



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

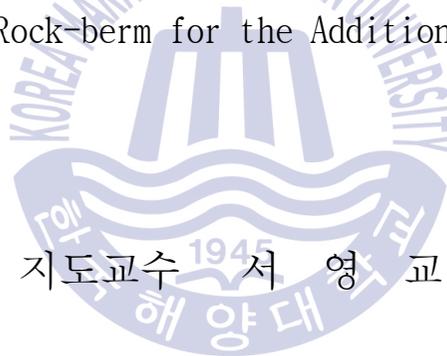
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

해저지반 내 매립된 구조물의 앵커 충돌
시나리오에 따른 위험성 분석 및 추가
보호를 위한 락범 설계기준에 관한 연구

A study on the Risk Analysis of the Anchor Impact Scenario
of the Buried Structures in the Seabed and the Design
Criteria of Rock-berm for the Additional Protection



2018년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

신문범

본 논문을 신문법의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 최 경 식 (인)

위 원 공학박사 박 선 호 (인)

위 원 공학박사 서 영 교 (인)

2017년 00월 00일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Figures	iii
List of Tables	vi
Abstract	vii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 동향 및 목적.....	3
제 2 장 앵커 투묘에 의한 위험성 분석	4
2.1 앵커 투묘 시나리오.....	4
2.2 종단속도 산정을 위한 수치해석.....	6
2.3 앵커 투묘에 의한 충돌 해석.....	13
2.3.1 앵커 모델링.....	14
2.3.2 파이프라인 모델링.....	15
2.3.3 해저지반 모델링.....	16
2.4 해석 결과 및 위험성 분석.....	18
제 3 장 앵커 주묘에 의한 위험성 분석	23
3.1 앵커 주묘 시나리오.....	23
3.2 앵커 주묘 시나리오 설정을 위한 선행해석.....	24
3.2.1 앵커 주묘 시나리오 설정을 위한 선행해석 개념.....	24
3.2.2 선행해석을 위한 유한요소해석 기법.....	26
3.2.3 선행해석을 위한 3차원 유한요소 모델링.....	27
3.2.4 선행해석 결과 분석 및 시나리오 결정.....	31
3.3 앵커 주묘에 의한 충돌 해석.....	35
3.4 해석 결과 및 위험성 분석.....	36
제 4장 추가 보호를 위한 락범 설계	40
4.1 추가 보호공법 방안.....	40
4.2 추가 보호를 위한 락범 단면 설계.....	41

제 5장 설계된 락범 단면에 대한 검증.....	42
5.1 앵커 투표에 의한 설계된 락범 단면 검증.....	42
5.1.1 설계된 락범의 유한요소 모델링.....	42
5.1.2 락범을 적용한 앵커 투표 해석 결과 및 위험성 분석.....	45
5.2 앵커 주묘에 의한 설계된 락범 단면 검증.....	54
5.2.1 설계된 락범의 유한요소 모델링.....	54
5.2.2 락범을 적용한 앵커 주묘 해석 결과 및 위험성 분석.....	56
5.3 앵커 투표 및 주묘에 의한 락범 설계 기준.....	63
 제 6장 결 론.....	 65
 참고문헌.....	 69



List of Figures

Fig. 1.1 Cause of accident in pipeline installed on the seabed.....	1
Fig. 1.2 Pipeline accident scenarios installed on the seabed.....	2
Fig. 2.1 Impact scenario by anchor drop.....	5
Fig. 2.2 Shape of stockless anchor.....	6
Fig. 2.3 Numerical Modeling.....	7
Fig. 2.4 The volume fraction of time step (Sphere).....	8
Fig. 2.5 Velocity and drag coefficient of the sphere.....	9
Fig. 2.6 The volume fraction of time step (Anchor).....	9
Fig. 2.7 Velocity and drag coefficient of the anchor (10.5Ton).....	10
Fig. 2.8 Terminal velocity of anchors by the equation	12
Fig. 2.9 Error rates of the two kids of terminal velocity results.....	12
Fig. 2.10 Case used for analysis.....	13
Fig. 2.11 Finite element model of anchor (10.5 ton).....	14
Fig. 2.12 Finite element model of subsea pipeline.....	15
Fig. 2.13 Mohr-coulomb failure criterion.....	16
Fig. 2.14 Boundary conditions applied to the analysis.....	17
Fig. 2.15 Finite element model (Burial depth 0.5m).....	17
Fig. 2.16 Results of maximum von-mises stresses (Soft Clay).....	18
Fig. 2.17 Results of maximum von-mises stresses (Loose sand).....	19
Fig. 2.18 Results of maximum von-mises stresses (Dense sand).....	20
Fig. 2.19 Von-mises stress probe of subsea pipeline	21
Fig. 3.1 Conceptual diagram of anchoring.....	23
Fig. 3.2 Settings required for dragging simulation.....	24
Fig. 3.3 Settings values considered for the preceding analysis.....	25
Fig. 3.4 Eulerian Volume Fraction (EVF).....	26
Fig. 3.5 Finite element modeling using CEL method.....	27
Fig. 3.6 Shape of stockless anchor.....	28
Fig. 3.7 Modeling of the chain and connecting type.....	29
Fig. 3.8 Analysis step.....	29
Fig. 3.9 Preceding simulation results of different initial penetration, drag velocity and drag angles.....	31

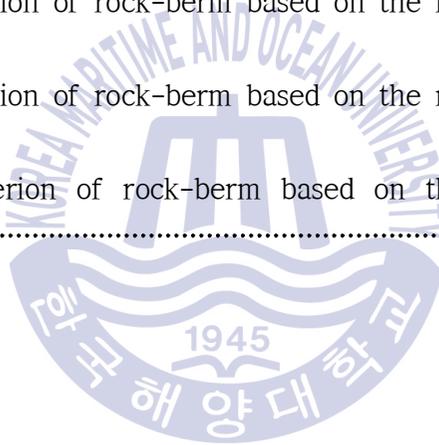
Fig. 3.10	Preceding simulation results of different initial penetration and drag velocity.....	32
Fig. 3.11	Preceding simulation results of different initial penetration and drag velocity.....	32
Fig. 3.12	Preceding simulation results of anchor trajectory.....	33
Fig. 3.13	Determined anchor dragging scenario.....	34
Fig. 3.14	Simulation results of anchor trajectory.....	36
Fig. 3.15	Result of anchor penetration depth(Soft clay).....	37
Fig. 3.16	Result of anchor penetration depth(Loose sand).....	38
Fig. 3.17	Result of anchor penetration depth(Dense sand).....	38
Fig. 4.1	Types of additional protection methods.....	40
Fig. 4.2	Design of Rock-berm cross section.....	41
Fig. 5.1	Finite element modeling of Rock-berm (Burial depth 0m).....	43
Fig. 5.2	Finite element modeling of Rock-berm (Burial depth 0.5m).....	43
Fig. 5.3	Finite element model	44
Fig. 5.4	Finite element model	44
Fig. 5.5	Results of maximum von-mises stresses (S_B1).....	46
Fig. 5.6	Results of maximum von-mises stresses (S_B2).....	47
Fig. 5.7	Results of maximum von-mises stresses (L_B1).....	48
Fig. 5.8	Results of maximum von-mises stresses (L_B2).....	49
Fig. 5.9	Results of maximum von-mises stresses (D_B1)	50
Fig. 5.10	Results of maximum von-mises stresses (D_B2)	51
Fig. 5.11	Result of von-mises stress probe(S_B1).....	52
Fig. 5.12	Result of von-mises stress probe(S_B2).....	52
Fig. 5.13	Result of von-mises stress probe(L_B1).....	52
Fig. 5.14	Result of von-mises stress probe(L_B2).....	52
Fig. 5.15	Result of von-mises stress probe(D_B1).....	52
Fig. 5.16	Result of von-mises stress probe(D_B2).....	52
Fig. 5.17	Cross-section of rock-berm modeling.....	55
Fig. 5.18	Scenario of anchor dragging analysis	55
Fig. 5.19	Simulation results of anchor trajectory(Soft clay).....	58
Fig. 5.20	Simulation results of anchor trajectory(Loose sand).....	59
Fig. 5.21	Simulation results of anchor trajectory(Dense sand).....	60

Fig. 5.22 Results of anchor penetration depth(Soft clay)..... 61
Fig. 5.23 Results of anchor penetration depth(Loose sand)..... 61
Fig. 5.24 Results of anchor penetration depth(Dense sand)..... 62



List of Tables

Table 2.1 Dimension of stockless anchor according to weights.....	6
Table 2.2 Air and water properties.....	7
Table 2.3 Area and volume according to the weight of the anchor.....	11
Table 2.4 Geometrical and mechanical properties of pipeline	15
Table 2.5 Material properties of seabed.....	16
Table 2.6 Ratio of maximum von-mises stress to the yield strength.....	22
Table 3.1 Parameters of the stockless anchor.....	28
Table 5.1 Material properties of rock-berm.....	44
Table 5.2 Analysis Case.....	45
Table 5.3 Dragging analysis case.....	56
Table 5.4 Design criterion of rock-berm based on the results of drop analysis	63
Table 5.5 Design criterion of rock-berm based on the results of drag analysis	64
Table 6.1 Design criterion of rock-berm based on the results of drop and drag analysis.....	67



A study on the Risk Analysis of the Anchor Impact Scenario of the Buried Structures in the Seabed and the Design Criteria of Rock-Berm for the Additional Protection

Mun-Beom Shin

Department of Ocean Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

In this study risk analysis of subsea pipeline was carried out by dropping and dragging of ship anchors, which are major risk factors for structures installed on the seabed. Firstly, impact scenario of a ship anchor dropped vertically and impacted an installed subsea pipeline was considered to calculate the impact force through terminal velocity. For that a computational fluid dynamic program, FLUENT, and MDM (Moving Deforming Mesh) technique were applied. Then, impact analysis of subsea pipeline was carried out using the dynamic finite element program, ABAQUS/CAE, considering seabed soil properties and pipeline buried depths in the seabed. Then, preliminary simulations were performed to determine the initial anchor penetration depth, anchor drag velocity, drag angle, and

the distance between the anchor and the rock-berm before simulating dragging of anchor. Based on the preceding simulation results, risk analysis of dragging anchor was carried out to calculate the anchor dragging penetration depth according to the seabed soil properties using CEL(Coupled Eulerian Lagrangian) technique of the ABAQUS/CAE program. Lastly, based on the risk analysis of subsea pipeline, Rock-Berm was designed for additional protection, and risk analysis were carried out through the dropping and dragging of anchor for verification of safety. Based on the results of the additional simulation, the design criteria of Rock-Berm considering the seabed soil properties and pipeline burial depths in the seabed was suggested.

KEY WORDS: Drop anchor 투묘; Drag anchor 주묘; Terminal velocity 종단 속도; Rock-berm 락범; Subsea pipeline 해저 파이프라인; Finite element method 유한요소법; MDM(Moving Deforming Mesh)method MDM기법; CEL(Coupled Eulerian Lagrangian)method CEL기법;

해저지반 내 매립된 구조물의 앵커 충돌 시나리오에 따른 위험성 분석 및 추가 보호를 위한 락범 설계 기준에 관한 연구

신 문 범

해 양 공 학 과
한국해양대학교 대학원

초 록

본 연구는 해저에 설치되는 구조물들에 대해 주요 위해요소인 선박용 앵커를 이용하여 투묘 및 주묘에 의한 위험성 분석을 실시하였다. 먼저 투묘에 의한 충돌 시나리오는 투하된 앵커가 수직낙하하여 해저에 설치된 파이프에 충돌하는 조건을 선택했다. 중단속도를 산정하기 위해 전산유체해석 프로그램인 FLUENT의 MDM(Moving Deforming Mesh)기법을 사용하였고, ABAQUS/CAE 프로그램을 이용하여 해저지반 성질 및 파이프라인의 매설깊이에 따른 충돌해석을 실시하여 투묘에 의한 위험성 분석이 수행되었다. 다음으로, 주묘에 의한 충돌 시나리오는 보수적인 설정으로 앵커 끌림 해석을 실시하기 위해 초기 앵커 침투깊이와 앵커 끌림 속도 및 각도, 그리고 앵커와 락범의 이격거리를 결정하기 위한 선행 시뮬레이션을 수행하였다. 선행 시뮬레이션 결과를 바탕으로, ABAQUS/CAE 프로그램의 CEL(Coupled Eulerian Lagrangian)기법을 이용하여 해저지반 성질에 따른 앵커 침투깊이

를 산정하여 주묘에 의한 위험성을 분석하였다. 마지막으로 앵커 투묘 및 주묘에 의한 위험성 분석을 기반으로 추가 보호를 위한 락범을 설계하였고, 락범 검증을 위한 투묘 및 주묘의 추가 해석을 실시하였다. 추가 해석 결과를 바탕으로 해저지반 성질 및 파이프라인의 매설깊이에 따른 락범 설계 기준을 정리하여 제시하였다.

KEY WORDS: Drop anchor 투묘; Drag anchor 주묘; Terminal velocity 종단 속도; Rock-berm 락범; Subsea pipeline 해저 파이프라인; Finite element method 유한요소법; MDM(Moving Deforming Mesh)method MDM기법; CEL(Coupled Eulerian Lagrangian)method CEL기법;



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

최근 에너지 수요량의 증가와 육상자원 고갈로 인한 해양자원 개발이 지속적으로 활발하며, 개발 해역은 북극해를 포함하여 천해(Shallow sea)뿐 아니라 심해저(Deep sea floor) 지역과 같은 극한 환경에서의 자원 채굴이 증가하고 있는 추세이다. 그에 따라 해양에서 채굴한 대량의 유체류 천연자원들을 안정적으로 육지로 수송하기 위한 해저파이프라인(Subsea pipeline)의 수요가 증가하고 있으며, 뿐만 아니라 국가와 국가를 잇는 전력망과 해상 풍력단지의 증가에 따라 해저케이블(Submarine cable)에 대한 수요 역시 증가하고 있는 추세이다.

이와같은 해저에 설치되는 파이프라인 및 케이블은 육상에 비해 보다 열악한 환경에 노출되어 있어 가동 중 손상을 입을 가능성이 매우 높다. 실제로 미국의 Pipeline and hazardous materials safety administration(PHMSA, 2014)의 통계에 따르면 최근 10여 년간 미국에서만 600여 건이 넘는 파이프 관련 사고가 일어나고 있다고 보고되고 있으며, 국내 사례로 2006년 제주도와 해남을 잇는 해저 케이블이 외력에 의한 손상으로 제주도 전역에 정전사태를 초래하는등의 해저에 설치되는 구조물들의 사고로 인한 인명피해 및 환경오염 그리고 막대한 경제적 손실의 예방을 목적으로 해양 설비의 설치 및 운영에 대한 엄격한 안전 규제가 요구된다.

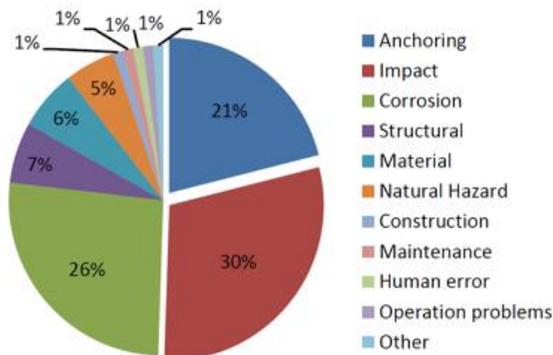


Fig. 1.1 Cause of accident in pipeline installed on the seabed

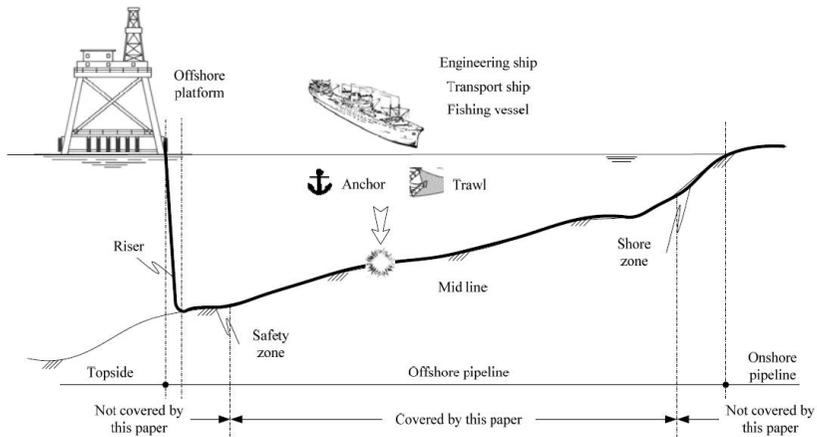


Fig. 1.2 Pipeline accident scenarios installed on the seabed

해저에 설치되는 구조물들은 파도나 해류와 같은 해양 물리력 이외에도 다양한 손상환경에 처해있으며, 안강망 조업 및 새우조망과 같은 어구활동이 활발한 지역과 선박 통행량이 많은 주 항로에 설치되어 사고위험에 항상 노출되어 있다. 특히 해저케이블의 외력에 의한 손상 중 가장 큰 위해 요인은 어로 활동으로 그 중 70%가 크고 작은 어선의 앵커로 인해 수심 200m 이내에서 가장 많이 발생하고 있다고 정의하고 있다(Jung et al., 2007). 또한 Liu 외3명(2011)은 중국에 설치되어 있는 파이프라인에 대한 사고원인의 위험성 확률 분석을 수행하여 경제적으로 파이프라인을 보호하기 위해 평가하였는데, 파이프라인의 보호하기 위한 사고 시나리오를 앵커 및 저인망 어업 활동 등으로 인해 주로 발생한다고 정의 하고 있다(Liu et al., 2011). DNV-RP-107에 따르면 해저에 설치되는 파이프라인 및 케이블에 대해 손상을 줄 수 있는 요소들에 대해 정의하고 설계 시 고려하도록 권장 하고 있는데 그 중 앵커의 투묘(Dropping Anchor) 및 주묘(Dragging Anchor)를 중대한 위험 요소로 분류하고 있다(DNV., 2010).

따라서 안정적으로 파이프라인 및 케이블을 운용 및 가동하기 위해서 다양한 충돌 외력으로부터 안전하게 보호해야 한다. 보호공법에는 해저지반(Seabed)을 굴착하여 매설하는 트렌칭·백필링(Trenching and backfilling)시스템이 주로 적용되어지며, 락범(Rock-berm)과 보호구조물로 피복하는 등의 다양한 보호공법이 적용되고 있다.

1.2 연구 동향 및 목적

우진호 외1명(2014)은 락범의 투묘에 의한 충돌 시뮬레이션을 실시하여 락범의 충돌에 의해 발생하는 응력을 산정하였고, 류연선 외2명(2016)은 마찬가지로 투묘에 의한 충돌을 고려한 보호구조물인 유연 콘크리트 매트리스 손상에 대해 평가하였다. 또한 Yu 외3명(2016)은 앵커 투묘에 의한 파이프라인의 변형에 관하여 실내실험과 수치해석을 비교하여 앵커 충돌 방향에 따른 영향들을 분석하였고, Chamizo 외3명(2012)은 해저파이프라인을 보호하기 위한 락범 설계를 Case별 실험을 통해 제안하였다. Zhao 외1명(2015)은 앵커 주묘 시 해저지반에 관입하는 깊이에 대해 영향을 주는 변수인자를 변경하여 해석적 연구를 수행하였다. 이와같이 해저파이프라인 및 해저케이블을 안정적으로 운용하기 위한 다양한 실험 및 연구가 진행되었다. 하지만 해저지반과 매설되는 구조물의 상호작용, 그리고 보호공법을 적용한 운용되는 해저지반의 안정성에 대해 검토하고 그 결과에 따른 보호공법 설계 기준이 없는 실정이다.

본 논문에서는 앵커의 투묘 및 주묘를 고려하여 해저에 설치되는 구조물을 안전하게 보호하기 위한 락범 설계를 위해 해석적 연구를 수행하였다. 이를 위해 해저에 설치되는 구조물과 구조물이 매설되는 해저지반 성질의 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)을 고려하여 앵커 투묘에 의한 충돌과 앵커 주묘에 의한 충돌로 분류하여 매설된 구조물의 위험성에 대해 분석 하고 안전한 매설심도를 산정하였다. 또한 안전하지 않은 매설심도에 매설된 구조물에 대해 추가 보호를 위한 락범을 설계하고, 설계된 락범을 적용 후 앵커 투묘 및 주묘에 의한 충돌로부터 매설된 구조물의 안정성을 평가하여 최종적인 시뮬레이션에 의한 해저지반 성질 및 매설심도에 따른 안전한 락범 설계 기준을 제시하고자 한다.

제 2 장 앵커 투묘에 의한 위험성 분석

2.1 앵커 투묘 시나리오

앵커 투묘에 의한 위험성 분석은 해저지반 내 매설된 파이프라인이 앵커 투묘에 의한 충돌 시 파괴유무를 해석적으로 분석하는 것이다. 이를 위해 해저지반 성질별 해석 Case를 분류하고 이에 따른 파이프라인의 안전한 매설깊이와 안전하지 않은 매설깊이를 산정하고자 한다.

따라서 앵커 투묘 시나리오는 해저지반 성질 3가지 (Soft clay, Loose sand, Dense sand)로 분류하였고, 10.5ton 중량의 스톡리스 앵커(Stockless anchor)로 선정하였으며, 파이프라인의 안정성 확인을 위한 3가지 매설깊이(0m, 0.5m, 1m)로 설정하여 Case를 분류하였으며, 총 9 Case에 대한 해석이 실시되었다. 또한 앵커는 해류나 조류에 의한 영향은 배제하고 수직 낙하하여 해저에 설치된 파이프라인에 충돌 하는 시나리오로 설정하였고, 해저지반은 다층지반(Multilayer soil)이 아닌 단일지반(Singlelayer soil)로 정의 하였다.

설정된 시나리오로 투묘에 의한 충돌 해석을 위해 먼저 앵커가 수중에서 낙하하여 해저지반에 충돌하는 속도에 대한 정의가 요구된다. 그에따라 낙하하는 물체에 관한 이해가 필요한데, 물이나 공기와 같은 유체 속을 낙하하는 물체는 운동방향으로 작용하는 중력(Gravity)과 운동방향의 반대편으로 작용하는 부력(Buoyancy)과 같은 항력(Drag force)을 받으며 낙하하게 된다. 일반적으로 항력은 속력이 빠를수록 더 커지며, 일정 속도에 도달하면 저항력과 중력의 크기가 같아져 물체에 작용하는 합력이 0이 되고 물체는 가속도가 없는 등속도 운동을 한다. 이와같은 물체가 어느 속도에 도달하면 더는 가속되지 않고 일정한 속도로 낙하할 때의 속도를 종단속도(Terminal velocity)라고 하며, 이러한 앵커의 종단속도가 파이프라인에 충돌 시 작용하는 속도이다. 하지만 종단속도를 계산하기 위해 무차원 수인 항력계수(Drag coefficient) 산정이 필수적이며, 이는 실험 및 해석적으로 산정해야 한다.

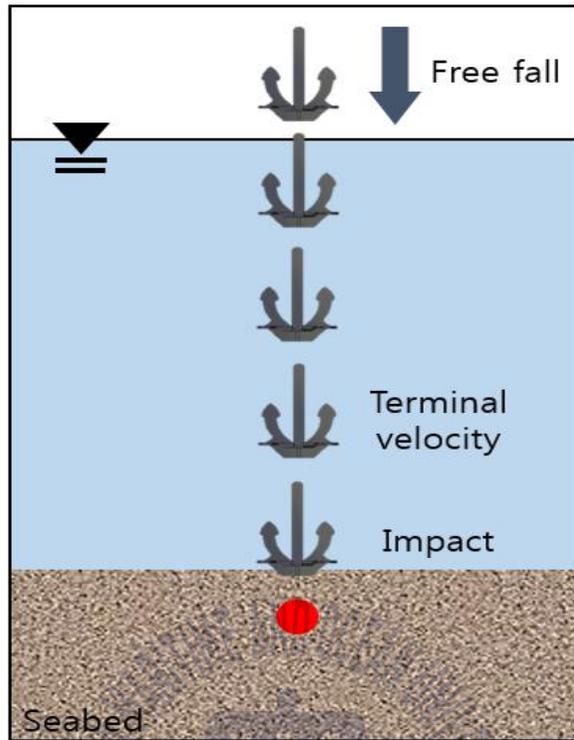


Fig. 2.1 Impact scenario by anchor drop



2.2 종단속도 산정을 위한 수치해석

앵커의 종단속도를 구하기 위해 앵커는 한국산업규격(KS)을 토대로 모델링하였다(SPS-KSA0127-V3311-5978, 2014). 앵커의 형상은 Fig. 2.2에 나타내었고 앵커의 크기를 가늠케 할 수 있도록 치수를 Table 2.1에 나타내었다. 앵커의 종단속도를 산정하기 위해 전산유체해석(Computational fluid dynamics) 프로그램인 FLUENT 13.0 MDM(Moving Deforming Mesh)기법을 이용하였다.

MDM 기법이란 Dynamic mesh라고도 불리며, 해석에 사용되는 경계면(Boundary)과 셀(Cell)을 움직이기 위해 격자(Mesh)를 조정하고, 제어해주는 방법으로 격자와 모델의 변형을 고려한 물리적 현상을 해석할 경우 적용 할 수 있다. 대표적인 MDM기법의 예로 페인펌프(Vane Pump)해석과 비행체 분리(Sperator) 시뮬레이션과 자유낙하(Free fall)해석 등에 주로 사용되어 진다. 정지해 있는 물체에 유체나 힘을 가하는 기존의 전산유체해석 방식이 아닌 앵커 낙하에 의한 종단속도의 표현을 위해 MDM기법의 적용은 타당하다고 판단되어 본 연구에 적용하였다.

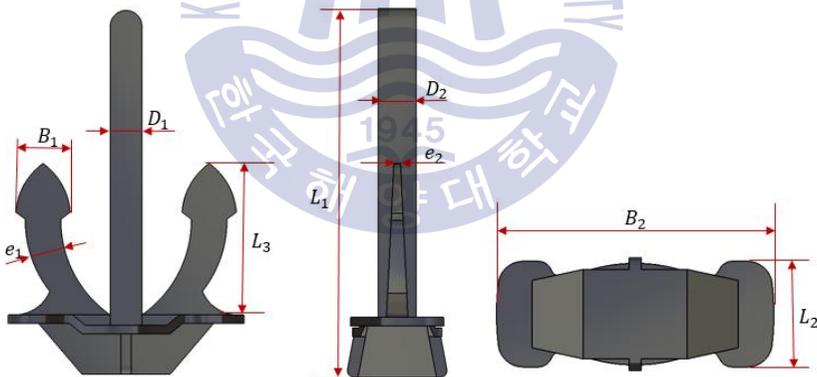


Fig. 2.2 Shape of stockless anchor

Table 2.1 Dimension of stockless anchor according to weights

Weight [ton]	B_1 [mm]	B_2 [mm]	D_1 [mm]	D_2 [mm]	L_1 [mm]	L_2 [mm]	L_3 [mm]	e_1 [mm]	e_2 [mm]
10.5	580	2520	338	400	3958	980	1644	380	71

해석에 사용된 유동장은 공기와 물로 이루어진 VOF(Volume of fluid) 모델로 형성하고 공기 중의 앵커가 물속으로 낙하하는 형태로 시뮬레이션을 진행하였으며 형상은 Fig. 2.3(a)나타 내었고, Fig. 2.3(b)는 유동장 내부 앵커의 격자 형상을 나타내었으며, Table 2.2는 해석에 사용된 유체(공기, 물)의 물성치를 나타내었다. 또한 해석에서 바닷속의 정수압(Hydrostatic pressure)을 표현하기 수심에 따른 압력변화를 형성한 유동장 내부에 설정하였고, 적용시킨 정수압 식은 아래와 같다.

$$\text{정수압(Hydrostatic pressure)} = \rho g z \quad (1)$$

여기서, ρ 는 물의 밀도 g 는 중력가속도 이며 z 는 수심이다.

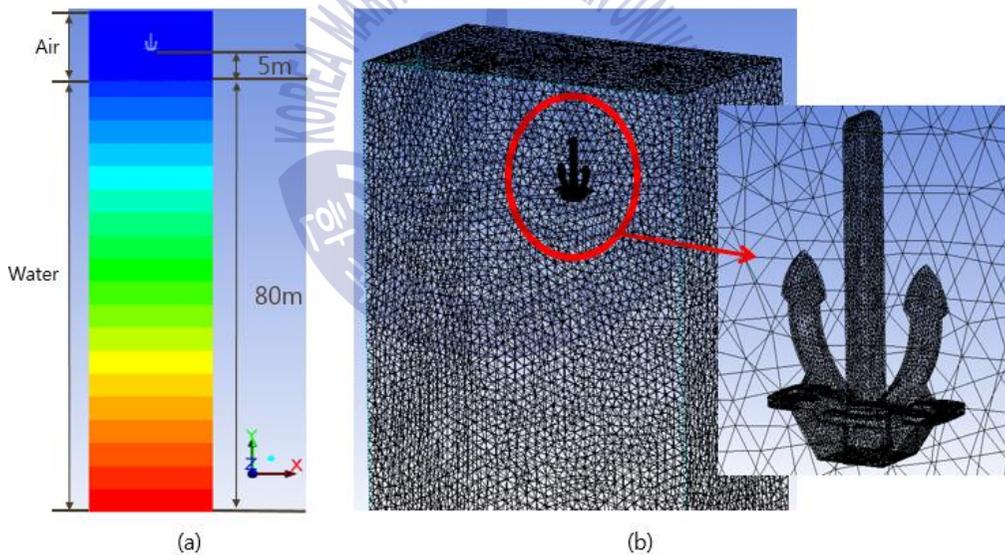


Fig. 2.3 Numerical Modeling

Table 2.2 Air and water properties

Material	Density [kg/m^3]	Viscosity [$kg/m \cdot s$]
Air	1.225	1.7894×10^{-5}
Water	1027.83	1.671×10^{-3}

또한 해석을 위한 해석모델의 설정에 앞서, 경계층의 정의를 위한 레이놀즈 수(Reynolds number, R_e)는 다음의 식 (2)을 사용하여 구하였다.

$$R_e = \frac{\rho_w VL}{\mu_w} = \frac{VL}{\nu_w} \quad (2)$$

여기서 L 은 앵커 특성길이, V 는 수중에서의 앵커 속도, μ_w 는 물의 점성계수, ν_w 는 물의 동점성계수이다. 여기서 L 을 앵커 투영면적의 수평 길이로 간주하여 계산하면 난류(Turbulent flow)로 가정할 수 있고, 이는 항력계수를 물체의 형상에 따라 실험 및 해석적으로 구해야 함을 의미한다. 따라서 해석상 난류 모델 설정은 앵커의 경계조건은 Wall로 설정한 후 $K-\omega$ SST(Shear Stress Transport) 모델을 적용하는 것을 끝으로 해석수행을 위한 모든 설정을 정의하였다.

본 연구 수행에 앞서, MDM기법을 적용한 항력계수 산출의 검증을 위해 동일한 해석 조건에서의 단순 구(Sphere) 형상의 자유낙하 해석을 실시하였다. 지름 0.2m에 10kg의 중량을 갖는 구를 MDM기법을 적용한 유동장 내에서 낙하하는 구의 위치를 확인하기 위한 부피율(Volume fraction)을 Fig. 2.4에 나타내었다.

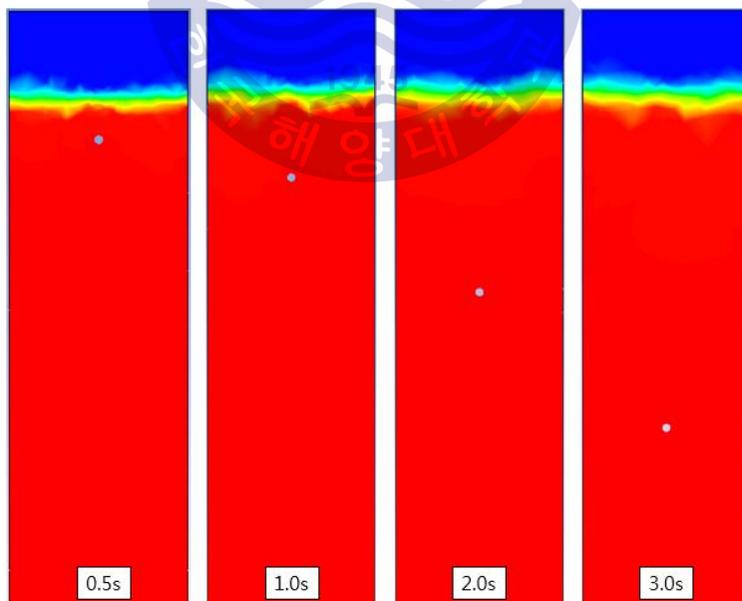


Fig. 2.4 The volume fraction of time step (Sphere)

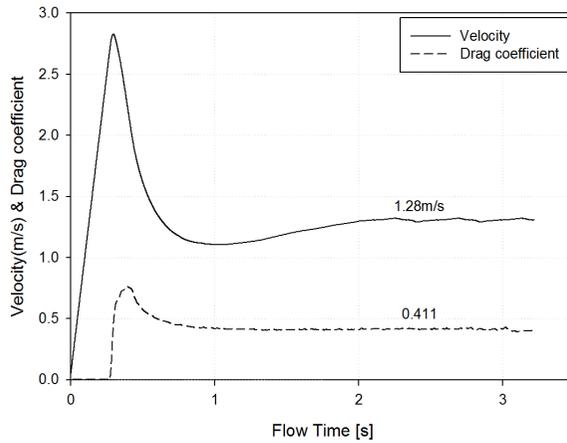


Fig. 2.5 Velocity and drag coefficient of the sphere

또한 구가 낙하되고 시간에 따른 속도 및 항력계수의 변화를 Fig. 2.5와 같이 그래프로 나타내었으며, 실험에 의해 제안된 구의 항력계수 범위인 0.4~0.5와 비교적 정확한 결과를 보였다(Massey and Smith., 2006). 따라서 앵커 종단속도 및 항력계수 산정을 위해 MDM기법을 적용하여 해석을 실시하였고, 종단속도 계산식을 산정하여 해석 결과와 비교 하였다. 먼저 앵커 10.5ton의 유동장 내부에서 앵커 위치 확인을 위한 시간에 따른 부피율을 Fig. 2.6에 나타내었다.

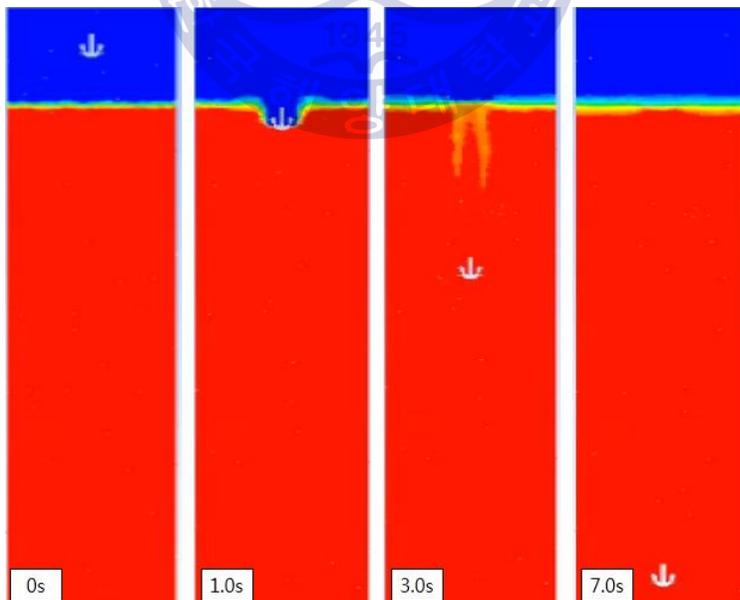


Fig. 2.6 The volume fraction of time step (Anchor)

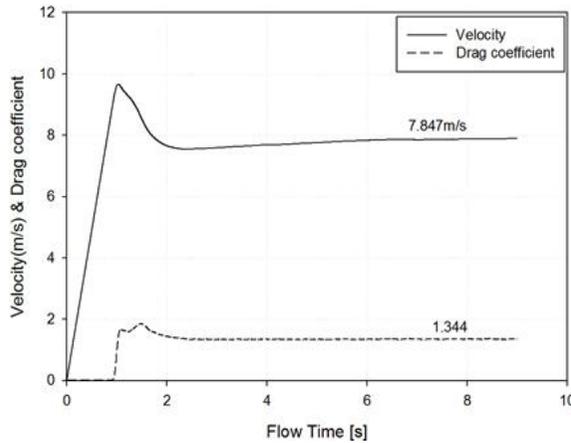


Fig. 2.7 Velocity and drag coefficient of the anchor (10.5Ton)

또한, 중량별 종단속도 해석 결과와 그에 따른 항력계수 결과를 Fig. 2.7에 나타내었다.

해석 결과의 검증을 위한 종단속도 계산 식 산정은 낙하하는 앵커에 작용하는 항력을 부력과 점성력을 고려하였고, 계산에 필요한 앵커 단면적을 앵커 투영면적으로 계산하여 사용하였으며 이는 Table 2.3에 나타내었다.

계산 식 유도를 위해 먼저 앵커가 물에 잠겼을 때 중력과 부력에 의한 식 2.1과 점성력을 고려한 항력(Drag force, F_D)의 관계 식 2.2는 아래와 같다.

$$F = W - B = mg - \rho_w Vg \quad (2.1)$$

$$F_D = \frac{C_d \rho_w A v^2}{2} = f_d v^2 \quad (2.2)$$

여기서, m 은 앵커의 질량, ρ_w 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, V 는 앵커의 부피, C_d 는 항력계수, A 는 앵커의 단면적, v 는 수중에서의 앵커 속도이다. 식(2.1) 및 식(2.2)를 합친 앵커가 받는 총 합력은 뉴턴의 제2법칙($F = ma$)를 이용하여 식(2.3)와 같은 운동방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \underline{m} \frac{dv}{dt} = F &= mg - (\rho_w gv + f_d v^2) \\
 &= (m - \rho_w v)g - f_d v^2 \\
 &= \underline{m}g - f_d v^2
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

여기서 \underline{m} 는 부력의 영향을 고려한 물체의 질량이다. 위 식 (2.3)를 변수 분리 후 양변을 적분하고 지수항 형태로 정리하면 다음과 같이 종단속도를 계산할 수 있는 식(2.4)을 얻을 수 있다.

$$v = \sqrt{\frac{m \cdot g}{f_d}} \tanh\left(t \sqrt{\frac{f_d g}{m}}\right)
 \tag{2.4}$$

다음 유도된 식을 바탕으로 해석으로 산출된 앵커 중량 별 항력계수를 식에 대입한 결과를 Fig. 2.8에 나타내었고, 해석에 의해 산정된 종단속도의 와 식에 의한 종단속도 비교 결과를 Fig. 2.9에 나타내었고, 오차율이 2%대로 해석에 의한 결과에 대해 신뢰성을 더했다. 실제 충돌 해석에 적용시킨 속도 값은 해석에 의해 얻어진 종단속도 결과 값으로 적용하였다.

Table 2.3 Area and volume according to the weight of the anchor

Weight [Ton]	Area [M ²]	Volume [M ³]
10.5	2.216	1.393

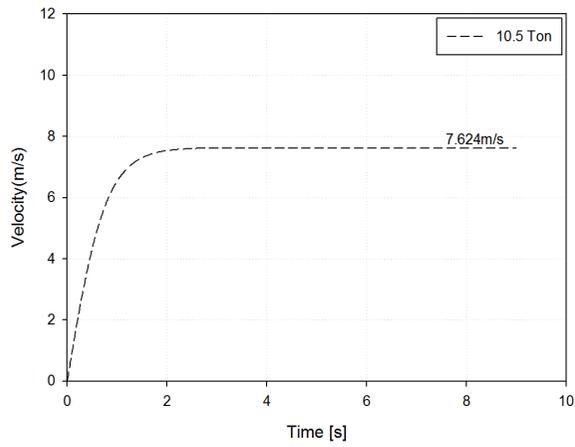


Fig. 2.8 Terminal velocity of anchors by the equation

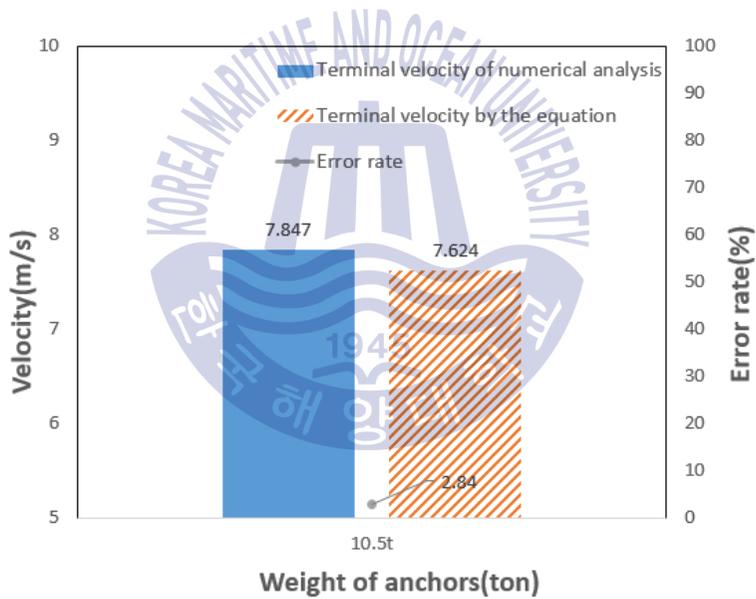


Fig. 2.9 Error rates of the two kinds of terminal velocity results

2.3 앵커 투묘에 의한 충돌 해석

앵커와 해저파이프의 충돌 해석을 위한 유한요소 모델링(Finite element modeling) 및 해석 조건 설정은 ABAQUS/CAE 2017의 비선형 동적 문제의 해석과 재료간의 충돌, 폭발 같은 해석에 주로 사용되어지는 Explicit dynamics를 이용하여 수행하였다. 또한 앵커의 충돌속도는 앞서 전산유체해석을 통해 물속의 부력 및 항력이 고려된 앵커의 종단속도 결과를 입력하였고, 충돌 후 앵커의 속도는 부력의 영향을 고려하지 않고 감소시키는 설정으로 해석을 수행하였다. 본 앵커 투묘에 의한 위험성 분석을 위해 실시되는 해석 시나리오를 Fig. 2.10에 나타내었다.

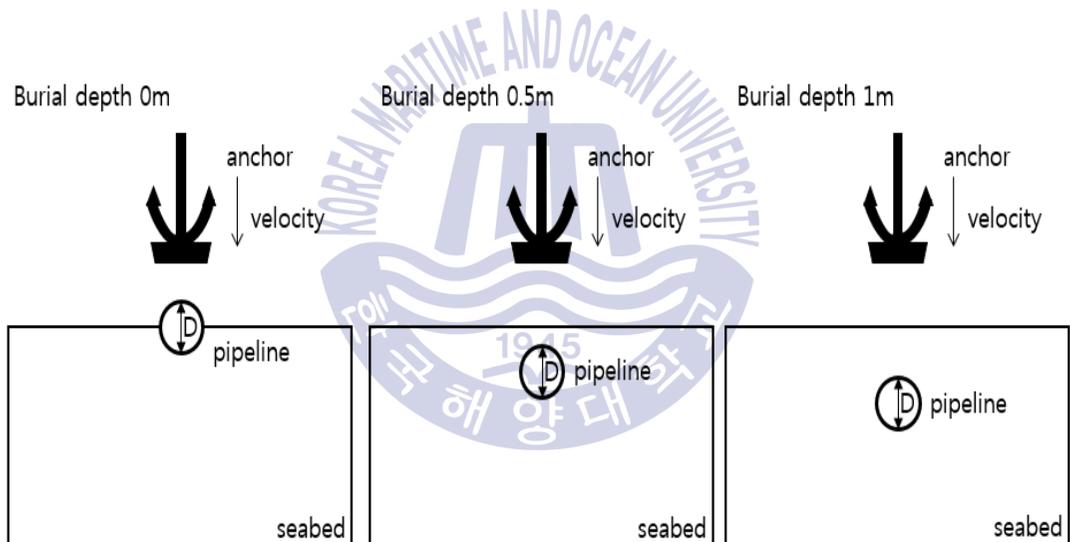


Fig. 2.10 Case used for analysis

2.3.1 앵커 모델링

충돌 해석을 진행하기 위해 앵커, 해저지반, 해저파이프라인의 형상이 정의되어야 하며 각각의 형상을 모델링 하였다. 첫째로 앵커 모델링은 종단속도 해석과 10.5ton의 앵커를 3차원 솔리드(Solid) 요소로 모델링을 수행하였다. 여기서 투묘에 의한 매설된 파이프의 위험성 분석은 파이프라인의 변형과 해저지반성질 및 매설깊이의 영향을 평가하기 위함이므로 앵커는 충돌 시 변화를 고려하지 않는 강체(Rigid body)로 설정하였고 자동격자형성(Automatic)으로 격자를 정의하였다. 모델링된 앵커의 형상은 Fig. 2.11와 같다.

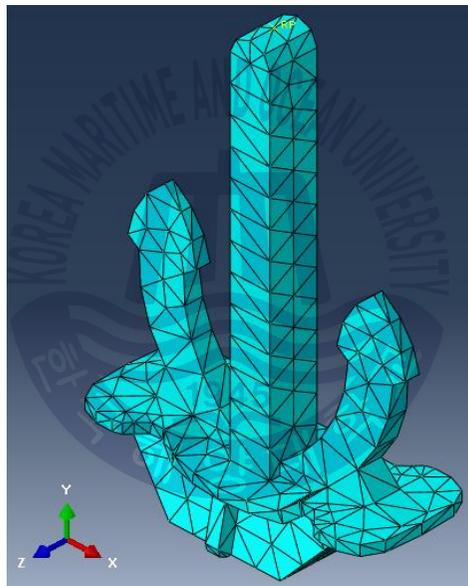


Fig. 2.11 Finite element model of anchor (10.5 ton)

2.3.2 파이프라인 모델링

파이프라인의 모델링은 API(American petroleum institute, 미국석유협회)의 석유 수송용 강재인 API 5L X52 PSL 2의 규격을 토대로 3차원 솔리드 요소로 변형이 가능한 탄성체(Elastic)로 모델링을 수행하였다. 파이프라인의 모델링된 형상은 Fig. 2.12와 같으며, 적용시킨 물성치는 Table 2.4에 나타내었다(Escoe., 2006). 파이프라인은 해저지반에 비해 그 크기가 상대적으로 작고, 원형이므로 육면체 격자를 적용하여 길이 방향과 앵커와 충돌이 발생하는 중앙 부분에 격자를 조밀하게 적용하였다. 파이프라인의 두께는 Mapped mesh 기법을 이용하여 2개 구간으로 원형단면을 정의 하였고, 유한히 이어진 파이프라인을 효과적으로 모델링 하기 위함과 길이방향의 반력의 영향을 최소화 하기 위해 10m로 가정하여 모델링 하였으며, 모델링 된 파이프라인의 양 끝단에 법선 방향의 변위(Displacement)는 구속(Fix)하는 조건을 적용하였다.

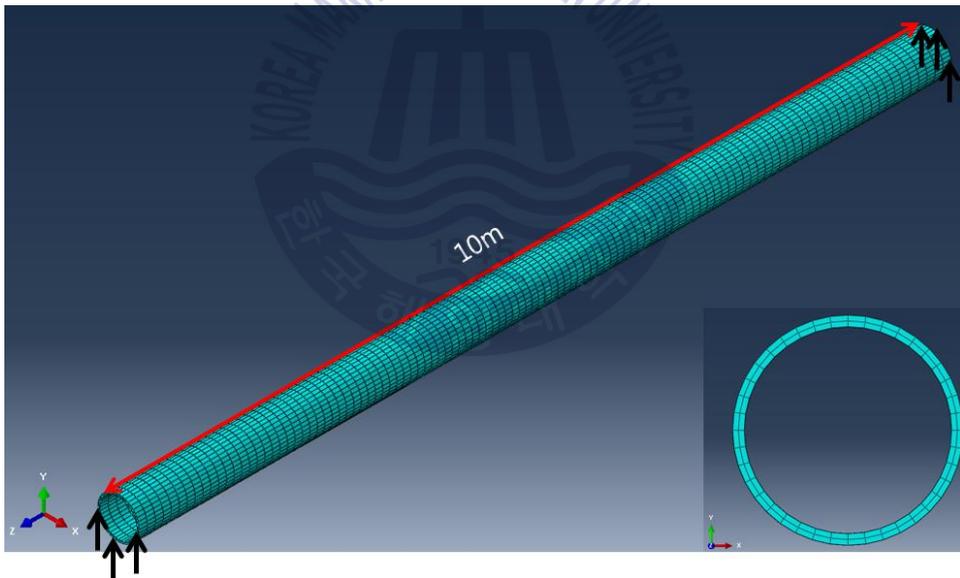


Fig. 2.12 Finite element model of subsea pipeline

Table 2.4 Geometrical and mechanical properties of pipeline

Grade	Out diameter [mm]	Wall thickness [mm]	Density [kg/m^3]	Poisson's ratio	Elasticity modulus [MPa]	Yield strength [MPa]
X52	508	25.4	7850	0.3	2×10^5	360

2.3.3 해저지반 모델링

마지막으로, 해저지반의 모델링은 마찬가지로 3차원 솔리드 요소를 사용하여, 변형이 가능한 탄소성체(Elastic-plastic)으로 모델링 하였다. 여기서, 지반은 불연속체이며 응력-변형률(Stress-Strain)이 비선형이므로 해저지반에 적용되는 역학적 물성은 다양한 항복기준(Failure criteria)중 재료의 파괴 시 응력이 응력원의 포락선으로 나타나는 Mohr의 파괴 기준과 점착력(Cohesion, c)과 내부마찰각 (Inner friction angle, ϕ)의 강도정수를 포함한 직선관계를 갖는다는 Coulomb의 기준을 합성한 식으로 적용하였고 이는 식2.5와 같이 표현 할 수 있다.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.5)$$

여기서, τ 는 흙의 전단강도, σ 는 연직응력이다. Mohr-Coulomb의 항복기준을 Fig. 2.13에 나타내었으며, 이와같은 Mohr-Coulomb의 항복 기준을 적용시켜 모델링된 해저지반에 부여된 역학적 물성치를 Table 2.5에 나타내었다(Das., 2009)

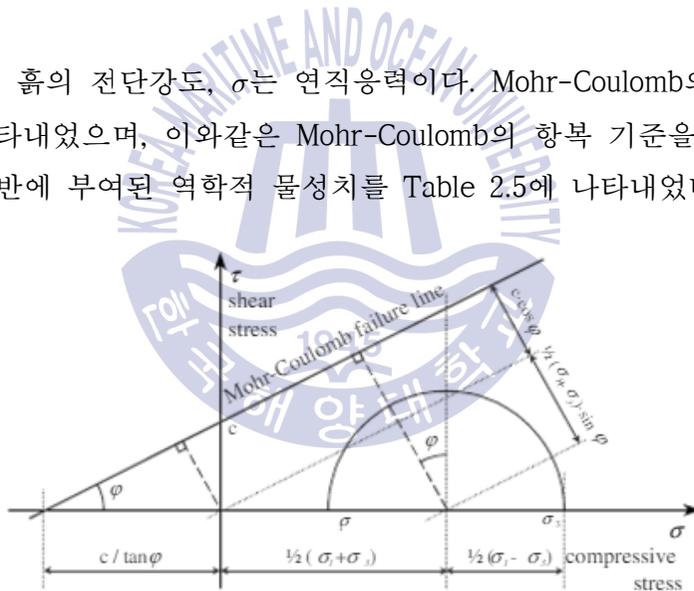


Fig. 2.13 Mohr-coulomb failure criterion

Table 2.5 Material properties of seabed

	γ_{sat} [kg/m^3]	Friction angle [$^\circ$]	Cohesion [kPa]
Soft clay	1611	0.01	5.9
Loose sand	1952	29.2	0.5
Dense sand	2020	36	0.5

또한 무한한 해저지반을 경제적으로 모델링하기 위해 파이프라인 지름의 10D 만큼 가로×세로×높이가 10m×10m×5m인 직육면체 형태로 여유롭게 모델링하여 고정된 면에서의 탄성과 영향을 최소화 하였으며, 해저지반 하단부의 법선 방향과 옆면의 접선 방향의 변위를 구속하는 조건을 부여하였다. 또한, 해석 시간의 과도해짐을 감안하여 대칭 경계조건(Half symmetry)조건을 적용하여 해석 시간을 단축시켰다. 적용된 경계조건을 Fig. 2.14에 나타내었고, 모델링된 해저지반, 파이프라인, 앵커의 유한요소 전체 모델을 Fig. 2.15에 나타내었다.

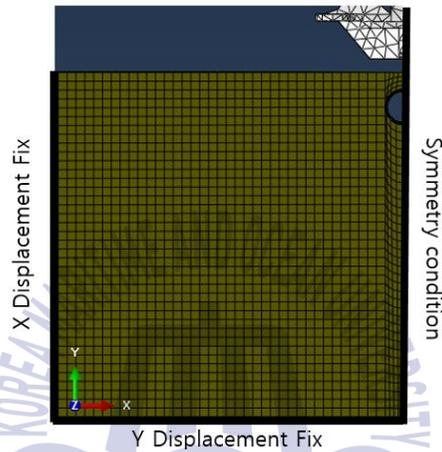


Fig. 2.14 Boundary conditions applied to the analysis

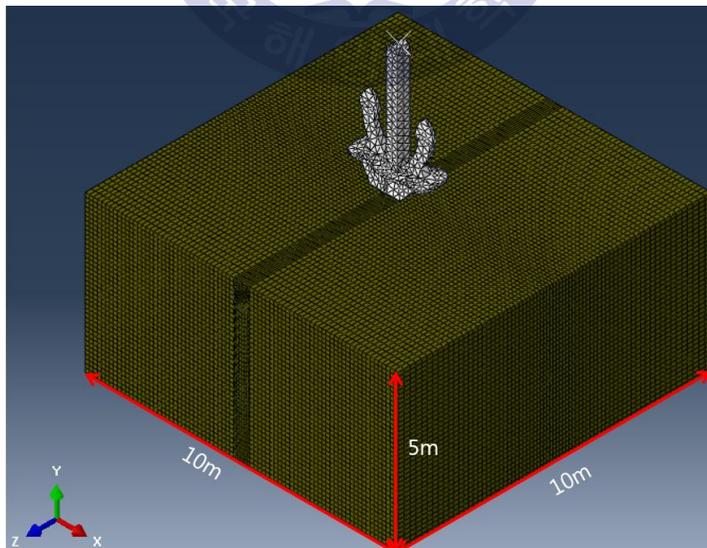


Fig. 2.15 Finite element model (Burial depth 0.5m)

2.4 해석 결과 및 위험성 분석

본 투묘에 의한 충돌 해석은 전산유체 해석을 통해 종단속도 결과를 앵커의 속도에 대입하여 낙하거리에 관계없이 일정한 속도로 낙하하게 설정하여 수행되어졌으며, 파이프라인은 항복강도(Yield strength, 360Mpa)를 초과하는 응력이 발생될 경우 파괴가 발생한다. 따라서 파이프라인이 매설되는 깊이 및 해저지반의 물성치 변화에 따른 앵커 투묘에 의한 충돌 후 파이프라인에 나타나는 최대 Von-mises stress를 도출하여 항복강도 값과 비교하여 위험성을 분석 하였다.

먼저 Soft clay의 지반인 경우 앵커와 충돌로 인한 파이프라인의 Von-mises stress 결과를 Fig. 2.16에 나타내었다.

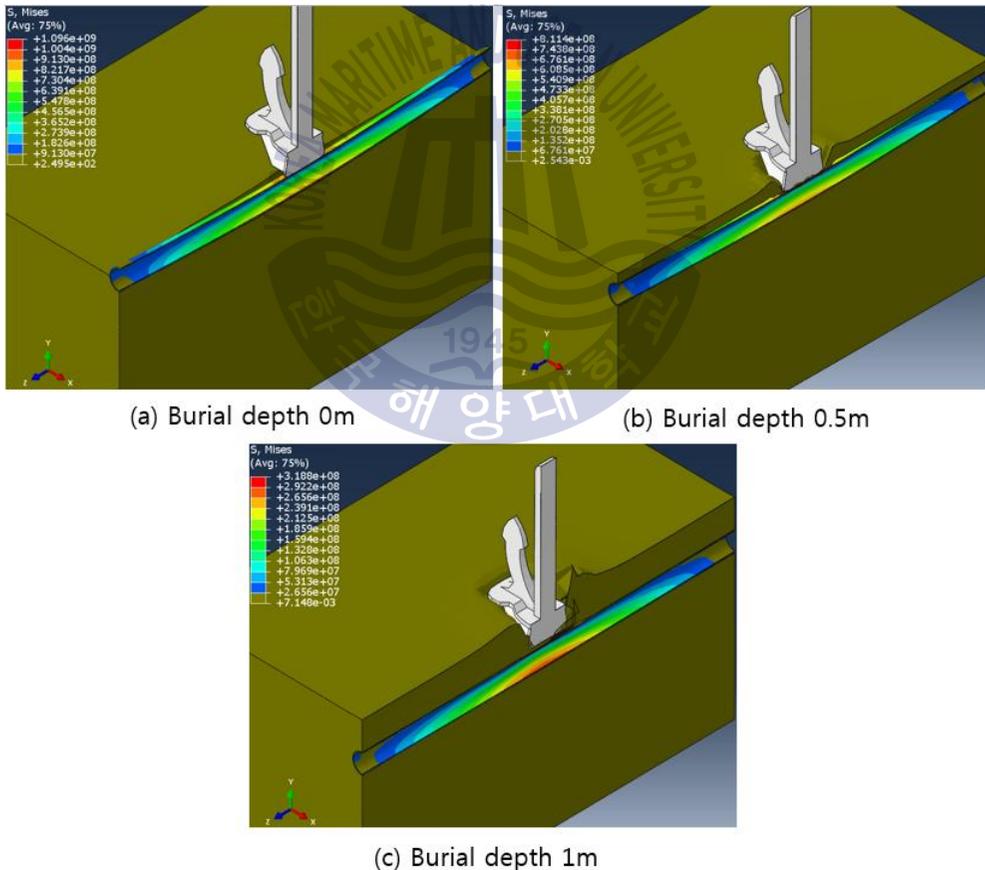


Fig. 2.16 Results of maximum von-mises stresses (Soft Clay)

Fig. 2.16에서 볼 수 있듯이 해저지반 내 완전 매설 되지 않은 상태로 낙하하는 앵커와 충돌할 경우, 최대 Von-mises stress 이력이 파이프라인의 항복강도를 훨씬 초과하였다. 또한 이와 같이 완전 매설되지 않은 파이프라인의 파괴는 앵커 형상에 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며, 실제로 앵커의 하부 형상의 양끝부분과 충돌하는 영역에 최대 응력이 발생하였고 파괴되는 결과를 보였다. 또한 Soft clay의 해저지반에서는 1m 이상 매설되어야 파이프라인의 항복강도를 초과하지 않는 즉, 안전한 매설깊이가 충족된다고 할 수 있다.

마찬가지로 Loose sand와 Dense sand의 해석 결과를 Fig. 2.17 및 Fig. 2.18에 나타내었다.

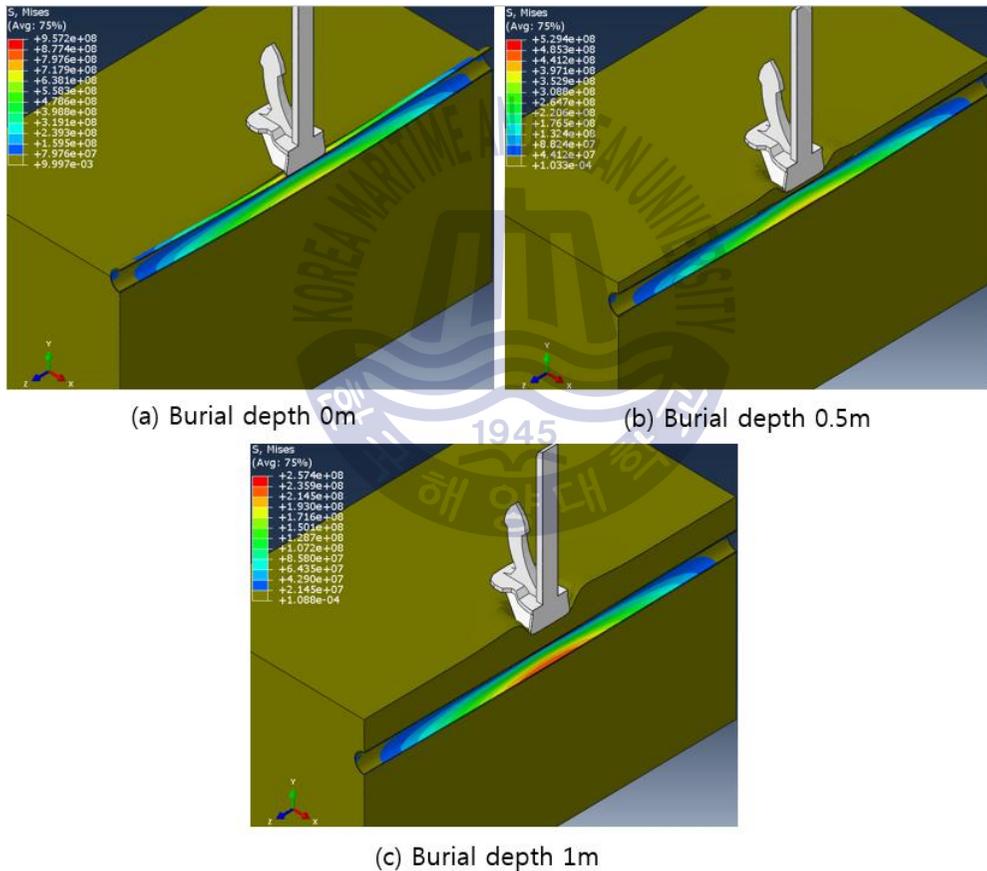


Fig. 2.17 Results of maximum von-mises stresses (Loose sand)

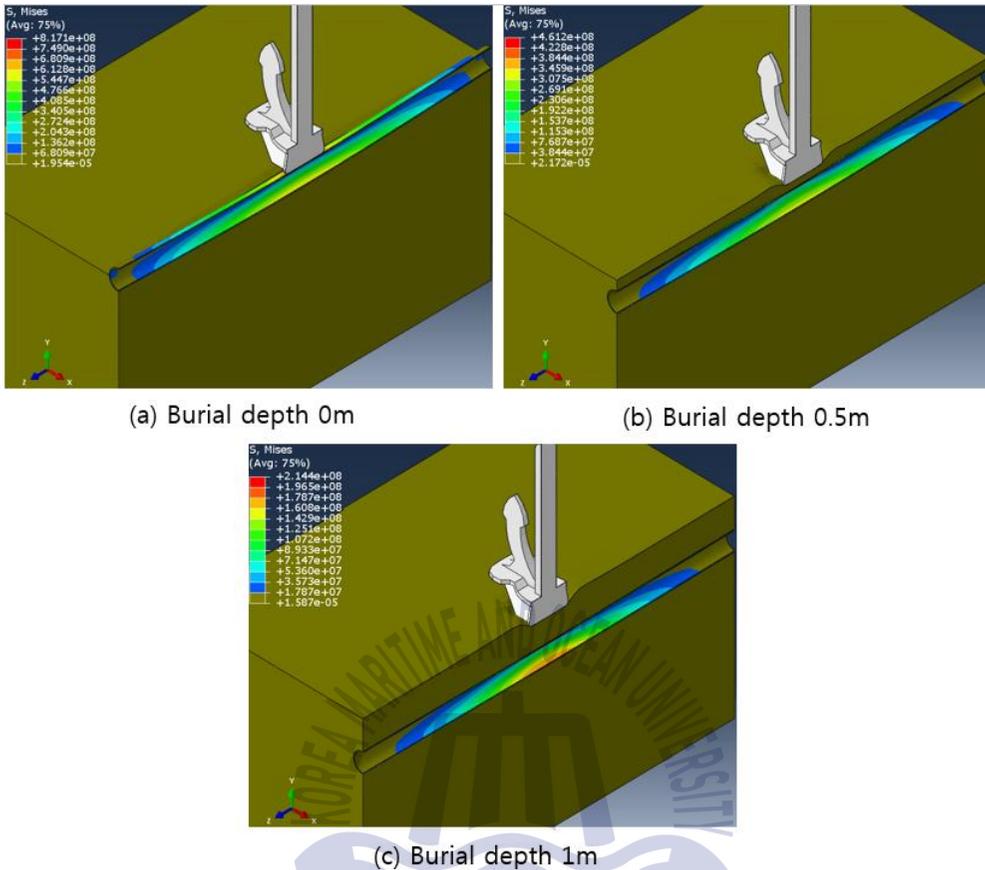


Fig. 2.18 Results of maximum von-mises stresses (Dense sand)

모든 해저지반 물성치에 따라 매설된 파이프라인의 경우 0m로 일부 매설된 구간과 반대로 충돌하는 앵커 형상에 직접적인 영향을 받지 않았으며, 앵커와 충돌이 발생하는 파이프라인의 상층 중앙부에서 가장 큰 Von-mises stress가 발생하는 것으로 나타났다.

모든 해석 결과 값의 정확한 비교를 위해 가장 큰 Von-mises stress가 발생하는 파이프 라인 중앙부의 일부매설(0m), 혹은 매설(0.5m, 1m)된 모든 해석 Case 에 대한 시간에 따른 이력을 Fig. 2.19와 같이 그래프로 나타내었다.

Fig. 2.19의 그래프 이력을 보면 Soft clay의 경우 충돌 초기에는 발생하는 Von-mises stress가 Loose sand와 Dense sand에 비해 낮게 측정 되나, 충돌 후

파이프라인에 발생하는 Von-mises stress 값은 더 크게 나타났다. 이는 0m로 파이프라인이 완전 매설이 아닌 일부 매설된 Case의 경우와 차이를 보인다. 또한 Dense sand 결과에서 가장 빨리 앵커 속도가 멈췄고 속도가 멈춘 이후 해저지반의 탄성으로 인해 속도가 다시 발생했다. 이처럼 앵커 투묘로 인한 안정성 검토를 위해 유한요소해석 결과에서 앵커의 속도가 Zero(0)가 되기 전 최대 Von-mises stress 값을 산출하였고, 그에 따른 산출 결과와 파이프라인의 항복강도 비교를 통해 해저지반 성질 및 파이프라인의 매설깊이 변화에 따른 안정성을 검토 하였다.

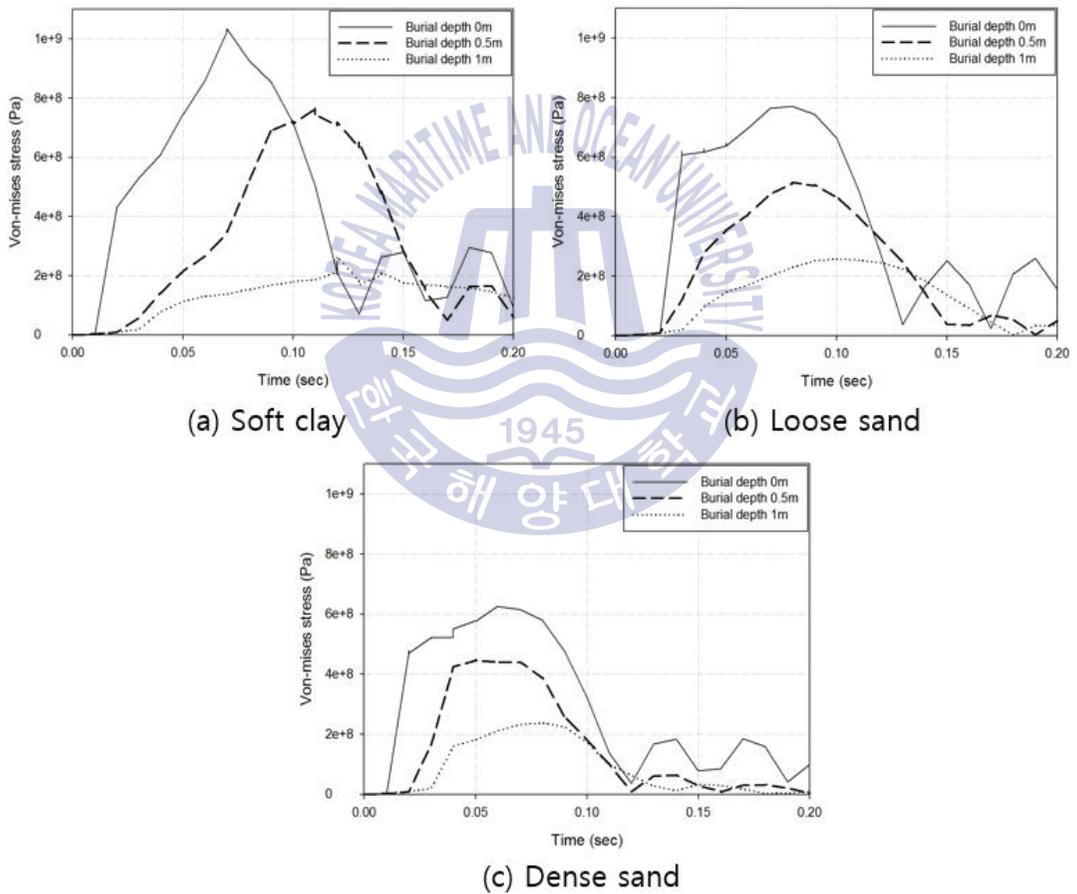


Fig. 2.19 Von-mises stress probe of subsea pipeline

따라서 최종적인 비교를 위해 최대 Von-mises stress 결과와 파이프라인의 항복강도의 비율결과를 Table 2.6에 나타내었다. 0m로 일부매설된 파이프라인의 경우 모든 해석 Case에서 항복강도를 초과하는 즉, 안전하지 않은 결과가 나타났으며, 0.5m 매설된 결과에서도 마찬가지로 모두 안전하지 않은 결과가 나타났으나, 해저지반 성질 및 매설깊이의 영향에 따라 차이는 보임을 알 수 있었다. 또한 1m로 매설된 파이프라인의 경우 모두 안전한 결과를 보였으나, 마찬가지로 해저지반 성질에 따라 결과 차이는 보이는 것을 알 수 있었고 Soft clay, Loose sand, Dense sand 순으로 발생하는 Von-mises stress 가 작게 나타났다.

본 앵커 투묘로 인한 안정성 분석 결과는 모든 해저지반의 성질에서 1m이상 매설돼야 파이프라인의 안정성이 보장됨을 알 수 있었고, 그 이하로 매설된 파이프라인의 경우는 투묘로 인한 안정성이 보장되지 않음을 의미 할 수 있다. 따라서 1m 이하로 매설된 파이프라인의 경우 추가적인 보호공법 적용이 필요하며, 보호공법인 락범을 적용한 파이프라인의 안정성 검토를 본 연구의 4장에서 다루도록 하겠다.

Table 2.6 Ratio of maximum von-mises stress to the yield strength

	Soft clay	Loose sand	Dense sand
Burial depth (0 m)	9.89	10.44	10.83
Burial depth (0.5 m)	1.49	1.27	1.08
Burial depth (1 m)	0.37	0.27	0.24

제 3 장 앵커 주묘에 의한 위험성 분석

3.1 앵커 주묘 시나리오

앵커 주묘(Drag anchor)에 의한 위험성 분석은 해저지반 내 매설된 파이프라인이 앵커 주묘에 의한 충돌 시 파괴유무를 해석적으로 분석하는 것이다. 이를 위해 해저지반 성질별 해석 Case를 분류하고 이에 따른 파이프라인의 안전한 매설깊이와 안전하지 않은 매설깊이를 산정하고자 한다.

앵커 주묘 시나리오는 투묘(Drop anchor) 시나리오와 마찬가지로 해저지반 성질 3가지(Soft clay, Loose sand, Dense sand)로 분류하였고, 앵커는 10.5ton 중량의 스톡리스 앵커(Stockless anchor)로 선정하였으며, 파이프라인의 안정성 확인을 위하여 주묘 해석 시나리오 설정을 위한 Case별 선행해석을 실시하였다. 또한 앵커가 주묘에 의해 파이프라인에 충돌 시 파괴가 발생한다는 가정을 통해 파이프라인 위험성 분석을 실시하였고, 해저지반은 투묘에 의한 위험성 분석과 마찬가지로 다층지반(Multilayer soil)이 아닌 단일지반(Singlelayer soil)로 가정하였다.

앵커는 해저지반에 침투하여 해양에서 선박 및 구조물을 정점에 계류시키기 위한 장치이며 다양한 해양환경과 선박의 제원에 의해 주묘에 관한 기준 설정이 모호하다. 따라서 앵커 주묘를 고려한 위험성 분석을 위한 해석을 실시하기 위해 앵커 주묘 시나리오에 대한 설정이 요구되어 지며, 모든 설정의 추론 값과 가정이 필요하다.

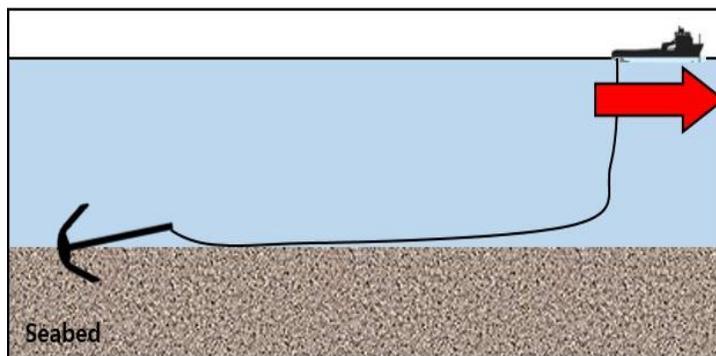


Fig. 3.1 Conceptual diagram of anchoring

3.2 앵커 주요 시나리오 설정을 위한 선행해석

3.2.1 앵커 주요 시나리오 설정을 위한 선행해석 개념

앵커 주요 시나리오 설정을 위해 앵커의 초기 침투깊이(Initial Penetration)설정과 앵커의 끌림 속도(Drag velocity) 및 끌림 각도(Drag angle)설정, 그리고 4장의 락범 설계에서 필요한 앵커와 락범의 이격거리(Anchor-rockberm distance)에 대한 설정이 필요하며, Fig. 3.2와같이 이를 위한 선행해석을 실시하여, 다음과 같은 설정에 대한 4가지 변수를 결정하였다.

먼저 앵커 초기 해저지반 침투깊이에 대한 설정은 앵커가 낙하(Drop anchor)하여 해저지반에 충돌 시 해저지반의 변위는 0.074m ~ 0.351m 까지 해저 지반 물성치(Material properties)와 앵커의 중량에 따라 결과 차이를 보였으며(Shin and Seo.,2017), 해저지반에 나타나는 변위가 곧 앵커가 해저지반에 침투되는 깊이 일 것이다. 또한 단단한 지반일수록(Dense sand) 앵커가 투묘에 의해 해저지반에 침투되는 깊이는 얕을 것이며, 앵커가 낙하되어 해저지반에 충돌 후 앵커는 해저지반내로 시간이 지남에 따라 자중에 의해 더 깊게 침투 할 것으로 예상되어 진다.

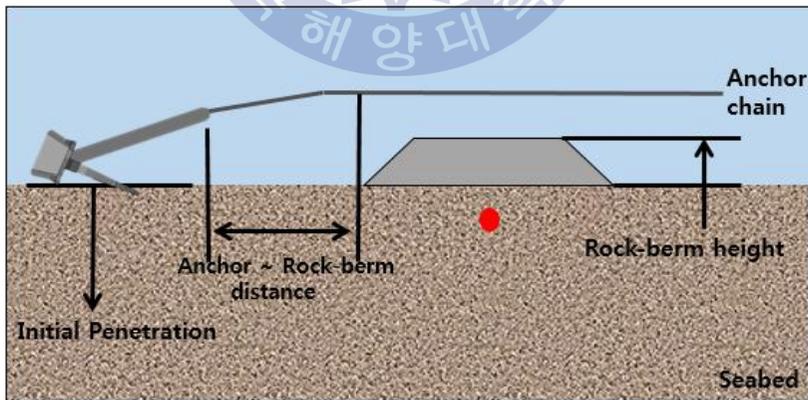


Fig. 3.2 Settings required for dragging simulation

따라서 앵커의 해저지반 초기 침투깊이 설정을 위해 첫째로, 앵커 Fluke이 해저지반에 침투해 있는 상태(P1)와 Fluke의 1.5배(P2), 0.5배(P3)의 초기 침투깊이를 설정하여 Case별 비교해석을 수행하였다.

둘째로, 끌리는 속도 및 각도에 따라 앵커가 해저지반에 침투되는 깊이와 같은 앵커 주묘에 대한 위험성 분석함에 있어 많은 영향이 있을 것으로 판단되므로 해저지반에 침투되어 있는 앵커가 끌리는(Drag anchor) 속도(힘)와 각도에 대한 설정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 앵커의 끌림 속도에 따른 비교를 위해 통상적으로 항해 및 운항하는 선박이 앵커를 회수하는 속도와 유사한 2m/s(V1)을 기준으로 1.5m/s(V2), 1m/s(V3)로 Case를 분류하였고, 끌림 각도를 0°(A1)과 30°(A2)로 분류하여 비교해석을 수행하였다.

마지막으로, 4장의 락범 설계 검증 시 적용될 앵커와 락범의 이격거리에 대한 설정이 필요하며, 이는 분류된 모든 선행해석 결과를 분석하여 가장 보수적인 설정으로 이격거리를 산정하였다. 다음과 같이 선행해석에서 결정될 설정값들을 Fig. 3.3에 나타내었다.

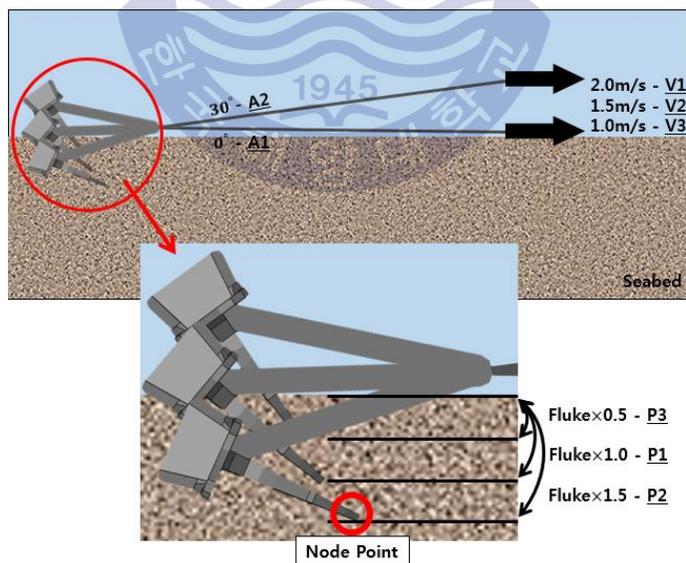


Fig. 3.3 Settings values considered for the preceding analysis

3.2.2 선행해석을 위한 유한요소해석 기법

FEM(Finite Element Method)은 토목 및 기초공학 분야에서 다양하게 활용되어져 왔으며, 특히 지반-구조물 상호작용을 고려한 거동 분석을 모사하는 중요한 도구로 사용되어져 왔다. 하지만 앵커 끌림 시뮬레이션과 같은 대변형(Large deformation)이 발생하는 해석에는 격자(Mesh)의 왜곡(Distortion) 현상과 접촉면 문제 등으로 인해 경계조건등을 풀어내는데 한계가 있다(Kim and Jeong., 2014). 따라서 본 연구에서는 이러한 대변형 문제를 해석 하기 위한 대체 해석법인 CEL(Coupled Eulerian Lagrangian)기법을 사용하여 앵커 끌림 해석을 수행 하고자 한다.

CEL 기법이란 연속체의 거동을 물체의 좌표 및 시간으로 정의하여 주로 구조 및 지반 공학의 해석에 사용되는 Lagrangian 모사법과 공간 좌표 및 시간으로 정의하여 주로 유체역학의 해석에 사용되는 Eulerian 모사법을 합친 것으로, Eulerian으로 모사된 영역내의 Lagrangian 요소의 거동을 각 요소의 체적비인 EVF(Eulerian volume fraction)로 나타내며, Fig. 3.4과 같이 각각의 Eulerian element는 물성이 채워져 있는 비율로 표현된다.

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

Fig. 3.4 Eulerian Volume Fraction (EVF)

이러한 Eulerian 모사법의 장점을 바탕으로 대변형에 대한 비틀림이나 왜곡 없이 해저지반 대변형에 의한 앵커 거동 모사가 가능하다. 실제로 CEL기법을 이용한 대변형에 관한 연구가 다양하게 수행되어져 왔으며, CEL해석기법의 대변형 해석적용에 대한 검증이 이루어졌다(Qiu et al., 2010). 또한 CEL기법을 적용하여 락범은 고려하지 않은 상태에서의 앵커 끌림 시 해저지반 침투에 관한 Case 연구(Zhao and Liu., 2015)등이 수행되어져 왔다.

본 선행해석에서는 Eulerian 모사법으로 해저지반과 락범을 모델링 하였고, Lagrangian 모사법으로 앵커와 앵커 체인을 모델링 하여 앵커 끌림 시물레이션을 수행하였다.

3.2.3 선행해석을 위한 3차원 유한요소 모델링

3차원 유한요소 모델링(Finite element modeling)을 위해 2장의 투묘에 의한 위험성 분석과 마찬가지로 Abaqus/Explicit를 이용하여 가로×세로×높이 가 40×20×10m인 직육면체로 무한히 이어진 해저지반을 경제적으로 모델링 하였으며, 이를 Fig. 3.5에 나타내었다. 또한 해저지반을 Eulerian으로 모델링 하고, 앵커와 앵커를 연결하는 체인(Chain)은 Lagrangian으로 모델링 하였으며 전체 모델링에서 약 25만개의 격자(Mesh)가 사용되었다.

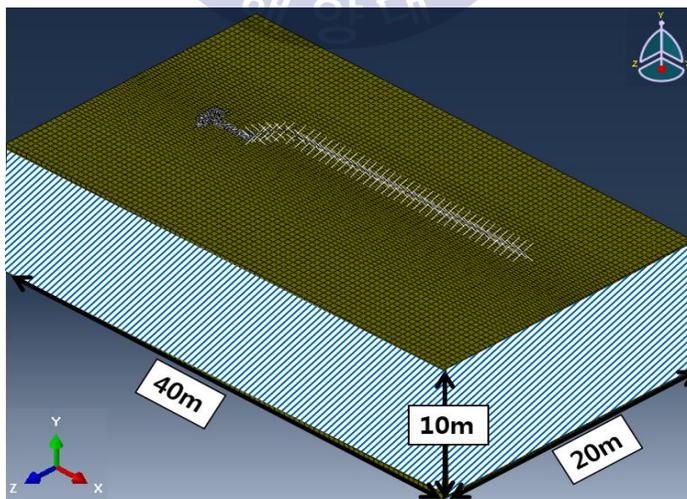


Fig. 3.5 Finite element modeling using CEL method

해석을 위한 경계조건(Boundary condition) 설정은 Fig. 3.5와 같이 모델링된 해저지반 하단부의 법선 방향(좌표축 Y) 변위를 구속하는 조건을 적용하였고, 모델링된 해저지반 옆면의 접선방향(좌표축 X, Z)의 변위를 구속하는 조건을 적용하였다.

앵커는 2장의 투묘에 의한 위험성 분석과 마찬가지로 10.5ton의 스톡리스 앵커(Stockless anchor)를 선정하여(SPS-KSA0127-V331105978., 2014) 앵커 Fluke이 벌어질 수 있는 최대 각도인 42° 로 모델링 하였으며, 해석 시 변형을 고려하지 않는 강체(Rigid body)로 설정하였고, 모델링된 형상을 Fig. 3.6에, 앵커의 제원을 Table 3.1에 나타내었다.

앵커 체인(Anchor chain)의 모델링은 앵커와 마찬가지로 각각의 체인을 모델링 후 해석 시 변형을 고려하지 않는 강체로 모델링 한 후 체인과 체인을 연결하는 Link type의 wire로 연결하여, 연결부의 회전을 제어하는 설정을 적용하였으며, 이를 Fig. 3.7에 나타내었다.

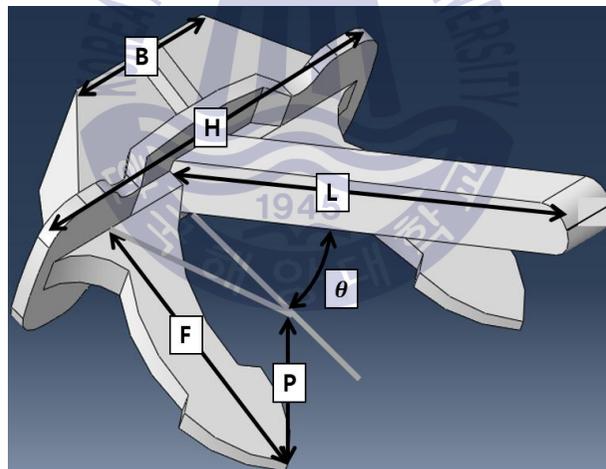


Fig. 3.6 Shape of stockless anchor

Table 3.1 Parameters of the stockless anchor

	L [m]	F [m]	B [m]	H [m]	P [m]	θ [$^\circ$]
10.5 [Ton]	3.13	1.65	0.9	2.52	1.11	42

또한 해석의 단계(Analysis step)를 해저지반이 자중에 의한 초기 토압을 고려하기 위해 중력(Gravity)을 적용하여 안정화 작업을 수행하기 위함과 앵커체인이 해저지반에 안착시키는 작업을 위해 3단계로 분류하였으며, 1단계에서 해저지반에 자중적용을 하고, 2단계는 앵커 체인을 해저지반에 안착하는 작업을 하였으며, 마지막 3단계에서 앵커 체인 연결부 제일 끝 부분에 속도를 주어 앵커가 주요 할 수 있도록 설정하였다.

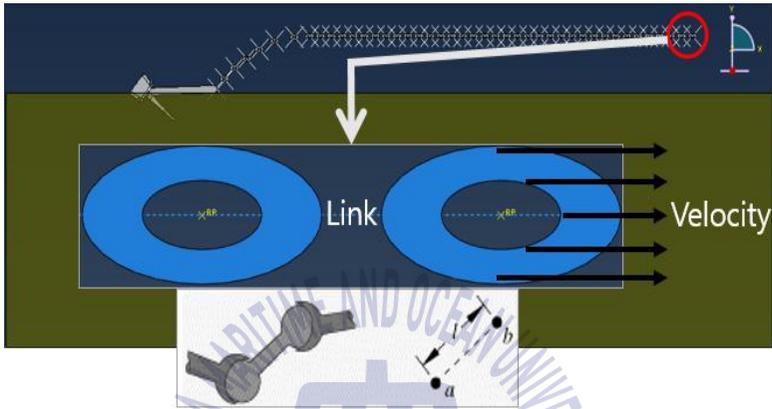


Fig. 3.7 Modeling of the chain and connecting type

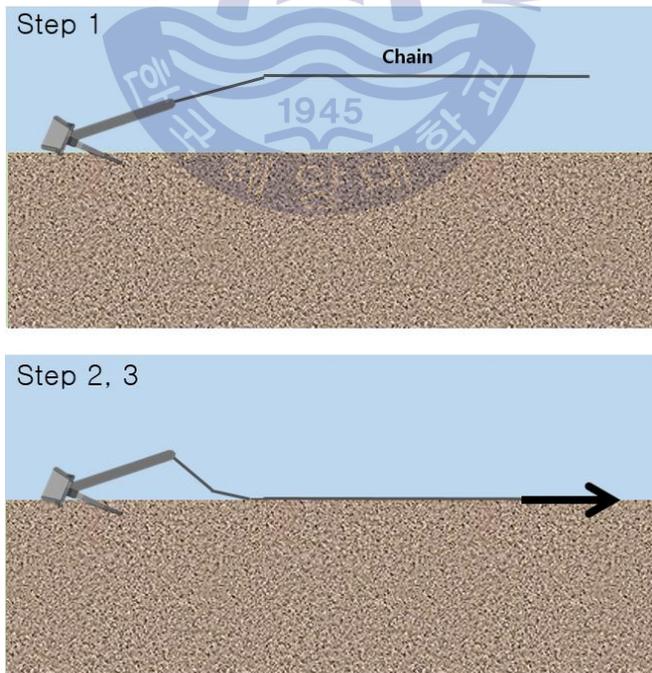


Fig. 3.8 Analysis step

해저지반에 적용된 역학적 물성은 마찬가지로 투묘에 의한 위험성 분석과 동일하게 주묘에 의한 위험성 분석에는 느슨한 모래(Loose sand), 조밀한 모래(Dense sand), 연약점토(Soft clay)로 총 3가지를 고려하였으나, 본 절의 선행 해석은 앵커 주묘에 의한 위험성 분석을 위해 적용 되어야하는 해석 시나리오 설정을 위해 진행되는 것이므로, 선행해석에서 고려한 해저지반은 3가지로 분류된 물성치 가운데 중간의 강도를 갖는 느슨한 모래(Loose sand)를 사용하여 실시하였다. 이와같은 Loose sand로 조성된 해저지반 모델링은 변형이 가능한 탄소성체(Elastic-plastic)으로 구성하였으며, 해저지반 물성치에 관한 내용은 2.3.3절의 해저지반 모델링에 자세히 서술하였다.

선행해석에서 분석될 내용을 재 정리하면 다음과 같다.

앵커 주묘에 의한 위험성 분석을 위해 주묘 시나리오 설정이 필요하며, 앵커의 해저지반 초기 침투깊이, 앵커의 끌림 속도 및 각도 그리고 4장의 설계된 락범 검증 시 적용될 락범-앵커 이격거리에 대한 설정이 필요하다.

따라서 앵커의 해저지반 초기 침투깊이 3가지(Fluke, Fluke \times 1.5, Fluke \times 0.5)와 앵커의 끌림 속도 3가지(2m/s, 1.5m/s, 1m/s), 앵커의 끌림 각도 2가지(0°, 30°)로 설정하여 Case별 선행해석을 실시하여 앵커 주묘에 의한 위험성 분석을 위한 주묘 시나리오를 결정하고자 한다.

각 분류된 해석 Case별 앵커의 주묘에 의한 해저지반 침투깊이를 산정하여 가장 보수적인 시나리오로 결정하였으며, 여기서 앵커의 침투깊이 측정은 각 Case별 주묘 시 앵커 최하단부인 Fluke의 끝부분 Node Point의 궤적을 추적하여 산정하였다.

3.2.4 선행해석 결과 분석 및 시나리오 결정

먼저 끌림 각도를 설정하기 위해 초기 침투깊이의 P1과 끌림 각도 A1, A2에 따른 끌림 속도 별 지반 침투깊이 결과를 Fig. 3.9에 나타내었다. 끌림 각도에 따라 앵커가 지반내로 침투하는 깊이의 영향에 많은 차이를 보였으며, 본 연구에서는 보수적인 시나리오 설정을 하고자 끌림 각도는 A1으로 결정하였다. 또한 초기 침투깊이와 끌림 속도를 결정하기 위해 끌림 각도 A1을 적용한 초기 침투깊이 P2, P3에 따른 끌림 속도별 앵커의 지반 침투깊이 결과를 Fig. 3.10와 Fig. 3.11에 나타내었다. 또한 앵커 주요 시뮬레이션에 의한 거동을 Fig. 3.12에 나타내었다.

결과를 보면 앵커의 초기 침투깊이 설정을 변경 할수록 끌림에 의한 침투깊이는 끌림 거리에 따라 차이를 보이지만, 끌림 거리 8m 이상에서의 초기 침투깊이 P1, P2, P3에 대한 오차율은 2~5% 대로 비교적 적은 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

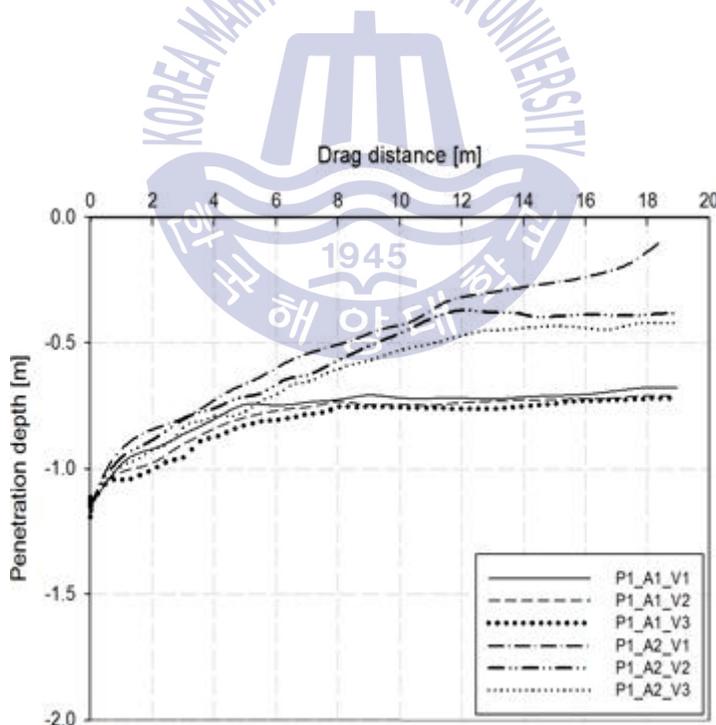


Fig. 3.9 Preceding simulation results of different initial penetration, drag velocity and drag angles

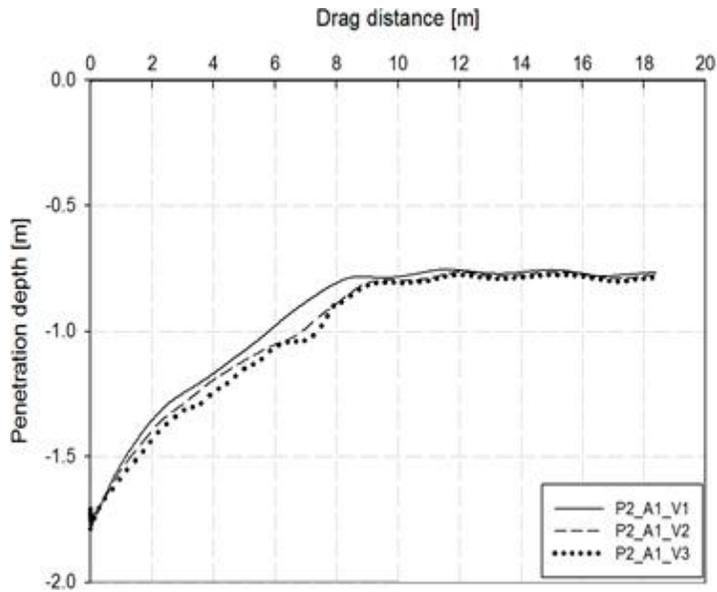


Fig. 3.10 Preceding simulation results of different initial penetration and drag velocity

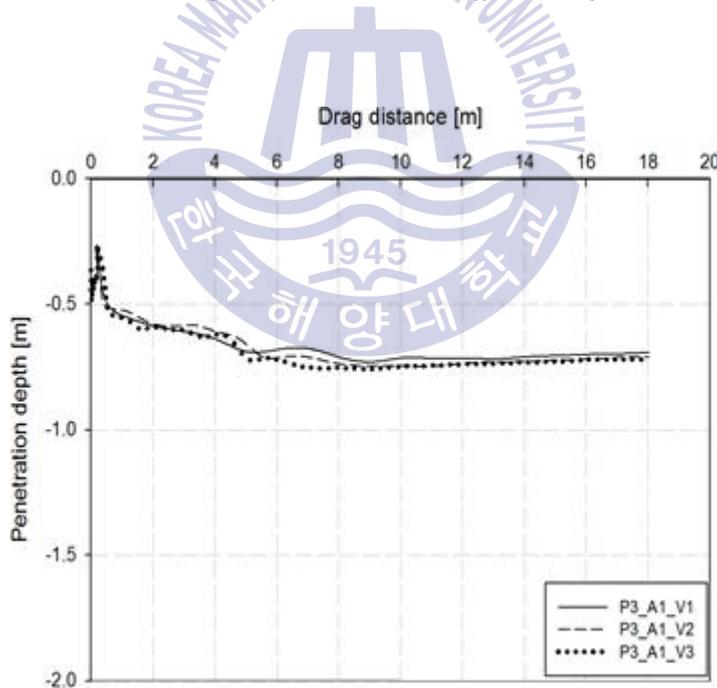


Fig. 3.11 Preceding simulation results of different initial penetration and drag velocity

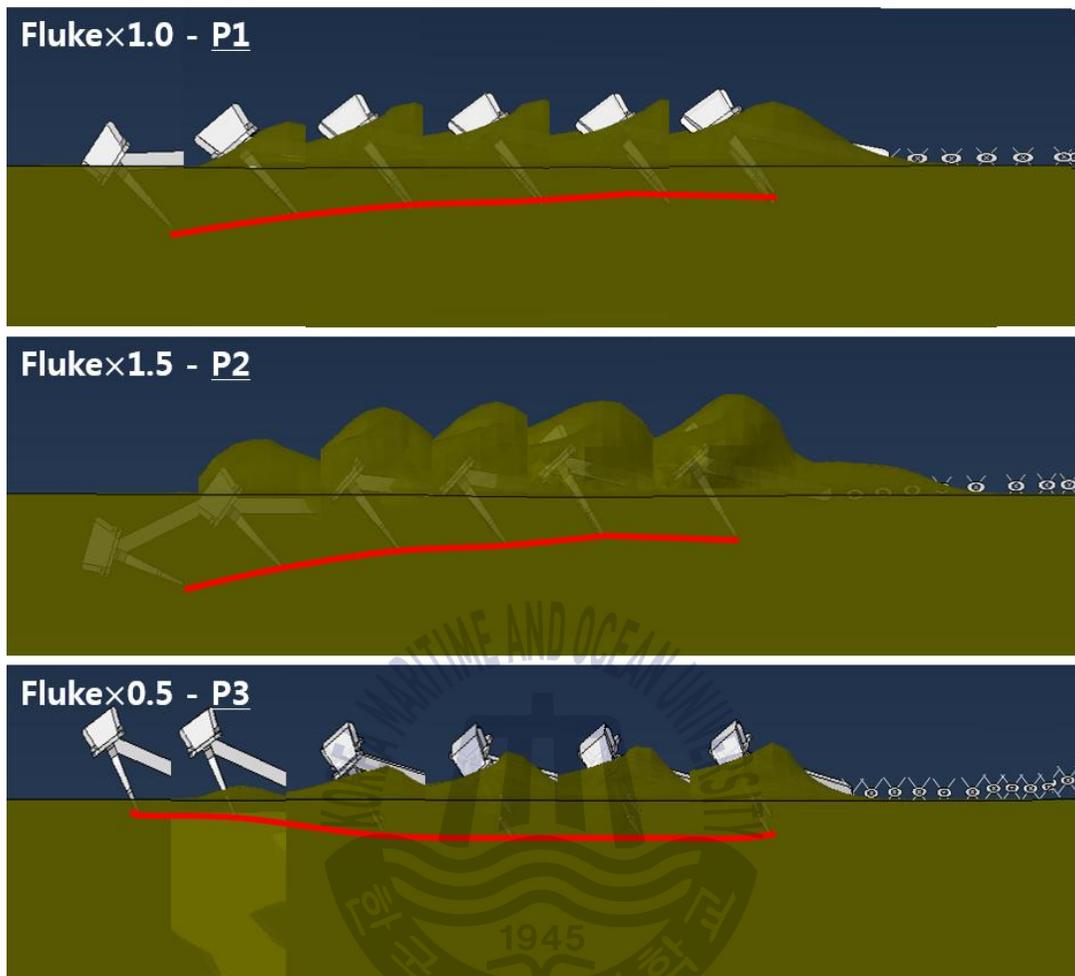


Fig. 3.12 Preceding simulation results of anchor trajectory

또한 끌림 속도는 V1일 때는 얇게 침투 하는 결과가 나타났으나, 마찬가지로 끌림 거리 8m 이상의 거리에서 속도 V2와 V3의 결과와 비교 시 전체적으로 3~6%대로 속도에 의한 차이 또한 비교적 적은 것으로 나타났다. 따라서 앵커의 초기 침투깊이는 Fluke이 해저지반에 완전 침투해있는 상태(P1)로, 끌림 속도는 1.5m/s(V2)로 결정하였다.

4장의 락범 설계 검증에 적용될 앵커와 락범의 이격거리는 Fig 3.9의 P1의 결과와 Fig 3.10의 P2의 결과의 경우 앵커 끌림에 의해 침투깊이가 점차 얕아지고 끌림 거리 8m 이후 침투깊이가 일정해지는 경향을 보였으며, 이는 끌림 거리 8m 이전 해저케이블과 충돌해야 보수적인 설정임을 나타내고 있다. 반대로 Fig 3.11의 P3의 결과는 앵커 끌림에 의해 침투깊이가 점차 깊어지고 끌림거리 8m 이후 침투깊이가 일정해지는 경향을 보였으며, 이는 끌림거리 8m 이후 해저케이블과 충돌해야 보수적인 설정임을 나타내고 있다. 이처럼 침투깊이가 일정해지는 끌림 거리를 반영하여 앵커와 락범의 이격거리는 8m로 결정 하였다.

따라서 본 주묘에 의한 위험성 분석을 위해 선행해석에 의해 결정된 앵커 주묘 시나리오를 Fig. 3.13에 나타내었다.

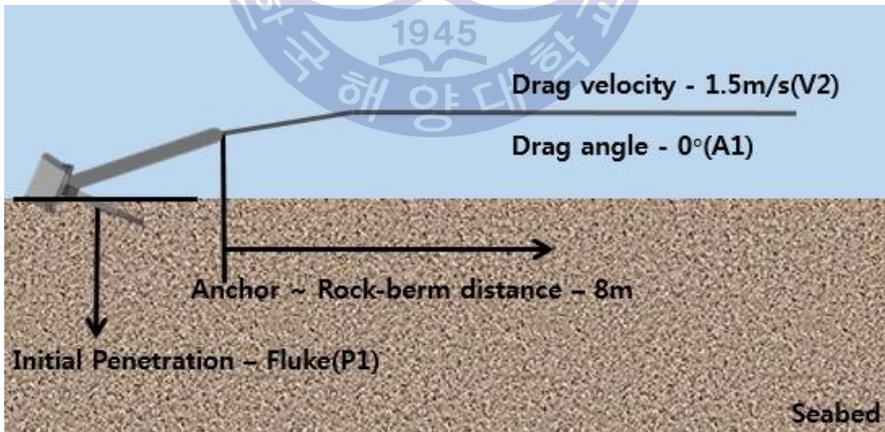


Fig. 3.13 Determined anchor dragging scenario

3.3 앵커 주묘에 의한 충돌 해석

앵커 주묘에 의한 충돌 해석은 3.2절의 선행해석으로 산정된 앵커 주묘 시나리오를 적용하여 실시하였으며, 산정된 시나리오를 적용하여 앵커가 주묘로 인해 해저지반 내 매설된 파이프라인과 충돌하면 파이프라인은 파괴 및 오장동이 예상되므로 안전하지 않다는 해석상 설정을 하였다.

또한 선행해석과 동일한 유한요소 해석기법과 3차원 유한요소 모델링을 적용하고 해저지반의 성질을 3가지(Soft clay, Loose sand, Dense sand)로 적용하여 각기 다른 해저지반에서의 앵커 주묘 시 침투되는 깊이를 산정하여, 매설된 파이프라인과의 충돌 유무를 예측하여 위험성을 분석하는 개념으로 충돌해석을 실시하였다.

마찬가지로 앵커 주묘 시 침투되는 깊이는 앵커의 최하단부인 Fluke 끝부분의 Node Point의 궤적을 추적하여 산정 하였다.



3.4 해석 결과 및 위험성 분석

본 주묘에 의한 충돌해석은 선행해석에 의해 결정된 주묘 시나리오 개념을 적용하여 해저지반 성질에 따른 앵커 침투깊이를 산정하여 파이프라인과의 충돌 유무를 판단하여 위험성을 분석하였고 해저지반 성질에 따른 앵커 침투깊이에 대한 시뮬레이션 앵커 궤적 결과를 Fig. 3.14에 나타내었다.

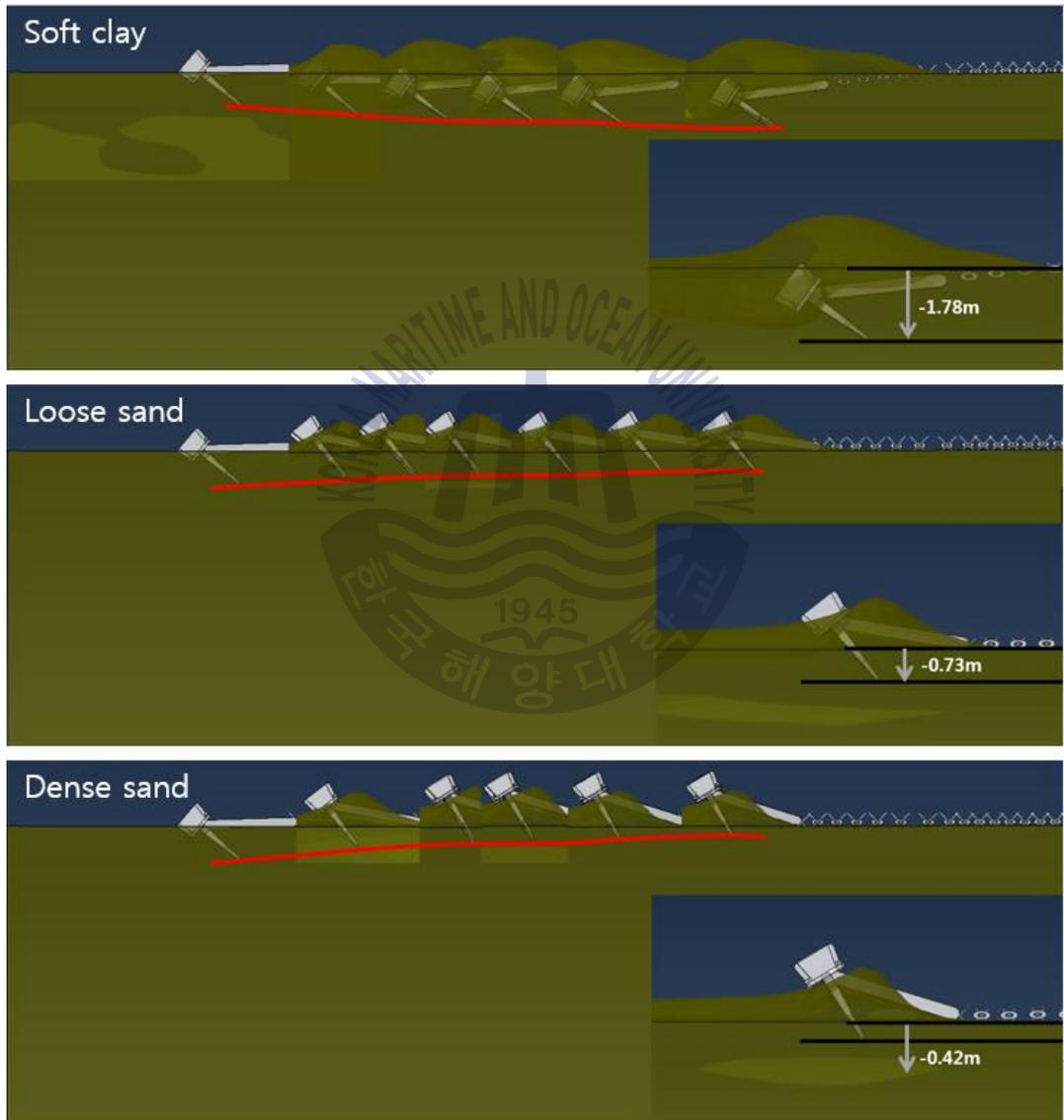


Fig. 3.14 Simulation results of anchor trajectory

Fig. 3.14의 앵커 주묘에 의한 궤적은 지반의 성질에 따라 차이를 보였으며, Soft clay에서는 초기 설정된 침투깊이보다 더 깊게 침투되었고, Loose sand와 Dense sand에서는 초기 설정된 침투깊이보다 얇게 침투되며 빠져나오는 결과가 나타났다.

또한 앵커 주묘에 의한 해저지반 침투깊이가 일정해지기 시작하는 8m일 때의 침투되는 결과를 Fig. 3.14의 각 해저지반에 따라 아래쪽에 나타내었다. 결과를 보면 단단한 지반일수록 8m이상의 거리에서 침투되는 깊이가 점점 줄어들어 들을 알 수 있었다. 하지만 파이프라인이 매설된 깊이에 따라 앵커 주묘에 의해 충돌이 발생할 것을 예상할 수 있다. 앵커가 주묘되는 거리에 따른 각 해저지반 성질 별 앵커 침투깊이에 대한 수치를 Fig. 3.15 ~ 17에 나타내었다.

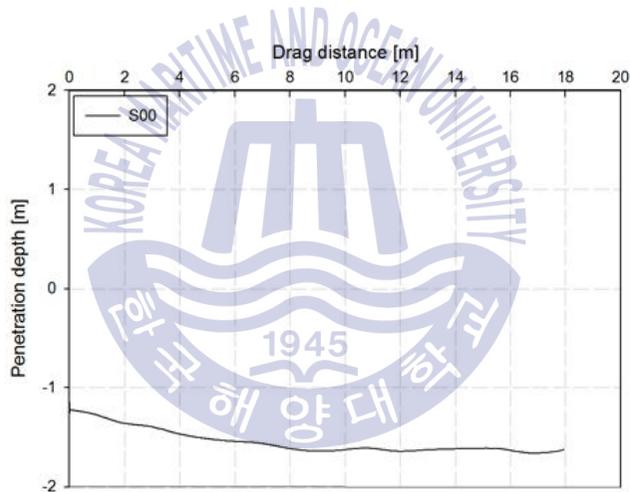


Fig. 3.15 Result of anchor penetration depth(Soft clay)

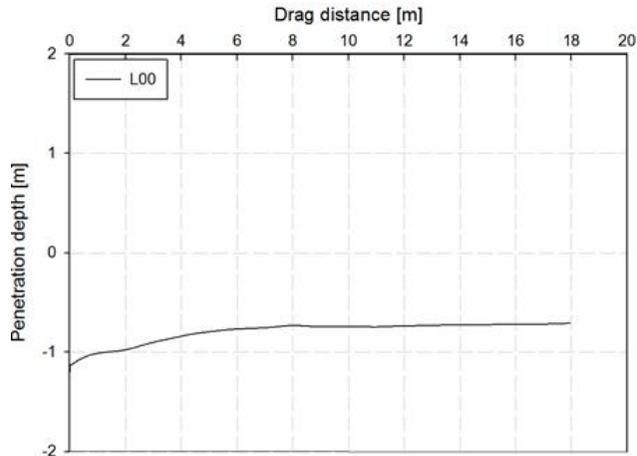


Fig. 3.16 Result of anchor penetration depth(Loose sand)

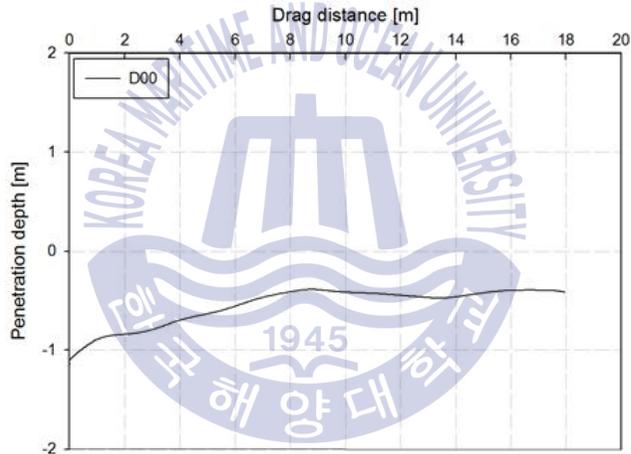


Fig. 3.17 Result of anchor penetration depth(Dense sand)

결과 그래프에서 알 수 있듯이 해저면(0m)를 기준으로 모든 해저지반 물성에서 앵커가 주묘에 의해 침투되는(-값)것을 확인 할 수 있었다.

하지만 모든 해석 Case에서 앵커가 8m이상 끌리며 해저지반 아래로 침투되었는데 이는 매설된 깊이에 따라 파이프라인과 충돌 할 위험이 있다는 것으로 간주 할 수 있으며 충돌로 인해 파괴 될 수 있다고 판단할 수 있다.

본 앵커 주묘로 인한 안정성 분석 결과는 Soft clay로 조성된 해저지반의 경우 1.78m 이상의 깊이로 파이프라인이 매설되어야 안정성이 보장되며, Loose sand는 0.75m, Dense sand는 0.42m이상의 깊이로 매설되어야 파이프라인의 안정성이 보장됨을 알 수 있었고 그 이하로 매설된 파이프라인의 경우 안정성이 보장되지 않음을 의미 할 수 있다.

이는 모든 해저지반 성질에 따라 1m이상으로 매설되어야 안전한, 앵커 투묘에 의한 안정성 분석 결과와 다소 차이를 보이고 있으나 비교적 비슷한 양상의 결과를 보여주고 있었다. 따라서 앵커 투묘 및 주묘에 의해 분석된 위험성에 대해 추가 보호공법 적용 및 시공되어야 한다.

보호공법인 락범을 적용한 파이프라인의 앵커 투묘 및 주묘에 의한 안정성 검토를 본 연구의 4장에서 다루도록 하겠다.



제 4장 추가 보호를 위한 락범 설계

4.1 추가 보호공법 방안

해저에 설치되는 파이프라인을 외력으로부터 보호하기 위해 다양한 보호공법이 적용되어 지고 있다. 먼저 Fig. 4.1과 같이 해저지반을 굴착하여 파이프라인을 매설하는 트렌칭·백필링(Trenching and backfilling)시스템의 매설공법도 보호공법에 해당하며, 사석으로 매설 및 설치된 파이프라인 상부를 덮는 락범(Rock-berm) 보호공법이 주로 적용된다. 또한 콘크리트 덩트를 이용한 보호공법 및 유연콘크리트 매트리스를 이용한 보호공법등 다양한 보호공법이 설치된 구조물들을 보호하기 위해 적용되어 지고 연구되어 왔다.

하지만 보호구조물로 피복하여 보호하는 공법은 주로 소규모나 천해역에서의 설치공사에 적용되며, 대규모나 심해역 공사 시 주로 트렌칭·백필링 시스템이 적용된다. 하지만 심해에 설치된 구조물들의 안정성을 보장하기 위해 일부구간을 추가 보호공법이 적용되어야 하며, 시공성 및 경제성을 고려할 때 락범을 이용한 보호공법이 주로 적용된다. 따라서 본 논문에서는 추가 보호공법 방안으로 락범을 선정하여, 락범 단면을 설계하고 2장, 3장에서 다뤘던 앵커 투묘 및 주묘에 의해 분석된 위험성을 낮추기 위한 시뮬레이션을 실시하여 설계된 락범 단면을 검증하였다.

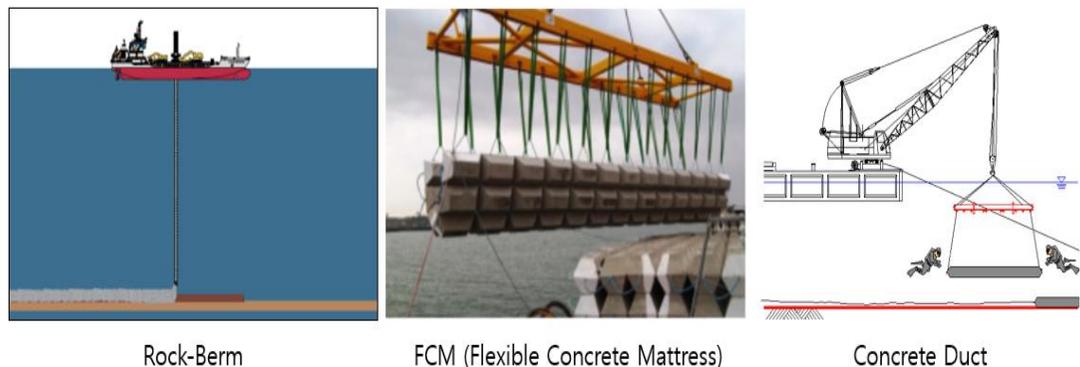


Fig. 4.1 Types of additional protection methods

4.2 추가 보호를 위한 락범 단면 설계

앵커가 투묘 및 주묘 시 매설된 파이프라인은 매설깊이에 따라 위험성을 나타내었다. 이처럼 투묘 및 주묘에 의해 위험성이 있는 구간에 대해 추가 보호공법인 락범을 시공하여 위험성을 일부 낮출 수 있게 된다. 하지만 추가 보호를 위한 락범 시공에 대해 설계기준이나 시공기준이 없는 실정이며, 본 연구에서는 추가 보호공법인 락범을 설계하여 투묘 및 주묘 시물레이션을 실시하고, 설계된 락범을 검증하여 최종적인 매설된 파이프라인 및 해저지반 성질에 따른 추가 보호공법 락범 설계기준을 제시 하고자 한다.

앵커 투묘 및 주묘에 의한 시물레이션을 위해 먼저 락범 단면에 대한 설계를 실시하였고 이를 Fig. 4.2에 나타내었다. 그림과 같이 락범 단면에 대한 설계는 락범 상단폭을 2m로, 하단폭을 8m로 유지하며 보강되는 높이를 0.5m와 1.0m, 1.5m로 변경하여 설계하였다. 다음과 같은 설계된 락범 단면을 변경하며 위험성을 나타내는 해저지반 성질에 따른 파이프라인의 매설깊이에 대해 안전한 락범 단면을 제시하는 앵커 투묘 및 주묘 시물레이션을 실시하였다.

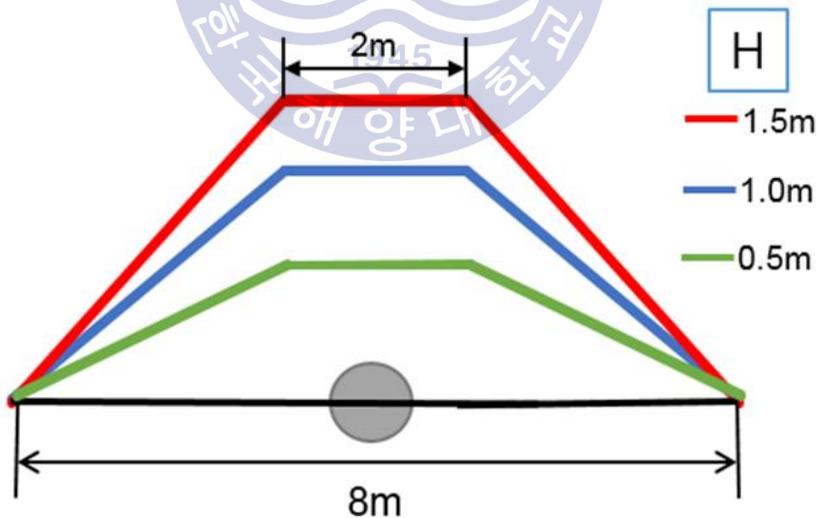


Fig. 4.2 Design of Rock-berm cross section

제 5장 설계된 락범 단면에 대한 검증

앞서 설계된 락범 단면을 검증하기 위해 2장, 3장의 위험성을 나타내는 해저 지반 성질에 따른 파이프라인의 매설깊이에 대해 설계된 락범 단면을 보강하여 앵커 투묘 및 주요 시뮬레이션으로 분류하여 검증하였다.

5.1 앵커 투묘에 의한 설계된 락범 단면 검증

앵커 투묘에 의한 설계된 락범 단면 검증은 앞서 수행된 2장의 앵커 투묘에 의한 위험성 분석과 동일하게 중단속도로 낙하하는 10.5ton의 Stockless anchor 와 해저지반 내 매설된 파이프라인을 모델링 후 같은 해석 조건에서 설계된 락범을 모델링을 추가하여 앵커 투묘 시뮬레이션을 수행하였다.

5.1.1 설계된 락범의 유한요소 모델링

설계된 락범 검증을 위해 먼저 유한요소 모델링은 사석으로 구성되는 락범의 경우 SPH(Smooth Particle Hydrodynamic)기법과 DEM(Discrete element method)와 같은 개별적인 Particle로 모델링하여 앵커 충돌로 인한 락범 거동을 구현할 수 있다. 하지만 앵커 투묘에 의한 락범 단면 검증에서는 앵커가 순간적인 충돌을 고려하므로 락범의 사석 거동을 해석하는 관점이 아닌 락범의 보강효과를 검증하기 때문에 락범을 해저지반과 동일한 형태로 형성하고 세가지 높이를 각각 모델링 하였다. 2장에서 앵커 투묘에 의한 위험성 분석의 결과는 해저지반 내 1m이상의 깊이에 매설된 파이프라인의 경우 앵커 투묘로부터 안전한 결과를 보였으므로, 추가 보호공법이 적용이 불필요하므로 본 설계된 락범 단면 검증을 위한 유한요소 모델링 및 시뮬레이션에서 제외 시켰으며, 매설깊이 0m 와 0.5m의 Case에서 보강될 락범만을 모델링 하였다. 최종적으로 모델링된 락범은 매설깊이 0m에서 적용되는 락범을 Fig. 5.1에 나타내었고, 매설깊이 0.5m에서 적용되는 락범을 Fig. 5.2에 나타내었다.

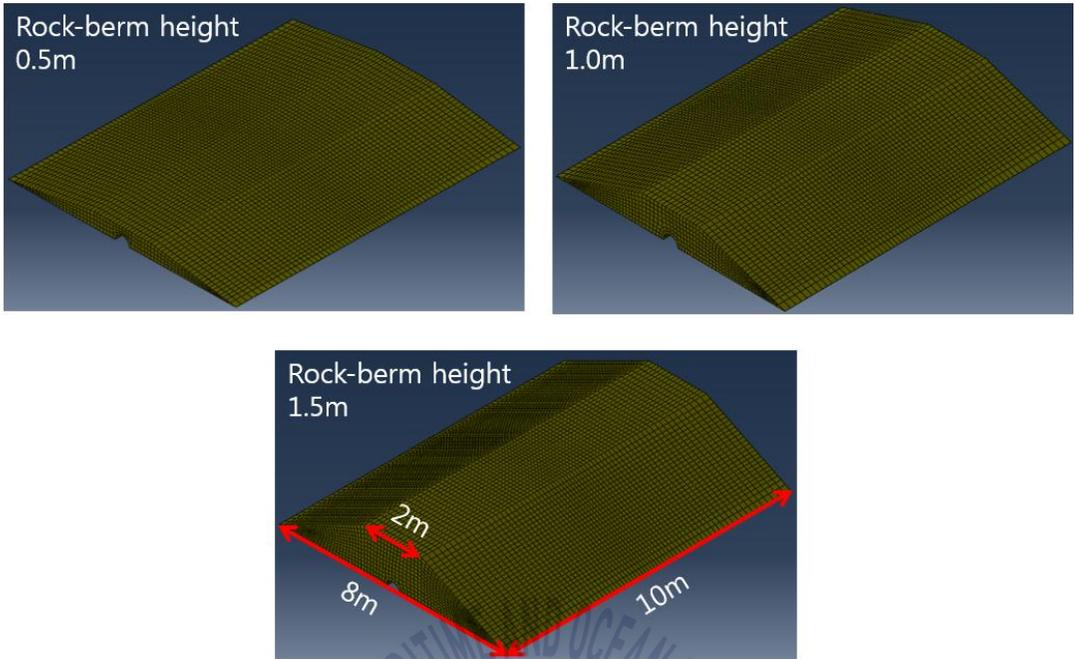


Fig. 5.1 Finite element modeling of Rock-berm (Burial depth 0m)

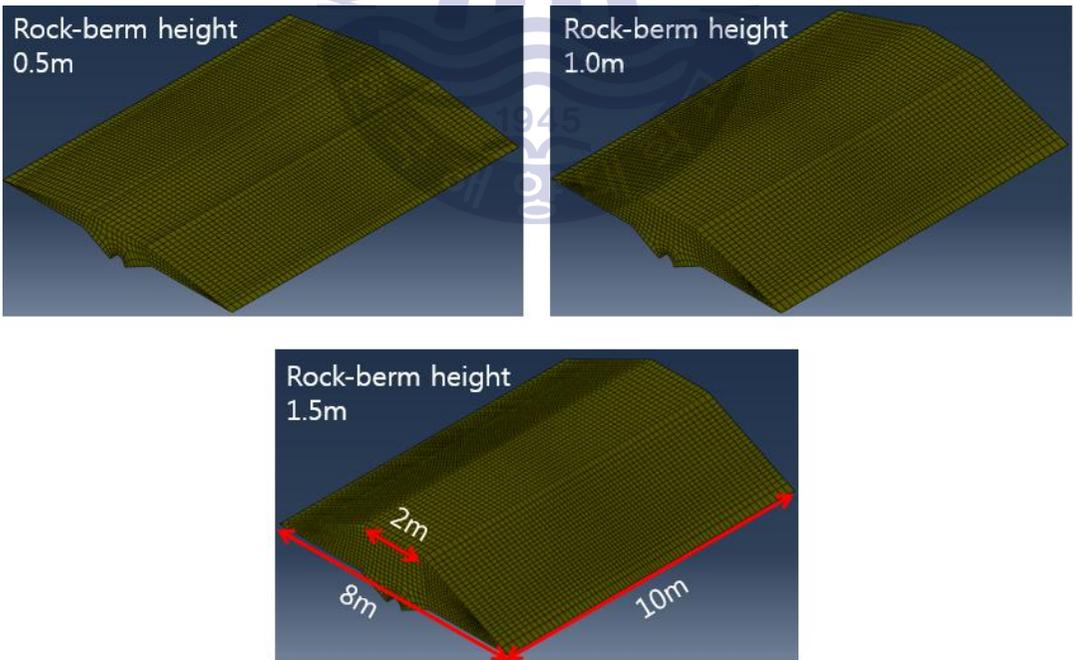


Fig. 5.2 Finite element modeling of Rock-berm (Burial depth 0.5m)

또한 해석에 적용되는 물성치도 마찬가지로 3차원 솔리드 요소를 사용하여 변형이 가능한 탄소성체로 모델링 되었고, Mohr-coulomb 구성모델을 적용하였다. 여기서, 락범은 사석으로 구성되며 점착력을 갖지 않으므로, 내부마찰각 (Inner friction angle, ϕ) 값을 크게 적용하고 점착력(Cohesion, c)을 비교적 작게 적용하여 락범을 구성하였다. 해석에 적용된 락범의 역학적 물성을 Table 5.1에 나타내었다. 또한 락범이 추가된 앵커 투묘에 의한 전체 유한요소해석 모델을 Fig. 5.3와 Fig. 5.4에 나타내었다. 해석이 수행될 Case가 많아짐에 따라 해석지반 성질의 앞 글자와, 매설의 B를 사용하여 매설깊이를 뒤 숫자를 구분하였으며, 락범의 R을 사용하여 락범 높이를 뒤 숫자로 구분하였고 정의된 Case를 Table 5.2에 정리하였다.

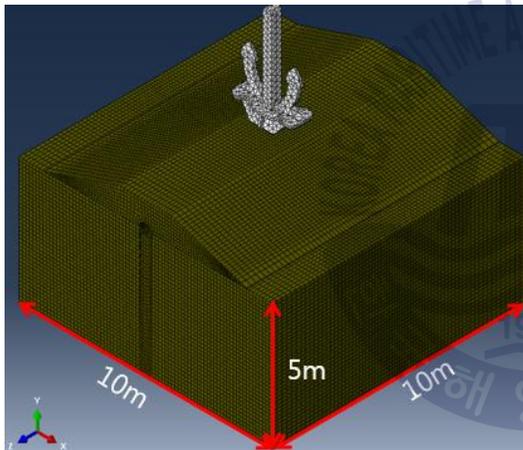


Fig. 5.3 Finite element model
(Burial depth 0m, Rock-berm height 1.0m)

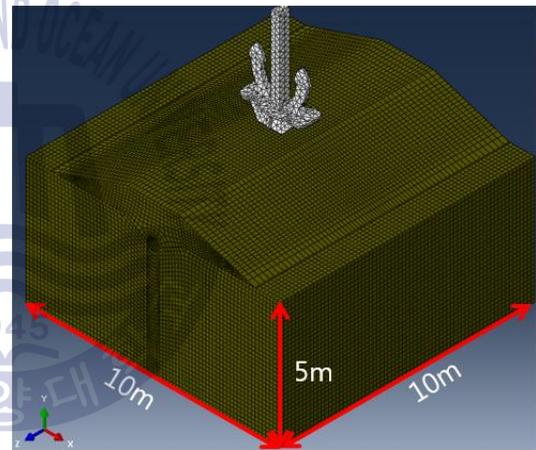


Fig. 5.4 Finite element model
(Burial depth 0.5m, Rock-berm height 1.0m)

Table 5.1 Material properties of rock-berm

	γ_{sat} [kg/m ³]	ϕ [°]	c [kPa]
Rock-berm	2650	48	0.05

Table 5.2 Analysis Case

		Burial depth 0m - B1	Burial depth 0.5m - B2
Soft clay	Rock-berm height 0.5m - R1	S_B1_R1	S_B2_R1
	Rock-berm height 1.0m - R2	S_B1_R2	S_B2_R2
	Rock-berm height 1.5m - R3	S_B1_R3	S_B2_R3
Loose sand	Rock-berm height 0.5m - R1	L_B1_R1	L_B2_R1
	Rock-berm height 1.0m - R2	L_B1_R2	L_B2_R2
	Rock-berm height 1.5m - R3	L_B1_R3	L_B2_R3
Dense sand	Rock-berm height 0.5m - R1	D_B1_R1	D_B2_R1
	Rock-berm height 1.0m - R2	D_B1_R2	D_B2_R2
	Rock-berm height 1.5m - R3	D_B1_R3	D_B2_R3

5.1.2 락범을 적용한 앵커 투묘 해석 결과 및 위험성 분석

본 투묘에 의한 설계된 락범 검증 해석 결과에서도 2장과 마찬가지로 파이프 라인의 항복강도(Yield strength, 360Mpa)와 해석의 Von-mises stress 결과를 비교하여 설계된 락범으로 보강 시 위험성을 얼마나 줄일 수 있는지를 분석하였고 그를 토대로 앵커 투묘에 의한 해저지반 성질 및 매설깊이에 따른 락범 높이를 선정하였다.

먼저 해저지반 성질에 따라 분류된 Case별로 정리하여 추가 보호공법인 락범 보강전의 위험성에 대한 해석 결과와 락범 높이를 변경한 앵커 투묘에 의해 발

생되는 파이프라인의 최대 Von-mises stress 해석의 비교 결과를 Fig. 5.5 ~ 5.10에 나타내었다.

Fig. 5.5는 Soft clay로 조성된 해저지반 내 0m로 일부 매설된 파이프라인의 앵커 투묘에 의한 결과이다. 결과를 보면 락범 보강에 의해 파이프라인에 발생되는 최대 Von-mises stress가 줄어드는 것을 알 수 있다.

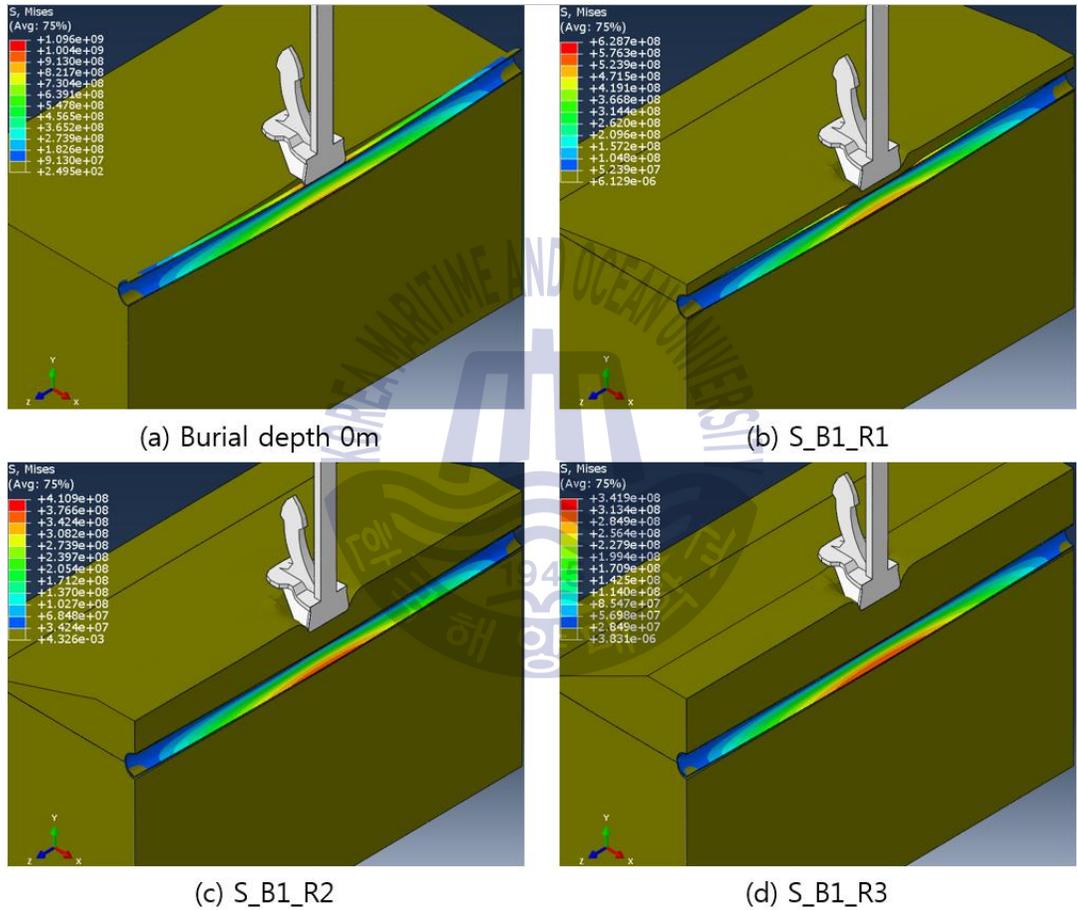


Fig. 5.5 Results of maximum von-mises stresses (S_B1)

Fig. 5.6은 Soft clay로 조성된 해저지반 내 0.5m로 매설된 파이프라인의 앵커 투묘에 의한 결과이다. 결과를 보면 락범 보강에 의해 파이프라인에 발생하는 최대 Von-mises stress가 줄어드는 것을 알 수 있으나, 락범 높이가 1.5m이상 즉 R3에서 Von-mises stress가 파이프라인의 항복강도를 초과하지 않는 결과를 보였고 나머지 Case에서는 락범이 보강되어도 파이프라인이 파괴되는 결과를 보였다.

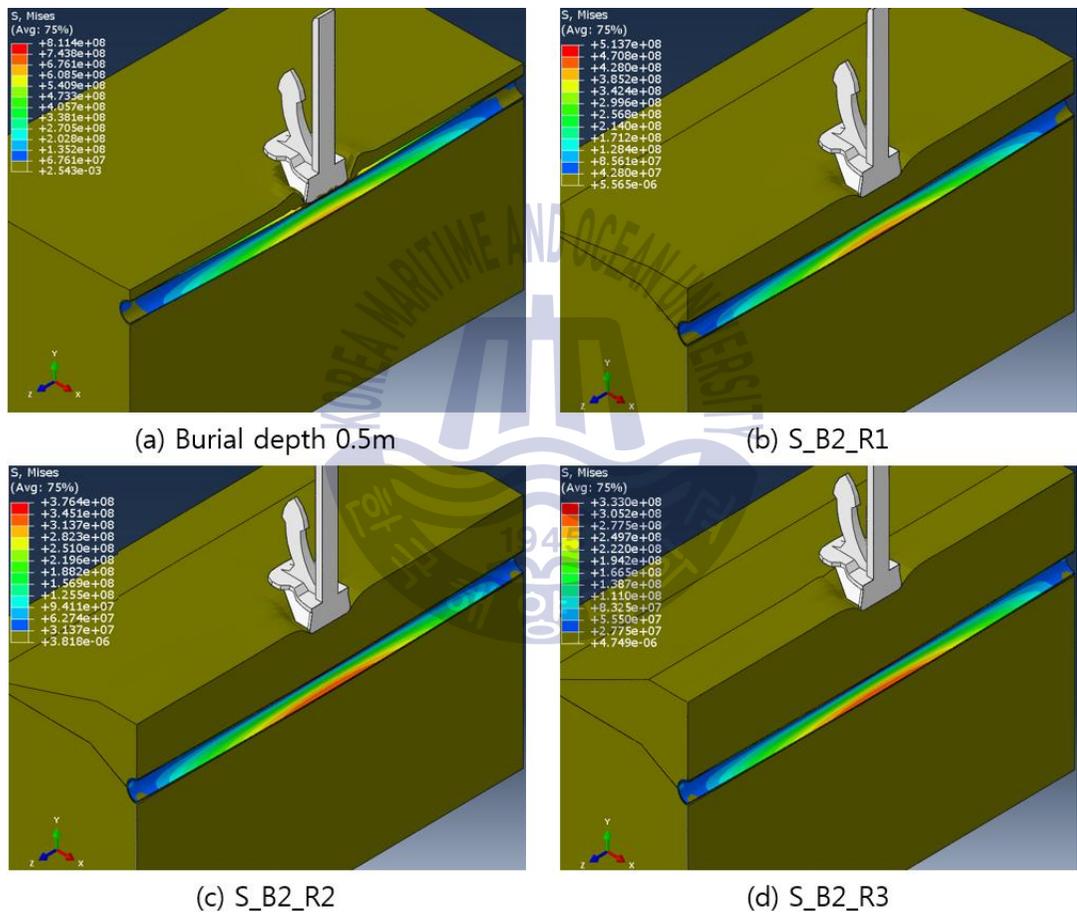


Fig. 5.6 Results of maximum von-mises stresses (S_B2)

Fig. 5.7는 Loose sand로 조성된 해저지반 내 0m로 일부 매설된 파이프라인의 앵커 투묘에 의한 결과이다. 결과를 보면 락범 보강에 의한 결과 락범 높이가 1.5m(R3) Case에서 Von-mises stress가 파이프라인의 항복강도를 초과하지 않는 결과를 보였고, 1m(R2) Case에서는 비교적 적은 차이로 파이프라인의 항복강도를 초과하는 것을 알 수 있었다.

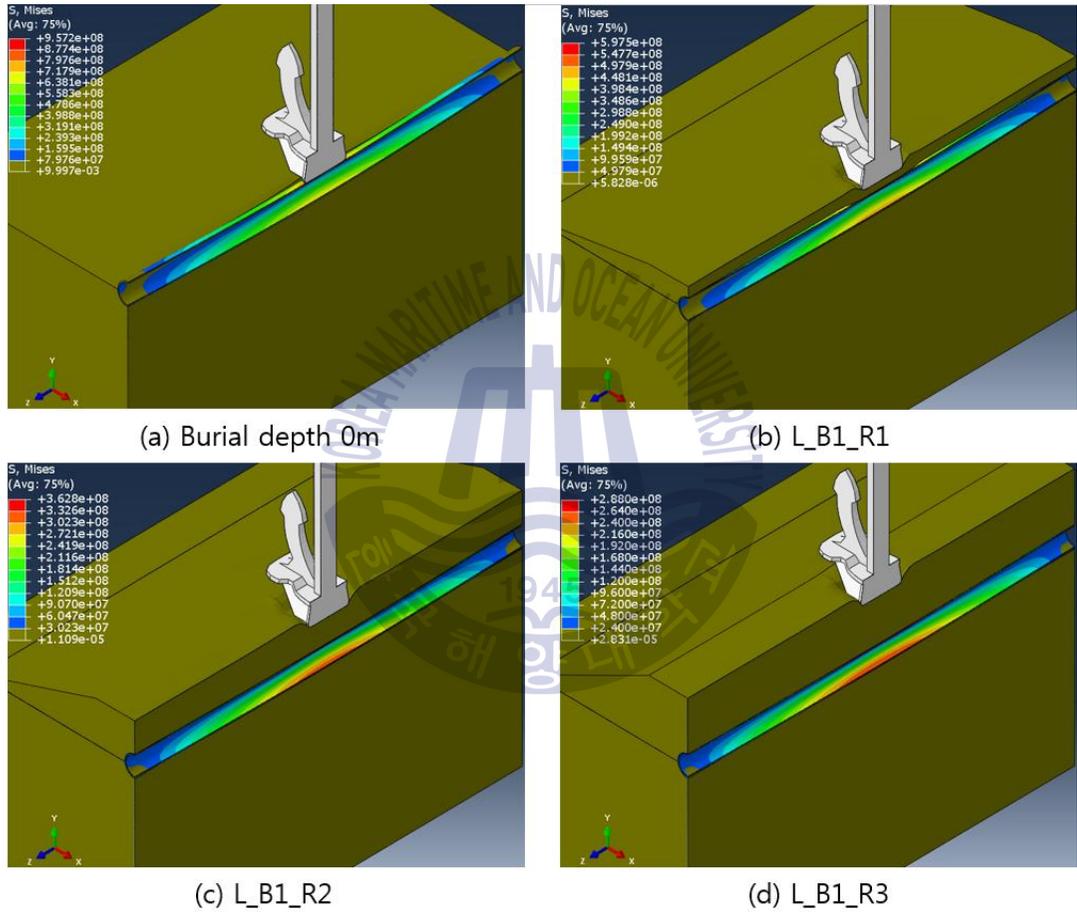


Fig. 5.7 Results of maximum von-mises stresses (L_B1)

Fig. 5.8는 Loose sand로 조성된 해저지반 내 0.5m로 매설된 파이프라인의 앵커 투묘에 의한 결과이다. 결과를 보면 락범 보강에 의한 결과 락범 높이가 1.5m(R3) Case와 1m(R2) Case에서 Von-mises stress가 파이프라인의 항복강도를 초과하지 않는 결과를 보였고 0.5m(R1) Case만 락범이 보강되어도 파이프라인이 안전하지 않은 결과가 나타났다.

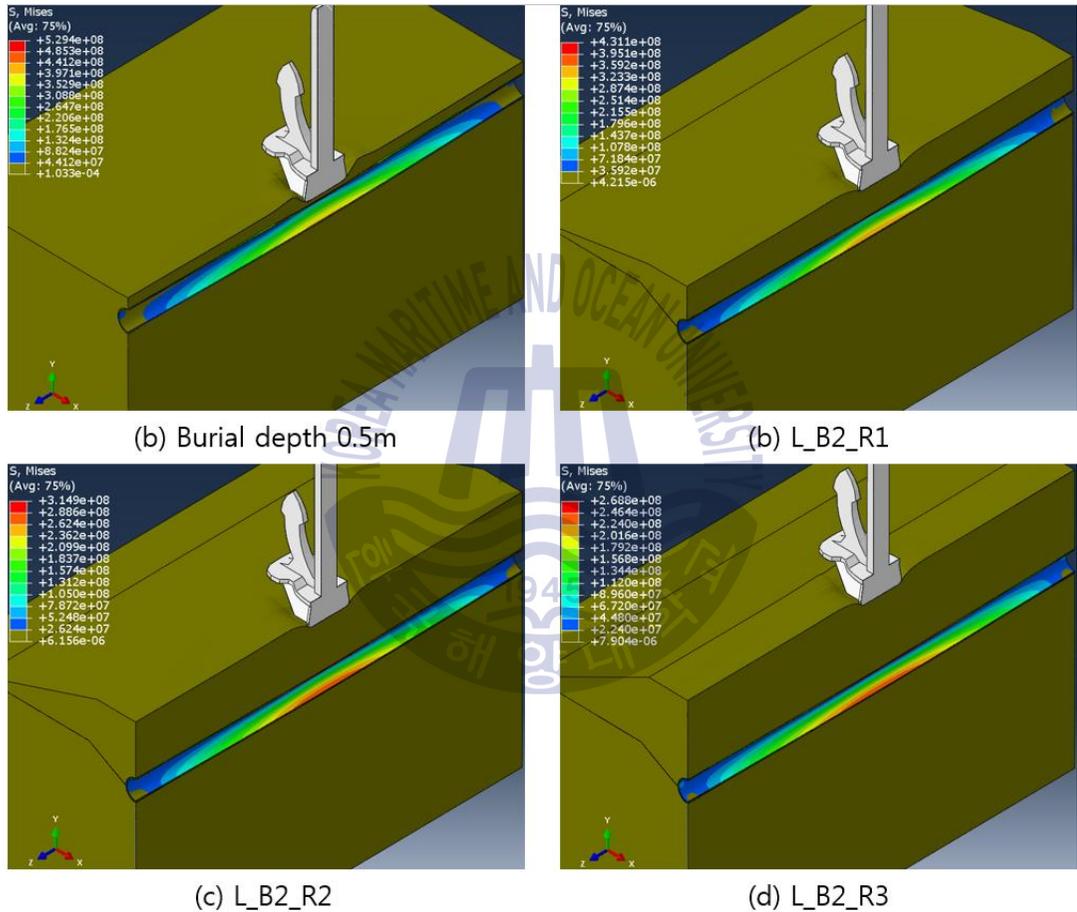


Fig. 5.8 Results of maximum von-mises stresses (L_B2)

Fig. 5.9는 Dense sand로 조성된 해저지반 내 0m로 일부 매설된 파이프라인의 앵커 투묘에 의한 결과이다. 결과를 보면 앞의 Loose sand와 Soft clay지반과 다르게 0m로 일부 매설된 파이프라인임에도 락범 높이가 1.5m(R3) Case와 1m(R2) Case에서 Von-mises stress가 파이프라인의 항복강도를 초과하지 않는 결과를 보였다.

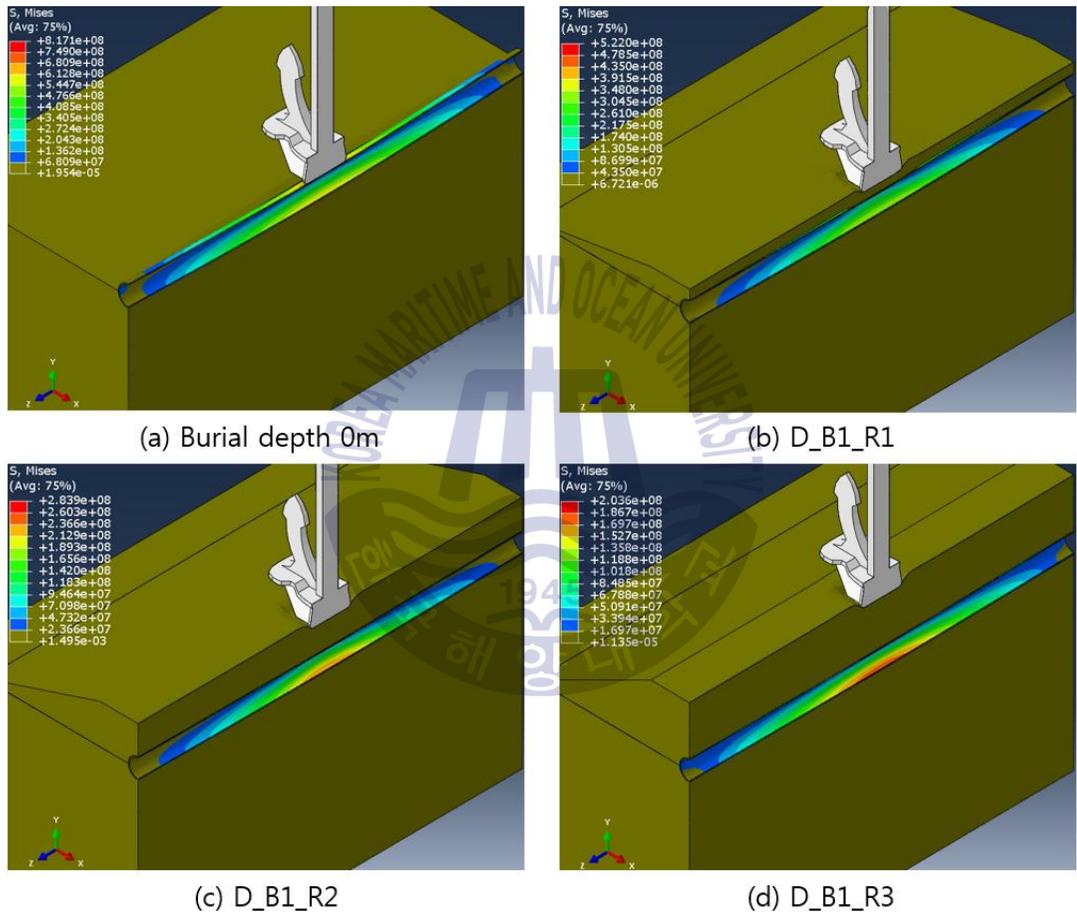


Fig. 5.9 Results of maximum von-mises stresses (D_B1)

Fig. 5.10은 Dense sand로 조성된 해저지반 내 0.5m로 매설된 파이프라인의 앵커 투묘에 의한 결과이다. 결과를 보면 Dense sand로 조성된 해저지반내 0.5m로 매설된 파이프라인의 경우 락범 높이 0.5m(R1) Case에서도 파이프라인의 항복강도를 초과하지 않는 Von-mises stress 결과가 나타났다.

모든 해석 결과 값의 정확한 비교를 위해 가장 큰 Von-mises stress가 발생하는 파이프라인 중앙에서의 모든 해석 Case에 대한 시간에 따른 이력을 해저지반과 매설깊이 별로 분류하여 Fig. 5.11 ~ 16와 같이 그래프로 나타내었다.

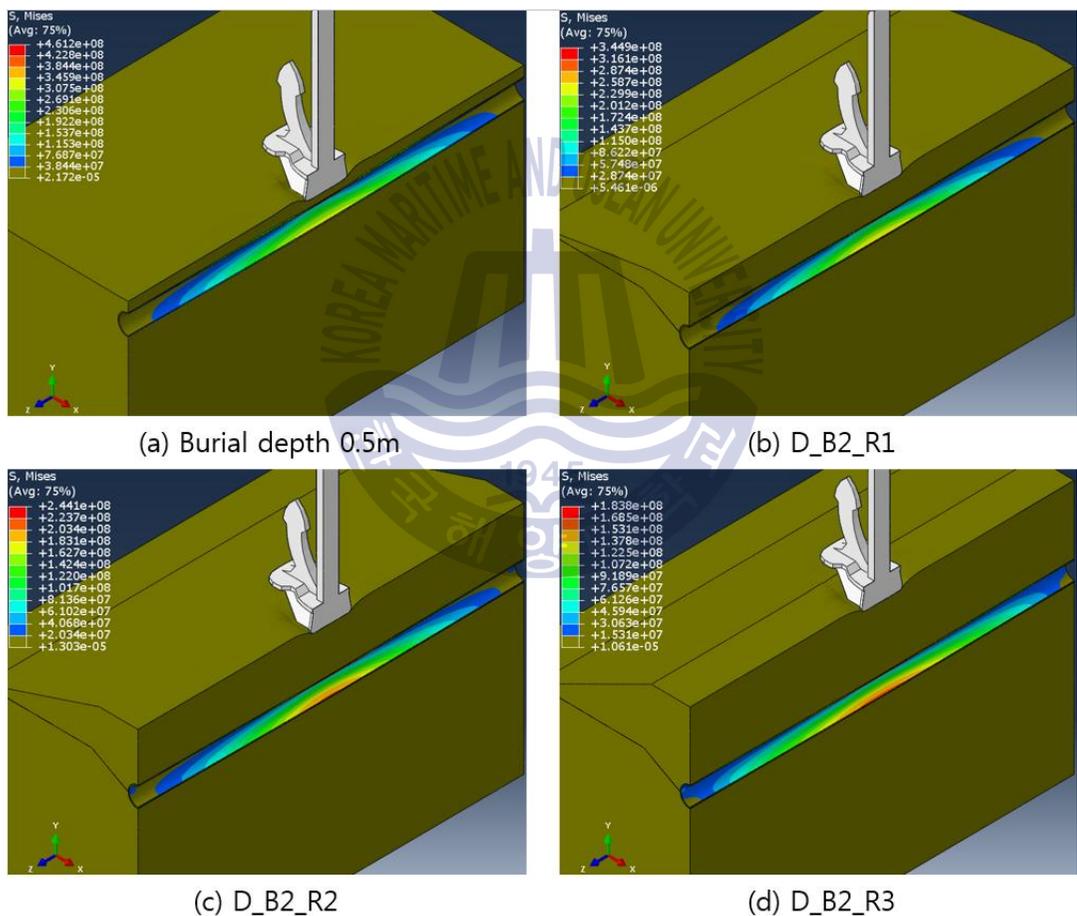


Fig. 5.10 Results of maximum von-mises stresses (D_B2)

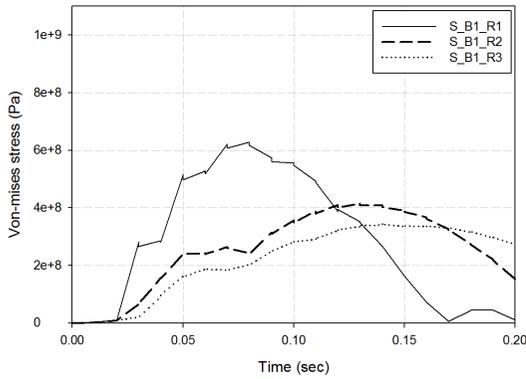


Fig. 5.11 Result of von-mises stress probe(S_B1)

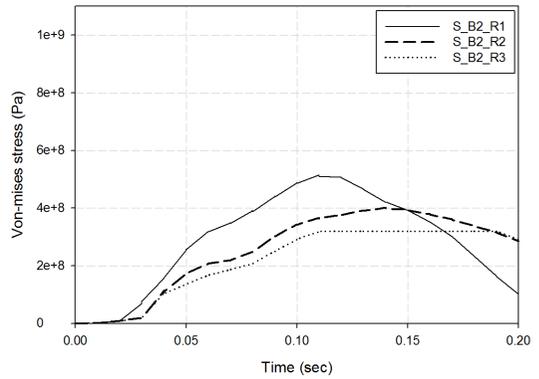


Fig. 5.12 Result of von-mises stress probe(S_B2)

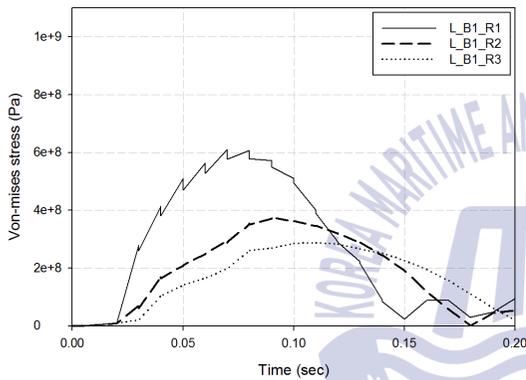


Fig. 5.13 Result of von-mises stress probe(L_B1)

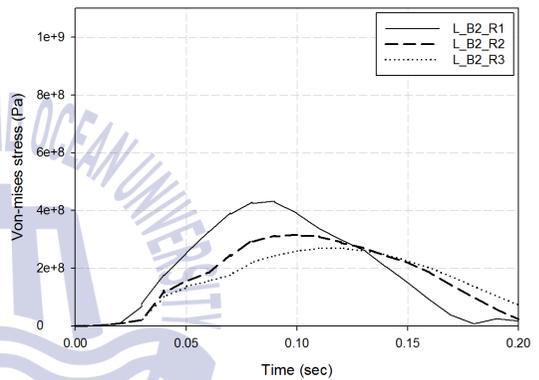


Fig. 5.14 Result of von-mises stress probe(L_B2)

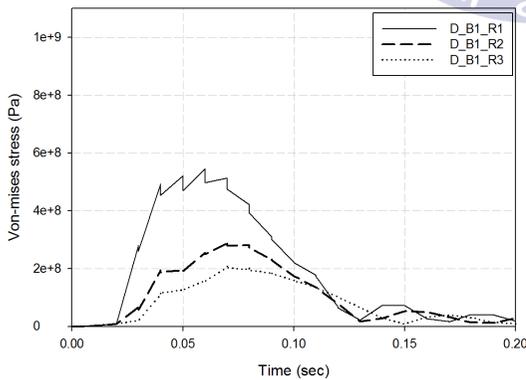


Fig. 5.15 Result of von-mises stress probe(D_B1)

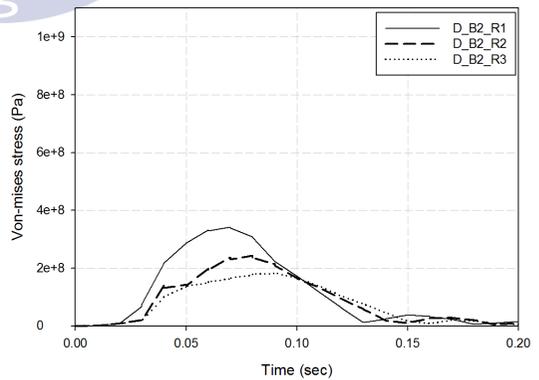


Fig. 5.16 Result of von-mises stress probe(D_B2)

투묘에 의한 설계된 락범 단면 검증 결과 및 위험성 분석에 대해 정리하면 Soft clay로 조성된 해저지반의 경우 매설깊이 0m, 0.5m 모두 락범 적용이 요구되었으며, 락범 높이 0.5m, 1m에서는 파이프라인이 안전하지 못하며 높이 1.5m이상의 락범이 적용되어야 파이프라인을 앵커 투묘로부터 안전하게 보호할 수 있는 결과를 보였다.

또한 Loose sand로 조성된 해저지반의 경우 마찬가지로 매설깊이 0m, 0.5m 모두 락범 적용이 요구되었고, 매설깊이 0m의 경우 높이 1.5m 이상의 락범이 적용 되어야 파이프라인을 앵커 투묘로부터 안전하게 보호할 수 있었으며, 매설깊이 0.5m의 경우 높이 1m의 락범이 적용되어도 파이프라인을 투묘로부터 안전하게 보호할 수 있는 결과가 나타났다.

마지막으로 Dense sand로 조성된 해저지반의 경우도 매설깊이 0m, 0.5m 모두 락범 적용이 요구되었으며, 매설깊이 0m의 경우 높이 1m의 락범이 적용 되어도 파이프라인을 앵커 투묘로부터 안전하게 보호할 수 있었으며, 매설깊이 0.5m의 경우 높이 0.5m의 락범만 적용되어도 파이프라인을 투묘로부터 안전하게 보호할 수 있는 결과가 나타났다.

본 앵커 투묘에 의한 설계된 락범 단면 검증을 통해 해저지반 성질 및 파이프라인의 매설깊이에 따라 요구되는 락범 높이를 정리하여 5.3절에서 자세히 다루도록 하겠다.

5.2 앵커 주묘에 의한 설계된 락범 단면 검증

앵커 주묘에 의한 설계된 락범 단면 검증은 앞서 수행된 3장의 앵커 주묘에 의한 위험성 분석과 동일한 보수적인 해석 시나리오로 락범 검증하기 위해 선행해석에 의해 결정된 앵커 주묘 해석 시나리오인 앵커 끌림 속도(1.5m/s, V2), 앵커 끌림 각도(0° , A1), 앵커와 락범 이격거리(8m)를 적용하였다.

5.2.1 설계된 락범의 유한요소 모델링

앵커 주묘에 의한 설계된 락범 검증을 위해 먼저 유한요소 모델링은 사석으로 구성되는 락범의 경우 개별적인 Particle로 모델링하여 앵커 주묘로 인한 락범 거동을 구현할 수 있다. 하지만 앵커 주묘와 같은 대변형을 해석 하기 위해 해저지반을 3장과 같이 CEL기법을 적용한 Eulerian으로 모사하고, 락범을 개별적인 Particle을 적용한 모델링이 현재 까지 상용 프로그램으로는 연동이 불가능하다. 따라서 투묘 해석과 마찬가지로 사석으로 구성되는 락범의 거동을 해석하는 관점이 아닌 락범의 보강효과를 검증하기 위해 락범을 해저지반과 동일한 형태인 CEL기법을 적용한 Eulerian으로 모사하고 세가지 락범 높이를 각각 모델링 하였다. 또한 3장에서 앵커 주묘에 의한 위험성 분석의 결과는 Soft clay로 조성된 해저지반의 경우 1.78m 이상, Loose sand는 0.75m, Dense sand는 0.42m이상의 깊이로 매설되어야 파이프라인의 안정성이 보장되고 각 해저지반 성질 및 매설깊이에 따라 다른 결과를 보였다. 따라서 본 절의 추가 보호공법인 설계된 락범을 적용하여, 앵커가 체인과 함께 끌릴 때 락범 보강 효과에 의해 해저지반 내로 침투하지 않고 빠져 나올 수 있으며, 락범 보강 높이 변경에 따라 그 효과도 달라질 것이다.

최종적 앵커 주묘 해석에 적용될 설계된 락범의 유한요소 모델링을 Fig. 5.17과 같이 상부길이 2m, 하부길이 8m를 고정하고 락범 높이를 3가지(0.5m, 1.0m, 1.5m)로 모델링 하였으며, 폭을 해저지반의 폭과 맞추어 20m로 모델링 하였다. 또한 락범에 적용되는 역학적 물성치는 5.1절의 앵커 투묘 해석과 동일하며, Table 5.1에 나타내어져 있다.

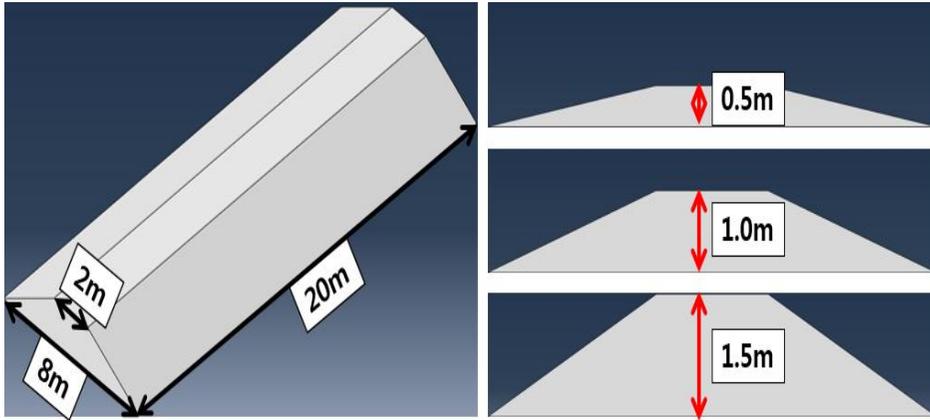


Fig. 5.17 Cross-section of rock-berm modeling

3장의 선행해석에 의해 결정된 앵커 주요 해석 시나리오와 모델링된 락범을 적용한 전체 유한요소해석 모델을 Fig. 5.18에 나타내었다. 또한 해저지반 성질과 설계된 락범 단면에 따른 해석 Case를 Table 5.3에 정의하였다. 정의된 해석 Case 앞 대문자는 조성된 해저지반 성질의 앞 대문자를 인용한 것이며, 뒤 숫자는 설계된 락범 단면의 높이를 의미한다. 예를 들어 L10은 Loose sand로 조성된 해저지반에서 락범높이 1.0m인 해석 Case를 의미한다.

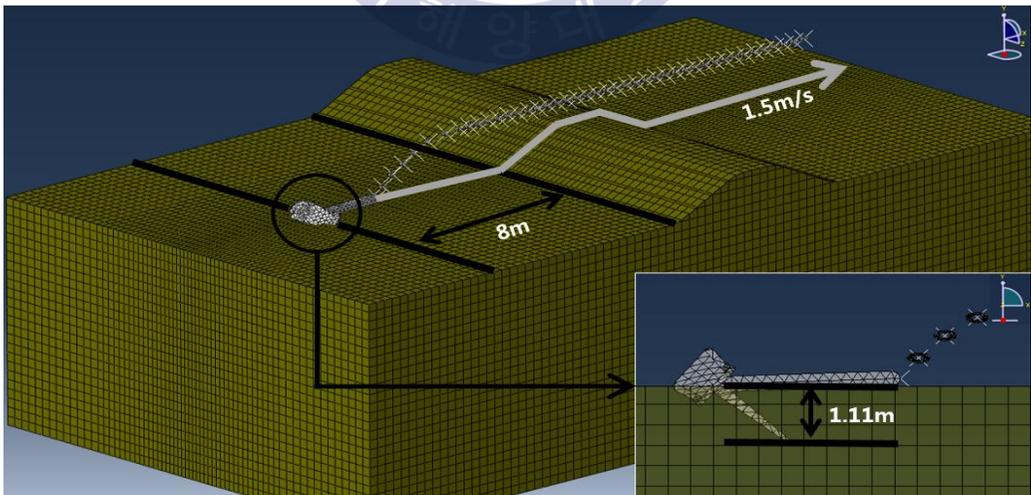


Fig. 5.18 Scenario of anchor dragging analysis

Table 5.3 Dragging analysis case

Simulation case	Seabed type	Rock-berm heights [m]
S05	Soft clay	0.5
S10	Soft clay	1.0
S15	Soft clay	1.5
L05	Loose sand	0.5
L10	Loose sand	1.0
L15	Loose sand	1.5
D05	Dense sand	0.5
D10	Dense sand	1.0
D15	Dense sand	1.5

5.2.2 락범을 적용한 앵커 주묘 해석 결과 및 위험성 분석

본 주묘에 의한 설계된 락범 검증 해석 결과에서도 3장과 마찬가지로 주묘에 의한 앵커의 해저지반 침투깊이를 산정하여 설계된 락범으로 보강 시 파이프라인이 매설된 구간에서의 침투깊이를 얼마나 줄일 수 있는지를 분석하였고 그를 토대로 앵커 주묘에 의한 해저지반 성질 및 매설깊이에 따른 락범 높이를 선정하였다.

먼저 해저지반 성질에 따라 분류된 Case별로 정리하여 추가 보호공법인 락범 보강전의 위험성에 대한 해석 결과와 락범 높이를 변경한 앵커 주묘에 의해 앵커의 해저지반 침투깊이에 대한 해석의 비교 결과를 Fig. 5.19 ~ 5.21에 나타내었다.

Fig. 5.19는 Soft clay로 조성된 해저지반에서의 주묘에 의한 앵커 끌림 시 해저지반 침투깊이에 대한 결과이며, 그림의 아래쪽은 이격거리 8m측 파이프라인이 매설되어 있다 가정되는 구간에서의 앵커 최대 침투깊이를 나타내었다. 결과를 보면 락범 보강에 의해 앵커가 해저지반에 침투되는 깊이가 줄어드는 것을 알 수 있다. 하지만 파이프라인이 매설되어있다 가정하는 이격거리 8m에서의 락범 높이의 최대치인 1.5m를 보강하여도 최대 침투깊이가 해저면(0m)를 기준으로 -0.13m 만큼 침투되는 결과를 보였으며, 이는 파이프라인의 매설깊이에 따라 충돌 할 위험이 있는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 높이 1.5m이상의 락범을 보강해야 앵커 주묘로 인한 위험성이 없음을 보여주고 있다.

Fig. 5.20은 Loose sand로 조성된 해저지반에서의 결과이며, 설계된 락범 높이가 1.0m를 보강하였을 때 해저면을 기준으로 +0.28m의 값으로 침투하지 않는 결과를 보였다. 이는 1.0m 이상의 락범을 보강할 시 매설된 파이프라인에 충돌이 발생하지 않음을 보여주며 위험성이 없음을 나타낸다.

Fig. 5.21은 Dense sand로 조성된 해저지반에서의 결과로 설계된 락범 높이가 0.5m로 가장 높이가 작은 락범을 보강하여도 해저면 기준 +0.43m로 침투되지 않는 결과를 보였다. 따라서 0.5m의 락범 만큼 보강하여도 조밀한 지반에서는 앵커 주묘에 의한 위험성은 없음을 보여주고 있다.

모든 해석의 결과 값을 보다 정확히 확인하기 위해 끌림 거리에 따른 앵커의 해저지반 침투깊이에 대한 전체 해석 Case를 Fig. 5.22 ~ 24와 같이 그래프로 나타내었다.

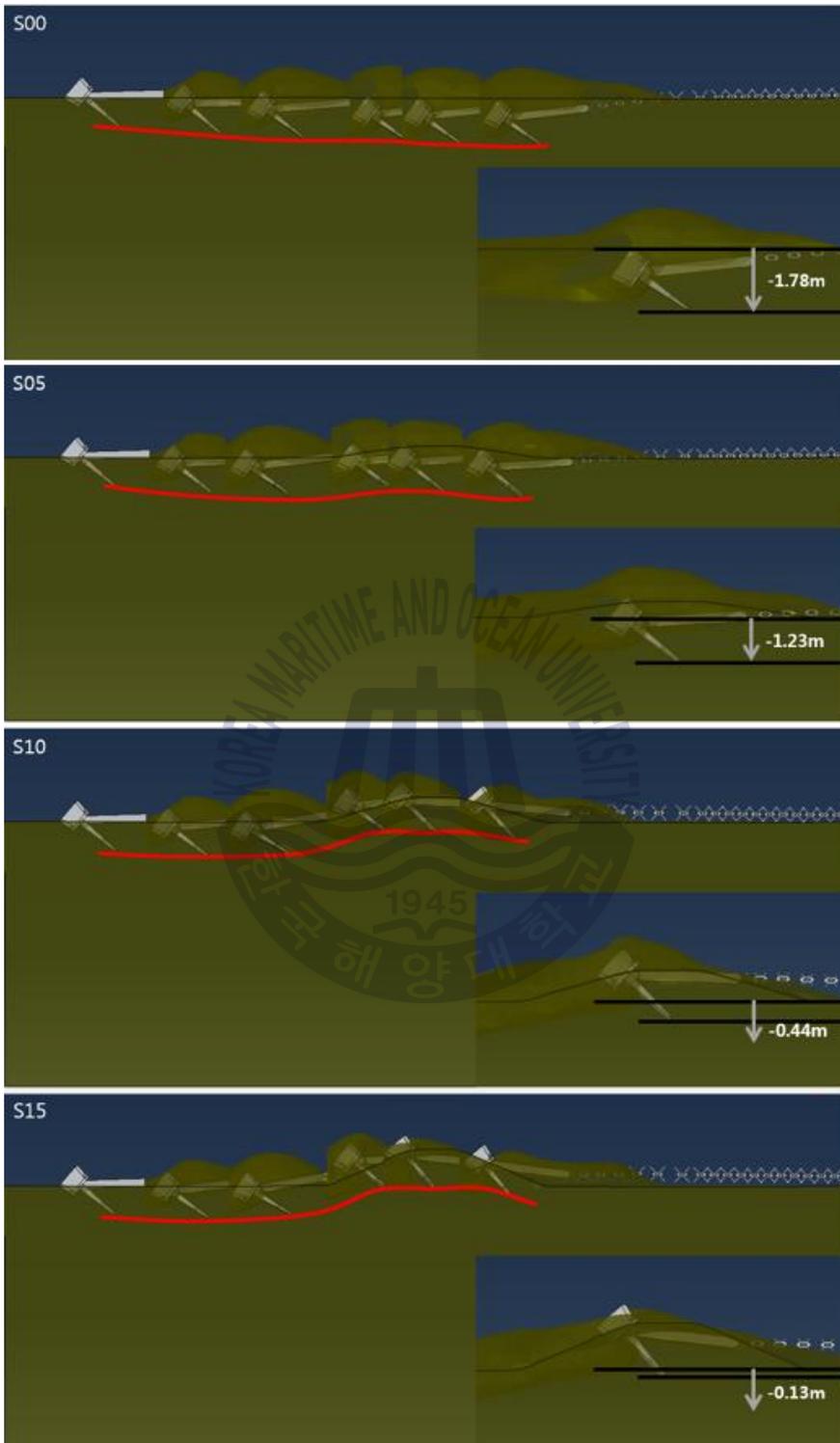


Fig. 5.19 Simulation results of anchor trajectory(Soft clay)

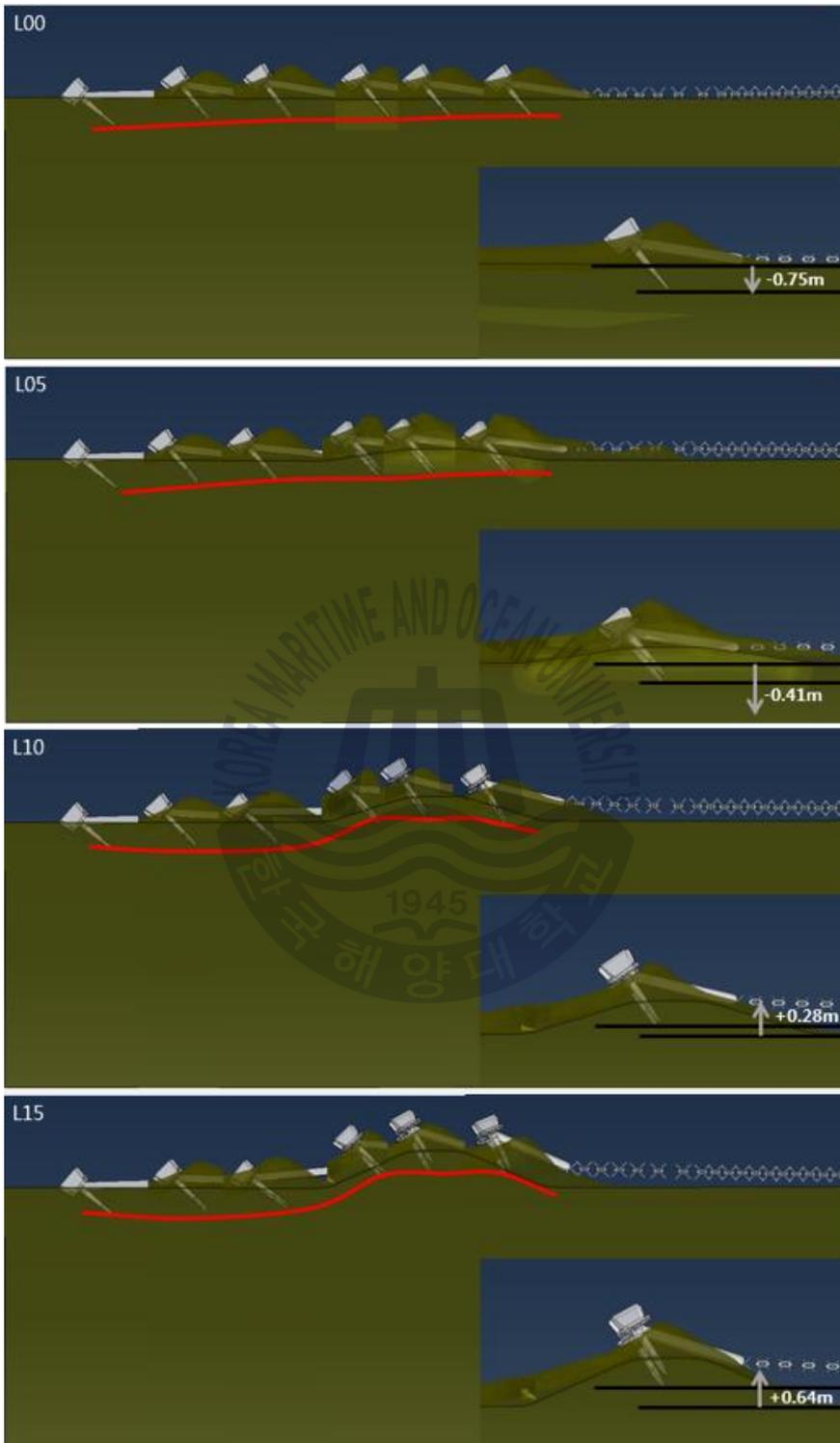


Fig. 5.20 Simulation results of anchor trajectory(Loose sand)

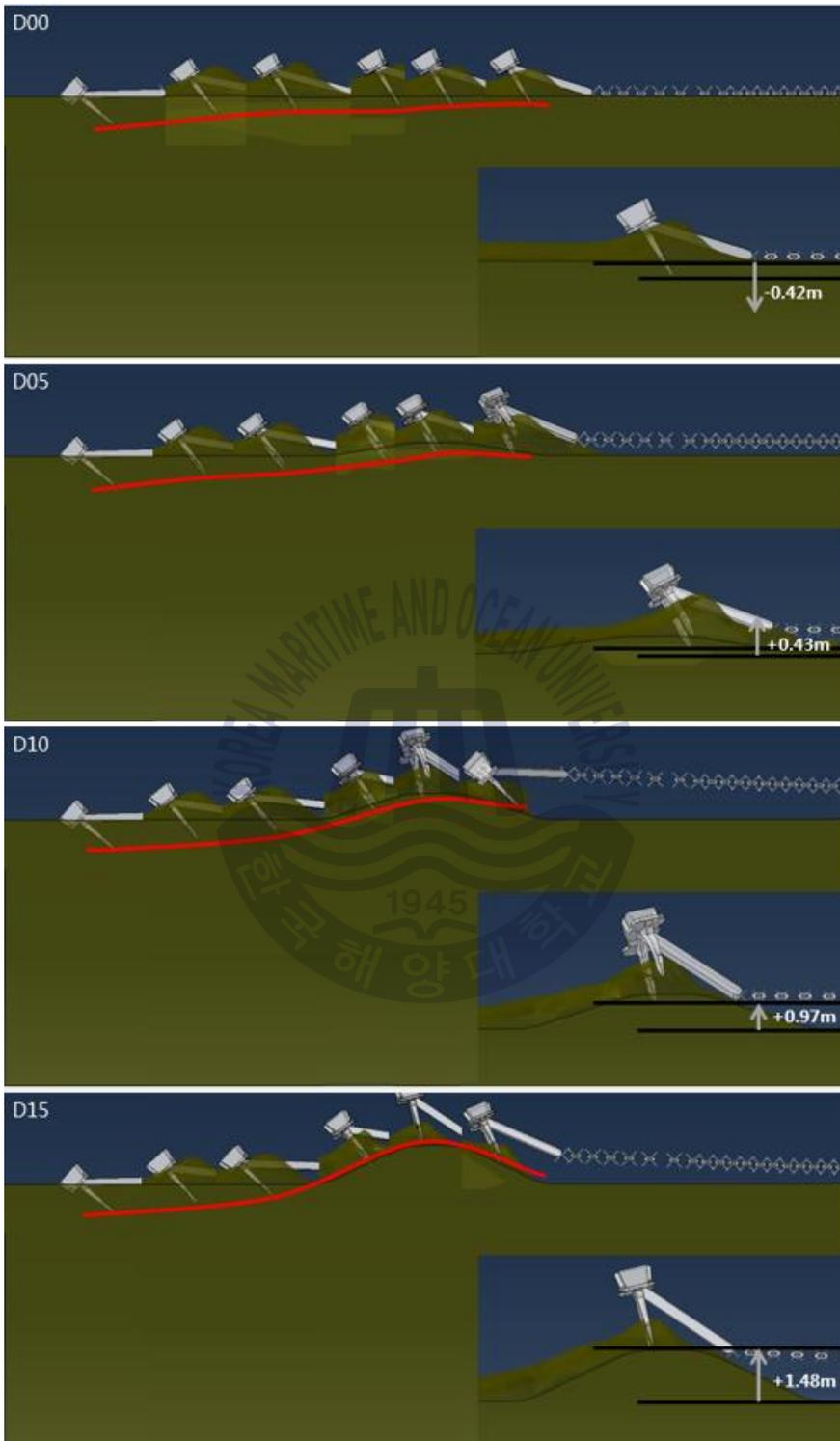


Fig. 5.21 Simulation results of anchor trajectory(Dense sand)

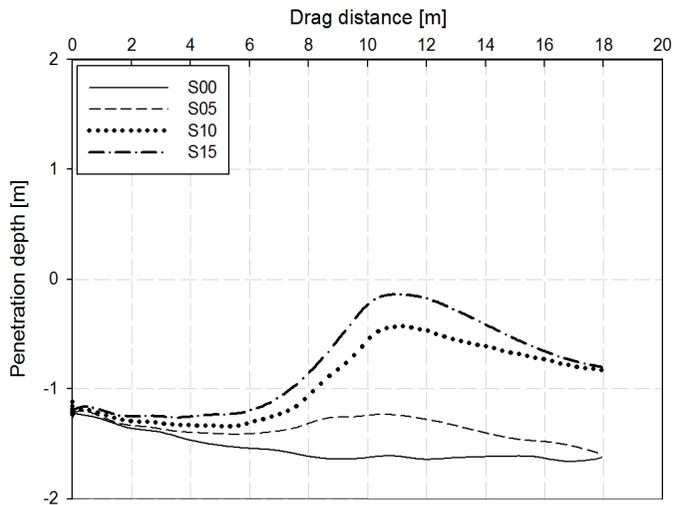


Fig. 5.22 Results of anchor penetration depth(Soft clay)

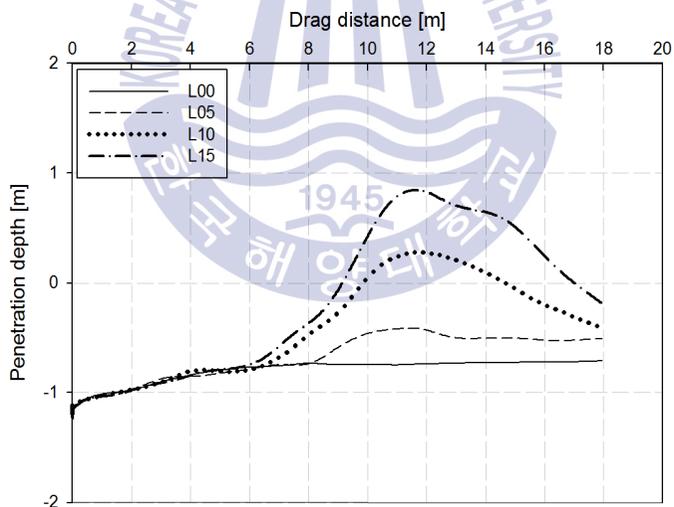


Fig. 5.23 Results of anchor penetration depth(Loose sand)

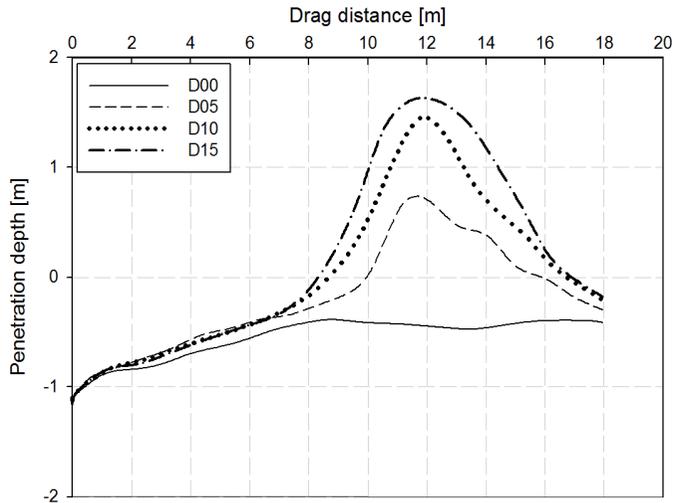


Fig. 5.24 Results of anchor penetration depth(Dense sand)

주요에 의한 설계된 락범 단면 검증 결과 및 위험성 분석에 대해 정리하면 Soft clay로 조성된 해저지반의 경우 락범 적용이 요구되었으며, 설계된 락범 높이의 최대치인 1.5m의 락범을 보강하여도 해저면 기준 아래로 침투되는 결과를 보였다. 파이프라인의 매설깊이에 따라 1.5m이상의 락범이 보강되어야 파이프라인을 주요로부터 안전하게 보호할 수 있는 결과를 보였다.

또한 Loose sand로 조성된 해저지반의 경우 높이 1.0m 이상의 락범이 적용되어야 파이프라인을 앵커 주요로부터 안전하게 보호할 수 있었으며, 마찬가지로 파이프라인의 매설깊이에 따라 앵커 주요로부터 안전하게 보호할 수 있는 결과를 보였다.

마지막으로 Dense sand로 조성된 해저지반의 경우도 0.5m 락범이 적용되어도 파이프라인을 앵커 주요로부터 안전하게 보호할 수 있었다.

5.3 앵커 투묘 및 주묘에 의한 락범 설계 기준

앵커 투묘와 주묘 해석에 의한 설계된 락범 검증을 통해 해저지반 성질 및 매설깊이에 따른 위험성 평가 토대로 산정된 안전하지 못한 해저지반 성질별 파이프라인이 매설된 깊이에 대해 추가 보호를 위한 락범 설계기준을 정리하기 위해 먼저 앵커 투묘해석 결과를 반영한 락범 기준을 Table 5.4에 나타내었다.

본 Table 5.4에서 앵커 투묘 해석에 파이프라인에 발생하는 최대 Von-mises stress 값이며, 단위는 MPa이다. 다음의 결과를 파이프라인의 항복강도와 비교를 통해 해저지반 성질 별 파이프라인의 매설깊이에 따른 앵커 투묘로부터 안전한 락범 기준을 산정 하였다.

Table 5.4 Design criterion of rock-berm based on the results of drop analysis

Seabed	Burial depth [m]	Rock berm height [m]			
		0	0.5	1.0	1.5
Soft clay	0	1096	621	411	342
	0.5	811	514	376	332
	1.0	319	-	-	-
Loose sand	0	957	598	363	288
	0.5	529	431	315	269
	1.0	257	-	-	-
Dense sand	0	817	522	284	204
	0.5	461	345	244	184
	1.0	214	-	-	-

다음으로 앵커 주요해석 결과를 반영한 락범 기준을 Table 5.5에 나타내었다.

본 Table 5.5에서 앵커 주요 해석에 의해 파이프라인이 매설되어 있다 가정
한 거리에서의 앵커의 해저지반 침투깊이를 산정하였고, 단위는 m단위 이다.
앵커 주요 해석은 투묘해석과 달리 파이프라인을 모델링 하지 않고 충돌하면
무조건 안전하지 않다는 해석의 초기 설정에 따라 해저면을 기준으로 파이프라인이
매설되어 있다 가정된 거리에서의 앵커가 침투(+값, -값)깊이에 따라 앵커
주요로부터 안전한 락범 기준을 산정하였다.

앵커 주요에 의한 결과는 파이프라인의 매설깊이에 따라 앵커가 침투하여도
충돌하지 않고, 안전하므로 전체적으로 앵커 투묘에 의한 위험성이 주요에 의
한 위험성보다 더 크고 락범 설계 기준 또한 더 큰 결과를 보였다.

Table 5.5 Design criterion of rock-berm based on the results of drag analysis

Seabed	Rock berm height [m]			
	0	0.5	1.0	1.5
Soft clay	-1.78	-1.23	-0.44	-0.13
Loose sand	-0.75	-0.41	+0.28	+0.64
Dense sand	-0.42	+0.43	+0.97	+1.48

제 6장 결론

본 논문은 해저지반 내 설치되는 구조물인 해저 파이프라인을 앵커 투묘 및 주묘에 의한 충돌로부터 안전하게 보호하기 위해 앵커 충돌 시나리오에 따른 위험성을 평가하여 충돌 시나리오로부터 안전한 매설깊이와 안전하지 않은 매설깊이를 산정하였다. 또한 안전하지 않은 매설깊이에 대해서 추가 보호를 위한 보호공법인 락범을 설계하고 보강 후 충돌 시나리오로부터 검증 후 최종적인 해저지반 성질 및 매설깊이에 따른 락범 설계 기준을 제안 하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

먼저 앵커 투묘에 의한 위험성 분석을 위해 10.5ton의 스톱리스 앵커를 선정하여 수중 종단속도를 전산유체해석을 통해 산정하였고, 이론식과 비교하였다. 결과를 반영한 앵커 투묘에 의한 충돌해석을 위해 해저지반 성질을 Soft clay, Loose sand, Dense sand로 분류하고 파이프라인의 매설깊이를 0m, 0.5m, 1m로 분류하여 총 9가지 Case 해석을 수행하였고, 파이프라인의 항복강도와 해석에 의한 Von-mises stress 결과를 비교하였다. 그 결과 매설깊이 1m이하의 분류된 모든 해저지반에서 파이프라인이 안전하지 못한 결과를 얻을 수 있었고, 해저지반 성질에 따라 파이프라인을 보호하는 효과가 다른 것을 추측할 수 있었다.

앵커 주묘에 의한 위험성 분석은 다양한 설정 값이 요구되었으며, 충돌해석에 앞서 앵커 주묘 시나리오를 결정하는 선행해석을 수행하였다. 그 결과 끌림 속도는 1.5m/s로 산정되었고, 끌림 각도는 0° , 그리고 추후 해석에 이용될 앵커와 락범의 이격거리는 8m로 보수적인 시나리오로 결정되었다. 선행해석의 결과를 반영하여 앵커 주묘에 의한 충돌해석은 투묘와 마찬가지로 해저지반 성질을 3가지로 분류하고 파이프라인을 선행해석에 의해 산정된 앵커와 락범의 이격거리인 8m 위치에 매설되어 있다 가정하고 앵커 주묘 시 앵커가 끌리며 해저지반에 침투깊이를 산정하여 파이프라인에 충돌되면 무조건 파괴된다는 가정을 도입하여 해석을 실시하였다. 그 결과 8m지점에서 앵커의 해저지반 침투깊이는 모든 해저지반에서 해저면 기준 침투(-값)하는 결과가 나타났으며, 파이프라인의 매설깊이에 따라 안전하지 못한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 Soft clay로 조성된 지반과 Dense sand로 조성된 지반의 앵커 침투깊이가 75%정도의 차

이를 보였으며, 단단하게 조성된 해저지반 일수록 앵커가 침투하는 깊이에 대한 차이가 있음을 추측 할 수 있었다.

이처럼 앵커 투묘 및 주묘에 의한 위험성 분석은 해저지반 성질 및 파이프라인의 매설깊이에 따라 안전하지 못한 결과를 보였으며, 이와같이 안전하지 못한 현상에 대해 추가 보호공법 적용이 필수적이다. 따라서 시공성 및 경제성을 고려하여 추가 보호를 위한 보호공법을 락범으로 선정하고 락범 단면을 설계하였다. 락범은 하단부 길이 8m, 상부 길이 2m로 고정하고, 높이를 0.5m, 1.0m, 1.5m의 3가지 타입으로 설계하였다. 설계된 락범 단면을 마찬가지로 투묘와 주묘로 나누어 분석된 위험성을 낮추기 위한 시뮬레이션을 실시하여 검증하였다.

앵커 투묘에 의한 락범 단면 검증은 위험성 분석과 동일한 해석 조건과 동일한 해석 Case를 반영하고, 설계된 락범을 추가하여 위험성을 보인 매설깊이 1m이하의 해저지반에서 검증하였는데, 락범 높이를 변경하며 총 18가지 Case 해석을 수행하였다. 그 결과 모든 해석 Case에서 락범 보강효과가 있는 것을 알 수 있었고, Soft clay로 조성된 해저지반에서의 매설깊이 0m, 1m의 경우 높이가 1.5m의 락범이 보강되어야 안전함을 알 수 있었다. 또한 Loose sand로 조성된 해저지반의 경우 매설깊이 0m에서는 높이가 1.5m의 락범이, 매설깊이 0.5m에서는 높이가 1.0m의 락범이 보강되어야 안전하였으며, Dense sand로 조성된 해저지반에서는 매설깊이 0m - 락범 1.0m, 매설깊이 0.5m - 락범 0.5m와 같은 결과를 얻을 수 있었고, 단단한 해저지반일수록 락범 보강 높이가 또한 줄어들음을 알 수 있었다.

앵커 주묘에 의한 락범 단면 검증은 마찬가지로 위험성 분석과 동일한 해석 조건에서 설계된 락범을 추가하여 위험성 분석에 의해 결정된 앵커 침투깊이 감소 효과를 검증하기 위해 총 9가지 Case해석을 수행하였다. 그 결과 락범 보강효과에 의해 앵커 침투깊이가 줄어드는 것을 알 수 있었고, 해저지반 성질에 따라 침투깊이 감소 효과가 차이를 보였으며, 전체적으로 Soft clay에서 약 52%, Loose sand에서 약 137%, Dense sand에서 약 126%씩 감소하는 결과를 보였다. 하지만 Soft clay로 조성된 해저지반은 설계된 락범의 최대치인 1.5m 높이를 보강하여도 8m지점에서의 앵커 침투깊이는 해저면 기준 아래(-)로 침투하는 결과를 보였으며, 파이프라인의 매설깊이가 0.13m 이하 일 경우 충돌 및 손

상의 위험이 있음을 추측할 수 있었다.

다음과 같이 설계된 락범 단면 검증을 위한 앵커 투묘 및 주묘 해석을 통해 해저지반 성질 및 파이프라인의 매설깊이에 대해 추가 보호를 위한 안전한 락범 설계 기준을 각 시나리오에 따라 선정하였으며, 최종적으로 앵커 투묘에 의한 락범 기준과 주묘에 의한 락범 기준을 비교하여 투묘 및 주묘 해석을 모두 고려한 해저지반 성질 및 매설깊이에 따른 추가 보호를 위한 락범 설계기준을 Table 6.1과 같이 앵커 투묘 해석의 분류인 0.5m단위로 나누어 제시 하였다. 하지만 본 설계 기준은 투묘 및 주묘의 확률적인 영향은 배제 한 해석에 의한 결과이므로 락범 설계 기준에 관한 실증 및 모형실험에 의한 검증이 요구된다.

Table 6.1 Design criterion of rock-berm based on the results of drop and drag analysis

Seabed	Burial depth [m]	Rock-berm height [m]		
		Drop	Drag	Total
Soft clay	0	1.5	1.5 + @	1.5 + @
	0.5	1.5	1.0	1.5
	1	0	1.0	1.0
Loose sand	0	1.5	1.0	1.5
	0.5	1.0	0.5	1.0
	1	0	0	0
Dense sand	0	1.0	0.5	1.0
	0.5	0.5	0	0.5
	1	0	0	0

참고문헌

- [1] 김영호, 정상섭, 2014. Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) 방법을 이용한 Dynamically Penetrating Anchor의 동적 거동 분석. 대한토목학회지, 34(3), pp.895-906.
- [2] 류연선, 조현만, 김서현, 2015. 재료모델에 따른 유연 콘크리트 매트리스의 충돌 거동 평가. 한국해양공학회지, 29(1), pp.70-77
- [3] 신문범, 서영교, 2017. 해저지반 성질과 매설깊이 변화에 따른 해저파이프의 충돌 특성. 한국해양공학회지, 31(3), pp.219-226.
- [4] 우진호, 나원배, 유정석, 2014. SPH 기법을 이용한 Rock-berm의 앵커 충돌 수치 시뮬레이션. 한국해안·해양공학회 논문집, 26(1), pp.9-15.
- [5] 우진호, 나원배, 2010. 앵커 충돌 및 끌림에 의한 원통연결 보호구조물의 최대 응답 해석. 한국해양공학회지, 24(5), pp.81-87.
- [6] 정재진, 이영선, 신현식, 2007. 천해부에서 해저케이블 건설 연구. 한국전자통신학회 논문지 2(3), pp.203-209.
- [7] 한국표준협회(KSA), 2014. SPS-KSA0127-V3311-5978. 앵커.
- [8] ABAQUS, 2017. ABAQUS user's manual. ABAQUS 2017, Rhode Island, Dssault Systems.
- [9] ANSYS Inc., 2010. ANSYS FLUENT MDM Tutorials. Release 13.0, Canonsburge.
- [10] Christophe Gaudin, Melissa M. Landon, Vernon Pedersen, Chia Hong Kiat, Wang Leqin, 2009. Validation of Rock Berm Cover Design for Offshore LNG Pipeline in Hong Kong. International Offshore and Polar Engineering Conference. Osaka, June 21-26.
- [11] Das, B.M, 2009. Principles of Geotechnical Engineering 7th Edition, Cengage learning, USA.
- [12] David J Chamizo, Dean R Campbell, Eric P Jas, Jay R Ryan, 2012. ROCK

- BERM DESIGN FOR PIPELINE STABILITY. International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering(OMAE2012), Rio de Janeiro, July 1-6.
- [13] Det Norske Veritas(DNV), 2010. Recommend and Practice DNV-RP-F107 Risk assessment of pipeline protection. Norway, DNV
- [14] Dong-Man Ryu, Chi-Seung Lee, Kwang-Ho Choi, Bon-Yong Koo, Joon-Kyu Song, Myung-Hyun Kim, Jae-Myung Lee, 2015. Lab-scale impact test to investigate the pipe-soil interaction and comparative study to evaluate structural responses. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 7(2015), pp.720-738.
- [15] Dong-Man Ryu, Lei Wang, Seul-Kee Kim, Jae-Myung Lee, 2017. Comparative study on deformation and mechanical behavior of corroded pipe: Part IeNumerical simulation and experimental investigation under impact load. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, (2017), pp.1-16.
- [16] Escoe, A.K, 2006. Piping and Pipeline Assessment Guide 1st Edition. UK.
- [17] Gang Qiu, Sascha Henke, Jurgen Grabe, 2010. Application of a Coupled Eulerian - Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations. Computers and Geotechnics, 38(2011), pp.30-39.
- [18] Jian-xing yu, Yi-yu Zhao , Tian-yu Li, Yang Yu, 2015. A three-dimensional numerical method to study pipeline deformations due to transverse impacts from dropped anchors. Thin-Walled Structures, 103(2016), pp.22-32.
- [19] Jie Zhang, Zheng Liang, Ding Feng, Chuan Zhang, Chengyu Xia, Yiliu Tu, 2016. Response of the buried steel pipeline caused by perilous rock impact: Parametric study. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 43(2016), pp.385-396.
- [20] LeQin Wang, HongKiat Chia, JianWu Wei, Qiang Chen, 2009. FEA-BASED STUDY OF PIPELINE PROTECTION FROM ANCHORS. International

- Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering(OMAE2009), Honolulu, May 31 - June 5.
- [21] LeQin Wang, HongKiat Chia, 2010. OPTIMIZATION STUDY OF PIPELINE ROCK ARMOUR PROTECTION DESIGN BASED ON FINITE ELEMENT ANALYSIS. International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering(OMAE2010), Shanghai, June 6-11.
- [22] Massey, B.S, Ward-Smith, J, 2006. Mechanics of Fluids 8th Edition. USA.
- [23] M.P. O'Neill, M.F. Bransby, M.F Randolph. 2003. Drag anchor fluke - soil interaction in clays. Can. Geotech. J, 40(2003), pp.78-94.
- [24] Yutao Liu, Hao Hu, Di Zhang, 2013. Probability Analysis of Damage to Offshore Pipeline by Ship Factors. Journal of the Transportation Research Board, No.2326, pp.24-31.
- [25] Shuwang Yan, Bingchuan Guo, Liqiang Sun, Wei Guo, Zhenming Lei, 2015. Analytical and experimental studies of dragging hall anchors through rock berm. Ocean Engineering, 108(2015), pp.529-538.
- [26] Stephen, P.B, Michael, C, 2007. Correlations of Soil Properties 5th Edition, USA.
- [27] Sujan Dutta, Bipul Hawlader, and Ryan Phillips, 2015. Finite element modeling of partially embedded pipelines in clay seabed using Coupled Eulerian - Lagrangian method. Can Geotech. J, 52(2015), pp.58-72.
- [28] S.Tjahyono, 2016. Numerical Analysis of Anchor Dragging Impact on Rock-Covered Pipeline Using CEL Method. Offshore Technology Conference, OTC-26495-MS, Malaysia, March 22-25
- [29] Haixiao Liu, Wei Zhang, Chenglin Liu, Cun Hu, 2011. Movement direction of drag anchors in seabed soils. Applied Ocean Research, 34(2012), pp.78-95.
- [30] Yanbing Zhao, Haixiao Liu, 2015. The drag effects on the penetration behavior of drag anchors during installation. Ocean Engineering, 109(2015), pp.169-180.

- [31] Yingguo Hu, Wenbo Lu, Ming Chen, Peng Yan, Yuzhu Zhang, 2015. Numerical simulation of the complete rock blasting response by SPH - DAM - FEM approach. Simulation Modelling Practice and Theory, 56(2015), pp.55-68.

