이층지반의 상대밀도에 따른 수평하중을 받는 단독말뚝의 거동특성

Behavioral Characteristics of a Single Pile According to the Relative Density of Two-Layered Soil during Lateral Loads

김지성* · 강기천**

Kim, Jiseong*, and Kang, Gichun**

Abstract

This study attempts to understand the behavioral characteristics of a pile in two-layered soil through model tests. A lateral load was applied to a single pile buried in the ground with different relative densities and strata ratios, and the lateral resistance and bending moment of the pile were analyzed. Consequently, when the strata ratio was 0.15, there was a clear difference in the values of the lateral resistance and the coefficient of the subgrade reaction of the pile according to the relative density of the lower ground. When the strata ratio was 0.30 or more, it was observed that the values of the lateral resistance and the coefficient of the subgrade reaction of the pile did not significantly affect the relative density of the lower ground. The locations of the maximum bending moments appeared in increasingly deeper places as the strata ratio increased, and all occurred in the lower ground with a high relative density.

Key words : Multi-layered Soil, Lateral Resistance, Pile, Relative Density

요 지

본 연구에서는 실내모형시험을 통해 이층지반에서의 말뚝의 거동특성을 파악하고자 한다. 상대밀도 및 지층구성을 달리한 지반에 매설된 단독말뚝에 수평하중을 가하여 말뚝의 수평저항력과 휨모멘트 등을 분석하였다. 그 결과 지층비가 0.15인 경우 하부지반의 상대밀도에 따른 말뚝의 수평저항력 및 지반반력계수 값의 차이가 뚜렷이 나타나는 반면, 지층비가 0.30 이상인 경우 말뚝의 수평저항력 및 지반반력계수 값이 하부지반의 상대밀도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 최대 휨모멘트의 발생 위치는 지층비가 커질수록 점점 더 깊은 곳에서 나타났으며, 모두 상대밀도가 높은 하부지반에서 발생하였다.

핵심용어 : 다층지반, 수평저항력, 말뚝, 상대밀도

1. 서 론

최근 건설 구조물들의 대형화와 제한된 국토에서의 부지 확보의 어려움으로 연약한 지반에서의 시공사례가 많아짐에 따라 말뚝기초의 활용성이 점점 많아지고 있다.

말뚝기초의 경우 상부 구조물의 하중을 지지하기 위한

역할 뿐만 아니라 토압, 풍압, 파력, 지반거동 등에 의한 수평하중에 대한 저항체로서의 역할까지 고려되어야 한다. 특히 수평하중으로 인해 발생하는 말뚝기초의 과도한 변위는 상부구조물에도 영향을 미치기에 수평하중을 받는 말뚝의 해석은 중요한 분야로 인식되고 있다.

수평하중을 받는 말뚝에 대한 연구들은 Broms (1964a,

*정회원, 전주비전대학교 지적토목학과 조교수(E-mail: kimjs@jvision.ac.kr)

Member, Assistant Professor, Dept. of Cadastre & Civil Eng, Vision College of Jeonju

**교신저자, 정회원, 경상국립대학교 공과대학 토목공학과 부교수(Tel: +82-55-772-1792, Fax: +82-55-772-1799, E-mail: gkang@gnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, College of Engineering, Gyeongsang National University

1964b)의 극한평형법, Chang (1937)의 지반반력해석법, Reese and Matlock (1956)의 비선형해석법, Poulos (1971)의 탄성해석법들이 대표적이며, 실내모형실험을 통해 수평하중을 받는 단독말뚝, 무리말뚝의 거동특성들에 대한 연구(Bae et al., 2000; Bae et al., 2004)뿐만 아니라 반복하중에 의한 무리말뚝의 거동특성들에 대한 연구(Kim, 2004)와 켄치모델을 이용한 수평저항력 산정식 제안에 대한 연구들(Kim and Kang, 2018) 등 많은 후속 연구들이 진행되어져 왔다. 하지만 이러한 연구들은 대부분 사질토 또는 점성토로 이루어진 단일지층을 대상으로 연구들이 진행되어져 왔다. 그러나 대부분의 건설 현장들은 다층지반으로 이루어져 있기에 지반의 성격이 서로 다른 다층지반에서의 말뚝의 수평저항 및 거동 특성들에 대한 연구가 중요하다.

다층지반에서 수평하중을 받는 말뚝에 대한 연구의 경우, Lee et al. (2011)가 3개 층으로 조성된 지반에서 강성 말뚝의 수평거동 및 수평저항력을 산정하는 연구를 수행하였다. Hong et al. (2009)은 다층지반에서 수평하중을 받는 말뚝을 대상으로 콘관입시험결과를 이용하여 극한수평지지력을 산정하였고, 다층지반을 고려할 수 있는 토압분포 형태를 제안하였다. Kim et al. (2009)는 모형실험과 수치해석을 통해 다층지반에서의 변형켄치모델 적용성에 대한 연구를 진행하였다. 이렇게 다층지반에서 수평하중을 받는 말뚝에 대한 연구들이 이루어져 왔지만 이러한 연구들은 지반의 구성의 다양성을 나타내고 있지는 않다. 또한 2층토 지반의 시설물에 빈번한 하자사고가 발생하고 있어 이에 대한 개선점 도출의 필요성을 제시하였다(Lee, 2005).

따라서 본 연구에서는 상·하 지반의 지층비와 지반의 상대밀도 조건들을 달리하여 수평하중을 받는 말뚝의 거동 특성과 지반반력계수의 변화양상을 알아보고자 한다.

2. 실내모형실험

이층지반에서 수평하중을 받는 단독말뚝의 거동 특성을 파악하기 위한 시험 장치는 Fig. 1과 같다. 모형 시험에

Fig. 1. Layout of Model Test Apparatus

사용된 강체 토조 크기는 1,000 X 1,000 X 1,000 mm의 강체로 제작하였으며, 말뚝과 토조 벽면사이의 간섭이 일어나지 않는 말뚝직경의 5배 이상으로서 충분한 경계거리를 유지하였다. 상사관계를 고려하기 위해 원형의 동관을 상용하였고 Iai (1989)의 1 g 상사비를 적용시켜 축소모사 하였다. 하지만 모형말뚝의 경우 상사법칙에 맞게 직접 가공제작하기가 어려워 기성 제품을 활용하여 실험을 해야 할 수밖에 없는 한계로 인해 두께 및 휨강성에서는 상사관계를 만족시킬 수는 없었다. 따라서 본 연구에서는 말뚝의 휨강성이 횡방향 지지거동에 지배적인 영향인자임을 감안하여 말뚝의 두께를 1.27 mm로 조절하여 휨강성의 상사관계를 만족토록 하였다. Iai (1989)의 상사법칙에 대한 값은 Table 1과 같고, 모형실험에 사용된 말뚝의 제원은 Table 2와 같다.

본 연구에 사용된 말뚝의 장단을 판별하기 위해 Broms (1965)가 제안한 말뚝분류법을 이용하였다. Table 3에서 지반의 상대밀도 값을 이용하여 지반변형성능 계수(n_h)값을 정하고 그 값을 Eq. (1)에 대입하여 특성값(η)을 구한다. 구해진 특성값에 말뚝의 근입깊이(L)를 곱해 Table 4에서 말뚝의 장단을 판별할 수 있다. 그 결과 본 시험에 사용된 말뚝은 Table 5와 같이 느슨한 지반에서는 중간말뚝, 중간 및 조밀한 지반에서는 장말뚝으로 나타났다.

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{EI}} \quad (1)$$

Table 1. Similarity Law of Iai (1989)

Scale Factor, $\lambda = 28$ Ratio of	Iai (1989)	Experiment	Reality
Length	λ	1	28.00
Density	1	1	1.00
EI of pile/width	$\lambda^{7/2}$	1	116,159.07
Displacement	$\lambda^{3/2}$	1	148.16
Strain	$\lambda^{1/2}$	1	5.29
Time	$\lambda^{3/4}$	1	12.17

Table 2. Characteristics of Model Pile

Length (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)	E (MN/cm ²)	I (cm ⁴)	EI (MN · cm ²)
940	28.6	1.27	12.25	1.02027	12.4983

Table 3. Average Values of n_h by Broms (1965)

Soil type	n_h (N/cm ³)	
Dry or moist sand	Loose	0.764~2.156
	Medium	5.39~6.84
	Dense	14.7~17.64

휨모멘트를 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 하중이 작용하는 방향의 말뚝 전·후면에 스트레인게이지 14개를 부착하였다. 지반의 재료는 낙동강 유역의 합천사로, 기진 상태에서 #4번체를 통과한 모래를 사용하였으며, 지반재료의 함수비는 0.08%이다. 물리적 성질과 입도곡선은 Table 6과 Fig. 3과 같다.

이층지반을 조성하기 위해 지반은 상·하층으로 조성하였다. 지층비(p)는 상층 지층의 높이를 전체 지층의 높이로 나눈 값으로 정의하였다. 지층비는 0.15 (상부 15% / 하부 85%), 0.30 (상부 30% / 하부 70%), 0.45 (상부 45% / 하부 55%)로 나누었다. 하부 지층의 상대밀도를 조절하기 위해 Fig. 1과 같이 토조하부에 장착되어 있는 진동다짐 장치를 통해 지반의 상대밀도를 조절하였다. 시간에 따른 지반의 상대밀도 값은 Table 7과 같다. Table 7에서 상재하중 $1,568 \text{ N/m}^2$ 을 가한 이유는 하부지반의 높이가 낮은 상태에서는 진동시간을 길게 하여도 중간 및 조밀한 상태의 밀도가

Table 4. Distinction of Pile Length by Broms (1965)

Description	Sand
Short pile	$\eta L < 2$
Medium pile	$2.0 \leq \eta L \leq 4.0$
Long pile	$\eta L > 4.0$

Table 5. Result of Pile Distribution

Density	η	ηL	Result
Loose	0.04356	3.57192	Medium pile
Medium	0.05471	4.48622	Long pile
Dense	0.06643	5.44726	Long pile

Fig. 2. Model Pile and Strain Gauges

나오지 않아 상재하중을 가하였다. 상부 지층은 강체토조 위에 #4 눈금의 망을 5 cm 간격으로 두 겹 설치한 후 강사 장치를 통해 일정한 높이에서 자유낙하 시켜 조성하였다.

하중재하 방법은 Fig. 1에서와 같이 재하장치위에 일정한 무게의 추를 올려 하중을 가하였다. 추의 무게는 27.54 N 씩

Table 6. Physical Properties of the Ground

Property	Symbol	Value
Max. void ratio	$e_{\max}$	0.79
Min. void ratio	$e_{\min}$	0.58
Max. dry density	$r_{d\max} \text{ (kN/m}^3\text{)}$	15.78
Min. dry density	$r_{d\min} \text{ (kN/m}^3\text{)}$	13.92
Specific gravity	G_s	2.54
Average grain size	D_{50}	0.59
Effective grain size	D_{10}	0.28
Uniformity coefficient	C_u	2.50
Coefficient of gradation	C_g	0.92

Table 7. Relative Density in Test Ground

Layered		Vibration time (sec)	Surcharge load (N/m^2)	Average density (N/cm^3)	Relative density (%)
Top	15, 30, 45%	0	0	14.41	26
Bottom	85%	10	0	14.56	36
		30	0	14.95	58
		180	0	15.31	77
	70%	10	0	14.55	36
		10	27.54	14.95	58
		60	27.54	15.31	77
	55%	30	0	14.55	36
		30	27.54	14.95	58
		180	27.54	15.31	77

Fig. 3. Particle Size Distribution for Sand

증가시켜 최대 385.53 N까지 적용하였다. 변위조건은 Eq. (2)와 같이 GAI Consultant Inc. (1982)에서 제안한 말뚝의 회전각이 2°가 되는 기준을 적용하였다.

$$\tan 2^\circ = \frac{d_{\max}}{h_{\max}} \quad (2)$$

여기서, $d_{\max}$: 말뚝 두부에서의 최대 변위,
 $h_{\max}$: 최대 휨모멘트 발생 깊이

최대 휨모멘트 발생 깊이는 본 연구의 실험조건과 유사한 Bae et al. (2004)의 실험연구에서 모래지반의 상대밀도에 따른 최대 휨모멘트 발생 위치가 말뚝 직경의 5~7배에서 발생하였으므로, 말뚝직경 28.6 mm를 적용하면 최대휨모멘트 발생깊이는 최대 200 mm에 해당하므로 Eq. (2)에 대입을 할 경우 말뚝두부의 최대 수평변위 값은 약 7 mm 값이 나타난다. 따라서 본 연구에서는 약간의 여유를 두어 말뚝의 수평변위를 1 cm까지 측정하였다.

실험방법은 말뚝거치대를 이용하여 말뚝을 거치하고, 모래 포설장치를 이용하여 하부지반의 모래를 포설한 후 일정 시간 진동을 통해 지반의 상대밀도를 조절한다. 이후 상부지반의 모래 포설 후 재하장치를 말뚝에 연결하여 추를 이용하여 하중을 가하며 말뚝의 변위 및 휨모멘트를 측정한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 이층지반에서 수평하중이 작용하는 단독말뚝의 저항력-변위 관계

Fig. 4는 지반의 상대밀도와 이층지반의 깊이비를 달리하였을 때 말뚝의 수평 변위와 저항력과의 관계를 나타낸 그림이다. 지층비가 0.15인 경우 하부지반의 상대밀도가 증가할수록 수평저항력이 증가함을 알 수 있다. 하지만 지층비가 0.30, 0.45의 경우 하부지반의 상대밀도가 증가할수록 수평저항력은 조금씩 증가를 하고 있지만 지층비가 0.15일 때와 같이 뚜렷하게 나타나지는 않고 있다. 또한 지층비가 0.35, 0.45인 경우 하부지반의 상대밀도와 관계없이 초기 저항력-변위의 값이 매우 유사하게 나타나고 있다. 이는

지층비가 0.15인 경우 말뚝에 가해지는 수평하중에 대한 저항 영역의 주체는 하부지반이 되고, 지층비가 0.30, 0.45인 경우 저항 영역의 주체는 하부지반이 되지만 상부지반이 하부지반에 영향을 미쳐 하중의 감소가 나타나는 것으로 사료 된다.

3.2 이층지반에서 수평하중이 작용하는 단독말뚝의 최대 휨모멘트

Fig. 5는 하부지반의 상대밀도가 58% (보통)인 지반에서 작용하중별 말뚝의 최대 휨모멘트를 각각의 지층비별로 나타낸 그림이다. 깊이비는 지반에 근입된 말뚝의 깊이별로 말뚝의 지름(D)을 나누어 무차원으로 나타내었다. 지층비가 0.15, 0.30인 경우 깊이비가 감소할수록 말뚝의 휨모멘트는 증가하다 감소하는 양상으로 나타나고 있지만, 지층비가 0.45인 경우 깊이비가 감소할수록 휨모멘트는 증가하다 최대 값이 나타난 후 급격하게 줄어드는 양상을 나타내고 있다. 이는 지층비가 0.15, 0.30인 경우 말뚝의 저항 영역이 하부 지반이 주체가 되고, 지층비가 0.45인 경우엔 말뚝의 저항영역이 상부 지반이 주체가 되고 하부 지반은 고정단 효과를 나타내는 것으로 사료된다. 최대 휨모멘트의 발생 위치는 지층비가 0.15인 경우 8D, 0.3에서는 13.5D, 0.45에서는 15.9D 위치에서 발생하고 있다. 이는 모두 각각의 경계면 (지층비 0.15인 경우 5.24D, 0.30인 경우 10.49D, 0.45인 경우 15.73D)을 기준으로 봤을 때 모두 하부지반에서 발생함을 알 수 있다. 또한 Bae et al. (2004)의 단일지층에서의 최대휨모멘트의 발생위치(5~7D)보다는 더 깊은 곳에서 최대 휨모멘트가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 6은 지층비가 0.45인 경우 하부지반의 상대밀도의 변화에 따른 말뚝의 휨모멘트를 나타낸 그림이다. 하부지반의 상대밀도가 36% (느슨), 58% (보통)인 경우 지층 경계면 (15.73D)보다 조금 아래(15.87D)에서 모멘트가 급격히 작아지는 양상을 나타내고 있지만 하부지반의 상대밀도가 77% (조밀)인 지반에서는 서서히 감소하고 있다. 이는 하부지반의 상대밀도가 느슨, 보통인 경우 말뚝의 저항 영역은 상부지반이 주체가 되고, 상대밀도가 조밀한 경우 말뚝의 저항영역은 하부지반이 주체가 되는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 각각의 상대밀도에서 하중단계별 지층비에 따른

Fig. 4. Lateral Resistance of Piles

Fig. 5. Bending Moment of Pile for $Dr = 58\%$

Fig. 6. Bending Moment at $p = 0.45$

Fig. 7. Relationship between Maximum Bending Moment and p

최대 휨모멘트를 나타낸 그림이다. 전반적으로 재하 하중이 작은 영역에서는 지층비의 변화에 따른 최대 휨모멘트의 크기 변화가 크게 나타나지 않고 있다. 하부지반의 상대밀도가 36%, 58%에서 하중이 110 N 이상 단계에서는 지층비가 증가할수록 최대 휨모멘트가 선형적으로 증가하는 양상을 나타내고 있다. 하지만 상대밀도가 조밀한 77% 지반에서 지층비가 0.30~0.45 구간에서는 상대적으로 최대 휨모멘트의 증가비가 완만하게 나타나고 있다.

3.3 이층지반에서 수평하중이 작용하는 단독말뚝의 지반반력계수

Figs. 8, 9는 각각의 지층비와 상대밀도에서 말뚝의 두부변위에 따른 말뚝특성치(β)와 지반반력계수(k_h)를 나타낸 그림이다. 말뚝의 특성치와 지반반력계수는 널리 사용되고 있는 Chang (1937)이 제안한 Eqs. (3), (4)를 이용하였다.

$$\delta = \frac{H}{2EI\beta^3} \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h D}{4EI}} \quad (4)$$

여기서, δ : 말뚝의 수평변위

H : 수평하중

말뚝의 수평변위가 0.2 cm 이후부터는 말뚝특성치와 지반반력계수 모두 선형적으로 감소하고 있다. 지층비가 0.15인

지층에서는 말뚝특성치와 지반반력계수 모두 하부지반의 상대밀도에 대한 영향을 많이 받지만, 지층비가 0.30, 0.45에서는 하부지반의 상대밀도의 영향을 크게 받지 않고 있다. 이는 지층비가 0.15인 지반인 경우 상부 지반이 하부 지반의 저항 거동에 큰 영향을 미치지 않지만, 지층비가 0.3 이상인 경우 상부 지반의 지층이 상대적으로 두꺼워 하부지반의 저항 거동에 간섭효과를 나타내기 때문이라 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 이층지반의 상대밀도 및 지층비에 따른 수평하중을 받는 단독말뚝의 거동특성을 모형시험을 통하여 분석하였다. 그에 대한 결과는 다음과 같다.

- 1) 말뚝의 변위에 따른 저항력 관계에서 지층비가 0.15인 경우 상대밀도에 따른 수평저항력의 크기 차이가 뚜렷이 나타난 반면 지층비가 0.3 이상인 경우 하부지반의 상대밀도의 영향이 크게 나타나고 있지 않았다. 이는 지층비가 0.15인 경우 말뚝에 가해지는 수평하중에 대한 저항 영역의 주체가 하부지반이 되는 것이고 지층비가 0.3 이상인 경우 저항 영역의 주체는 하부지반이 되지만 상부지반이 하부지반에 영향을 미쳐 하중의 감소가 나타나는 것으로 보인다.
- 2) 최대 휨모멘트의 발생 위치는 모두 하부지반에서 나타났다. 지층비가 0.45에서 하부지반의 상대밀도가 36%, 58%인 경우 지층 경계면바로 아래에서 휨모멘트가 급격히 작아지는 양상을 나타냈지만 하부지반의 상대

Fig. 8. Relationship between β and Lateral Displacement

Fig. 9. Relationship between k_h and Lateral Displacement

밀도가 77%인 경우 휨모멘트가 서서히 감소하였다. 이는 하부지반의 상대밀도가 느슨, 보통인 경우 말뚝의 저항 영역은 상부지반이 주체가 되고, 상대밀도가 조밀한 경우 말뚝의 저항영역은 하부지반이 주체가 되는 것으로 보인다.

- 3) 지반반력계수는 말뚝두부의 변위가 증가함에 따라 선형적으로 감소하였다. 또한 지층비가 0.15인 경우 하부지반의 상대밀도가 증가함에 따라 지반반력계수의 값도 증가하였지만, 지층비가 0.3 이상인 경우 하부지반의 상대밀도의 영향을 크게 받지 않았다. 이는 지층비가 0.15인 경우 상부 지반이 하부 지반의 저항 거동에 큰 영향을 미치지 않지만, 지층비가 0.3 이상인 경우 상부 지반의 지층이 상대적으로 두꺼워 하부지반의 저항 거동에 간섭효과를 나타낸 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2021학년도 전주비전대학교 교내 연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

References

- Bae, J.S., Kim, S.H., and Kim, J.H. (2004). Behavior of single pile in direction of the repeated lateral loads. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C*, Vol. 24, No. 1C, pp. 11-17.
- Bae, J.S., Kim, T.Y., and Kim, S.H. (2000). The lateral behavior characteristics of group piles in sand ground. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C*, Vol. 20, No. 6C, pp. 517-524.
- Broms, B.B. (1964a). Lateral resistance of piles in cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 90, No. SM2, pp. 27-63.
- Broms, B.B. (1964b). Lateral resistance of piles in cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 90, No. SM3, pp. 123-156.
- Broms, B.B. (1965). Design of laterally loaded piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 91, No. 3, pp. 79-99.
- Chang, Y.L. (1937). Lateral pile-loading tests. *ASCE*, Vol. 102, pp. 272-278.
- GAI Consultant Inc. (1982). *Laterally Loaded Drilled Pier Research Vol. 2*. Research documentation GAI Report EL-2197, Research project 1280-1, California.
- Hong, J.M., Kyung, D.H., Kang, B.J., and Lee, J.H. (2009). Analysis of estimation of ultimate lateral capacity of pile in multi-layered soil using CPT results and proposal of modified lateral earth pressure. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 6, pp. 47-57.
- Iai, S. (1989). Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1 g gravitational field. *Soil and Foundations*, Vol. 29, No. 1, pp. 105-118.
- Kim, H., Lee, J., Chung, J., and Yoon, C. (2009). Application of pile under lateral load in multi layered ground using the strain wedge model. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 10, No. 7, pp. 159-165.
- Kim, J.S., and Kang, G.C. (2018). Ultimate lateral resistance of quadrangle array piles using the strain wedge model on soil subgrade. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 46, No. 6, pp. 2339-2350.
- Kim, T.Y. (2004). *Behavior characteristics of group piles under repeated lateral loads in sand*. Ph.D. dissertation, Gyeongsang National University, pp. 72-81.
- Lee, I.Y. (2005). *A study on the distribution stresses beneath loaded ground surface area of double stratum ground on soft clay layers*. Ph.D. dissertation, Mokpo National University, p. 3.
- Lee, J., Kyung, D., Hong, J., and Kim, D. (2011). Experimental investigation of laterally loaded piles in sand under multilayered conditions. *Soils and Foundations*, Vol. 51, No. 5, pp. 915-927.
- Poulos, H.G. (1971). Behavior of laterally loaded piles: I -single piles. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div, ASCE*, Vol. 97, No. SM5, pp. 711-731.
- Reese, L.C., and Matlock, H.L. (1956). *Non-dimensional solutions for laterally loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth*. Proc., 8th Texas Conf., on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Austin, TX, pp. 1-41.

Received	November 1, 2021
Revised	November 1, 2021
Accepted	November 17, 2021