

모래지반에서 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 영구수평변위 평가

Evaluation of Permanent Lateral Displacement of a Cyclic Laterally Loaded Pile in Sandy Soil

백 성 하¹ Baek, Sung-Ha 김 준 영² Kim, Joon-Young
이 승 환³ Lee, Seung-Hwan 정 충 기⁴ Chung, Choong-Ki

Abstract

Pile foundations that support offshore structures or transmission towers are dominantly subjected to cyclic lateral loads due to wind and waves, causing permanent displacement which can severely affect stability of the structures. In this study, a series of cyclic lateral load tests were conducted on a pre-installed aluminum flexible pile in sandy soil with three different relative densities (40%, 70% and 90%) in order to evaluate the permanent displacement of a cyclic laterally loaded pile. Test results showed that the cyclic lateral loads accumulated the irreversible lateral displacement, so-called permanent displacement. As the number of cyclic lateral load increased, accumulated permanent displacement increased, but the permanent displacement due to one loading cycle gradually decreased. In addition, the permanent displacement of a pile increased with decrement of relative density and decreased by soil saturation. From the test results, the normalized permanent displacement defined as the cumulative permanent displacement to the initial permanent displacement ratio was investigated, and empirical equations for predicting the normalized permanent displacement was developed in terms of relative density of the soil and the number of cyclic lateral load.

요 지

해상구조물, 송전탑 등을 지지하는 말뚝기초는 바람, 조류, 파랑 등의 영향으로 횡방향 반복하중을 지배적으로 받으며, 이는 말뚝 주변 지반에 영구수평변위를 발생시켜 구조물의 안정성 및 기능성을 저해한다. 본 연구에서는 횡방향 반복하중에 의해 발생하는 말뚝의 영구수평변위를 평가하기 위하여, 서로 다른 세 가지 상대밀도(40%, 70%, 90%)로 조성된 건조 및 포화 모래지반에서 모형말뚝시험을 수행하였다. 모형시험 결과, 모든 시험조건에서 말뚝에 재하된 횡방향 반복하중은 말뚝 주변 지반에 영구수평변위를 발생시켰다. 누적된 영구수평변위의 크기는 말뚝에 재하되는 횡방향 반복하중의 크기 및 재하횟수가 증가함에 따라 증가하였지만, 1회 재하로 인하여 발생하는 영구수평변위의 증가량은 점차 감소하였다. 또한, 말뚝에 발생하는 영구수평변위는 지반의 상대밀도가 클수록 작게 발생하고, 지반이 포화되면 크게 발생하는 것으로 평가되었다. 추가적으로, 누적 영구수평변위를 최초 재하 시 발생한 영구수평변위로 정규화한 영구수평변위를 평가하였으며, 이를 모래지반의 상대밀도, 횡방향 반복하중의 재하횟수에 관한 식으로 나타내었다.

1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)

2 정희원, 서울대학교 공학연구소 선임연구원 (Member, Post Doc. Researcher, Eng. Research Institute, Seoul National Univ.)

3 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)

4 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ., Tel: +82-2-880-7347, Fax: +82-2-873-2684, geolabs@snu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 세계적으로 신재생에너지 확보를 위한 관심이 높아지고 있으며, 특히 친환경적이며 경제성이 우수하다고 평가받고 있는 해양에너지의 개발이 확대되고 있는 추세이다. 이에 따라 해상에서 에너지를 생산하고 이를 도시에 공급하기 위해 활용되는 해상구조물 및 대형 송전탑 등의 건설이 증가하고 있다. 해상구조물 및 송전탑 등을 지지하기 위해 설치되는 말뚝기초는, 일반적인 기초와 달리 구조물의 자중에 의한 연직하중은 비교적 작은 반면, 바람, 조류, 파랑 등에 의한 횡방향 반복하중을 지배적으로 받는다. 따라서 이러한 구조물의 설계 시에는 횡방향 반복하중에 따른 말뚝기초의 거동을 예측하고 이를 설계 지배인자로 고려해야 한다. 특히 말뚝에 횡방향 하중이 반복적으로 재하될 때 주변 지반에 누적되는 영구수평변위는 구조물의 기능성 저해, 지지력 저하 등의 문제를 발생시킨다고 알려져 있으므로(Achumus et al., 2009), 구조물의 안정성 및 사용성을 확보하기 위해서는 말뚝기초의 횡방향 극한지지력 확보와 더불어 영구수평변위를 평가하고 제한하는 것이 핵심적 설계 고려사항이라 할 수 있다.

일반적으로, 말뚝의 횡방향 지지거동은 말뚝이 설치된 지반조건(상대밀도 및 포화여부 등)과 말뚝에 재하되는 횡방향 반복하중의 특성(횡방향 반복하중의 크기 및 재하횟수 등)에 영향을 받는다고 알려져 있으며(Long and Vanneste, 1994; Lin and Liao, 1999), 이를 영구수평변위 관점에서 평가하기 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 횡방향 반복하중을 받는 말뚝기초의 설계 시 널리 활용되는 API 설계기준서(2007)에서는 정적 p-y 곡선에 현장시험 결과로 평가된 지반저항 감소계수를 적용하여 말뚝의 영구수평변위를 평가하고 있으나, 횡방향 반복하중의 크기 및 재하횟수 등과 같은 반복하중의 특성을 고려하고 있지 않다. Hettler(1981)와 Rosquoet et al.(2007)은 모래지반에 설치된 모형말뚝에 다양한 크기의 횡방향 반복하중을 재하하여, 횡방향 반복하중의 크기 및 재하횟수가 영구수평변위에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과, 말뚝의 영구수평변위 산정식을 반복하중의 재하횟수에 대한 로그함수 형태로 제안하였지만, 비교적 조밀한 건조모래지반에서 수행된 결과였다.

또한, Little과 Briuad(1988)은 현장말뚝재하시험 결과를 활용하여 영구수평변위 산정식을 반복하중의 재하횟수에 대한 거듭제곱의 형태로 제안하였고, LeBlanc et al. (2010)과 Nicolai와 Ibsen(2014)은 1g 모형말뚝시험을 수행하여 장기적인 횡방향 반복하중이 말뚝의 지지거동에 미치는 영향을 평가하고 영구회전각의 산정식을 반복하중의 재하횟수에 대한 거듭제곱의 형태로 제안하였다. 그렇지만 이들 연구도 모래 및 점토로 이뤄진 층상의 현장지반조건과(Little and Briuad, 1988), 느슨한 건조모래지반 및 조밀한 포화모래지반(각각, LeBlanc et al., 2010; Nicolai and Ibsen, 2014)과 같은 한정된 지반조건에서만 평가되었다는 한계가 있었다. 이에 Paik과 Park(2010)은 다양한 상대밀도를 가지는 건조모래지반에서 1g 모형말뚝시험을 수행하여 말뚝의 영구수평변위를 평가한바 있으나, 이 또한 조밀한 건조모래지반을 제외하고는 한 가지 반복하중 크기(정적 횡방향 극한지지력의 40% 수준)에 대해서만 수행된 제한적인 결과였다. 즉, 앞서 언급한 바와 같이 말뚝의 영구수평변위는 말뚝이 설치된 지반조건 및 횡방향 반복하중의 특성과 밀접한 연관이 있지만, 이를 종합적으로 연구한 결과는 제시된 바 없다.

이에 본 연구에서는 서로 다른 상대밀도(40%, 70%, 90%)로 조성된 건조 및 포화 모래지반에서 서로 다른 크기의 횡방향 반복하중(정적 횡방향 극한지지력의 20%, 40%, 60% 수준)이 적용된 1g 모형말뚝시험을 수행하여, 지반조건 및 하중조건이 말뚝의 영구수평변위에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다. 모형시험 결과를 바탕으로 모래지반의 상대밀도 및 횡방향 반복하중의 재하횟수에 따른 말뚝의 영구수평변위 산정식을 제안하였고, 이를 횡방향 반복하중을 지배적으로 받는 말뚝의 설계 시 활용 가능하도록 하였다.

2. 모형말뚝시험 방법 및 조건

2.1 모형시험 장비

본 연구에서 사용된 모형토조는 Fig. 1과 같이 폭 600mm, 길이 1800mm, 높이 1000mm의 직육면체의 형태로, 두께 20mm의 강화 아크릴판으로 제작하였다. 모형토조의

하부에는 나선형태의 모형말뚝 고정단(fixed base)을 설치하여 암반에 근입된 말뚝을 모사할 수 있도록 하였다.

모형말뚝은 외경 30mm, 두께 2mm, 길이 1400mm의 알루미늄 파이프를 이용하여 제작되었고, 그 제원은 Table 1과 같다. 모형말뚝의 제작 시 모형말뚝시험의 크기효과(size effect)를 고려하기 위해서 보편적으로 사용되는 연성의 강관말뚝을 원형(prototype)으로 선정하고 Iai(1989)의 1g 상사비를 적용시켜 축소모사 하였다. 단, 모형말뚝 재질의 한계로 원형말뚝과 모형말뚝의 두께 및 휨강성(flexural rigidity)의 상사관계를 모두 만족시키는 것은 불가능하였다. 본 연구에서는 말뚝의 두께 보다는 휨강성이 횡방향 지지거동에 지배적인 영향을 미치는 것을 고려하여, 모형말뚝의 두께를 2mm로 조절하여 휨강성의 상사관계를 만족하도록 하였다.

Poulos와 Davis(1980)와 Rao et al.(1998)에 의하면 말뚝이 횡방향 거동으로 영향을 미치는 지반의 범위는 말뚝직경의 10배(본 연구, 300mm)로 알려져 있다. 이에 따라 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 인접 말뚝의 중심간격이 말뚝직경을 10배 이상(약 10배~13배) 되도록 하였고, 모형토조에 동일한 재원을 가지는 말뚝을 동시에 4본 설치할 수 있도록 설계하였다. 두부 자유조건(free-

head condition)에서 모형말뚝시험이 수행되었으며, 횡방향 하중은 변위제어가 가능한 횡방향 재하장비를 활용하여 지표로부터 300mm 떨어진 지점에서 재하되었다. 모형말뚝시험이 수행되는 동안 모형말뚝에 재하되는 횡방향 하중 및 횡방향 변위는 횡방향 재하장비에 부착된 하중계(load cell)와 말뚝 두부에 설치된 변위계(LVDT)를 통해 2초에 1회씩 측정되었다.

2.2 모형지반

모형지반 조성에는 국내의 대표적인 모래시료인 주문진 표준사를 사용하였으며, 입도분포곡선과 주요 물성값을 각각 Fig. 2와 Table 2에 나타냈다. 주문진 표준사는 균등계수(C_u)가 1.68로 입자크기가 비교적 균질하여 통일분류법에 의해 SP(poorly graded sand)로 분류되며, 평균유효입경(D_{50})은 0.58mm 이다. Nunez(1988)에 따르면 말뚝의 외경이 지반시료 평균유효입경의 45배보다 크면 입자의 내적크기효과(internal scale effect)를 무시할 수 있다고 알려져 있는데, 본 연구에서 사용된 모형말뚝의 외경은 주문진 표준사 평균유효입경의 약 52배로 이를 만족하였다.

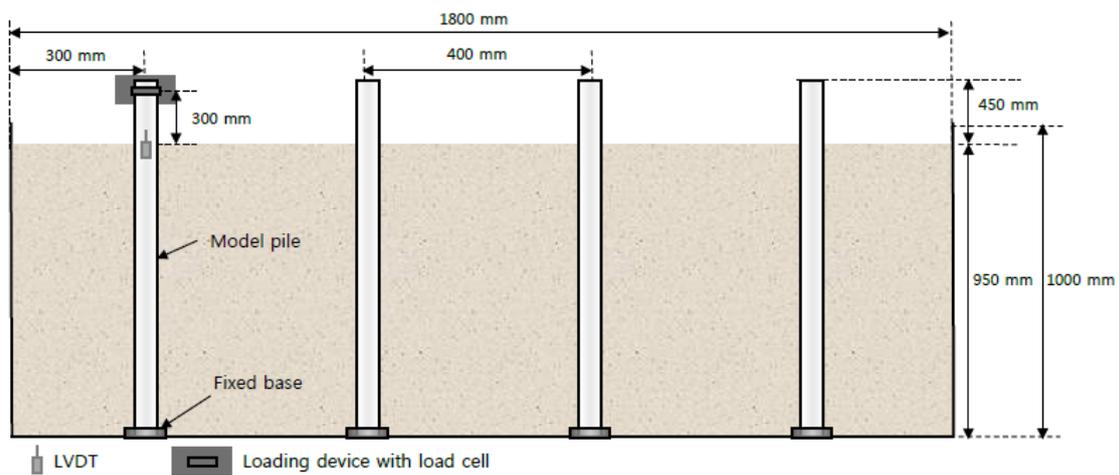


Fig. 1. The schematic diagram of model pile experiment set-up

Table 1. Material properties of model pile

	Scale factor	Prototype	Model ($\lambda=15$)
Outside diameter (mm)	λ	450	30
Length (mm)	λ	21000	1400
Embedment depth (mm)	λ	14250	950
Thickness (mm)	λ	40	2
Flexural rigidity (Ncm ²)	$\lambda^{4.5}$	2.29E+8	1.19E+3

모형지반의 상대밀도는 40%, 70%, 90%이며, 각각의 상대밀도는 느슨한(loose), 약간 조밀한(medium dense), 매우 조밀한(very dense) 상태를 대표한다. 모형지반은 세 가지 다른 상대밀도를 가지는 건조토 또는 포화토 단일지반으로 총 깊이 950mm에 대해 일곱 층(150mm 씩 다섯 층, 100mm 씩 두 층)으로 나누어 조성되었다. 우선 모형지반의 각 층을 조성하는데 필요한 시료의 양을 층별 체적과 상대밀도를 고려하여 계산하고 준비하였다. 이후 준비된 시료를 모형토조에 층별로 채우고, 에어샌드래머(air sand rammer) 장비를 활용하여 시료를 다짐으로써 목표한 상대밀도의 모형지반을 조성하였

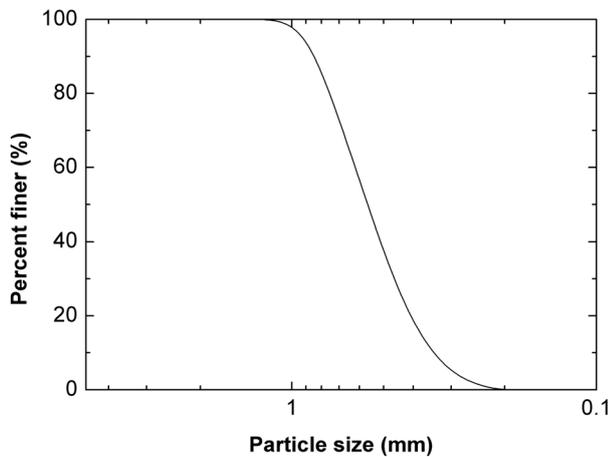


Fig. 2. Particle size distribution of Jumoonjin sand

Table 2. Material properties of Jumoonjin sand

USCS	SP	e_{max}	0.99
D_{10} (mm)	0.35	e_{min}	0.63
D_{50} (mm)	0.58	C_u	1.68
G_s	2.65	D_r (%)	40, 70, 90

Table 3. Test program

Soil conditions		Loading conditions (no. of cycles: 20)	Loading rate (mm/s)
Loose sand ($D_r=40\%$)	Dry	Static	0.06
		Cyclic ($0.2H_{us}$, $0.4H_{us}$, $0.6H_{us}$)	
	Saturated	Static	
		Cyclic ($0.2H_{us}$, $0.4H_{us}$, $0.6H_{us}$)	
Medium dense sand ($D_r=70\%$)	Dry	Static	
		Cyclic ($0.2H_{us}$, $0.4H_{us}$, $0.6H_{us}$)	
	Saturated	Static	
		Cyclic ($0.2H_{us}$, $0.4H_{us}$, $0.6H_{us}$)	
Very dense sand ($D_r=90\%$)	Dry	Static	
		Cyclic ($0.2H_{us}$, $0.4H_{us}$, $0.6H_{us}$)	

다. 또한 지반포화에 따른 영향을 평가하고자, 상대밀도 40%와 70% 포화지반을 조성하여 추가적인 시험을 수행하였다. 포화지반 조성 시 층별 체적 및 상대밀도를 고려하여 준비된 건조시료를 7일 간 물에 담가두어(soaked) 입자 사이에 존재하는 공기를 제거한 뒤 활용하였고, 실제 현장지반 매립방법(reclamation technique)과 유사하게 젖은 모래를 물로 채워진 토조에 층층이 채워 다지는 방식으로 지반을 조성하였다(Yang, 2009). 각각의 지반 조성 시 여러 위치에 알루미늄 캔을 설치하여 위치별 상대밀도를 측정하였고, 그 결과 모형지반의 균질성을 확인하였다.

2.3 모형시험 계획 및 조건

본 연구에서 수행된 모형말뚝시험의 조건은 Table 3과 같다. 모형말뚝시험은 제원이 동일한 4본의 말뚝을 모형토조 하부에 고정시켜 설치하고(pre-installed), 모형지반을 조성한 뒤 수행되었다. 우선 첫 번째 말뚝에 횡방향 정적하중을 재하하여 횡방향 하중-변위 곡선을 평가하고, 이로부터 각 지반조건 별 정적 횡방향 극한지지력(H_{us})을 평가하였다. 횡방향 하중-변위 곡선으로부터 횡방향 극한지지력을 평가하는 기준은 여러 연구자들로부터 다양하게 제안되어 왔는데(Meyerhof et al., 1981; Davidson et al., 1982; Fleming et al., 1992), 본 연구에서는 말뚝 단면을 원형으로 가정하여 말뚝 직경의 10% 만큼 변위가 발생하였을 때를 극한상태로 간주하는 Fleming et al.(1992)의 파괴기준을 적용하였다. 이후, Fig. 3과 같이 나머지 세 말뚝에 각각 정적 횡방향 극한지지력의 20%, 40%, 60% 크기에 해당하는 횡방향 하중을 20회씩 반복재하하고, 각 재하단계마다의 누적변위를 측정

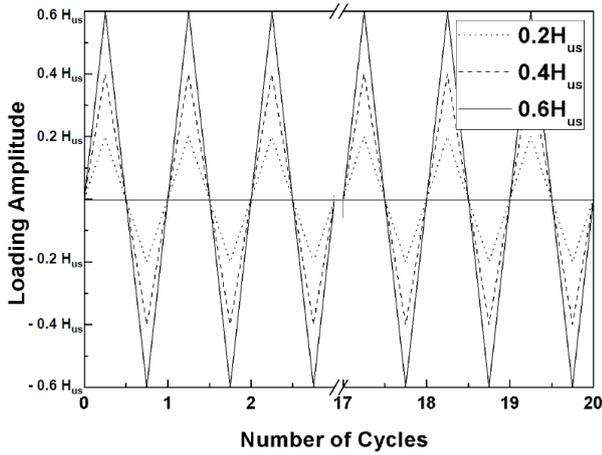


Fig. 3. Cyclic loading configuration

하여 말뚝의 영구수평변위를 평가하였다. 이 때, 횡방향 하중의 재하속도는 0.06mm/s로 과잉간극수압이 발생되지 않도록 충분히 천천히 재하하였다.

3. 모형말뚝시험 결과 및 분석

3.1 정적 횡방향 극한지지력

모형말뚝시험 시 적용할 횡방향 반복하중의 크기를 결정하기 위하여 각 지반조건에 대해 설치된 4본의 말뚝 중 첫 번째 말뚝에 횡방향 정적하중 재하시험을 수행

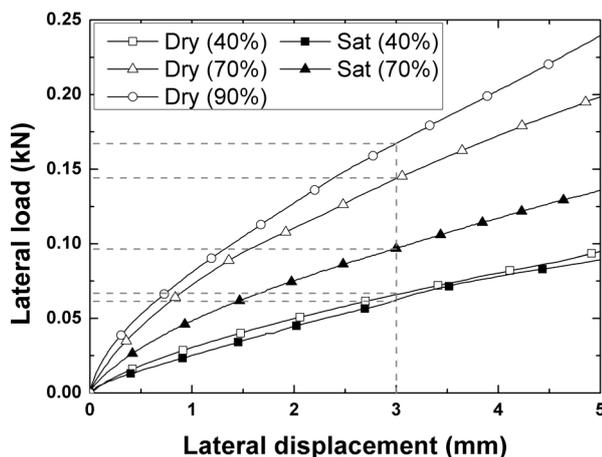


Fig. 4. Static lateral load-displacement curves

Table 4. Static lateral load capacities

Soil conditions	Loose sand ($D_r=40\%$)		Medium dense sand ($D_r=70\%$)		Very dense sand ($D_r=90\%$)
	Dry	Saturated	Dry	Saturated	Dry
Static lateral load capacity, $H_{u,s}$ (kN)	0.0658	0.0608	0.1437	0.0968	0.1673

하였다. Fig. 4는 말뚝에 횡방향 정적하중을 재하하여 평가한 각 지반조건 별 횡방향 하중-변위 곡선이다. 앞서 언급한 바와 같이 Fleming et al.(1992)의 파괴기준을 적용하여 말뚝 직경의 10%(3mm)에 해당하는 변위가 발생했을 때의 횡방향 하중을 횡방향 극한지지력으로 평가하였다. Table 4에 나타난 바와 같이, 말뚝의 정적 횡방향 극한지지력은 지반의 상대밀도가 커질수록 증가하고, 지반의 포화 시 감소하였다. 이는 지반의 상대 밀도가 증가할수록 강도가 증가하고, 포화 시 지반의 유효응력 저하로 강도가 감소하여 말뚝 주변 지반의 횡방향 저항력이 각각 증가 및 감소하기 때문이다.

3.2 횡방향 반복하중 재하 시 말뚝의 영구수평변위

평가된 정적 횡방향 극한지지력의 20%, 40%, 60%에 해당하는 크기의 횡방향 하중을 각 말뚝에 20회 씩 양방향 반복재하하여, 횡방향 반복하중 재하 시 횡방향 하중 변위곡선을 평가하였다. Fig. 5에서 보듯이, 말뚝에 횡방향 하중이 반복적으로 재하됨에 따라 말뚝의 영구수평변위가 발생하였다. 말뚝에 횡방향 하중이 최초 재하되면 말뚝 전면부, 즉 최초 하중 재하방향의 지반은 다져지고, 후면부의 지반은 주동상태(active state)가 되어 말뚝-지반 틈새(gap)로 모래가 충전(flow)된다. 이후 말뚝에 횡방향 하중이 반대방향으로 재하될때, 주동 상

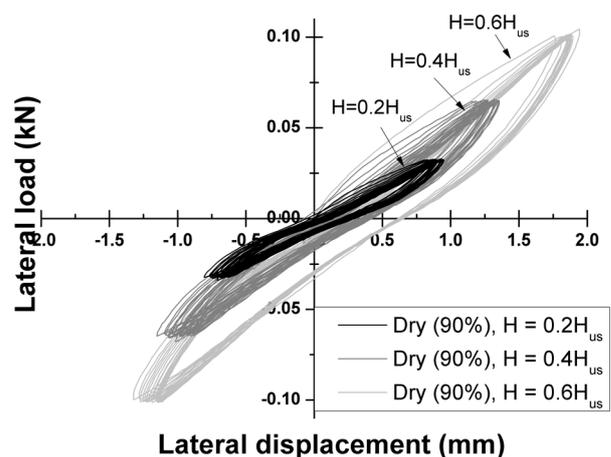


Fig. 5. Cyclic lateral load-displacement curves ($D_r=90\%$; dry)

태였던 말뚝 후면부 지반은 틈새에 충전된 모래의 영향으로 동일한 크기의 반대방향 재하에 대해 더 작은 크기의 변위가 발생한다. 더불어, 말뚝의 전면부 지반은 초기 재하시의 다짐에 의해 말뚝-지반 틈새에 더 적은 양의 모래를 충전시키므로 영구수평변위가 발생한다. 이와 같이 말뚝에 횡방향 하중이 반복재하되면 말뚝 전면부의 지반이 후면부 지반보다 크게 다져지는 과정이 반복되며, 말뚝의 첫 번째 하중 재하 방향으로 횡방향 변위가 누적된다(Long and Vanneste, 1994). 모형말뚝시험 결과로부터 지반조건 및 횡방향 재하하중의 특성이 말뚝의 영구수평변위에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 각 재하단계의 누적변위를 측정하여 말뚝의 영구수평변위를 평가하였다.

Fig. 6의 (a), (b), (c)는 각각 상대밀도 40%, 70%, 90% 지반에서 평가된 영구수평변위(y_N)를 반복하중의 재하횟수(N)에 따라 나타낸 것이다. Fig. 6에서 보듯이, 모든 시험조건에서 말뚝에 재하 된 횡방향 반복하중은 말뚝 주변 지반에 영구수평변위를 발생시켰다. 누적된 영구수평변위의 크기는 말뚝에 재하되는 횡방향 반복하중의 크기와 횟수가 증가함에 따라 점차 증가하는 경향을 보였지만, 1회 재하로 인하여 발생하는 영구수평변위의 증가량은 점차 감소하였다. 영구수평변위는 말뚝 주변 지반의 다짐 및 충전의 반복에 의해 발생하는데, 반복 횟수가 증가할수록 지반의 다짐 및 충전량이 점차 감소하기 때문에 판단된다. 이러한 결과는, 횡방향 반복하중에 의한 말뚝의 횡방향 지지거동의 변화가 초기 반복 재하 시 크게 발생하고 반복 횟수가 증가함에 따라 점차 적어진다는 Barton(1979)과 Hoadley et al.(1981)의 연구결과와 유사하다고 할 수 있다. 또한, 말뚝에 발생하는 영구수평변위는 지반의 상대밀도가 클수록 작게 발생하고 지반이 포화될수록 크게 발생하는 것으로 평가되었는데, 지반의 상대밀도가 증가할수록 같은 재하단계에서 말뚝 주변 지반의 다짐 및 충전량이 작아지며, 포화 시에는 증가하기 때문으로 판단된다.

지반조건 및 하중조건이 말뚝의 영구수평변위에 미치는 영향을 보다 정량화하여 평가하기 위하여, 각 시험조건 별로 최초 재하 시 발생한 영구수평변위(y_1)에 대한 N 회 반복재하 시 누적 영구수평변위(y_N)의 비로 정의되는 정규화 된 영구수평변위(y_N/y_1)를 평가하였다. Fig. 7의 (a), (b), (c)는 각각 상대밀도 40%, 70%, 90% 지반에서 평가된 정규화 된 영구수평변위(y_N/y_1)를 반복하중의 재하횟수(N)에 따라 나타낸 것이다. 누적 영구수

평변위와 같이, 정규화 된 영구수평변위는 재하횟수에 따라 점차 증가하는 경향을 보였지만 1회 재하로 인한 증가량은 점차 감소하였다. 또한 지반의 포화여부, 횡방향 반복하중의 크기에는 영향을 받지 않는 것으로 나타

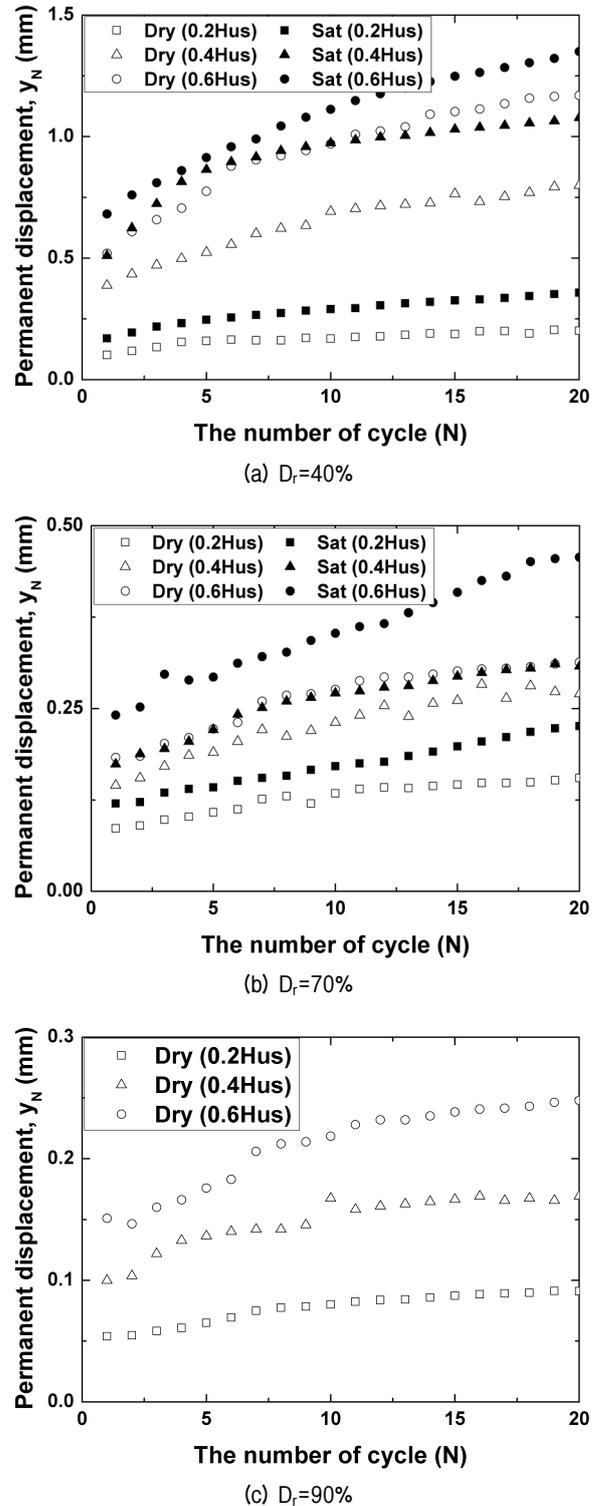


Fig. 6. Permanent displacement in terms of the number of cyclic lateral load

났다. 반면, 지반의 상대밀도는 정규화 된 영구수평변위에 영향을 미치는 것으로 평가되었는데, 상대밀도가 높을수록 작아지는 경향을 보였다. 이는 정규화 된 영구수평변위가 지반의 상대밀도에 영향을 미치지 않는다는

Paik과 Park(2010)의 연구결과와는 상반되지만, Lin과 Liao(1999)의 연구결과와는 일치한다. Paik과 Park(2010)의 연구결과는 대부분 상대밀도 90%의 매우 조밀한 모래지반에서 수행된 한방향 반복재하시험 결과로부터 도출된 것으로, 상대밀도에 따른 정규화 된 영구수평변위 변화를 적절히 고려하기에는 한계가 있었을 것으로 판단된다.

4. 횡방향 반복하중 재하 시 말뚝의 영구수평변위 산정식 제안

횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 정규화 된 영구수평변위는 지반의 포화여부, 횡방향 반복하중의 크기와는 큰 관련이 없었고, 지반의 상대밀도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 지반의 각 상대밀도 조건에 따라 정규화 된 영구수평변위의 횡방향 반복하중 재하횟수에 대한 산정식을 평가하였다. 이 때, 정규화 된 영구수평변위가 반복하중의 재하횟수에 따라 증가하지만 1회 재하로 인한 증가량은 점차 감소하는 경향을 고려하여, Little과 Briud(1988)와 Paik과 Park(2010)과 유사하게 식 (1)을 통한 회귀분석을 수행하여 상대밀도에 따른 계수 α 를 결정하였다.

$$y_N/y_1 = N^\alpha \quad (1)$$

그 결과는 Table 5와 같으며, 이를 활용하여 느슨한 모래지반($D_r=40\%$), 약간 조밀한 모래지반($D_r=70\%$), 매우 조밀한 모래지반($D_r=90\%$)에 설치되어 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 영구수평변위 평가가 가능하다.

추가적으로, 본 연구의 결과를 보다 일반적인 경우에 적용하기 위하여 모형시험에 적용된 상대밀도(40%, 70%,

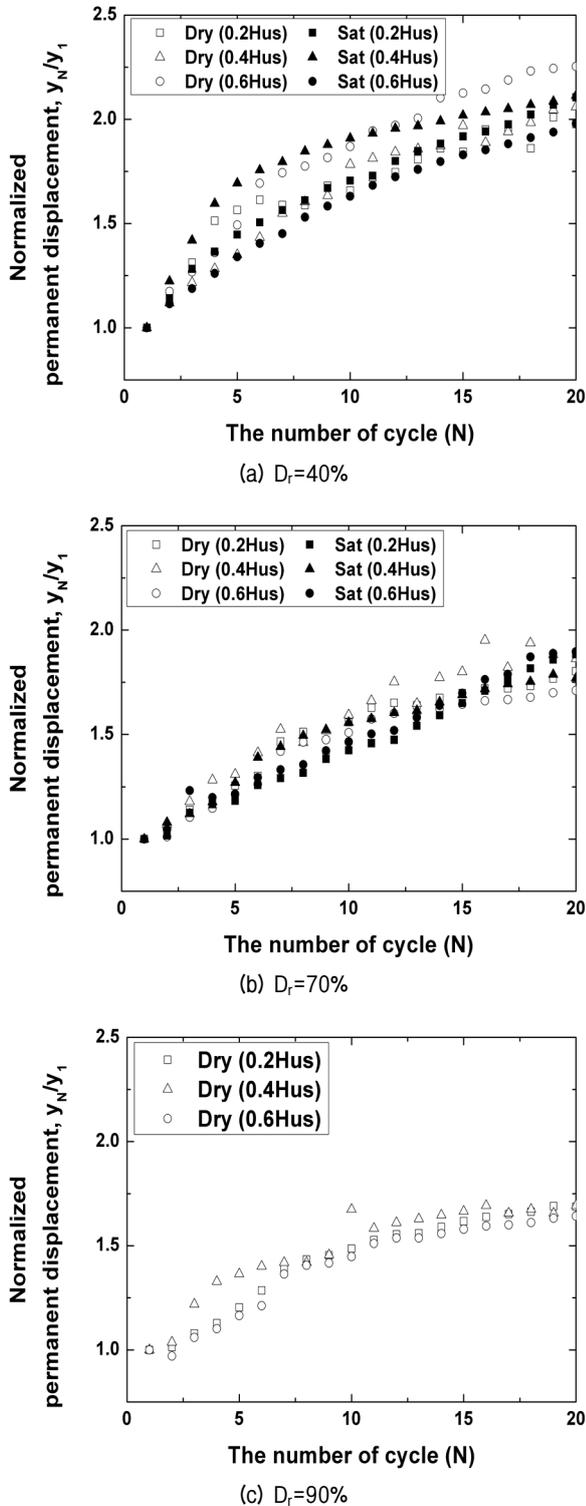


Fig. 7. Normalized permanent displacement in terms of the number of cyclic lateral load

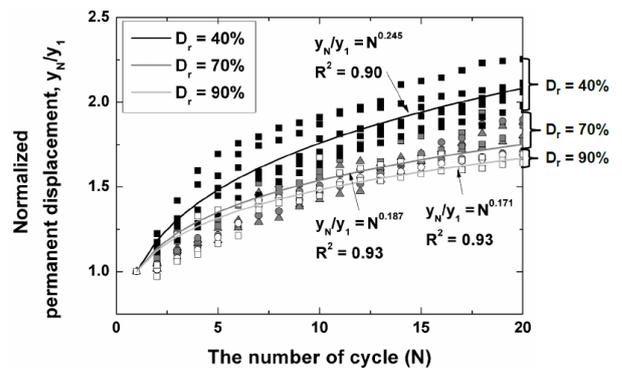


Fig. 8. Regression analysis of normalized permanent displacement

Table 5. Empirical equations of normalized permanent displacement of a pile in sand (where, N is the number of cycle)

Soil conditions	Normalized permanent displacement, y_N/y_1
Loose sand ($D_r=40\%$)	$= N^{0.245}$
Medium dense sand ($D_r=70\%$)	$= N^{0.187}$
Very dense sand ($D_r=90\%$)	$= N^{0.171}$

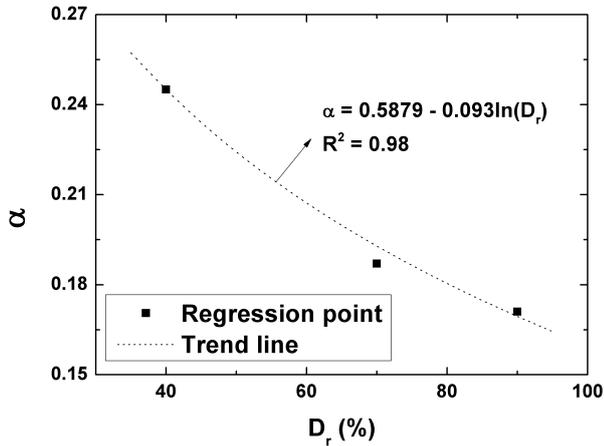


Fig. 9. Regression analysis of the parameter α

90%)에 대해 결정된 계수 α (각각 0.245, 0.187, 0.171)를 각 상대밀도에 대해 회귀분석하여 Fig. 9에 나타냈다. 그 결과, 계수 α 는 상대밀도에 대해 로그함수의 형태로 나타낼 수 있었고 이를 활용하여 결정된 말뚝의 정규화된 영구수평변위는 식 (2)와 같다. 식 (2)를 활용하면 임의의 상대밀도를 갖는 건조 및 포화 모래지반에 설치되어 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 영구수평변위를 평가할 수 있다.

$$y_N/y_1 = N^{0.5879 - 0.093\ln(D_r)} \quad (2)$$

본 연구에서는 모형말뚝시험 결과에 근거하여 경험적으로 제안된 산정식의 신뢰성을 검증하기 위하여 Paik (2010)과 Baek et al.(2016)의 연구와 유사하게, 모형말뚝시험으로 평가한 정규화 된 영구수평변위를 제안된 산정식을 통해 예측한 정규화 된 영구수평변위와 비교하였다. 또한, 기존 연구자들에 의해 제안된 방법(Table 6)으로 산정한 정규화 된 영구수평변위도 함께 비교하여 Fig. 10에 나타냈다.

Fig. 10에서 확인할 수 있듯이, 제안된 산정식은 모형말뚝시험 결과를 비교적 정확하게 예측하였다. 반면, Hettler(1981), Little과 Briaud(1988), Rosquoet et al.(2007)

Table 6. Existing empirical equations of normalized permanent displacement of a pile (where, N is the number of cycle, DF is load amplitude, and F_{max} is the maximum applied load)

Researcher	Normalized permanent displacement, y_N/y_1
Hettler (1981)	$= 1 + 0.2\ln N$
Little & Briaud (1988)	$= N^{0.136}$
Rosquoet et al. (2007)	$= 1 + 0.08(DF/F_{max})^{0.35}\ln N$
Paik & Park (2010)	$= N^{0.277}$

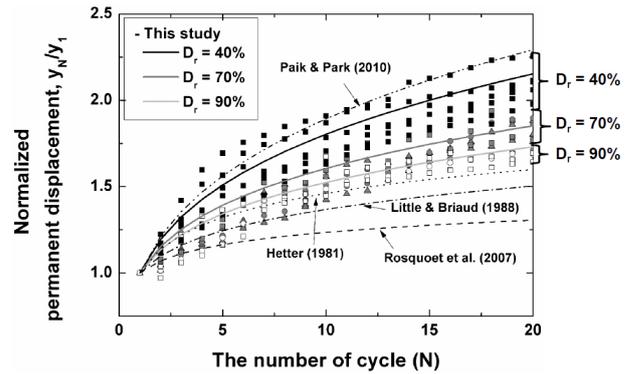


Fig. 10. Comparison between experimental values and the values predicted by the proposed method and the previous methods

은 영구수평변위를 다소 과소평가하고 Paik과 Park(2010)은 과대평가 하는 것으로 나타났다. 단, 본 연구에서 제안된 산정식은 제한된 조건하에서 수행된 축소모형시험을 통해 평가된 것이므로, 추가적인 연구를 통해 이를 검증 및 보완하는 과정이 필요하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 1g 모형말뚝시험을 수행하여 모래지반에서 횡방향 반복하중을 지배적으로 받는 말뚝기초의 영구수평변위를 평가하였다. 서로 다른 상대밀도(40%, 70%, 90%)로 조성된 건조 및 포화 모래지반에 모형말뚝을 설치하고 횡방향 반복하중을 재하하여 지반조건 및 하중조건이 말뚝의 영구수평변위에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 모래지반에 설치된 말뚝에 횡방향 반복하중 재하시, 말뚝-지반 사이에서 영구수평변위가 발생 및 누적되었다. 누적된 영구수평변위의 크기는 말뚝에

재하되는 횡방향 반복하중의 크기와 횡수가 증가함에 따라 점차 증가하는 경향을 보였지만, 1회 재하로 인하여 발생하는 영구수평변위의 증가량은 점차 감소하였다. 영구수평변위는 말뚝 주변 지반의 다짐 및 충진에 의해 발생하는데, 반복 횡수가 증가할수록 지반의 다짐 및 충진량이 점차 감소하기 때문으로 판단된다.

- (2) 말뚝에 발생하는 영구수평변위는 모래지반의 상대 밀도가 클수록 작게 발생하고, 지반이 포화될수록 크게 발생하였다. 이 또한 지반의 상대밀도가 증가함에 따라 말뚝 주변 지반의 다짐 및 충진량이 작아지며, 포화 시에는 증가하기 때문으로 판단된다.
- (3) 횡방향 반복하중 최초 재하 시 발생한 영구수평변위에 대한 N 회 반복재하시의 누적 영구수평변위의 비로 평가한 정규화 된 영구수평변위는 지반의 포화여부 및 횡방향 반복하중의 크기에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 반면, 지반의 상대밀도는 정규화 된 영구수평변위에 영향을 미치는 것으로 나타났다는데, 상대밀도가 높을수록 작아지는 경향을 보였다.
- (4) 모형말뚝시험 결과를 활용하여 모래지반에서 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 정규화 된 영구수평변위 산정식을 제안하였다. 제안된 산정식을 통해 평가한 영구수평변위를 모형말뚝시험 결과와 비교한 결과, 제안된 산정식을 통해 모래지반에서 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 영구수평변위를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

본 연구결과는 모래지반에 설치되어 횡방향 반복하중을 받는 말뚝기초의 영구수평변위를 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 정적수평재하시험 혹은 이론적 방법 등을 활용하여 평가하고자 하는 대상 말뚝의 횡방향 하중 1회 재하 시 영구수평변위를 평가하면, 제안된 산정식을 통해 동일 조건의 하중이 반복재하될 때의 누적 영구수평변위를 예측할 수 있다. 단, 이상의 결과는 말뚝에 횡방향 하중을 양방향으로 20회 씩 반복재하하여 평가된 결과로서 한방향 반복하중 혹은 장기적인 횡방향 반복하중을 지배적으로 받는 말뚝의 지지거동을 예측하는데는 한계가 있으므로, 추가적인 말뚝시험을 수행하여 제시된 연구결과를 검증 및 보완할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양개발용 수중건설로봇 사업단, PJT200539).

참고문헌 (References)

1. Achumus, M., Kuo, Y.S., and Abdel-Rahman, K. (2009), "Behavior of Monopile Foundations under Cyclic Lateral Load", *Computer and Geotechnics*, Vol.36, pp.725-735.
2. American Petroleum Institute (2007), *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design: API recommended practice 2A-WSD (RP 2A-WSD)*, API.
3. Baek, S.H., Kim, J.Y., Lee, S.H., and Chung, C.K. (2016), "Effect of Relative Density on Lateral Load Capacity of a Cyclic Laterally Loaded Pile in Sandy Soil", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.4, pp.41-49 (in Korean).
4. Barton, Y.O. (1979), "Lateral Loading of Model Piles in the Centrifuge", M.Phil. Thesis, University of Cambridge.
5. Davidson, H.L., Cass, P.G., Khilji, K.H., and McQuade, P.V. (1982), *Laterally loaded drilled pier research*, Report EL-2197, EPRI, 324p.
6. Fleming, W.G., Weltman, A.J., Randolph, M.F., and Elson, W.K. (1992), *Piling Engineering*, 2nd ed., John Wiley and Sons Inc., New York.
7. Hettler, A. (1981), "Verschiebungen Starrer und Elastischer Gründungskörper in Sand bei Monotoner und Zyklischer Belastung", Ph.D. Thesis, University of Karlsruhe.
8. Hoadley, P.J., Barton, Y.O., and Parry, R.H.G. (1981), "Cyclic Lateral Load on Model Pile in a Centrifuge", *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, pp.621-625.
9. Iai, S. (1989), "Similitude for Shaking Table Tests on Soil-structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field", *Soil and Foundations*, Vol.29, No.1, pp.105-118.
10. LeBlanc, C., Houlsby, G.T., and Byrne, B.W. (2010), "Response of Stiff Piles in Sand to Long-term Cyclic Lateral Loading", *Geotechnique*, Vol.60, No.2, pp.79-90.
11. Lin, S.S. and Liao, J.C. (1999), "Permanent Strains of Piles in Sand due to Cyclic Lateral Loads", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol.125, No.9, pp.798-802.
12. Little, R.L. and Briaud, J.L. (1988), "Full Scale Cyclic Lateral Load Tests on Six Single Piles in Sand", *Miscellaneous paper GL-88-27*, Geotechnical Division, Texas A&M University, Texas.
13. Long, J. and Vanneste, G. (1994), "Effect of Cyclic Lateral Loads on Piles in Sand", *J. of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.120, No.1, pp.225-244.
14. Meyerhof, G.G., Mathur, S.K., and Valsangkar, A.J. (1981), "Lateral Resistance and Deflection of Rigid Wall and Piles in Layered Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.18, pp.159-170.
15. Nicolai and Ibsen (2014), "Small-scale Testing of Cyclic Laterally Loaded Monopiles in Dense Saturated Sand", *J. of Ocean and*

Wind Energy, Vol.1, No.4, pp.240-245.

16. Nunez, I.L. (1988), "Driving and Tension Loading of Piles in Sand on a Centrifuge", *Proceeding International Conference Centrifuge 88*, Paris, Corte, J.K. (ed.), Balkema, Rotterdam, pp.353-362.
17. Paik, K.H. (2010), "Lateral behavior of Driven Piles Subjected to Cyclic Lateral Loads in Sand", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.12, pp.41-50 (in Korean).
18. Paik, K.H. and Park, W.W. (2010), "Permanent Deformation of Piles in Sand under Cyclic Lateral Loads", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.11, pp.63-73 (in Korean).
19. Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980), *Piling foundation analysis and design*, John Wiley and Sons Inc., New York.
20. Rao, S.N., Ramakrishna, V.G.S.T., and Rao, M.B. (1998), "Influence of Rigidity on Laterally Loaded Pile Groups in Marine Clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No.6, pp.542-549.
21. Rosquoet, F., Thorel, L., Garnier, J., and Canepa, Y. (2007), "Lateral Cyclic Loading of Sand-installed Piles", *Soils and Foundations*, Vol.46, No.5, pp.821-832.
22. Yang, E.K. (2009), "Evaluation of Dynamic p-y Curves for a Pile in Sand from 1g Shaking Table Tests", Ph.D. Thesis, Seoul National University.

Received : November 16th, 2016

Revised : January 10th, 2017

Accepted : January 16th, 2017