Coupled Eulerian–Lagrangian 기법을 이용한 선박의 수중사면 충돌해석 2 : 매개변수연구

이 계 희[†]

[†]목포해양대학교 해양건설공학과 교수

Vessel Collision Analysis of an Underwater Soil Slope using Coupled Eulerian–Lagrangian Scheme 2: Parametric Study

Gyehee Lee[†]

[†]Professor, Dept. of Ocean Civil Engineering, Mokpo National Maritime Univ., Mokpo, 58626, Korea

Abstract

In this study, parametric analyses are performed using the coupled Eulerian–Lagrangian scheme for the collision behaviors of a vessel and an underwater slope that constitutes part of an artificial protective island. The vessel parameters considered in the analysis are bow angle, stem angle, draft, and impact velocity. The gradient of the slope, the friction coefficient between the bow and the slope, and soil strength are considered as parameters of the slope. For each parameter, the dissipated collision energy and the collision force are estimated from the behavior of the vessel, and the energy dissipation mechanism is identified in terms of the ground deformation. The collision force is assumed as an exponential function, and the effects of the parameters are estimated. As a result, only two parameters, the gradient of the slope and the friction coefficient between the vessel and the soil, can affect the exponential coefficient of the function. The dissipated energy by the soil can thus be estimated adequately. The relationship between the volume of the soil pushed out by the bow and the dissipated collision energy is estimated as a linear function. This relationship is independent of the magnitude of the collision energy, and affected more by the friction coefficient and the soil strength than by the parameters of the vessel.

Keywords : coupled eulerian-lagrangian (CEL) scheme, vessel collision analysis, large deformation analysis, underwater slope

1. 서 론

운항하는 선박으로부터 시설물을 보호하는 선박충돌 방호공은 여러가지 형식이 있는데, 그 중 인공섬형식의 충돌 방호공은 상대적으로 큰 충돌에너지를 가진 선박을 방호하기 위해 설계한다(AASHTO, 2009). 이 형식의 충돌 방호공은 지반의 변형으로 선박의 충돌에너지를 소산하는 구조로 이를 설계하기 위해서 지반의 대변형을 해석하는 과정이 수반하게 된다. 이러한 지반의 대변형은 다양한 비선형 거동을 포함하므로 기존의 구조해석적 접근으로는 해를 구하는데 여러가지 어려움이 있다. 이러한 어려움을 해소하는 방안의 하나로 지반을 일종의 유체와 같은 관점으로 해석하는 Coupled Eulerian Lagrangian

(CEL)방법이 제안되고 있다(Kim and Jeong, 2014; Ko *et al.*, 2017; Qiu *et al.*, 2011). 이 방법은 주로 상용해석프로그램인 ABAQUS(Simulia, 2012)를 이용하여 수행되어 파일의 관입 및 해상기초의 해석 등 지반의 대변형을 고려해야 하는 다양한 분야에 적용되고 있다(Konkol and Bałachowski, 2017; Xiao *et al.*, 2019). 이러한 해석기법들은 다수의 축소모형실험과 현장 실험에서 얻어진 값을 적절히 모사할 수 있음을 보이고 있다(Khoa and Jostad, 2016; Konkol, 2017).

선박충돌 방호공의 해석에서 가장 중요한 응답으로는 충돌력과 방호공의 에너지 소산거동을 들 수 있다. 이는 방호공의 설계에 중요한 요소이며, 선박이나 보호받는 구조물의 안전성과 관련되어 있는 응답이다. 다만 수중사면의 경우는 그 충돌

[†]Corresponding author:

Tel: +82-61-240-7314; E-mail: lghlsk@mmu.ac.kr
Received September 26 2019; Revised ; October 23 2019
Accepted October 24 2019

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

력이 대상구조물에 직접적으로 전달되지 않기 때문에 추가적인 해석이 필요하다.

이전 연구(Lee, 2020)에서는 CEL방법을 이용하여 수중사면에 충돌하는 선박의 거동 및 충돌에너지와 사면의 거동과의 관계를 추정하였다. 이 연구에는 선박의 선수에 의해서 밀려난 원지반의 지반부피와 소산된 충돌에너지와 밀접한 관련이 있다는 것을 보였다.

수중사면에 충돌하는 선박의 지반의 거동은 다양한 매개변수들에 의해 영향을 받는다. 충돌하는 선박의 입장에서 선박의 형태와 크기가 중요한 요소가 될 것이고, 충돌을 당하는 사면에 대해서는 사면의 형상과 지반을 구성하는 재료의 물성치가 중요한 요소로 판단된다. 이러한 매개변수들이 상호작용이 전체 거동이 미치는 영향을 평가하는 것은 이러한 선박충돌에 대한 시설물의 안전을 확보하는데 중요한 기초지식일 될 것이다.

본 연구에서는 이전 연구(Lee, 2020)에서 개발된 방법론을 바탕으로 수중사면에 선박이 충돌하는 경우 다양한 매개변수들의 영향과 거동에 대한 매개변수해석을 수행한다.

2. 매개변수의 선정 및 모델링

2.1 선박

본 연구의 CEL해석에서 선박은 Lagrangian영역으로 모델링되었다. 선박의 충돌질량은 2.0×10^4 배수톤(DT)으로 일반적인 1,000TEU급의 컨테이너선의 만재배수량에 해당하는 질량으로 가정하고 충돌속도를 같은 값(5m/s)을 사용하여 동일한 충돌에너지(250MJ)를 가지도록 하였다. 선박의 충돌은 선수 충돌로 가정하고 선박전체의 질량을 선수부에 집중시켜 모델링을 수행하였다. 다만 선수의 형태에 따라 모델링에 사용된

부피가 다르므로 밀도값을 조절하여 동일한 충돌질량을 갖도록 하였다. 충돌하는 선박의 특성은 크게 선수의 형상과 크기로 정의될 수 있다. 썰기형태의 상용선수(conventional bow)를 가진 선박의 형상은 Fig. 1과 같이 정의된다.

상용선수를 가진 선박의 형상을 결정하는 매개변수는 선수각(2θ), 스템각(ϕ) 그리고 선체의 높이(H_{deck})라 할 수 있다. 일반적으로 썰기형 선수를 가진 선박의 경우 선수각의 범위는 많은 경우 40° 미만의 값을 보이고 큰 선체를 갖는 유조선이나 산물선의 경우 최대 70° 정도의 선수각을 갖는 경우가 있다. 스템각은 60° 내외의 각이 일반적이거나 70° 이상의 값을 갖는 경우도 있다(Zhang, 1999). 본 연구에서는 이러한 선수의 형상에 대한 특성값을 선수각의 경우 30° , 45° , 60° 로(Fig. 2), 스템각의 경우는 45° , 60° , 80° 의 값(Fig. 3)을 변수로 잡고 모델링을 수행하였다. 이 중 표준적인 형태의 해석모델로는 컨테이너선의 표준과 가장 가까운 선수각 30° , 스템각 60° 로 가정하였다. 선체의 형상 중 다른 매개변수인 선체의 높이는 동일한 선수각과 스템각을 가졌을 경우 닢은 비에 따라 동일한 흘수를 가지면 충돌에 고려되는 선체의 높이는 동일하다. 따라서 충돌 시 선박의 충돌위치를 조절하여 흘수를 변화시키면서 고려하였다.

Fig. 1 Shape parameters of conventional bow

(a) $\phi=45^\circ$

(b) $\phi=60^\circ$

(c) $\phi=80^\circ$

Fig. 2 Shape of bows as stem angle

(a) $2\theta=30^\circ$

(b) $2\theta=45^\circ$

(c) $2\theta=60^\circ$

Fig. 3 Shape of bows as bow angle

2.2 지반

Eulerian 방법으로 모델링된 영역은 공기, 해수와 지반을 포함하는 영역으로 직육면체로 해석영역을 설정하고 Eulerian Volume Fraction(EVF)의 값을 설정하여 지반과 다른 영역을 구분하였다. 요소망의 생성시 충돌이 일어나는 부분은 상대적으로 작은 크기의 요소를 사용하여 해석의 정확도를 높이고자 하였고, 이 영역 밖으로는 요소의 크기가 설정된 최대값이 이를 때까지 일정한 비율로 증가하도록 하였다. 요소망에 사용된 요소의 최소 및 최대크기는 선박의 진행방향(x)으로는 0.2m, 1.5m, 선박진행의 직각방향(y)로는 0.2m, 1.0m, 수직방향(z)로는 0.2m, 1.0m이다. 해석에 사용된 전체 Eulerian 영역은 기존 연구에서 사용했던 모델과 동일하며 절점수 약 18만개, 요소수 17만개 정도이다(Lee, 2020).

충돌하는 지반에 대한 경사는 선박과 지반과의 접촉형상이 달라지기 때문에 충돌거동에 중요한 매개변수로 판단되었다. 모델링에서 지반에 해당하는 부분의 EVF 값을 다시 설정하여 고려하였다. 매개변수해석에 고려된 지반의 경사는 1:1, 1:2, 1:3이다. 지반의 경사에 따른 선박의 충돌위치를 Fig. 4에 나타내었다.

선수의 충돌에 따라 밀려나는 원지반의 부피를 사면의 기울

Fig. 4 Vessel collision location as slopes(draft 8m)

기와 충돌위치, 선수의 형상에 따라 Fig. 5에 나타내었다. 이 그래프들의 범례에서 “s”뒤에 오는 숫자는 사면의 기울기와 충돌흘수를 나타내고 “b”뒤에 오는 숫자는 선수각과 스템각을 나타낸다. 예를 들어 vols38b46은 1:3의 사면경사에 흘수 8m로 선수각 45°, 스템각 60°의 선수를 나타낸다. 이들 그래프에서 알 수 있듯이 사면의 기울기가 급해질수록 동일한 선수의 변위에서 많은 양의 지반을 밀어낸다. 이는 선수각이 커지는 경우에도 동일한 경향을 보인다. 하지만 스템각은 조금 다른 경향을 보이는데 변위가 작은 경우에는 스템각이 작은 경우 즉 사면과의 경사각의 차이가 작은 경우에 더 많은 부피의 지반을 밀어내지만 변위가 커질수록 지반에 관입되는 부피의 증가도가 커져

(a) as slope

(b) as bow angle(2θ)

(c) as stem angle(ϕ)

Fig. 5 Pushed out volume of soil

Table 1 Soil parameters

Soil name	E (Pa)	Su (Pa)	Density (kg/m ³)	friction angle
Type0	4.50×10^7	9.00×10^4	6.116×10^2	25°
Type1	2.71×10^7	5.41×10^4		
Type2	1.32×10^7	2.65×10^4		
Type3	6.20×10^6	1.24×10^4		
Type4	2.03×10^6	5.25×10^3		

Table 2 Maximum collision force and displacement as parameters

Parameter	Value (legend name)	Max. Force (MN)	Max. Disp. (m)	Coeff. α	Dissipated Energy*** (MJ)
Bow angle	30°*(b361)	32.36	16.60	1.33	230.6
	45°(b461)	38.03	14.41	1.29	239.7
	60°(b661)	44.52	12.51	1.33	238.9
Stem angle	45°(b341)	33.11	15.76	1.35	222.5
	60°*(b361)	32.36	16.60	1.33	230.6
	80°(b381)	30.75	17.57	1.38	227.4
Slope	1:1(ps18)	35.92	10.74	0.64	235.8
	1:2(ps28)	35.09	13.84	1.27	214.1
	1:3*(ps38)	32.36	16.60	1.33	230.6
Draft	8m*(ps38)	32.36	16.60	1.33	230.6
	6m***(ps36)	28.65	-	-	-
	4m***(ps34)	21.95	-	-	-
Friction Coefficient	0.0*(3619)	32.36	16.60	1.33	230.6
	0.1(36f1)	36.31	15.24	1.36	234.0
	0.3(36f3)	42.46	13.70	1.42	240.2
	0.5(36f5)	47.65	12.63	1.44	246.4
	1.0(36f9)	50.57	11.59	1.51	232.7
Soil	Type0*(3619)	32.26	-	-	-
	Type1***(36s1)	22.92	16.60	1.33	230.6
	Type2***(36s2)	13.75	-	-	-
	Type3***(36s3)	7.84	-	-	-
	Type4***(36s4)	5.07	-	-	-
Velocity	2m/s(36v2)	10.93	7.97	1.27	38.4
	3m/s(36v3)	17.75	11.13	1.28	86.5
	4m/s(36v4)	24.93	13.67	1.33	146.0
	5m/s*(3619)	32.36	16.60	1.33	230.6

* Basic parameters

** Final displacement was exceed the modeling boundary.

*** Estimated by Eq.(2)

스텝각이 큰 선수의 관입부피와의 크기가 역전되는 것을 볼 수 있다. 스텝각이 45°인 경우와 60°인 경우는 변위가 약 13m일 때 역전되며 스텝각이 60°인 경우와 80°인 경우는 변위가 약 16m에서 크기가 역전된다. 하지만 전체적인 부피의 범위는 그래프에 도시된 범위에서는 세 종류의 크기에 대해서 거의 유사한 값을 보여주고 있다. 동일한 사면에서 수직방향의 충돌위치 변화가 충돌점에서의 변위에 따른 관입부피의 변화를 발생시키지 않기 때문에 흡수에 변화에 따른 그래프는 따로 도시하지 않았다.

해석에서 고려된 지반의 재료모델은 Mohr-Coulomb 모델

이다. 이 때 사용된 지반의 종류에 따른 재료물성값을 Table 1에 나타내었다. 지반재료의 여러가지 특성 중 지반의 강도를 매개변수로 가정하고 다른 매개변수는 동일한 값을 사용하여 지반의 물성치에 대한 영향을 고려하였다. 또 다른 지반에 대한 매개변수로 지반과 선수면의 마찰계수를 선정하였다. 본 연구에서는 0에서 1까지의 마찰계수를 산정하여 해석을 수행하였다. 본 논문에서 고려된 매개변수는 Table 2에 정리하였다.

매개변수의 영향을 독립적으로 고려하기 위하여 기준해석 경우를 결정하고 각각의 매개변수를 변화시키면서 산정된 응답의 변화를 기준해석경우와 비교하여 매개변수의 영향을 평가하였다. 기준해석경우는 1:3사면에 흡수 8m, 선수각(2θ) 30°, 스텝각(φ) 60°, 지반 Type0, 마찰계수 0.0, 충돌속도 5m/s 인 경우로 선정하였다.

3. 해석결과

3.1 변형과 충돌력

해석결과 얻어진 최종 단계에서의 지반의 변형형상의 예를 Fig. 6에 나타내었다. 이 결과에서 고려된 매개변수는 선수각(2θ)이다. 선수각이 증가할수록 선수의 최종변위가 작아지고 선수의 측면으로 더 많은 양의 지반이 밀려나는 현상을 관찰할 수 있다.

선수각의 변화에 따라 충돌 중 발생하는 선박의 응답시간이력을 Fig. 7에 나타내었다. 각 그래프에서 b361, b461, b661은 각각 선수각(2θ)가 30°, 45°, 60°인 경우의 응답을 나타내고 최대점을 따로 표시하였다. Fig. 7(a)는 선수변위의 시간이력을 나타낸다. Fig. 6에서 나타났듯이 선수각의 증가에 따라 최종 변위가 감소함을 알 수 있다. 하지만 각 충돌경우는 동일한 충돌 에너지 값을 가지고 있으므로 충돌이 짧은 시간에 종료되었다면 상대적으로 큰 충돌력이 발생할 것이다. 이러한 경향은 Fig. 7(c)에 나타내었다. 이 때 발생한 충돌력은 선수의 가속도시간이력과 선수의 질량을 곱한 것으로 선박이 받는 충돌력을 의미한다. 하지만 이는 동시에 사면이 받는 충돌력과 동일한 값이므로 사면배후에 시공된 파일이나 교각의 기초에 영향을 미칠 수 있는 응답이다. 선박의 충돌력은 선수각이 클수록 큰 값을 나타내어 상식적으로 추정할 수 있는 거동과 일치되는 응답을 보이고 있다. 충돌 시 선박의 속도감소는 Fig. 7(b)에 나타내었다. 선수각이 큰 해석인 경우에 충돌종료시간이 짧아지는 경향을 잘 보여주고 있다. 충돌 시 선박에 작용하는 충돌력은 선수각이 큰 경우에 크게 발생하는 것이 물리적으로 타당할 것이다. 이러한 경향은 Fig. 7(c)에 나타나 있다. 최대 충돌력은 선박이 정지하기 약간 전에 발생하며 이후로는 비슷한 수준을 유지하다가, 선박의 반동과 함께 급속히 감소한다. 이러한 충돌력의 변화를 변위를 기준으로 그리면 Fig. 7(d)와 같이 나타난다.

Fig. 6 Final deformation of slope as bow angle(2θ)

이 그래프에서는 변위를 기준으로 할 때 최대 충돌력이 발생한 후 추가적인 변위를 발생시키지 못하고 반동하는 것으로 나타난다.

선박이 충돌 시 지반의 변형을 발생시키는 외부일은 작용력을 변위에 대하여 적분한 값이므로 Fig. 7(d)에서 곡선의 면적이 된다. 곡선의 형상을 바탕으로 충돌력과 변위의 관계를 다음과 같이 지수함수로 가정하였다.

$$F = \beta x^\alpha \quad (1)$$

여기서, F 는 충돌력, x 는 선박의 변위이고 α, β 는 계수이다. 충돌 시 소산된 에너지 E_d 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 7 Collision responses as bow angle

$$E_d = \int_0^{d_{max}} F dx = \frac{1}{\alpha + 1} F_{max} d_{max} \quad (2)$$

여기서, d_{max} 는 최대충돌력 F_{max} 이 발생하는 변위이다. Fig. 7(d)에서 볼 수 있듯이 이 값은 최대 변위와 거의 같은 값을 가진다. 식 (1)의 양변에 로그를 취하면 다음과 같은 1차함수로 나타난다.

$$\log(F) = \alpha \log(x) + \log(\beta) \quad (3)$$

식 (3)을 최소자승법에 의해서 보간하여 식 (1)의 지수계수 α 값을 구할 수 있다.

Table 2에서 각 매개변수에 따른 해석경우에서 얻어진 최대 충돌력 및 변위와의 관계와 소산된 에너지를 정리하였다. 또한 각 매개변수에 대한 해석명을 괄호안에 명시하였다. 이들 매개변수해석에서 지반의 강도를 약하게 한 경우(Type1~4)와 충돌 시 흡수가 작은 경우는 최종해석시의 응답값이 모델링의 영역을 벗어나는 거동이 발생하여 변위와 관련된 결과를 제외하였다.

선박에 대한 매개변수들 중 충돌력에 큰 영향을 미치는 매개변수는 선박의 경우 선수각과 충돌속도이고 지반의 경우는 재료적 특성을 나타내는 지반의 강도와 마찰계수이다. 선수의 스템각과 사면의 경사도는 충돌력에 영향을 미치지 않는 결과를 보였다. 하지만 변위와의 관계를 중점으로 살펴보면 선박의 특성을 나타내는 매개변수들은 충돌력과 변위와의 관계를 나타내는 지수계수에 거의 영향을 미치지 않았고 사면의 경사와 지반과의 마찰계수에만 영향을 받는 경향을 보였다.

변위와 충돌력의 곡선에 기반하여 산정한 소산에너지는 총 충돌에너지의 약 90%이상의 값을 보인다. 이러한 차이는 선박이나 지반에 저장되는 탄성변형에너지나 기타 계산과정에서 발생하는 불확실성에 기인하는 것으로 판단되어 타당한 결과를 보이는 것으로 판단된다.

3.2 충돌에너지와 지반의 변형

선수에의 의해서 밀려난 지반의 부피와 소산된 운동에너지의 관계를 비례관계로 가정하고 선형 회귀분석을 수행하였다. 선형회귀분석의 경우 x축의 값이 0인 경우 초기 y절편값이 발생하지만 선수가 사면에 충돌하지 않아 밀려난 지반의 없는 경우의 에너지소산량은 0이므로 y절편값이 없이 기울기만 있는 1차식으로 회귀분석을 수행하였다.

각 매개변수에 대한 해석에서 이를 적용하여 밀려난 지반의 부피와 소산된 선박의 충돌에너지를 비교하면 Fig. 8과 같다.

이 그래프에서 볼 수 있듯이 지반의 부피와 소산된 선박의 충돌에너지는 매우 강한 상관성을 가지고 있다. 따라서 부피와 소산된 에너지의 관계는 두 값이 이루는 직선의 기울기로 규정할 수 있다. 전체적으로 선수와 관련된 매개변수의 변화에 대해서는 둔감한 경향을 보이며 선수에 관련된 매개변수 중 스템각에 대해서만 의미있는 변화를 관찰할 수 있었다. 충돌지반에 대한 매개변수에서 형상을 나타내는 사면의 기울기의 영향은 선수의 형상에 대한 매개변수와 유사하게 작은 변화를 보이는 데 반해 지반을 구성하는 재료의 특성을 나타내는 지반의 강도와 마찰계수에 대해서는 큰 폭의 변화를 보여주고 있다. 이러한 결과로 부터 소산에너지와 밀려난 지반의 부피의 관계는 재료적인 특성이 크게 작용하는 것을 보여주고 있다.

선수의 형상에 대한 매개변수인 스템각은 최대충돌력에 거의 영향을 미치지 못하지만 밀려난 지반의 부피와 소산에너지의 관계에는 선수의 형상에 관한 매개변수 중 가장 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 다른 선박에 관한 매개변수는 지반의 부피와 에너지와의 관계에 영향을 크게 미치지 못하는데 이중 흡수에 대한 영향은 이론상 동일한 직선을 나타내야 하지만 실제 해석에서는 약간의 변화가 보이고 있다. 이는 하부의 지반이 상부의 재료에 의한 구속압의 증가가 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 8의 결과는 동일한 충돌에너지에 대한 결과이므로 추가적으로 충돌에너지를 변화시키면서 최대충돌력과 에너지 소산거동을 비교하였다(Fig. 9). 고려된 충돌속도는 5m/s, 4m/s, 3m/s, 2m/s이다. 충돌에너지의 최소값과 최대값의 상대적인 비는 1:6.25이고 충돌에너지에 대해 최대충돌력은 1:2.97배의 변화를 보인다. 하지만 이러한 충돌에너지와 충돌력의 변화가 발생해도 소산된 충돌에너지와 밀려난 지반의 부피는 상대적인 비율을 변하지 않고 거의 일정한 값을 유지한다. 또한 앞절에서 살펴보았던 충돌력과 변위의 비례관계도 변화되지 않고 유지하는 것을 알 수 있다.

이와 같이 밀려난 지반의 부피와 에너지의 선형관계로부터 다음과 같은 비례식을 가정할 수 있다.

$$E_d = \gamma V_s$$

여기서, E_d 는 소산된 에너지로 힘과 거리의 곱에 비례하는 차원을 가지고 있고 V_s 는 지반의 부피로 거리의 세제곱에 비례하는 물리량이다. 따라서 두 물리량간의 기울기 γ 는 힘을 거리의 제곱인 면적으로 나눈 물리량을 가져야 한다. 이러한 물리량은 압력이나 재료의 탄성계수의 물리량과 일치한다. 따라서 Fig. 8(e)에서 고려되었던 매개변수 지반의 초기 탄성계수와 기울기에 대한 관계를 정리하면 Table 3에서 보는 바와 같다.

Fig. 8 Relationships between pushed out soil volume and dissipated energy

Table 3에서는 해석에 사용된 지반의 탄성계수와 해석결과 얻어진 소산에너지와 지반의 부피 간의 기울기를 최대값에 대한 정규화된 값으로 비교하였다. 그 결과 기울기 값은 실제로는 탄성계수의 약 4/5제곱에 근접하는 값을 보였다. 이러한 차이의 원인으로는 탄성계수는 지반의 대변형이 일어나기 전에 초기상태의 값이므로 지반이 대변형을 겪는 동안의 고도의 비선

형성을 대표하기에는 부족한 값이라는 점과 해석과정에서 고려되지 못한 거동특성의 영향들을 들 수 있다.

이상과 같은 이러한 오차의 영향을 최소화하는 방법과 추가적인 에너지 소산거동, 특히 마찰거동의 올바른 평가방안에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 9 Responses as collision energy

Table 3 Maximum collision force and displacement as parameters

Soil Type	Young Modulus(E) (MPa)	slope(α) (MPa)	Norm. E (E_n)	Norm. γ (γ_n)	$E_n^{\frac{4}{5}}$
Type0	45.0	1.2	1.00	1.00	1.00
Type1	27.1	0.79	0.602	0.658	0.666
Type2	13.2	0.44	0.294	0.366	0.375
Type3	6.20	0.25	0.138	0.208	0.205
Type4	2.32	0.15	0.045	0.125	0.084

4. 결론

본 연구에서는 이전의 연구에서 coupled Eulerian Lagrangian (CEL)기법을 이용하여 구성된 선박과 사면의 충돌해석모델에 기반하여 매개변수해석을 수행하였다. 선수각, 스텝각, 흘수, 충돌속도를 충돌선박의 매개변수로 하고 사면의 경사, 마찰계수, 지반의 강도를 경사사면의 매개변수로 하여 해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충돌력은 변위와 지수함수적 관계를 보이며, 이 관계는 사면의 경사와 마찰계수에 주로 영향을 받는다.
- 2) 충돌 시 밀려난 지반의 부피와 소산된 충돌에너지는 선형비례의 관계로 가정할 수 있다.
- 3) 지반의 부피와 소산된 충돌에너지 간의 관계는 선박의 형상보다 마찰계수나 지반강도 등 지반의 재료적 특성에 주로 영향을 받으며 이에 대한 추가적인 연구필요성이 도출되었다.

감사의 글

이 논문은 2017년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2017R1D1A1B03030253).

References

- AASHTO (2009) *Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2nd Edition.
- Khoa, H.D.V., Jostad, H.P. (2016) Application of Coupled Eulerian-Lagrangian Method to Large Deformation Analyses of Offshore Foundations and Suction Anchors, *Int. J. Offshore & Polar Eng.*, 26(3), pp.304~314.
- Kim, Y., Jeong, S.S. (2014) Analysis of Dynamically Penetrating Anchor based on Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) Method, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 34(3), pp.895~906.
- Ko, J., Jeong, S., Kim, J. (2017) Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian Technique on Constructability Problems of Site on Very Soft Soil, *Appl. Sci.*, 7(10), pp.1080~1095.
- Konkol, J. (2017) Numerical Analysis of Pile Installation Effects in Cohesive Soils, PhD Thesis, The Gdańsk University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering.
- Konkol, J., Balachowski, L. (2017) Influence of Installation Effects on Pile Bearing Capacity in Cohesive Soils - Large Deformation Analysis via Finite Element Method, *Stud. Geotech. et Mech.*, 39(1), pp.27~38.
- Lee, G.H. (2020) Vessel Collision Analysis to the Underwater Slope Using Coupled Eulerian-Lagrangian Scheme 1 : Development of Analysis Model, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 33(1), pp. 17~23.
- Qiu, G., Henke, S., Grabe, J.G. (2011) Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian approach on Geomechanical Problems Involving Large Deformations, *Comput. & Geotech.*, 38(1), pp.30~39.

SIMULIA (2012) *Abaqus 6.12 Analysis User's Manual*, SIMULIA.
Xiao, Z., Fu, D., Zhou, Z., Lu, Y., Yan, Y. (2019) Effects of Strain Softening on the Penetration Resistance of Offshore Bucket Foundation in Nonhomogeneous Clay, *Ocean Eng.*, 193, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106594>.

Zhang, S. (1999) The Mechanics of Ship Collision, PHD Thesis, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark.

요 지

본 논문에서는 Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 기법을 이용하여 인공섬 형식의 방호공을 구성하는 수중사면에 선박이 충돌하는 경우 발생하는 선박의 선수와 지반의 거동에 대한 매개변수 해석을 수행하였다. 고려된 매개변수는 선수의 경우 선수각, 스템각, 충돌위치 그리고 충돌속도이며, 지반의 조건으로 사면의 기울기, 지반과 선박의 마찰계수 그리고 지반의 강도이다. 선수의 거동으로부터 소산된 충돌력과 운동에너지를 각 매개변수에 대해 산정하고, 이를 지반의 변형과 연계하여 에너지 소산기구의 거동을 파악하였다. 충돌력을 변위의 지수함수로 가정하고 매개변수의 영향을 검토하였다. 그 결과 지수함수의 계수는 사면의 경사와 선박과의 마찰계수에만 영향을 받는 결과를 얻었다. 이 관계로부터 소산되는 충돌에너지를 타당하게 산정할 수 있었다. 충돌 시 선수에 의해 밀려난 원지반의 파괴와 소산된 충돌에너지는 비례하는 관계로 나타낼 수 있다는 것을 보였고, 이 관계는 선박의 형상보다는 선박과 사면의 마찰계수와 지반의 강도에 영향을 받는 것으로 나타났다.

핵심용어 : Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) scheme, 선박충돌해석, 대변형해석, 수중사면