따라 회전각이 점차 감소함을 알 수 있었다.
- (4) 수평인발( $0^\circ$ ) 시 인발작용점이 석션파일의 상부에서 70% 부근에서는 석션파일의 회전이 없는 순수이동이 거동의 주된 특성을 나타내었다. 수평인발( $0^\circ$ ) 및 수직인발( $90^\circ$ ) 이외에는 60% 부근에서 유사한 특성을 나타냄을 알 수 있었다.
- (5) 인발각이 증가함에 따라 최대 인발저항력 발생시점까지의 변위가 점점 작아짐을 알 수 있었다.
- (6) 석션파일의 형상중심의 수직변위를 최대인발저항력이 작용한 시점에서 관찰한 결과 모두 지표 쪽으로 이동한 것을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 대우건설기술연구원의 자체과제로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고 문헌

1. 김택곤 (1999), “원심모형실험 및 수치해석에 의한 사질토 지반 내 터널복공의 역학적 거동에 관한 연구”, 박사학위논문, 서울대학교, pp.48-52.
2. Allersma H. G. B., Kirstein A. A., Brinkgreve R. B. J. and Simon T. (1999), “Centrifuge and Numerical Modelling of Horizontally Loaded Suction Piles”, *9th Int Offshore and Polar Eng Conf & Exhibition*, Brest, France, Vol.I, pp.711-717.
3. Allersma H. G. B., Brinkgreve R. B. J. and Simon T. (2000), “Centrifuge and Numerical Modeling of Horizontally Loaded Suction Piles”, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.10, No.3, pp.222-228.
4. Aubeny, C. P., Han, S. W., and Murff, J. D. (2003), “Inclined load capacity of suction caissons”, *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.27, pp.1235-1254.
5. Bang, S., and Cho, Y. (1999), “Analytical Performance Study of Suction Piles in Sand”, *9th Int Offshore and Polar Eng Conf & Exhibition*, Brest, France, Vol.I, pp.90-93.
6. Bang, S., and Cho, Y. (2002), “Ultimate Horizontal Loading Capacity of Suction Piles”, *Int Journal of Offshore and Polar Eng*, Vol.12, pp.56-63.
7. Bang, S., Jones, K. D., Kim, K. O., Kim, Y. S., and Cho, Y., (2011), “Inclined Loading Capacity of Suction Piles in Sand”, *Journal of Ocean Engineering*, Vol.38, Issue.7, pp.915-924.
8. Cho, Y., and Bang, S. (2002), “Inclined Loading Capacity of Suction Piles”, *12th Int. Offshore and Polar Eng Conf & Exhibition*, Kitakyushu, Japan, pp.827-832.
9. Cho I. H., Kwag D. J., Bang, S., and Cho, Y. (2008), “Use of Suction Piles for Temporary Mooring of Immersed Tunnel Elements”, *18th Int. Offshore and Polar Eng Conf & Exhibition*, Vancouver, BC, Canada, pp.665-669.
10. Cho, Y. (2001), “Calibration of Installation, Analytical Performance Study, and Analytical Solution of Loading Capacity of Suction Piles”, PhD, *South Dakota School of Mines and Technology*, pp.173-267.
11. Cho, Y., Bang, S. and Preber, T. (2002), “Transition of Soil Friction During Suction Pile Installation”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, No.5, pp.1118-1125.

12. Katagiri, M., Ueno K., and Takemura, J. (1998), "Report of cooperative test on method for preparation of sand samples", *Centrifuge 98*, Vol.2, Tokyo, Japan, pp.1095-1108.
13. Kim. Y., Kim. K., Cho. Y. and Bang. S. (2010), "Centrifuge Model Tests on Suction Pile Pullout Loading Capacity in Sand", *Int. Conf. on Physical Modelling in Geomechanics*, pp.787-792.
14. Park J. B., Park C. L., Kim S. W., Jeong H. J., Kim Y. S., Kim S. J. and Kim Y. G. (1998), "Geotechnical Centrifuge Facility at Daewoo Institute of Construction Technology", *Centrifuge 98*, Tokyo, Japan, pp.9-12.
15. Randolph, M. F., and Houlsby, G. T. (1984), "The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil", *Geotechnique*, Vol.34, No.4, pp.613-623.
16. Randolph, M. F., Cassidy, M. J., Gourvenec, S. and Erbrich, C. J. (2005), "Challenges of Offshore Geotechnical Engineering", State of the Art Paper, *16th ICSMGE*, Osaka, Japan, 1:123-176. Rotterdam: Balkema.
17. Supachawarote C., Randolph, M. F., and Gourvenec S. (2004), "Inclined Pull-out Capacity of Suction Caissons", *14th Int. Offshore and Polar Eng Conf & Exhibition*, Toulon, France, pp.500-506.
18. 岡村未対, 萩原敏行, 松田 隆 (2004), "遠心模型実験—実験技術と実務への適用—3. 予測手段, 予測対象としての遠心模型実験", *土と基礎*, Vol.52, No.11, pp.51-58.

(접수일자 2011. 3. 30, 심사완료일 2011. 11. 7)