

SPH 기법을 이용한 Rock-berm의 앵커 충돌 수치 시뮬레이션 Anchor Collision Simulation of Rock-berm using SPH Technique

우진호* · 나원배* · 유정석**

Jinho Woo*, Won-Bae Na* and Jeong-Seok Yu**

요 지 : 암석과 같은 입자들로 구성된 구조체의 거동을 일반적인 요소망을 이용한 유한요소해석으로 구현하기 어렵다. 이는 입자로 구성된 구조체의 거동 해석시 입자간의 상호작용을 무시할 수 없기 때문이다. 본 연구에서는 입자로 구성된 구조체(rock-berm)의 분할에 Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) 기법을 이용하여 충돌해석을 수행하고 이를 기존의 Lagrange 기법을 사용한 해석결과와 비교하여 SPH 기법의 적용 가능성을 알아보았다. 결과적으로 SPH 기법이 입자로 구성된 구조체의 충돌해석에 사실적인 모사가 가능한 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 충돌해석, rock-berm 보호공, SPH 기법, 앵커 충돌

Abstract : It is not easy to analyze the behavior of a structural body composed of particles such as rocks using the finite element method facilitating typical element meshes because we cannot ignore the interactions among particles. In the study, we investigated the applicability of smooth particle hydrodynamics (SPH) element method for collision analysis of rock-berm by comparison with the conventional Lagrange method. As the result, SPH technique is expected to be capable of realistic simulation under collision analysis of material composed of particles.

Keywords : collision analysis, rock-berm protector, SPH technique, Anchor collision

1. 서 론

해저케이블과 파이프라인은 육지에서 도서지역으로 전력, 식수, 통신 등의 수송을 담당하는 사회기반시설이며 설치 위치(천해 또는 심해)에 따라 발생 가능한 손상을 고려한 보호 공법이 요구된다. 특히 천해부의 경우 각종 어로 활동이나 선박의 정박활동이 위해요소로 작용한다. 그리고 포설되는 수심의 변화에 따라 위해요소의 종류와 특성이 상이하기 때문에 상황에 맞는 보호 공법의 적용이 매우 중요하다. 천해부에서는 항행하는 선박에 의한 앵커와 어구에 의한 손상을 방지하기 위하여 매설, 보호 구조물 등 다양한 보호공법이 요구된다(Ahn et al., 2007).

기존의 보호공법에 관한 연구를 살펴보면 해저케이블의 매설에 대해 위해요소의 분류 및 대상 지질에 대한 어구와 앵커의 관통깊이 평가가 진행되었다(Allan, 1998). 또한 관련 설계지침으로 보호공법의 위해성 평가, 파이프라인의 규준과 해저케이블의 설치와 보호에 따른 권고사항들이 제시되고 있다(DNV, 2010; DNV, 2012). 그리고 컴퓨터 기술의 발전과 유한요소해석 프로그램의 개발로 인하여 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 연구가 진행되고 있으며 Woo et al.(2009)은 아치형

보호구조물의 앵커 충돌 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 위해요소의 충돌력 산정과 관련하여 전산유체해석을 이용하여 앵커의 항력계수를 계산하여 앵커의 수중낙하속도를 산정하는 연구도 진행되었다(Woo et al., 2013).

상기의 보호공법 중 돌을 쌓는 형태인 rock-berm은 구조물의 상부에 돌을 쌓아서 흐름에 의한 유체력과 충돌체에 의해 발생 가능한 외적하중으로부터 해저케이블, 파이프라인을 보호하는 역할을 수행한다. Rock-berm에 대한 기초 연구들은 berm 유형의 구조물의 파괴 안정성 해석에 집중되어 있다(Corkum and Martin, 2004; Tørum et al., 2012). 또한 rock-berm의 기본재료가 되는 암석 재료의 수치해석에 관한 연구들도 폭발, 고속 충돌과 같은 고변형률속도를 대상으로 하는 암석의 손상 및 파괴에 관한 연구들이 대부분이다(Hao and Hao, 2013; Zhu et al., 2007). 반면 자유 낙하하는 앵커의 충돌과 같은 저속 충돌에 관한 연구는 Woo et al.(2009)에 의해 연구가 수행된바 있으나 이는 구조물의 충돌해석이고 rock-berm과 같이 작은 입자로 구성된 구조체를 대상으로 하는 연구는 찾아보기 어렵다. 특히 암석으로 이루어진 rock-berm의 충돌해석에 관한 연구는 종전에 수행된 바가 없다. 기존의 Lagrange 기법의 경우 재료내부의 공극을 묘사할 수 없는 단

*부경대학교 해양공학과(Corresponding author: Won-Bae Na, Ocean Engineering Department, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea. Tel: +82-51-629-6588, Fax: +82-51-629-6590, wna@pknu.ac.kr)

** (주)한국해양기술 (Korea Ocean Engineering & Consultants Co., LTD, Suwon, Kyunggi 442-819, Korea)

점이 있다. 그와 달리 SPH(Smooth Particle Hydrodynamics) 기법은 무메쉬(meshless)법으로 입자의 이동을 통하여 재료의 거동을 기술하는 방법이며 파편의 비산과정에 대한 수치모사가 실제적으로 재현 가능한 기법이다(Noh and Park, 2007). 이러한 SPH 기법을 이용하는 경우 rock-berm과 같이 입자로 구성된 내부공극이 있는 재료의 충돌해석이 가능하리라 사료된다.

따라서 본 연구에서는 해양에서 발생 가능한 위해요소로부터 해저케이블을 보호하는 rock-berm 구조의 저속 충돌 유한요소해석 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 암석의 모델링에 Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) 기법을 이용하여 충돌해석을 수행하고 이를 기존의 Lagrange 기법을 사용한 해석결과와 비교하여 SPH법의 적용 가능성을 알아보았다. 유한요소 해석법의 차이에 따른 동적 유한요소 해석을 수행하여 응답을 얻었으며 이를 비교하였다. 또한 SPH의 입자 직경변화에 따른 rock-berm의 변위(혹은 충돌) 응답 특성 변화를 알아보고자 하였다.

2. 유한 요소 모델링

충돌 해석에 관한 컴퓨터 시뮬레이션의 경우 충돌체와 피충돌체의 충돌에 관한 여러 가지 설계인자가 포함되어야한다. 본 연구에 사용된 ANSYS AUTODYN은 재료의 상태방정식과 외연적(explicit) 해석법을 이용하여 충돌에 의해 발생하는 물체의 대변위, 대변형 문제를 빠르게 해결할 수 있는 유한요소해석 프로그램이다. 일반적으로 Lagrange, Euler와 SPH 기법을 사용한다. 본 연구에서는 앵커와 rock-berm의 충돌해석을 모델링하기 위해 Lagrange, SPH 기법을 사용하였다. AUTODYN solver상의 계산 사이클은 Fig. 1로 간단히 나타낼 수 있다.

2.1 앵커

일반적으로 앵커는 선박의 정박에 사용되는 것으로 선박의 이동을 방지한다. 이러한 이유로 충분한 무게와 해저면에 잘 정착되는 구조를 가진다. 선체의 크기가 항행하는 위치에 따

라 제한되어있는데 본 연구의 대상해역은 제주-해남간의 HVDC(High voltage direct current) 케이블이 설치된 위치로 당 해역은 섬들이 많으며 협소한 것이 특징이다. 본 연구에서 고려된 앵커는 선박에서 사용되는 2 ton의 중량을 가지는 스톡앵커(stock anchor)이고 시뮬레이션에 고려된 앵커의 종류와 무게는 동일하다.

시뮬레이션 상의 앵커는 KS V 3311(2012)의 스톡앵커를 기준으로 4개의 절점을 가지는 쉘(shell) 요소로 모델링하였으며 강체로 가정하였다. 이는 일반적인 앵커의 경우 주철로 제작되며 충돌에 따른 앵커의 손상은 미소할 것이라 판단되기 때문이다. 앵커의 모델링 상에서 충돌부인 하부면을 제외한 앵커링, 스톡 등은 생략하거나 간략화하여 모델링을 수행하였다. Fig. 2는 시뮬레이션 상에서 모델링된 앵커의 형상이며 강체로 모델링 하였다. 앵커의 모델링에 사용된 주철의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

앵커의 충돌속도는 2.774 m/s가 고려되었다. 2.774 m/s는 전산유체해석을 이용하여 앵커의 항력계수를 계산하여 앵커의 수중낙하속도를 산정한 연구(Woo et al., 2013)의 결과로 얻어진 스톱앵커의 종단낙하속도이다.

2.2 Rock-berm

Rock-berm은 일정 크기의 암석을 쌓아올린 구조로 된 보호 구조물이다. Fig. 2는 rock-berm의 모델링 형상을 나타낸다. rock-berm은 하부 모래층과 암석의 두 부분으로 구성되어있다. 하부 모래층의 물성치는 Table 1과 같으며 8개의 절점을 가지는 솔리드 요소를 이용하여 선형 탄성재료로 모델링하였다. 암석의 경우 SPH 기법과 Lagrange 기법으로 유한 요소 모델링을 수행하였다. Rock-berm의 치수는 Fig. 3과 같으며 하부 폭은 11.1 m, 상부 폭은 5 m, 높이는 2.1 m이다. 앵커의 충돌 위치는 rock-berm의 상부면의 중앙이다. 모델링 상에서

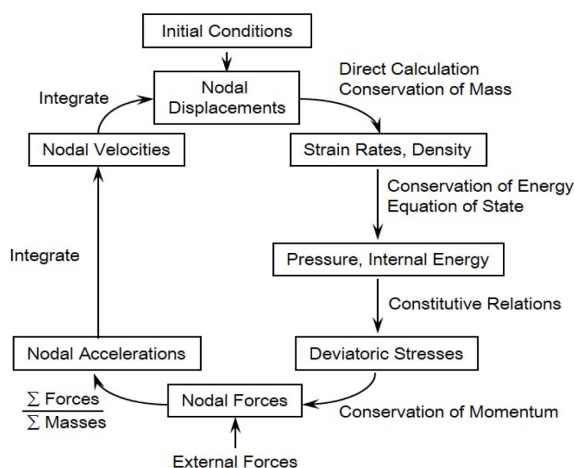


Fig. 1. Analysis cycle of ANSYS AUTODYN.

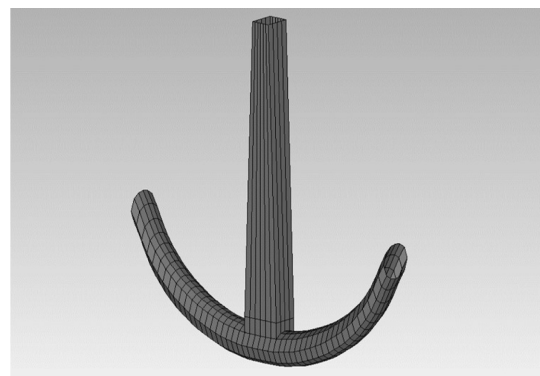


Fig. 2. Anchor modelling.

Table 1. The properties of anchor and bottom sand

	Density (kg/m ³)	Young's modulus	Poisson ratio
Anchor	7200	170 GPa	0.25
Sand	2200	81 MPa	0.3

경계조건으로 모래층의 하부면의 수직방향 변위를 구속하였으며 rock-berm의 양쪽 단면(경계면)에서 수평방향 변위를 구속하여 해석을 수행하였다.

암석의 재료모델은 콘크리트, 암석, 토양 등의 모사에 주로 사용되는 재료모델인 piecewise Drucker-Prager 모델을 사용하였다. 본 연구에서는 Fig. 4에 도시된 piecewise 압력-항복

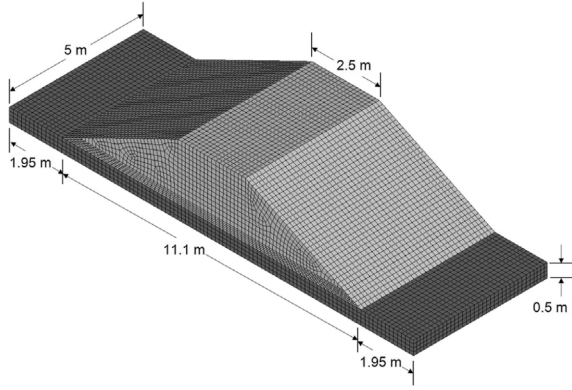


Fig. 3. Rock-berm modelling.

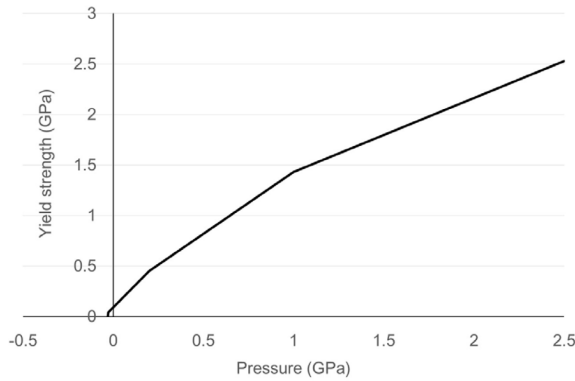


Fig. 4. Piecewise pressure-yield stress curve.

Table 2. The materials properties of rock

Parameter	Value
Density (kg/m ³)	2750
Bulk modulus (GPa)	35.7
Shear modulus (GPa)	17.44
Hydro tensile limit (MPa)	30
Pressure 1 (MPa)	-30
Pressure 2 (MPa)	-26.7
Pressure 3 (MPa)	200
Pressure 4 (MPa)	1000
Pressure 5 (MPa)	2500
Yield stress 1 (MPa)	0
Yield stress 2 (MPa)	40
Yield stress 3 (MPa)	450
Yield stress 4 (MPa)	1430
Yield stress 5 (MPa)	2530

곡선을 이용하여 재료의 강도를 나타내었으며 Table 2에 사용된 물성치를 나타내었다(Chen et al., 2000).

3. 유한 요소 해석 기법

암석과 같은 입자들로 구성된 구조체의 거동을 일반적인 요소망을 이용한 유한요소해석으로 구현하기 어렵다. 이는 입자로 구성된 구조체의 거동 해석시 입자간의 상호작용을 무시할 수 없기 때문이다. 본 연구에서는 입자로 구성된 구조체(rock-berm)의 분할에 Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) 기법을 이용하여 충돌해석을 수행하고 이를 기존의 Lagrange 기법을 사용한 해석결과와 비교하여 SPH기법의 적용 가능성을 알아보았다.

Lagrange 기반의 유한요소해석 기법은 구조체를 유한개의 요소망(mesh)으로 나누는 방식이며 일반적인 구조해석에 많이 이용된다. Lagrange 기법의 경우 구조체를 유한개의 절점(node)을 가지는 요소망으로 분할한다. Fig. 5(a)는 정육면체 구조물을 Lagrange 기반 기법의 요소 분할형태로 나타낸 그림이다. 특히, 공극이 없고 균일한 구조체의 해석에 주로 이용되는 방법으로 모래, 유체와 같은 재료의 해석에 적합하지 못하다는 단점이 있다.

SPH 기법은 요소망이 필요 없는 방법(meshless)이다. 장점은 요소망을 형성하지 않고 요소를 생성할 수 있으며 Lagrange 기법에서 발생하는 대변형에 따른 요소망의 엉킴, 왜곡과 같은 문제점을 해결할 수 있다(Ansys, Inc., 2009). 또한 물체를 유한개의 구형의 입자(particle)로 모델링하기 때문에 유체와 모래와 같이 작은 입자들로 구성된 재료의 해석에 적합한 장점이 있다. Fig. 5(b)는 정육면체 구조물의 SPH 기법의 유한 요소 모델링의 형상을 나타낸다. SPH 기법은 무요소법(meshless method)이라 불리며 kernel estimation을 이용하여 입자간의 분포 특성을 표현한다. 다음 식은 kernel estimation을 이용한 입자의 밀도계산식을 나타낸다.

$$\rho^I = \sum_{J=1}^N m^J W^{IJ}(x^I - x^J, h) \quad (1)$$

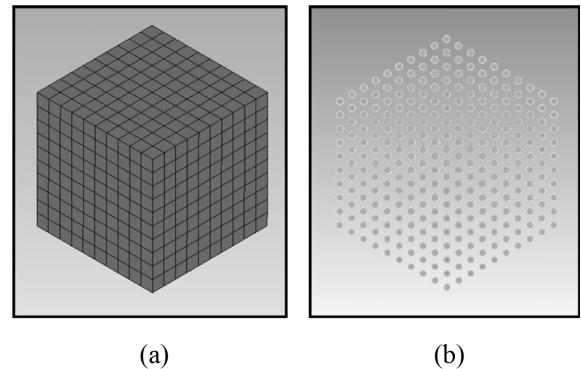


Fig. 5. Element discretization: (a) Lagrange interpolation method, (b) SPH technique.

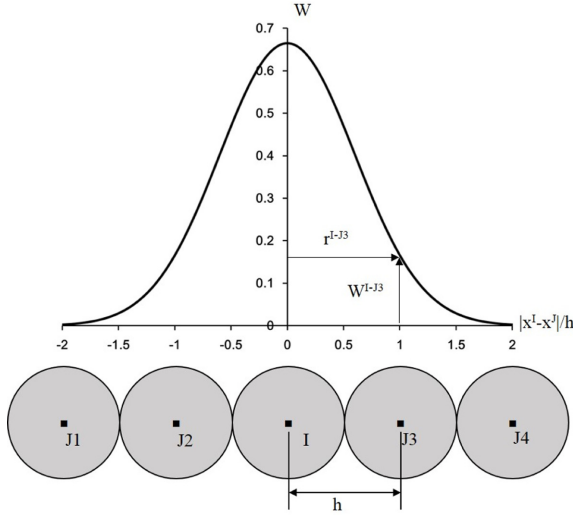


Fig. 6. Density calculation in SPH method.

여기서, ρ^I 는 I 번째 입자의 밀도, m^J 는 J 번째 입자의 질량, $W^{IJ}(x^I - x^J, h)$ 는 입자의 직경 h 에 따른 가중함수이다. 그리고 상첨자 x^I 는 I 번째 입자의 x 좌표와 x^J 는 J 번째 입자의 x 좌표를 나타낸다. 즉, SPH법의 입자 밀도는 주변 입자의 질량과 입자간의 거리에 따른 가중함수의 곱으로 나타내어진다. Fig. 6은 밀도계산식과 가중함수의 개념도를 나타낸다(Clegg et al., 1997). Kernel B-spline을 가중함수로 사용하며 거리 q 에 따른 가중함수의 기본형은 다음 식과 같다.

$$W(q) = \frac{1}{N_\delta h^\delta} \begin{cases} 1 - 1.5q^2 + 0.75q^3, & 0 \leq q < 1 \\ 0.25(2 - q)^3, & 1 \leq q \leq 2 \\ 0, & q > 2 \end{cases} \quad (2)$$

여기서, N_δ 와 h^δ 는 차원상수이고 $q = |x^I - x^J|/h$ 를 나타낸다(Omang et al., 2005).

SPH 기법은 rock berm의 모델링에만 사용되었다. SPH 기법을 이용한 해석에서 입자의 직경은 중요한 요소 중의 하나로 이는 단위체적당 입자의 수에 따라 결과의 정확성이 달라지기 때문이다. 본 연구에서는 입자의 직경 변화에 따른 응답변화를 알아보기 위하여 설계상의 암석의 평균직경인 200 mm 이외에 50, 100, 150, 300 mm의 직경을 추가로 고려하였다. 입자의 상호작용(interaction)은 고려하였으나 연결(connection)은 고려하지 않았기 때문에 실제 암석의 거동과 유사할 것이라 사료된다.

4. 결 과

유한요소해석 기법의 종류와 입자의 직경에 따른 해석 case는 Table 3에 나타내었다. 해석 case에 따라 Lagrange 기법은 대문자 L로 표기하였으며, SPH 기법은 대문자 S에 입자의 직경을 표기하였다. 예를 들어 L은 Lagrange 기법의 해석 case를 나타내고 S200은 SPH 기법의 입자 직경은

Table 3. Simulation cases

Analysis Case	Analysis condition	Collision velocity
L	Lagrange	2.774 m/s
S50	SPH (50 mm)	2.774 m/s
S100	SPH (100 mm)	2.774 m/s
S150	SPH (150 mm)	2.774 m/s
S200	SPH (200 mm)	2.774 m/s
S300	SPH (300 mm)	2.774 m/s

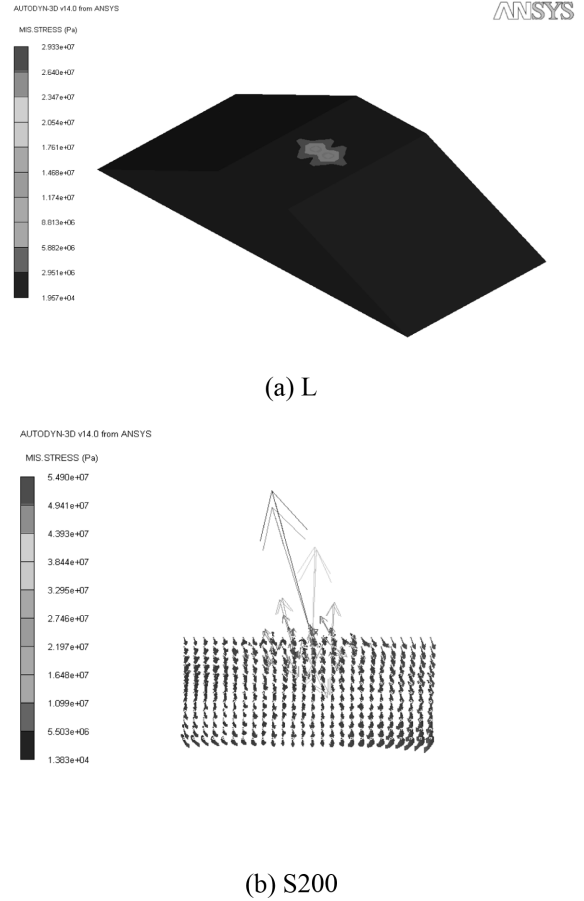


Fig. 7. von-Mises stress contours of L and S200.

200 mm인 해석 case를 의미한다. SPH 기법의 경우 입자의 충돌위치에 따라 결과가 상이하게 나타날 수 있으므로 입자의 상부중앙에 충돌이 발생하도록 모델링을 수행하였다.

Fig. 7의 (a)와 (b)는 Lagrange 기법(L)과 SPH 기법(S200)의 von-Mises 응력 분포도를 나타낸다. 결과를 비교하였을 때 해석 기법의 차이로 인하여 응력 분포도만으로 그 차이를 알아보기 어렵다. 이는 SPH 기법의 경우 입자의 거동에 의하여 각 입자에 발생하는 응력의 방향과 크기가 벡터의 형태로 나타나기 때문이다. 따라서 모든 해석에서 동일한 위치에 5개의 게이지 포인트를 선정하여 응답 결과를 비교하였다. 게이지 포인트는 rock berm의 하부면을 기준으로 상부로 500 mm의 간격으로 선정하였다(0 m, 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m). Table 4와 5에 응답결과를 나타내었다.

Table 4. Maximum von-Mises stresses of each case (unit: MPa).

	2 m	1.5 m	1 m	0.5 m	0 m
L	132	4.75	2.74	1.35	1.49
S50	275	9.27	2.64	1.46	1.45
S100	222	13.4	4.41	1.72	1.58
S150	104	19.8	3.27	2.21	1.44
S200	99.3	39.6	4.60	2.26	1.45
S300	56.2	34.2	7.26	2.36	1.94

Table 5. Maximum vertical displacements of each case (unit: mm).

	2 m	1.5 m	1 m	0.5 m	0 m
L	0.452	0.160	0.170	0.163	0.159
S50	0.80	0.20	0.189	0.189	0.189
S100	1.51	0.27	0.202	0.209	0.205
S150	1.26	0.42	0.228	0.227	0.217
S200	1.80	0.30	0.290	0.240	0.222
S300	1.26	1.03	0.37	0.322	0.31

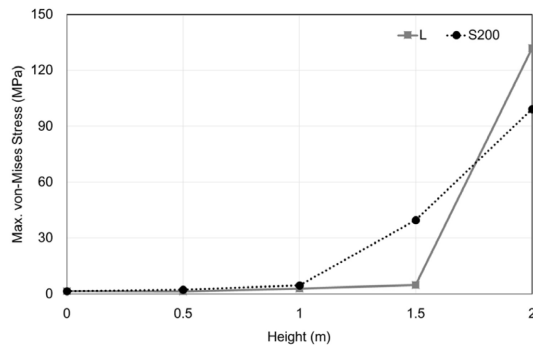
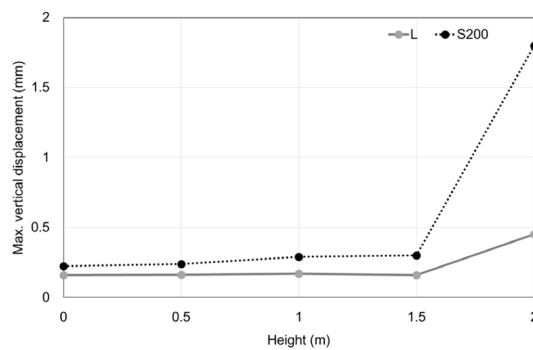
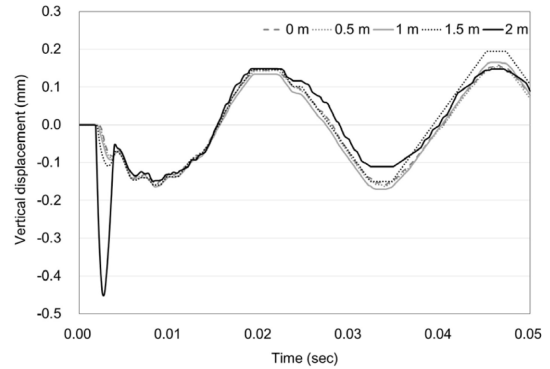
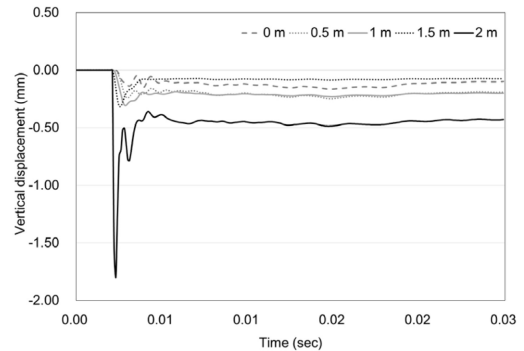
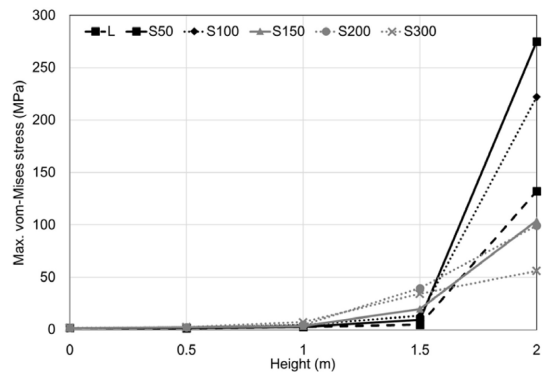
**Fig. 8.** Maximum von-Mises stress of L, and S200.**Fig. 9.** Maximum vertical displacement of L, and S200.

Fig. 8과 9는 유한요소해석 기법의 변화에 따른 최대 von-Mises 응력과 최대 수직 변위의 분포를 나타낸다. 실제 암석의 평균직경인 S200과 L의 2가지 케이스를 비교하였다. 모든 결과에서 충돌부에서 제일 가까운 2 m 위치에서 최대 응답(von-Mises응력, 최대변위)이 발생한다. 최대 von-Mises 응력은 L에서 132 MPa이 발생하였다. 2 m의 결과를 제외한 나머지 위치에서는 S200의 응력이 크게 발생한다. 최대 수직 변

**(a) L****(b) S200****Fig. 10.** Vertical displacement of L and S200 with time.**Fig. 11.** Maximum von-Mises stress according to height.

위의 경우 모든 위치에서 S200의 변위가 크게 나타난다. S200의 변위는 위치가 낮아질수록 감소하는 경향을 보이나, L의 결과에서는 0.5와 1 m의 변위가 1.5 m에 비해 크게 발생한다. 또한 응력의 경우에도 0 m에 비해 0.5 m의 응력이 작게 나오는 현상을 보인다. 이는 해석 기법의 차이에 기인한 것으로 Lagrange 기법을 사용한 L의 경우 Fig. 10 (a)와 같이 충돌에 의한 탄성파가 발생하여 일정한 주기로 진동하는 현상을 보이며 SPH기법인 S200은 Fig. 10 (b)와 같이 발생한 변위가 유지되는 결과를 보인다. 일반적인 암석의 경우 공극에 의해 탄성파가 소산되는데 반해 Lagrange 요소법을 사용하는 경우 내부공극의 부재로 인하여 탄성재료의 거동을 나타낸다.

Fig. 11과 12는 SPH 기법의 입자 크기 변화에 따른 최대

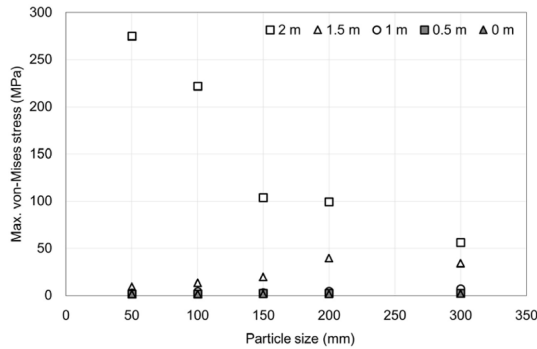


Fig. 12. Maximum von-Mises stress according to particle size.

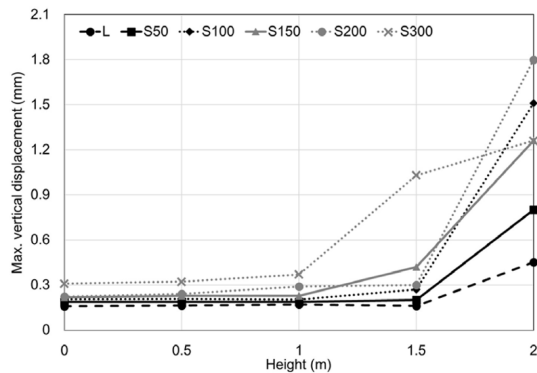


Fig. 13. Maximum vertical displacement according to height.

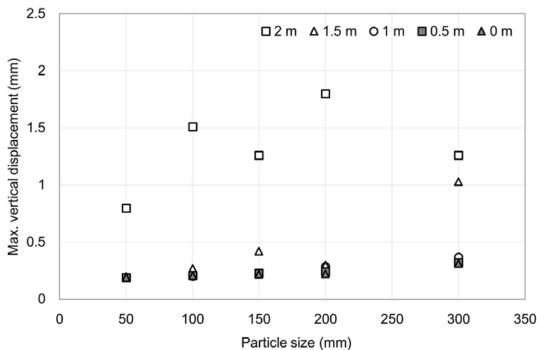


Fig. 14. Maximum vertical displacement according to particle size.

von-Mises응력 분포를 나타낸다. 최대 응력값은 S50의 2 m 위치에서 275 MPa가 발생하였다. Fig. 12와 같이 측정위치가 하부로 갈수록 최대응력은 작아지며 입자 크기가 작아질수록 2 m 위치의 최대 von-Mises 응력이 커지는 결과를 보인다. 반대로 0~1.5 m 위치의 최대 von-Mises응력은 입자의 크기가 커질수록 증가하는 양상을 보인다. 이는 SPH 입자의 크기 증가에 따라 gauge point 사이에 존재하는 입자의 수가 감소하여 입자간의 직접적인 응력의 전달이 발생하여 응력이 증가하는 것으로 보인다.

Fig. 13과 14는 입자의 크기 변화에 따른 최대 수직 변위의 분포를 나타낸다. S200에서 1.8 mm의 최대 수직 변위가 발생한다. Fig. 13과 같이 모든 결과에서 최대 변위는 2 m의 위치에서 발생하고 높이가 낮아질수록 변위가 감소하는 경향

을 보인다. 2 m 위치의 최대변위는 입자의 크기에 따른 경향성을 찾기 어렵다. 그러나 1.5 m 이하의 변위결과에서 200 mm의 결과를 제외하고 입자의 크기 증가에 따라 최대수직변위도 증가하는 경향을 보인다. 이는 입자의 크기 증가에 인한 것으로 SPH 입자의 크기 증가에 따라 입자간의 변위가 발생하는 것으로 보인다. 상기의 결과로부터 수직 변위가 입자 직경의 변화에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 입자로 구성된 구조물의 충돌해석에 관한 연구로 SPH 기법의 충돌해석에 대한 적용성을 알아보기 위하여 rock-berm 구조물의 앵커 충돌 시뮬레이션을 수행하였으며 충돌 응답 결과를 분석하였다. 암석의 모델링에는 Lagrange 기법과 SPH 기법이 사용되었다. 또한 SPH입자의 직경변화(50, 100, 200, 300 mm)에 따른 rock-berm의 응답특성 변화를 분석하였다. 구조응답은 rock-berm에 발생하는 최대 von-Mises 응력과 최대 수직변위로 선정하였다. 이상의 해석으로 얻어진 결론은 다음과 같다.

Rock-berm의 충돌응답(von-Mises 응력, 수직 변위)은 유한요소해석 기법의 변화에 크게 차이를 보였다. Lagrange 기법의 경우 충돌부에 변위가 집중되며 응력은 작게 발생하였으나 응력과 변위가 하부로 갈수록 감소하는 양상은 보이지 않았다. Lagrange 기법의 특성에 의해 rock-berm 하부에 부적절한 응력과 변위의 증가가 발생하였다. 충돌에 의한 탄성파가 발생하여 전파되는 현상이 발생하였으며 Lagrange 기법의 경우 불연속 재료의 충돌응답을 효과적으로 표현하지 못하는 것으로 판단된다.

SPH 기법의 경우 충돌부에 응력이 집중되고 rock-berm의 하부로 갈수록 순차적으로 응력과 변위가 감소하는 결과를 나타내었다. SPH입자의 직경 변화에 대해 충돌응답(von-Mises 응력, 수직변위)은 민감하게 반응한다. SPH입자 직경의 변화에 따라 응답의 분포와 크기가 달라진다.

본 연구로부터 입자로 구성된 재료의 충돌해석에서 SPH 기법이 Lagrange 기법에 비해 사실적인 모사가 가능하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 실질적으로 rock-berm에 사용되는 암석의 크기가 다양하므로 이들을 SPH입자로 모사할 경우 입자의 직경을 달리해야하는 단점이 있다. 따라서 향후 암석의 크기를 대표하는 평균직경입자의 개념이 제시될 필요가 있으며 실제 실험을 통한 수치해석의 검증 및 해석결과의 수렴정도의 판단이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 2013년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(천해역 해저케이بل 보호설비 안전성 평가지침기술개발)이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Ahn, S.H., Kim, D.S. and Park, K.W. (2007). Research for the submarine cable installation and protection methods according as characteristics of ocean environment. Proceeding of fall Conference on Korean Society of Marine Environment and Safety, KOSOMES, 51-56 (in Korean).
- Allan, P.G. (1998). Selecting appropriate cable burial depths a methodology. A Methodology IBC conference on Submarine Communication. The Future of Network Infrastructure, France, 1-12.
- ANSYS, Inc (2009). Autodyn User Manual Version 12.0.
- Chen, S.G., Zhao, J., Makurati, A. and Madshus, C. (2000). Discrete element modelling of an explosion test in granite. Proceeding of GeoENG2000 International Conference on Geotechnical, Geological Engineering, Australia, 1474-1481.
- Clegg, A.R., Sheridan, J., Hayhurst, J.C. and Francis, J.N. (1997). The application of SPH techniques in AUTODYN-2D to kinetic energy penetrator impacts on multi-layered soil and concrete targets. Proceeding of 8th International Symposium on Interaction of the effects of Munitions with Structures, Geological Engineering, USA, 22-25.
- Corkum, A.G. and Martin, C.D. (2004). Analysis of a rock slide stabilized with a toe-berm: a case study in British Columbia Canada. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(7), 1109-1121.
- DNV (2010). Risk Assessment of Pipeline Protection. Recommended Practice DNV-RP-F107, Det Norske Veritas, Norway.
- DNV (2012). Electrical Power Cables in Subsea Applications. Recommended Practice DNV-RP-F401, Det Norske Veritas, Norway.
- Hao, Y. and Hao, H. (2013). Numerical investigation of the dynamic compressive behaviour of rock materials at high strain rate. Rock Mechanics and Rock Engineering, 46(2), 373-388.
- KS V 3311 (2012) Anchor. Korean Standards Association (in Korean).
- Noh, M. and Park, D. (2007). A numerical simulation of the impact of a high-velocity projectile on concrete structures, Proceeding of fall Conference on Korean Concrete Institute, KCI, 425-427 (in Korean).
- Omang, M., Børve, S. and Trulsen, J. (2005). Alternative kernel functions for Smoothed Particle Hydrodynamics in cylindrical symmetry, Shock Waves, 14(4), 293-298.
- Tørum, A., Moghim, M.N., Westeng, K., Hidayati, N. and Arntsen, Ø. (2012). On berm breakwaters: Recession, crown wall wave forces, reliability. Coastal Engineering, 60, 299-318.
- Woo, J., Na, W.B. and Kim, H.T. (2009). Numerical Simulation of Arch-type Submarine Cable Protector under Anchor Collision. Journal of Ocean Engineering and Technology, 23(1), 96-103 (in Korean).
- Woo, J., Na, W.B. and Yu, J.S. (2013). Analysis of the Falling Velocity of Underwater Anchor using Computational Fluid Dynamics, Proceeding of Korean Association of Ocean Science and Technology Joint Workshop, KAOSTS, 1997-1999 (in Korean).
- Zhu, Z., Mohanty, B. and Xie, H. (2007). Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and propagation in rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44(3), 412-424.

원고접수일: 2013년 12월 12일

수정본채택: 2014년 1월 17일(1차)

2014년 2월 10일(2차)

게재확정일: 2014년 2월 25일