

대변형 해석기법(Coupled Eulerian-Lagrangian)을 이용한 항타 관입성 모사의 3차원 해석

A Study on the 3D Analysis of Driven Pile Penetration Based on Large Deformation Technique (Coupled Eulerian-Lagrangian)

고 준 영¹ Ko, Jun-Young
정 상 첨² Jeong, Sang-Seom
이 승 연³ Lee, Seung-Yeon

Abstract

This paper presents the application of the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) numerical technique to simulate the driving of open-ended piles into sandy soil. The main objective of this study was to investigate the applicability of CEL technique to the behavior of the driven pile penetration. Comprehensive studies to verify the behavior of driven pile penetration are presented in this paper. Through comparison with results of field load tests, the CEL methodology was found to be in good agreement with the general trend observed by in situ measurement, and the CEL approach accurately simulated the behavior of driven pipe piles.

요 지

최근 기존의 유한요소 해석기법으로는 항타 말뚝 관입과 같은 대변형 문제를 적절히 모사하기 어렵기 때문에 대변형 해석기법을 필요로 하고 있다. 본 연구에서는 대변형 수치해석 기법 중 하나인 Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 기법을 이용하여 항타 관입의 3차원 대변형 해석을 수행하고자 한다. 현장 시험 결과와 비교를 통해, CEL 기법의 타당성을 검증하였고, 그 결과 본 연구에서 적용한 CEL 기법이 기존 유한요소 해석 기법으로는 구현이 불가능한 항타 말뚝 관입의 전반적인 거동을 합리적으로 모사할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 항타 개단말뚝의 특징인 선단부 근에 응력이 집중되는 현상을 적절히 예측함을 알 수 있었다. 이를 통해 CEL 기법을 이용하여 항타 관입 해석이 가능한 것을 확인하였다.

Keywords : Coupled Eulerian-Lagrangian technique, Large deformation FE analysis, Driven pipe pile, Sand, Radial stress, Soil plugging index

1 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 박사 후 연구원 (Member, Post-doctoral Fellow, Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)
2 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-2807, Fax: +82-2-2123-8378, soj9081@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
3 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

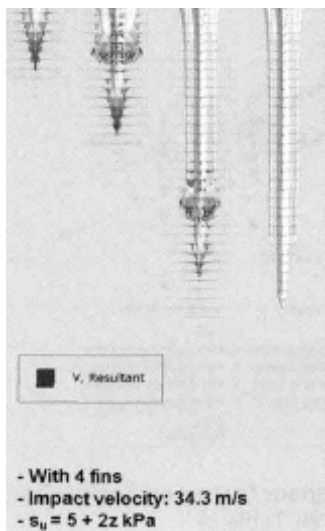
1. 서 론

최근 수십 년간 지반공학 분야에서는 수치해석적 방법에 대한 연구가 꾸준히 진행되었으며, 유한요소해석법(finite element method, FEM)에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 하지만, Lagrangian 좌표를 기반으로 하는 기존 유한요소해석법은 대변형이 발생 시 메쉬(mesh)의 왜곡 현상 및 상대변위로 인한 접촉면이 수렴하지 않는 문제가 발생하여 지반-구조물의 상호작용 해석에 어려운 점이 있다. 대체 해석법으로 개별요소법(discrete element method) 또는 updated Lagrangian(UL) 방법 등이 있으나, 빠른 속도로 거동하는 구조물-지반의 동적거동을 예측하기에는 한계가 있다(Kim and Jeong, 2014). 이러한 한계점 때문에 지반공학 분야의 경우 대부분 미소변형 해석에 국한되었지만, 최근 컴퓨터 기술의 발달과 함께 대변형 수치해석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 가스, 석유 등의 시추 작업에 필요한 해상 앵커링 기술(Kim and Jeong, 2014), 산사태 및 토석류 해석(Jeong et al., 2014; Lee et al., 2014), 말뚝의 관입에 따른 거동 분석, 터널 굴착 시 인접 구조물의 영향 문제 등 대변형이 발생하는 지반공학적 문제에 적용되고 있다(Fig. 1 참조).

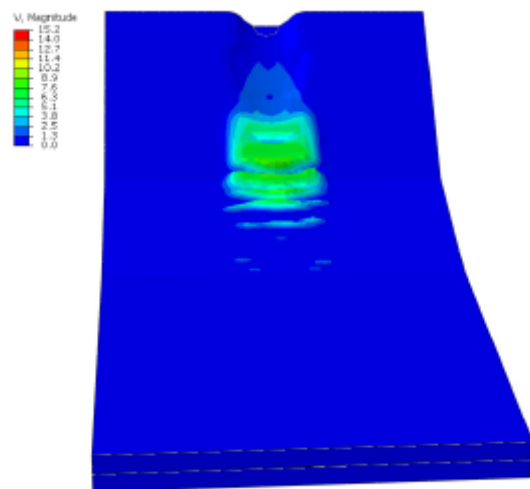
특히 지금까지 말뚝의 항타 관입에 관한 수치해석은 파(wave)를 이용하는 GRL weap 해석이 대부분이며, 이를 통해 지지력 예측, 항타 관입성 분석 등이 가능하지만, 일반적인 말뚝의 응력 거동, 변형 특성 분석은 불가능하여 한계가 있다.

최근 유한요소해석을 기반으로 하는 대변형 해석기법은 대표적으로 Remeshing and Interpolation Technique by Small Strain(RITSS) 방법, Adopted Meshing(AM) 기법, Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 기법이 있다. RITSS 방법은 서호주대학(University of Western Australia)에서 개발되었으며 미소변형 해석법을 기반으로 하는 해석기법이다. 특히 해석 단계마다 메쉬를 재생성하고 결과를 재배치하여 비교적 정확한 해석방법으로 알려져 있다. 하지만 in-house 코드를 이용하여 해석하기 때문에 사용자의 접근성이 떨어지는 단점이 있다. AM 방법은 범용 프로그램인 ABAQUS에 내장된 해석기법으로 해석 단계마다 왜곡된 메쉬를 합리적으로 수정하는 기법이다. 하지만 변형된 메쉬를 수정하는데 있어 한계가 있어 복잡한 형상의 구조물 또는 관입과 같은 해석에는 어려움이 있다. CEL 기법도 ABAQUS에서 지원을 하여 사용자의 접근성이 뛰어나다. 또한, AM 방법에 비해 구조물의 형상과 같은 제약사항이 없어 적용성이 우수하다.

본 연구에서는 대변형 수치해석을 통해 개단말뚝의 항타 관입 해석 적용성을 평가하고자 한다. 항타 말뚝의 지반 관입 과정을 직접 모사하기 위하여 Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 기법을 사용하여 대변형 해석을 수행하였다. 모델링 기법 및 분석결과는 현장 시험 결과와의 비교를 통해 검증하였으며, 검증된 기법을 바탕으로 항타 관입 메커니즘을 분석하여 적용성을 확인하고자 한다.



(a) Anchor analysis (Kim and Jeong, 2014)



(b) Debris flow (Lee et al., 2014)

Fig. 1. Large deformation finite element analysis

2. 향타 말뚝의 거동

향타 말뚝은 관입성을 높이기 위해 일반적으로 개단 상태로 시공된다. 이 때 말뚝이 지반에 관입될 때 말뚝 속으로 밀려들어간 흙으로 인하여 말뚝의 선단부가 막힌 것과 유사한 효과를 발휘하기 때문이며 이를 폐색효과(plugging effect)라고 하며 관입하는 동안에 흙과 말뚝 벽과의 마찰로 인하여 말뚝 내부에 흙마개(soil plug)가 형성된다. 말뚝의 폐색상태는 크게 3가지 상태로 구분할 수 있다. 완전개방상태는 말뚝의 관입깊이와 관내토 길이가 같은 상태로 향타로 말뚝이 관입되는 만큼 관내토가 올라오는 상태를 의미한다. 부분폐색상태는 말뚝 관입깊이보다 관내토 길이가 작은 상태이며, 대부분의 대구경 말뚝이 이에 속한다. 마지막으로 완전폐색 상태는 향타가 진행될수록 관입깊이가 증가하지만, 더 이상 관내토가 올라오지 않는 상태로 이는 폐단말뚝과 유사한 거동을 나타낸다. 향타 말뚝의 폐색효과를 정량화시키는 방법은 대표적으로 plug length ratio(PLR)가 있다. PLR은 향타시공 종료 후에 말뚝 관입깊이와 관내토 길이의 비로 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$PLR = \frac{L_i}{D_i} \quad (1)$$

여기서, L_i 는 관내토 길이, D_i 는 말뚝 관입깊이이다.

PLR이 0인 경우는 향타 관입 시 말뚝 내부에 흙이 유입되지 않은 것을 의미하며 이는 폐단말뚝과 거동이 유사하다. 반대로 PLR이 1인 경우는 향타가 종료 후의 관입깊이와 관내토 길이가 같은 것을 의미하며 이는 완전개방상태이다.

향타 개단말뚝의 지지력 성분 중 내주면마찰력은 관내토와 말뚝 내부의 벽 사이에 마찰로 인해 발생하는 지지력으로 폐색정도에 따라 크게 달라진다. 극한하중 상태에서 내주면마찰력은 관내토 전체에서 발생하는 것이 아니라 말뚝 선단부근에 일부의 관내토 범위에서 집중적으로 발현되는 것이 특징이다(Ko and Jeong, 2015; Paikowsky, 1990). 또한 Ko & Jeong(2015)은 이를 다음 식 (2)와 같이 정량화하였다.

$$SPI = \frac{L_{is}}{L_i} \quad (2)$$

여기서, SPI 는 soil plugging index, L_i 는 관내토 길이, L_{is} 는 내주면마찰력이 발생하는 길이이다.

White et al.(2005)은 향타 말뚝의 관입 시 폐색정도에 따라 흙의 상대적인 변위와 radial stress 분포가 영향을 받는 것으로 보고하였다. Fig. 2와 같이 완전개방 또는

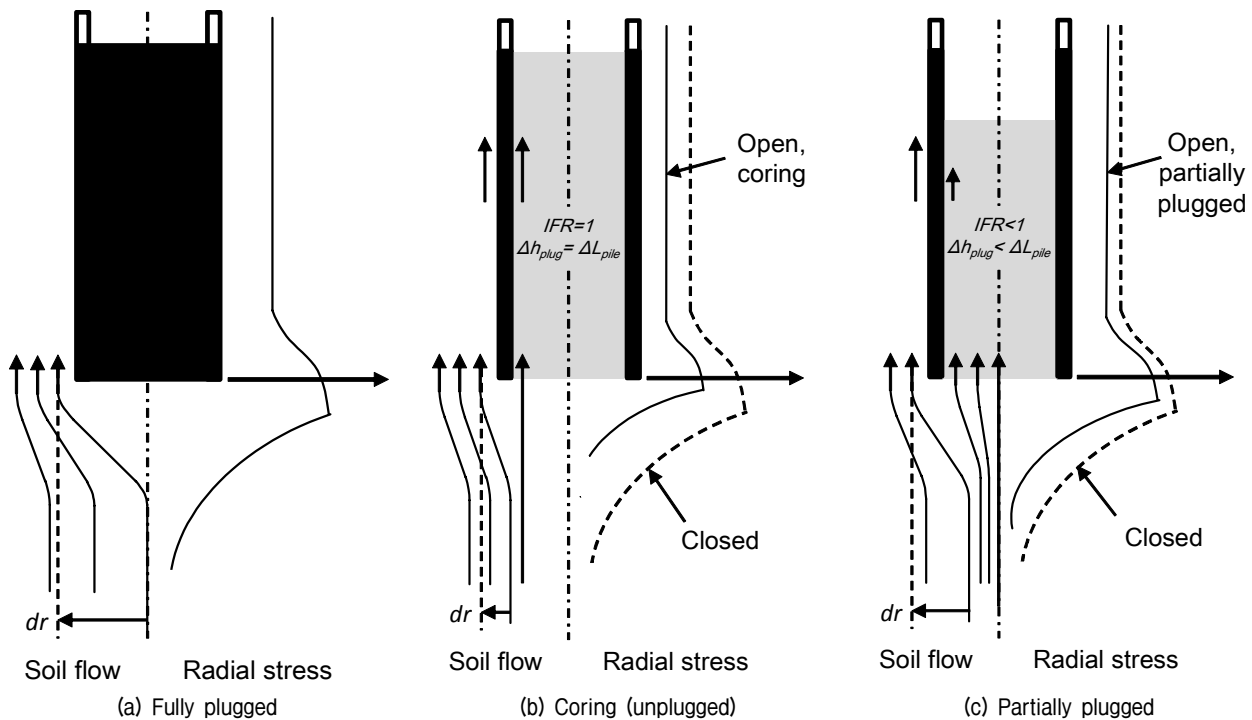


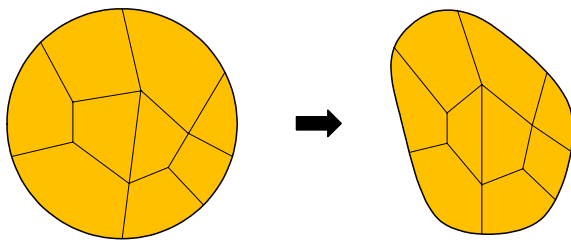
Fig. 2. Schematic streamlines of soil flow and profiles of radial stress (White et al., 2005)

부분폐색상태는 완전폐색상태(또는 폐단말뚝)에 비해 상대적으로 작은 radial stress와 흙의 변위가 발생한다. 또한 항타 말뚝의 지지력은 말뚝 선단부근의 radial stress에 영향을 받는다. Lehane(1992)과 Chow(1997)은 말뚝의 주면마찰력과 극한 상태의 radial stress가 관련이 있는 것으로 보고하였다.

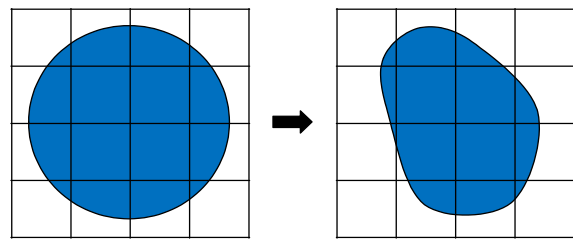
이와 같이 항타 말뚝의 신뢰성 있는 내주면마찰력 및 지지력을 산정하기 위해서는 실제로 내주면마찰력이 발생하는 범위에 대한 분석과 radial stress 거동에 대한 연구가 필요하지만 현장시험에서 항타 말뚝의 선단부근의 radial stress 측정과 SPI를 산정하는 것이 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 대변형 수치해석을 통해 항타 말뚝의 지반 관입 과정을 모사하고, 항타 말뚝의 동적 거동 특성을 분석하고자 한다.

3. Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL)을 이용한 대변형 수치해석

Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 기법은 Lagrangian

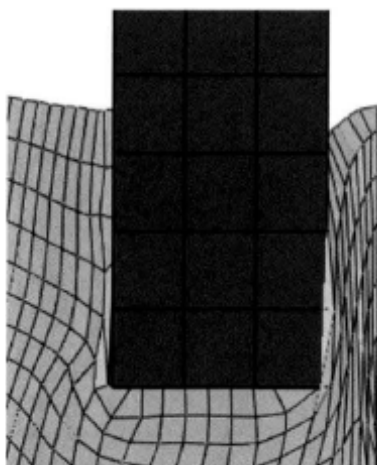


(a) Lagrangian analysis

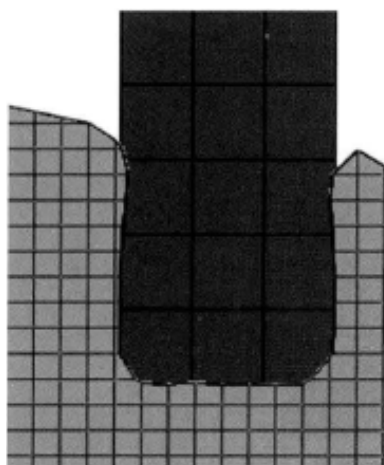


(b) Eulerian analysis

Fig. 3. Deformation of a continuum in a Lagrangian and an Eulerian analysis (Qiu et al., 2011)



(a) Pure Lagrangian model



(b) Coupled Eulerian-Lagrangian model

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.32	0.91	0.91	0.32	0.0
0.0	0.91	1.0	1.0	0.91	0.0
0.0	0.91	1.0	1.0	0.91	0.0
0.0	0.32	0.91	0.91	0.32	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

(c) Eulerian volume fraction (EVF)

Fig. 4. Lagrangian and Eulerian analysis (ABAQUS, 2013)

해석법 및 Eulerian 해석법의 장점을 각각 적용하였다. 유한요소해석법에서 체적을 가지는 요소의 시간에 따른 거동을 모사하는 방법은 크게 Lagrangian 해석법과 Eulerian 해석법이 있다. Lagrangian 해석법은 각각의 요소의 물성 좌표와 시간에 대한 함수로 연속체의 거동을 정의하며, 이는 일반적으로 고체역학에서 적용되었다. Lagrangian 해석 시 각 메쉬의 절점은 요소의 물성과 함께 움직이므로 두 물체 사이의 접촉면에서는 정확하게 절점이 공유되고 물성이 정의되어야 한다(Fig. 3(a)). 그러므로 대변형 발생 시 접촉면 또는 각 요소의 왜곡으로 인한 문제가 발생하기 쉽다. Eulerian 해석법은 공간좌표와 시간에 대한 함수로 연속체의 거동을 정의하며, 이는 주로 유체역학에서 적용되었다. Eulerian 해석 시 물체의 거동이 전체 영역내에서 물질의 이동량으로 정의되며(Fig. 3(b)), 이는 메쉬의 왜곡이나 뒤틀림이 발생하지 않는 장점이 있다(Kim and Jeong, 2014; Qiu et al., 2011).

Fig. 4와 같이 기본적으로 Eulerian 영역내의 Lagrangian 요소의 거동을 Eulerian volume fraction(EVF)으로 정의

하며 이는 각 요소의 체적비를 나타낸다. 각각의 Eulerian 요소는 물성이 채워져 있는 비율로 표현되며, 특정 물성으로 채워져 있다면 EVF는 1, 비어있다면 0으로 나타낸다(ABAQUS, 2013). 지반공학 분야에서 적용하는 경우, 일반적으로 강성이 상대적으로 강한 구조물을 Lagrangian 요소를 적용하며, 강성이 상대적으로 약한 지반을 Eulerian 영역을 적용한다.

4. Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 모델링

본 연구에서 대변형 수치해석은 범용 해석 프로그램인 ABAQUS/EXPLICIT(2013)를 이용하였으며, 해석 기법은 ABAQUS에서 지원하는 Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) 기법을 적용하였다.

4.1 해석영역 및 경계조건

해석 영역은 Fig. 5(a)와 같이 상부에 물성이 정의되지 않는 구간인 void layer와 하부에 물성이 정의되어 있는 soil layer로 구성되어 있다. 여기서 void layer는 항타 말뚝이 관입되는 과정에서의 토체의 흐름을 파악할 수 있도록 하며, 말뚝 관입에 의한 지반 heaving 현상도 모사 가능하다. 또한, 본 해석의 모델링이 축대칭(axisymmetric) 형상이 가능하지만 CEL 해석기법은 2차원 해석이 불가능하므로, Fig. 5와 같이 사분면 형상으로 모델링하였다. 해석 영역의 크기는 동적해석에 의한 wave의 반발을 최소화하기 위해 방사 방향으로 말뚝 반지름의 10배(10R), 깊이 방향은 말뚝 관입깊이의 2배(2L)를 적용하였다. 경계조건은 방사방향 경계면에서 z

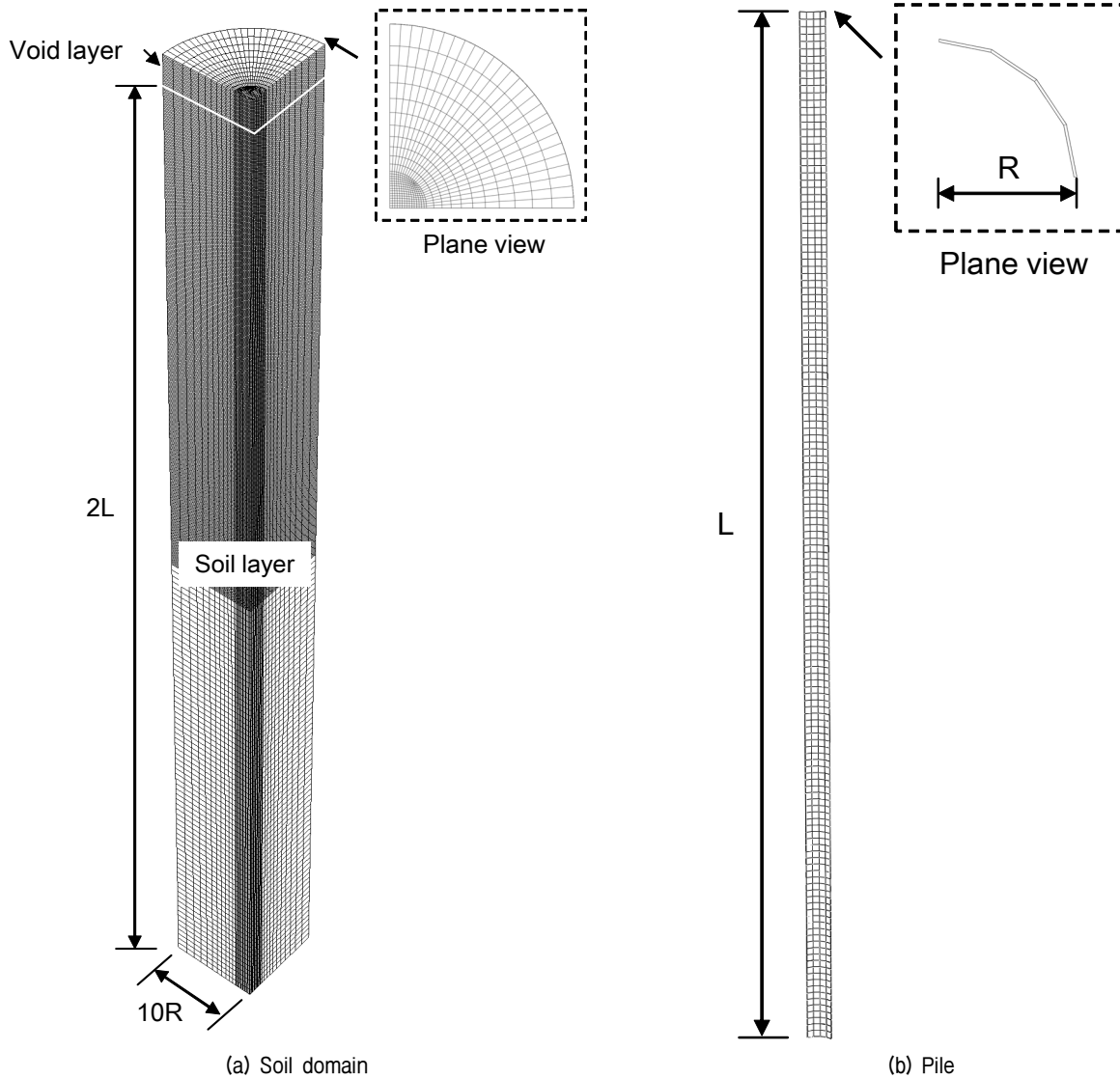


Fig. 5. Geometry and finite element mesh for soil domain and pile

축 방향으로 변위를 허용하기 위해 롤러구속조건을 적용하였으며, 하부 경계면에는 모든 축방향으로 변위가 발생하지 않도록 힌지구속조건을 적용하였다. 해석에 적용된 말뚝 및 지반 요소는 8개의 절점(node)으로 구성된 Lagrangian brick 요소와 Eulerian brick 요소인 C3D8R, EC3D8R을 각각 적용하였다. 말뚝은 rigid로 모델링하여 항타 시공 중에 변형이 발생하지 않도록 하였다.

4.2 접촉면 조건 및 하중 조건

CEL 해석에서 Lagrangian 요소와 Eulerian 요소의 접촉면 조건은 일반적으로 ABAQUS에서 제공하는 접촉요소(contact element)를 사용하여 지반과 말뚝 사이의 접촉면을 모델링하였다. 경계면 조건은 식 (3)과 같이 마찰계수와 한계변위 혹은 한계 전단응력으로 정의되는 Coulomb 마찰이론을 사용하였다. 해석에서 사용된 마찰계수(μ)값은 사질토에서 일반적으로 적용되는 0.4 값을 적용하였다.

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (3)$$

여기서, μ 는 마찰계수, p 는 접촉력이다.

또한 정적해석 시 두 접촉면을 지정하는 해석 알고리즘(접촉면 해석방법)을 적용하지만 본 해석은 시간에 따라 접촉면이 유동적이므로 ABAQUS에서 제공하는 general 접촉 알고리즘을 적용한다. 이는 Lagrangian 요소와 Eulerian 요소간의 접촉면 메쉬의 일치하지 않아도 되며, 시간에 따라 경계면이 자동으로 계산이 되므로 경계 부분의 메쉬 크기에 따라 경계면 부근의 해석 결과가 다르게 나타날 수 있다.

재료의 자중을 고려한 초기 응력분포를 산정하여 초

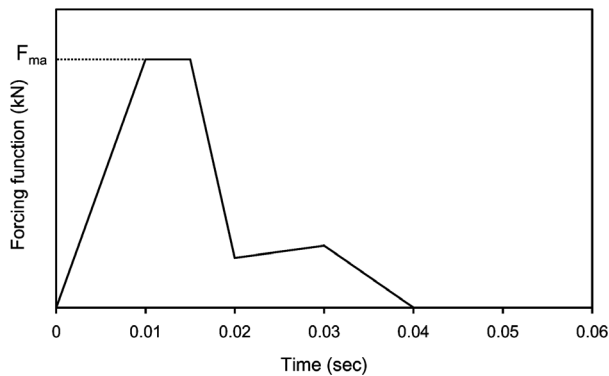


Fig. 6. Driving load with time for one hammer blow

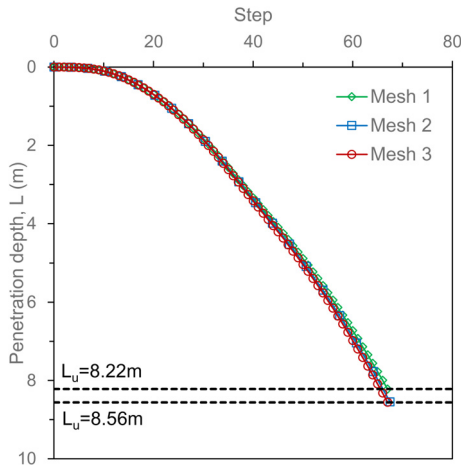
기 평형상태(initial equilibrium state)를 구현하고 초기 단계 이후, 말뚝 두부에 항타 하중을 적용하여 항타 관입을 모사하였다. 말뚝의 항타 하중은 해머중량 130kN, 낙하고 0.3m를 항타에너지로 환산하였으며, Fig. 6과 같이 한 타에 대한 하중을 0.04초 동안 말뚝 두부에 반복적으로 적용하였다(Goble et al., 1980). 또한 항타로 인한 인장력 때문에 발생하는 말뚝의 재료적 손상을 막기 위하여 최대 하중의 20%를 감소시켜 하중을 적용하였고(Mabsout et al., 1995, 1999), 항타 말뚝의 리바운드는 고려되지 않았다.

4.3 Mesh convergence study

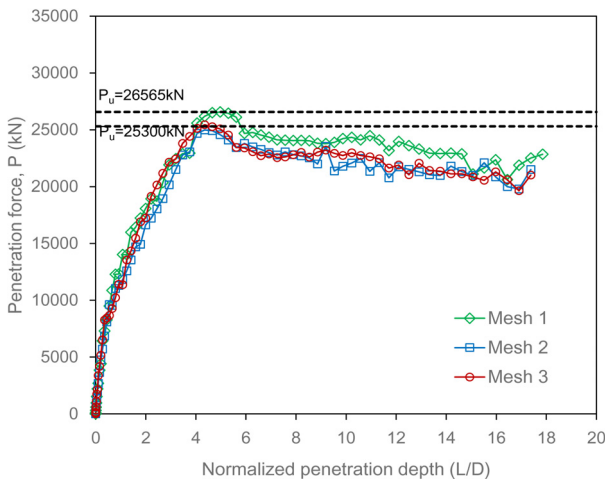
앞서 언급하였듯이 구조물과 지반의 경계면은 자동으로 계산되므로 정확하고 신뢰성 있는 경계면 거동에 측을 위해서는 경계 부분의 조밀한 Eulerian 메쉬의 모델링이 중요한 요소이다(Kim and Jeong, 2014; Qiu et al., 2011). 따라서 CEL해석은 메쉬 크기에 따라 해석 결과의 정확성 및 신뢰성이 다르게 나타날 수 있어, 적절한 메쉬 크기 결정이 해석 시 중요한 절차이다. 대표적으로 Tho et al.(2012)은 jack-up spudcan의 관입 해석을 하기 앞서, 각기 다른 메쉬 크기를 4개 선정하여 mesh convergence study를 수행하였고, 해석에 적합한 대표 메쉬 크기를 선정하여 CEL 해석을 수행하였다. 일반적으로 FEM 해석에서 메쉬 크기가 조밀할수록 정확한 해석 결과를 얻을 수 있지만, 해석 컴퓨터의 성능 및 시간적인 제한사항이 있으므로 해석 결과에 영향을 주지 않는 적절한 메쉬 크기를 결정해야 한다.

메쉬 크기 결정을 위해 저자가 수행하였던 현장재하시험을 대상을 모델링하여 해석을 수행하였다. 현장재하시험은 직경에 따른 개단말뚝의 폐쇄효과를 분석하기 위하여 광양 현장에서 3본의 시험말뚝(강관말뚝)을 대상으로 수행되었고, 사질토 지반에 항타 시공되었다. 현장 지반조건은 상부에 준설 매립층이 15m 정도 두텁게 분포하며, N값은 8~18 정도로 나타냈다. 본 현장 지반에서 준설 매립층에 해당하는 지층의 시료를 채취하여 입도시험을 수행한 결과, 비중(G_s)이 2.70이고, 균등계수(C_u)가 2.00, 곡률계수(C_c)가 1.01을 나타냈으며, 통일분류법 상 SP에 해당하였다. 개단말뚝의 지지력 성분은 외주면 마찰력, 선단부 지지력, 내주면 마찰력으로 구분되는데, 이러한 지지력 성분을 분리 측정하기 위하여, 이중관 시험말뚝을 총 3본(외경: 508.0, 711.2, 914.4mm)

을 제작하여 동재하시험과 정재하시험을 수행하였다. 본 연구에서는 8.6m 길이, 508.0mm 직경의 말뚝을 대상으로 해석을 수행하였고 사용된 재료정수는 Table 1에 정리하였다. 현장 재하시험에 대한 보다 자세한 내용은 Ko & Jeong(2015)의 논문에 수록되어있다.



(a) Step-penetration depth curves



(b) Penetration force versus normalized penetration depth curves

Fig. 7. Convergence study for three different mesh densities

Table 1. Input parameters (Kwangyang site)

Type	Model	γ_t (kN/m ³)	E (MPa)	ϕ (deg)	c (kPa)	Poisson's ratio, ν
Pile	L.E.	75	210,000	-	-	0.2
Sand	M.C.	17.6	13.5	32	0	0.3

Table 2. Convergence study for mesh

Type	Minimum mesh size near the pile (m)	D/minimum mesh size	Number of elements	Computation time (h)	Ultimate penetration force, P_u (kN)
Mesh 1	0.05	10.2	101,232	3.2	26,565
Mesh 2	0.04	12.7	292,752	8.0	24,990
Mesh 3	0.03	16.9	591,600	14.5	25,445

Table 2와 같이 메쉬 크기와 해석 결과를 정리하였다. 메쉬 1이 가장 크고, 메쉬 3이 가장 작은 크기이며, 바꾸어 말하면 메쉬 3이 가장 조밀하고 메쉬 1이 가장 느슨한 조밀도를 가지는 경우이다. 해석 결과, Fig. 7(a)에서 보듯이 말뚝의 최종 관입 깊이가 메쉬 2와 3이 동일하게 나타나고, 메쉬 1은 조금 차이를 보인다.

Wang et al.(2010)은 수치해석 시 느슨한 메쉬 조밀도를 가지는 경우에 지지력 계수를 약간 과대평가하는 것으로 보고하였다. 본 해석에서 Fig. 7(b)와 Table 2와 같이 극한 관입 저항치(P_u)는 메쉬 1이 가장 크고 메쉬 2와 3은 유사하게 나타나므로, 메쉬 1은 지지력을 과대평가하는 것으로 판단되므로 메쉬 1 크기는 해석에 적합하지 않을 것으로 판단된다. 이처럼 해석 결과를 바탕으로 메쉬 2가 가장 합리적인 메쉬 크기로 판단되며, 본 연구에서 메쉬 2의 크기를 적용하여 해석을 수행하였다.

5. CEL 기법의 검증

본 절에서는 광양 현장재하시험 사례(Ko and Jeong, 2014)를 토대로 항타 말뚝의 거동을 비교·분석하였으며, 본 연구에서 적용한 CEL 기법의 타당성을 검증하였다. 검증 모델링은 4장에서 언급했던 해석 조건을 적용하였으며, 해석에 사용된 재료정수는 Table 1과 같다.

5.1 광양 현장 측정 결과와 비교

CEL 모델링 기법의 비교검증을 위해 현장 시험 결과인 PLR과 SPI를 이용하였다. Table 3은 본 장에서 검증하고자 하는 현장 시험의 말뚝 제원 및 PLR과 SPI의 CEL 해석 결과를 정리하였다. PLR의 경우 해석결과와 현장 시험 결과를 비교한 결과, 약 98.7~118.2%의 정

Table 3. Validation of numerical model

Type	Pile length (m)	Pile diameter (mm)	PLR		L _{is} (m)		SPI (%)	
			CEL	Measured	CEL	Measured	CEL	Measured
Case 1	8.6	508.0	0.52	0.44	1.80	1.30	40.0	34.4
Case 2	11.4	711.2	0.75	0.76	1.94	2.00	22.6	23.1
Case 3	15.5	914.4	0.90	0.85	1.84	2.30	13.1	17.4

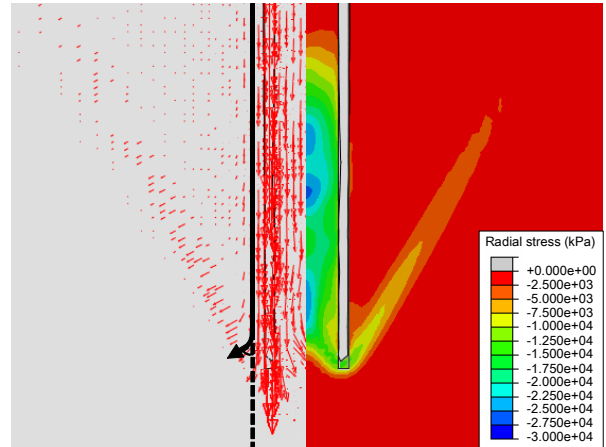
확도를 나타내었으며, 말뚝 직경이 큰 경우의 정확도가 비교적 높은 것을 알 수 있었다. SPI를 비교한 결과 약 75.3~116.3%의 정확도를 나타냈다. 2번 시험말뚝 경우에 매우 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 나머지 경우에도 약간의 오차는 발생하였지만 전반적으로 현장 계측치를 합리적으로 예측하고 있음을 확인할 수 있었다.

5.2 항타 관입 메커니즘 검증

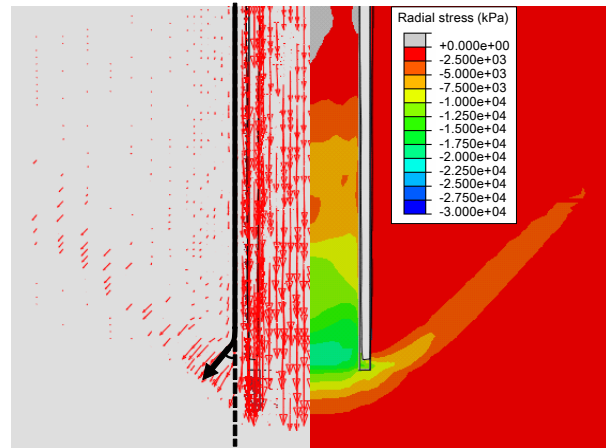
2장에서 언급하였듯이 항타 말뚝은 관입 시 폐색정도에 따라 흙의 상대적인 변위와 radial stress 분포가 다르게 나타난다. 따라서 항타 말뚝의 관입 메커니즘을 분석하기 위해 Fig. 8과 같이 순간속도벡터와 radial stress 분포를 나타내었다. Fig. 8에서 검은색 선이 항타 관입에 따라 발생하는 흙의 상대적인 변위의 방향을 나타낸다. 소구경 말뚝(1번 시험말뚝)의 경우, 말뚝 선단 부근의 흙의 변위가 수평 방향에 가깝고 크게 발생한다. 반면에 대구경 말뚝(3번 시험말뚝)의 경우, 말뚝 선단 부근에서 발생하는 흙의 변위 방향이 말뚝과 평행에 가깝고 작게 발생한다.

Fig. 8의 우측은 radial stress 분포를 나타내는데 이는 간접적으로 말뚝의 폐색정도를 확인할 수 있다. Fig. 8에 나타나듯 말뚝 직경이 증가할수록 말뚝 선단 부근의 내·외부에 발생하는 radial stress의 크기와 분포는 감소한다. 이는 말뚝 직경이 증가할수록 폐색효과가 감소하는 것을 나타내며 기존 연구 결과와도 잘 일치한다(Beringen et al., 1979; Klos and Tejchman, 1981; Szechy, 1959; Kishida, 1967; Paikowsky, 1989).

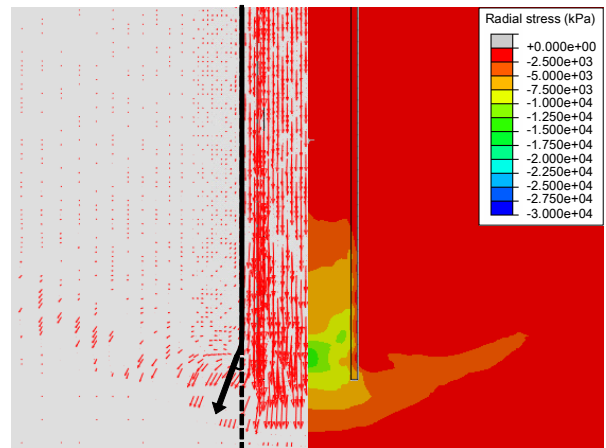
또한 Fig. 2에서 언급하였던 항타 관입 메커니즘에 대한 기존 연구 결과(White et al., 2005)와도 잘 일치하였다. 특히, 해석 결과를 통해 흙의 상대적인 변위와 radial stress 분포를 분석할 수 있어 항타 말뚝 관련 연구에 활용성이 뛰어날 것으로 판단된다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 8. Mechanism of driven pile penetration

6. 결 론

본 연구에서는 대변형 수치해석을 통해 항타 말뚝의 동적 거동 특성을 분석하였다. 항타 말뚝의 지반 관입 과정을 직접 모사하기 위하여 Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) 기법을 사용하여 대변형 해석을 수행하였고, 모델링 기법 및 분석결과는 현장 시험 결과와의 비교를 통해 검증하였으며, 검증된 기법을 바탕으로 항타 관입 메커니즘을 분석하였다. 본 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 지반공학 분야에서 활발히 적용되지 못한 대변형 해석기법 중에 하나인 Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) 기법을 이용하여 기존 유한요소 해석 기술로는 구현이 어려운 항타 말뚝의 관입 해석을 수행하였다. 적용성 검토 결과, 메쉬의 왜곡 및 뒤틀림, 해석의 수렴과 같은 문제없이 모사가 가능하였고 이와 같이 대변형 수치해석을 이용하여 다양한 지반공학 분야에 적용 가능할 것으로 판단된다.
- (2) 특히 대변형 해석은 항타에 따른 응력 거동 및 변형 특성 분석이 가능하여, 기존의 파(wave)를 이용한 항타 해석 방법(GRL weap)의 한계를 극복 가능할 것으로 판단된다.
- (3) PLR의 경우 해석결과와 현장 시험 결과를 비교한 결과, 약 98.7~118.2%의 정확도를 나타내었으며, 말뚝 직경이 큰 경우의 정확도가 비교적 높은 것을 알 수 있었다. SPI를 비교한 결과 약 75.3~116.3%의 정확도를 나타냈다. 이처럼 현장 측정 자료와의 비교검증을 통해, 본 연구에서 적용한 CEL 해석결과가 실제 항타에 의해 지반에 관입되는 말뚝의 거동을 합리적으로 예측할 수 있음을 확인하였다.
- (4) CEL 기법을 이용한 해석 결과, 항타 관입 메커니즘에 대한 기존 연구 결과(White et al., 2005)와 유사한 경향을 나타냈다. 특히, 해석 결과를 통해 흙의 상대적인 변위와 radial stress 분포를 분석할 수 있어 항타 말뚝 관련 연구에 활용성이 뛰어난 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0030040)의 지원을 받아 수

행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. ABAQUS. (2013), *ABAQUS user's and theory manuals, Version 6.13. rhode island: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.*
2. Beringen, F. L., Windle, D., and Van Hooydonk, W. R. (1979), "Results of Loading Tests on Driven Piles in Sand", *Proceedings of the Conference on Recent Development in the Design and Construction of Piles*, ICE, London, Vol.21-22, pp.213-225.
3. Chow, F. C. (1997), "Investigation into the behaviour of Displacement Piles for Offshore Foundation", Ph.D. thesis, University of London (Imperial College), London, UK.
4. Goble, G. G., Raushe, F. R., and Likins, G. E. (1980), "The Analysis of Pile Driving-a State-of-the-art", *Proceedings of International Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles*, Stockholm, Sweden, pp.131-162.
5. Jeong, S. S., Lee, K. W., Kim, Y. M., and Kim, J. H. (2014), "A Study on the Landslide/debris Flow based on Large Deformation Analysis", *Proceedings of the 40th KSCE Conference*, Daegu, Korea, pp.271-272.
6. Kim, Y. H. and Jeong, S. S. (2014), "Analysis of Dynamically Penetrating Anchor based on Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) Methods", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No.3, pp.895-906.
7. Kishida, H. (1967), "The Ultimate Bearing Capacity of Pipe Piles in Sand", *Proceedings of 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.196-199.
8. Klos, J. and Tejchman, A. (1981), "Bearing Capacity Calculation for Pipe Piles", *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, Vol.2, pp.751-754.
9. Ko, J. Y. and Jeong, S. S. (2014), "Analysis of Plugging Effect for Open-ended Piles based on Field Tests", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.12, pp.51-61.
10. Ko, J. Y. and Jeong, S. S. (2015), "Plugging Effect of Open-ended Piles in Sandy Soil", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.52, No.5, pp.535-547.
11. Lee, K. W., Kim, Y. M., Kim, J. H., and Jeong, S. S. (2014), "A Study on the Landslide/debris Flow Considering the Erosion and Entrainment of Bed Sediment", *Proceedings of KGS fall national conference*, Seoul, Korea, pp.169-174.
12. Lehane, B. M. (1992), "Experimental Investigation of Pile behaviour Using Instrumented Field Piles", Ph.D. thesis, University of London (Imperial College), London, UK.
13. Mabsout, M. E., Reese, L. C., and Tassoulas, J. L. (1995), "Study of Pile Driving by Finite-element Method", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.121, No.7, pp.535-543.
14. Mabsout, M. E., Sadek, S. M., and Smayra, T. E. (1999), "Pile Driving by Numerical Cavity Expansion", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.23, No.11, pp.1121-1140.
15. Paikowsky, S. G. (1989), "A Static Evaluation of Soil Plug behavior with Application to the Pile Plugging Problem", D.Sc. thesis, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA.
16. Paikowsky, S. G. (1990), "The Mechanism of Pile Plugging in Sand",

Proceedings of the 22nd Offshore Technology Conference, Houston, TX, pp.593-604.

17. Qiu, G., Henke, S., and Grabe J. (2011), "Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian Approach on Geomechanical Problems Involving Large Deformations", *Computers and Geotechnics*, Vol.38, pp.30-39.
18. Szechy, C. H. (1959), "Tests with Tubular Piles", *Acta Technica*, Hungarian Academy of Science, Vol.24, pp.181-219.
19. Tho, K. K., Leung, C. F., Chow, K. K., and Swaddiwudhipong, S. (2012), "Eulerian Finite-Element Technique for Analysis of Jack-up Spudcan Penetration", *International Journal of Geomechanics*, Vol.12, No.1, pp.64-73.
20. Wang, D., Hu, Y., and Randolph, M. F. (2010), "Three-dimensional Large Deformation Finite-element Analysis of plate Anchors in Uniform Clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.136, No.2, pp.355-365.
21. White, D. J., Schneider, J. A., and Lehane, B. M. (2005), "The Influence of Effective Area Ratio on Shaft Friction of Displacement Piles in Sand", *Proceedings of Frontier in 255 Offshore Geotechnics*, pp.741-747.

Received : April 25th, 2015

Revised : August 3rd, 2015

Accepted : August 12th, 2015