



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.

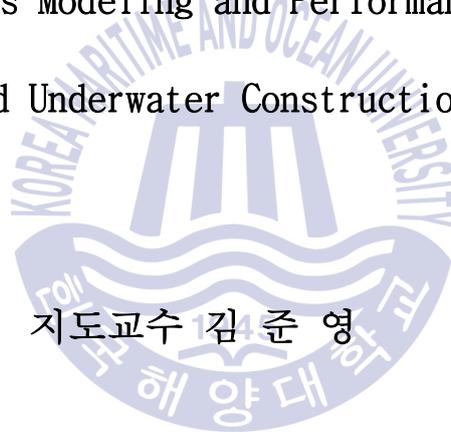
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

트랙기반 수중건설로봇의 운동 모델링 및
성능 해석에 관한 연구

A Study on Dynamics Modeling and Performance Analysis of
Track-based Underwater Construction Robot



지도교수 김 준 영

2016년 2월

한국해양대학교 대학원

조선기자재공학과

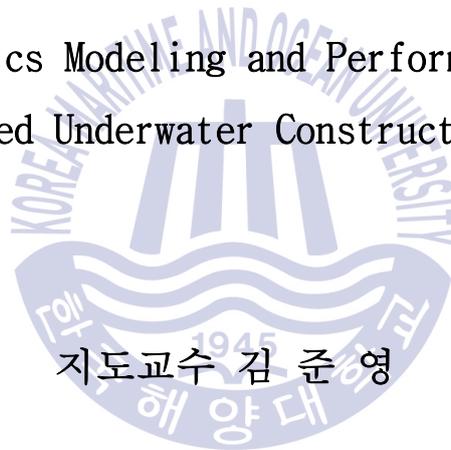
이 영 진



공학석사 학위논문

트랙기반 수중건설로봇의 운동 모델링 및
성능 해석에 관한 연구

A Study on Dynamics Modeling and Performance Analysis of
Track-based Underwater Construction Robot



지도교수 김 준 영

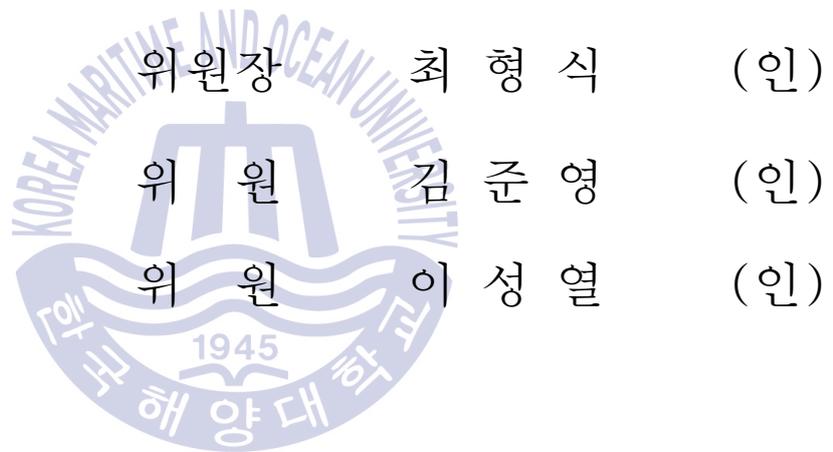
2016년 2월

한국해양대학교 대학원

조선기자재공학과

이 영 진

본 논문을 이영진의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2015년 12월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	vii
List of Figures	viii
Abstract	xi
제 1 장 서 론	
1.1 연구배경	1
1.2 연구내용	5
제 2 장 트랙기반 수중건설로봇의 수학 모델	
2.1 궤도차량 모델	6
2.2 궤도차량의 운동 모델링	8
2.2.1 궤도차량의 3자유도 운동방정식	8
2.2.2 토양모델	9
2.2.3 유체 항력	11
2.3 MBD(Multi Body Dynamics) Model	12
2.3.1 궤도차량의 MBD Model	12
2.3.2 궤도모델의 상세 제원	12
2.3.3 토양모델	18
2.4 Trencher Model	20

제 3 장 수치 시뮬레이션을 이용한 운동성능 해석

3.1 3자유도 운동방정식 시뮬레이션	24
3.1.1 시뮬레이터의 구성	24
3.1.2 직진주행 시뮬레이션	25
3.1.3 선회운동 시뮬레이션	27
3.1.4 Trenching 작업 시 주행에 필요한 견인력 분석	30
3.2 MBD Model 시뮬레이션	33
3.2.1 직진주행 시뮬레이션	33
3.2.2 선회운동 시뮬레이션	36
3.2.3 Trenching 작업 시 주행에 필요한 견인력 분석	39

제 4 장 결 론

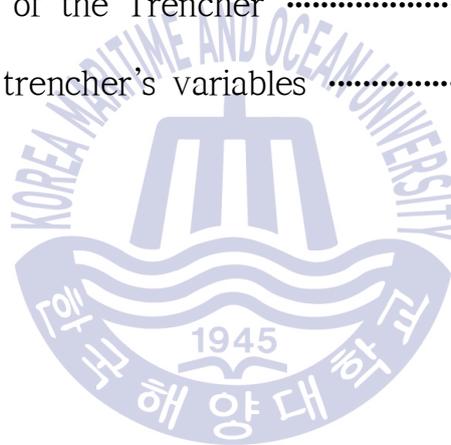
4.1 결론	42
4.2 추후연구	43

참고문헌	44
------------	----

감사의 글	45
-------------	----

List of Tables

Table 1	Specifications of the Tracked Vehicle Model	7
Table 2	Material properties	13
Table 3	Dimension information of sprocket	14
Table 4	Dimension information of idler & support roller	15
Table 5	Dimension information of road wheel	16
Table 6	Dimension information of track link	17
Table 7	Specifications of the Trencher	20
Table 8	Definition of trencher's variables	21



List of Figures

Fig. 1 Various ROVs for Underwater Construction	2
Fig. 2 XT1200 Made by Forum	3
Fig. 3 QTrencher1400 Made by SMD	3
Fig. 4 Underwater Leveling Equipment (KIOST)	4
Fig. 5 Minero (KRISO)	4
Fig. 6 3D Illustration of the Tracked Vehicle	6
Fig. 7 Free Body Diagram on the tracked vehicle	8
Fig. 8 Multi Body Vehicle Model using RecurDyn-TrackLM	12
Fig. 9 Model of track	13
Fig. 10 Model of sprocket	14
Fig. 11 Model of idler & support roller	15
Fig. 12 Model of road wheel	16
Fig. 13 Model of track link	17
Fig. 14 Response to repetitive normal load	19
Fig. 15 3D illustration of the trencher	20
Fig. 16 Illustration of forces on the trenching cutter bar	21
Fig. 17 Tractive thrust H and normal reaction V of trencher	23
Fig. 18 Simulator using Matlab & Simulink	24

Fig. 19	Track input of longitudinal motion simulation	25
Fig. 20	Velocity and angle of longitudinal motion simulation	26
Fig. 21	X-Y plane motion of longitudinal motion simulation	26
Fig. 22	Track slip of longitudinal motion simulation	27
Fig. 23	Track input of turning motion simulation	28
Fig. 24	Velocity and angle of turning motion simulation	28
Fig. 25	X-Y plane motion of turning motion simulation	29
Fig. 26	Track slip of turning motion simulation	29
Fig. 27	Track input of longitudinal motion simulation on trenching	30
Fig. 28	Track slip of longitudinal motion simulation on trenching	31
Fig. 29	Velocity of longitudinal motion simulation on trenching	31
Fig. 30	Sprocket torque of vehicles	32
Fig. 31	Surge responses of vehicles at Input=95deg/s	33
Fig. 32	Surge responses of vehicles at Input=70deg/s	34
Fig. 33	Velocities of vehicles at Input=95deg/s	34
Fig. 34	Velocities of vehicles at Input=70deg/s	35
Fig. 35	Track input of turning motion simulation	36
Fig. 36	Longitudinal velocity of turning motion simulation	37
Fig. 37	Lateral velocity of turning motion simulation	37
Fig. 38	Heading angle of turning motion simulation	38
Fig. 39	X-Y plane motion of turning motion simulation	38
Fig. 40	Reaction forces of revolute joints	39

Fig. 41 Track input of longitudinal motion simulation on trenching 40

Fig. 42 Sprocket torque of vehicles at $\phi = 35^\circ$ 40

Fig. 43 Sprocket torque of vehicles at $\phi = 45^\circ$ 41

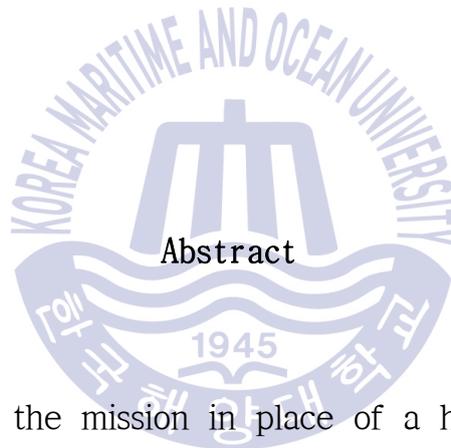


A Study on Dynamics Modeling and Performance Analysis of Track-based Underwater Construction Robot

Lee, Young Jin

Department of Marine Equipment Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



Abstract

The ROV performing the mission in place of a human being is required in the field of underwater construction that is dangerous working environment in the deep water. Especially, in the case of the work such as laying cable and pipe-line under the seabed, the tracked-vehicle has advantage in gaining tractive force and dynamic performance.

This thesis mainly focuses on the development of track-based underwater construction robot. In all sorts of engineering design and manufacture, the result of performance analysis according to the design changes can be easily checked through the numerical simulation using computer. Also, dynamic behavior analysis can be categorized as Multi-body model, modeling each component to make similar to real model, and Single-body

model, modeling real model as a rigid body. In this thesis, tracked vehicle's dynamic performance of the two models, single-body model and Multi-body model, were compared through the numerical simulation. The dynamic analysis program of the tracked vehicle was developed using Matlab/Simulink and RecurDyn.

Moreover, the trencher model was applied to the simulator for analysis of vehicle's tractive force.

KEY WORDS: Tracked vehicle 궤도차량; Trencher 트랜처; Multi Body Dynamics 다물체 동역학.



제 1 장 서 론

1.1 연구배경

해저플랜트 및 해양영토 확대와 무한한 자원의 보고인 해양을 개발하기 위한 수중건설시장의 증가로 인해 해양의 열악한 입지조건에도 불구하고 더욱 다양한 형태의 해저작업이 필요하게 되었다. 이때 깊은 수심의 위험한 작업환경에서 인간을 대신하여 수중에서의 구조물을 효율적으로 건설할 수 있는 장비인 수중건설용 로봇이 필요하다.

일찍이 수중에서 다양한 작업 임무를 수행하는 로봇인 ROV(Remotely Operated Vehicle, 원격무인잠수정)가 등장하여 여러 수중건설 현장에 투입되기 시작하였고, 로봇의 구동방식 및 작업특성에 따라 크게 유영식 작업로봇(Free Swimming Work Class ROV), 매설로봇(ROV Trencher), 및 기타 특수목적의 작업로봇으로 나뉠 수 있다.

특히 다양한 해양플랜트 및 해양구조물을 잇는 해저 광통신 케이블, 전력 케이블 및 파이프라인을 해저에 매설하는 작업의 경우 매설로봇의 하단에 부착된 Trenching cutter, Water jet 등의 Tool을 사용한다. 이때 발생하는 반력을 견디기 위한 견인력과 기동성능을 얻는데 있어 트랙방식의 궤도차량이 큰 장점을 가진다.

트랙기반의 수중건설로봇의 기술현황으로는 해외선진국에서는 70년대 부터 개발이 이루어졌으며, 특히 미국의 Forum사가 영국의 SMD(Soil Machine Dynamics)사와 함께 세계적으로 가장 대표적인 두 제작업체이다. Forum사의 대표적인 모델은 Fig. 2의 XT1200이며 작업가능수심은 2,700m 이며 Water jet을 이용하여 해저지반 및 토사를 트랜칭하여 파이프라인 및 해저케이블 매설 작업을 수행한다. SMD사 또한 각종 Tool 및 구동방식을 스키드방식과 트랙방식으

로 나누어 QTrencher series의 다양한 장비를 개발하여 상용화를 하였고, Fig. 3은 QTrencher1400으로 Trenching cutter를 장착한 트랙기반의 매설로봇이다. 국내의 경우 트랙기반 수중건설로봇을 체계적으로 개발된 사례가 없으며 유사 장비로는 한국해양과학기술원에서 창원대학교와 같이 Fig. 4와 같은 수심 20m 급 항만수중공사용 수중사석고르기를 개발하였고, 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소에서는 Fig. 5의 해저자원 채광로봇인 미내로를 개발하였으며 이 로봇은 트랙기반으로 운영되는 국내 최대 규모의 ROV이다. 또한, 국내에서 유일하게 해저 케이블 및 파이프라인 매설장비를 다수 보유하고 있는 (주)케이티서브마린의 경우에도 장비들은 모두 해외에서 직접 구매한 것들이다. 이처럼 열악한 수중건설로봇 분야에서 해외 임대 의존도를 줄이기 위해 국내의 독자적인 수중건설로봇의 개발이 필수적이다.

이에 국내에서도 해양수산부 주관 하 2013년부터 수중건설로봇 개발 사업을 진행하고 있다. 이 사업에서 개발할 ROV는 Fig. 1과 같이 경작업용 ROV, ROV 기반 수중 중작업용 로봇, 그리고 트랙기반 해저 중작업용 로봇으로 분류된다. 본 연구는 위 3가지의 ROV중 트랙기반 해저 중작업용 로봇을 개발하기 위한 기초 연구로써 수행하게 되었다.

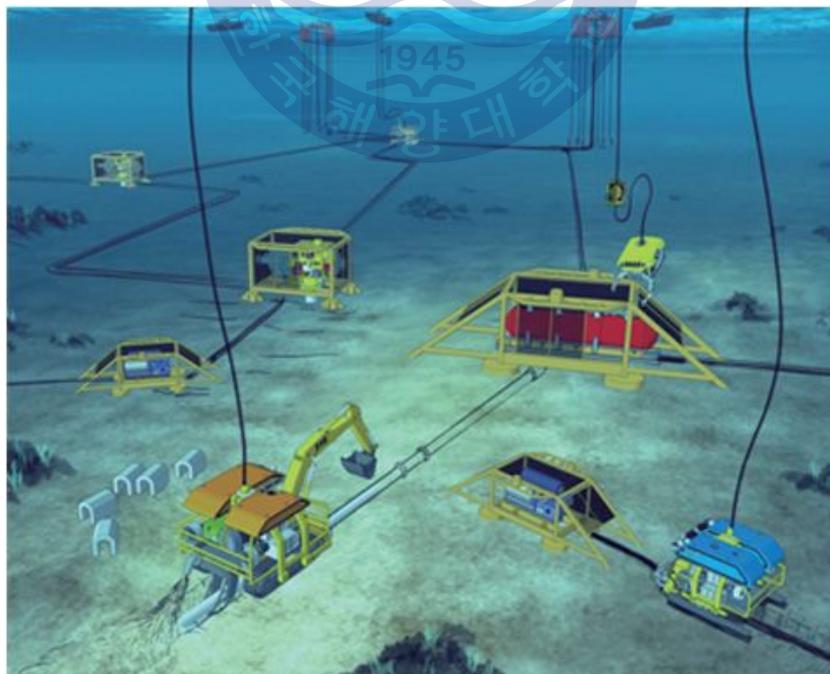


Fig. 1 Various ROVs for Underwater Construction



Fig. 2 XT1200 Made by Forum



Fig. 3 QTrencher1400 Made by SMD



Fig. 4 Underwater Leveling Equipment (KIOST)



Fig. 5 Minero (KRISO)

1.2 연구내용

본 연구의 목적은 개념 설계된 트랙기반 수중건설로봇의 차체인 궤도차량의 목표성능을 확인할 수 있을 뿐만 아니라 설계변수의 변화에 따른 결과를 쉽게 확인할 수 있고, 문제해결에 필요한 시간과 비용을 절감하기 위해서 수치 시뮬레이션을 통한 궤도차량의 동적거동 해석을 수행하는 것이다.

이러한 궤도차량의 동적거동을 해석하기 위해 운동 모델링과 수치 시뮬레이션에 대한 연구가 많이 진행되어 왔고(Baladi & Rohani, 1979; Murakami et al., 1992; Wong, 1993; Le et al., 1997; 이창호 등, 2009), 본 논문에서 사용된 운동 모델은 실제모델을 하나의 강체로 모델링한 강체 차량 모델과 실제모델과 유사하게 모든 구성요소가 모델링된 다물체 차량 모델로써 총2가지의 운동 모델링을 수행하고 수치 시뮬레이션을 통해 두 가지 모델의 동역학 해석결과들을 비교 분석하고, 작업용 툴인 Trencher의 역학 모델을 적용하여 수중 작업 시 차량 주행에 필요한 견인력을 해석하고자한다.



제 2 장 트랙기반 수중건설로봇의 수학 모델

2.1 궤도차량 모델

본 논문에서 사용된 궤도차량 모델은 Fig. 6의 개념설계도와 같으며, 하부는 좌, 우 궤도가 있으며 상부 프레임에는 내압용기, 케이블 연결부, 수중 추진기 그리고 작업용 툴 브래킷으로 구성되어 있다. 궤도차량 주요부의 치수와 제원은 아래 Fig. 6와 Table 1와 같다(Choi, et al., 2015).

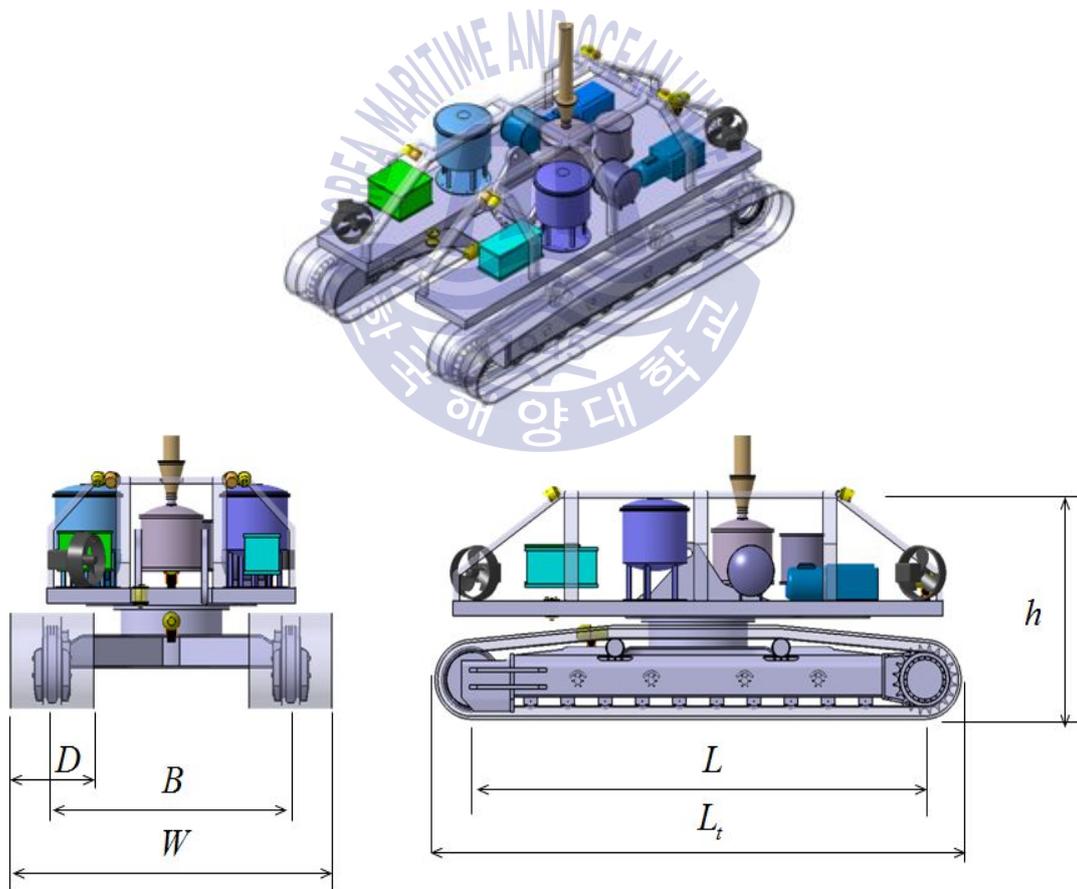


Fig. 6 3D Illustration of the Tracked Vehicle

Table 1 Specifications of the Tracked Vehicle Model

Items	Specification
Dimensions ($L_t \times W \times h$)	5800×3495×2290 (mm)
Mass	30 Ton
Track tread (B)	2595 mm
Track width (D)	900 mm
Contact length of track (L)	5000 mm
Maximum traveling speed	2 km/h
Climbing capacity	30° (No load)



2.2 궤도차량의 운동 모델링

2.2.1 궤도차량의 3자유도 운동방정식

Fig. 7은 궤도차량의 자유물체도로 차량고정좌표계와 각각의 궤도요소들과 지면사이에서 작용하는 힘들을 나타내었다. 차량고정좌표계의 원점은 차량의 기하학적 중심에 위치하도록 하고, 차량의 진행방향을 x 축 그리고 z 축을 연직 위 방향으로 하였으며, y 축은 오른손법칙에 의하여 결정하였다. 이때의 궤도차량의 Surge, Sway, Yaw방향의 3자유도 운동방정식은 식 (1)과 같다.

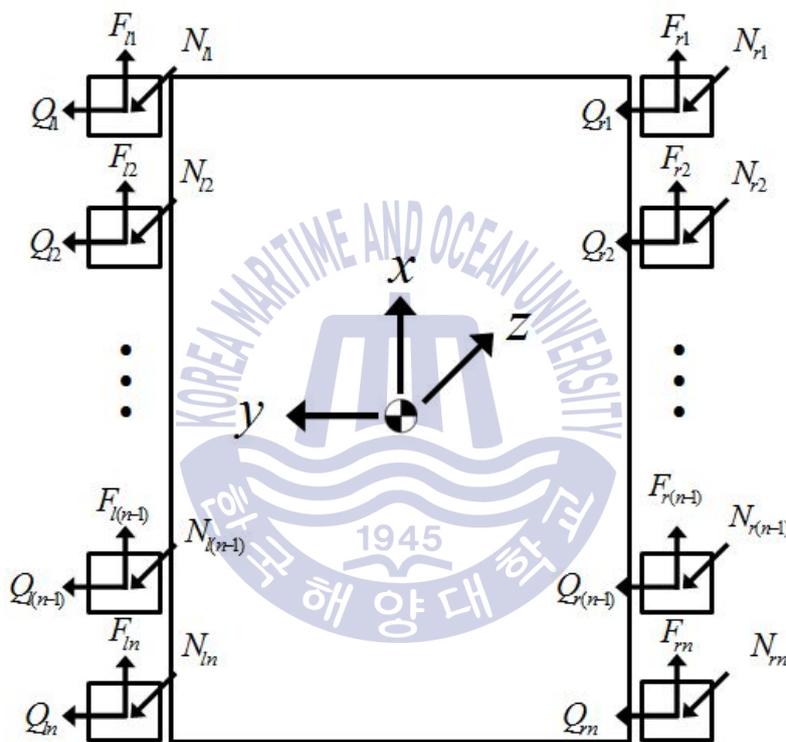


Fig. 7 Free Body Diagram on the tracked vehicle

$$M(\dot{v}_x - rv_y) = \sum_{i=1}^n (F_{li} + F_{ri}) - \sigma \sum_{i=1}^n (N_{li} + N_{ri}) - F_{dx}$$

$$M(\dot{v}_y + rv_x) = \sum_{i=1}^n (Q_{li} + Q_{ri}) - F_{dy} \quad (1)$$

$$I_z \dot{r} = \sum_{i=1}^n x_i (Q_{li} + Q_{ri}) + \frac{B}{2} \sum_{i=1}^n (F_{ri} - F_{li}) - \frac{B}{2} \sigma \sum_{i=1}^n (N_{ri} - N_{li})$$

3자유도 운동방정식에서 M , I_z 는 질량과 질량관성모멘트를 나타내고 v_x , v_y , r 은 차량 중심에서의 직진방향과 횡방향 그리고 Yaw방향의 각속도이며, σ 는 구름저항계수, F_{dx} 와 F_{dy} 는 유체 항력이다. 그리고 F , Q , N 은 각각 궤도요소 아래에서의 전단력(Shear force)과 수직하중이다. 수직하중 N 은 궤도차량의 기구학적 관계식에 의해 구할 수 있으며 아래 식 (2)와 같다(Baladi & Rohani, 1979).

$$N_{li} = (W-b) \left[\frac{1}{2} - \frac{H}{(W-b)B} F_{cy} - \frac{6Hx_i}{(W-b)(L/n)^2} F_{cx} \right], \quad (i = 1 \sim n)$$

$$N_{ri} = (W-b) \left[\frac{1}{2} + \frac{H}{(W-b)B} F_{cy} - \frac{6Hx_i}{(W-b)(L/n)^2} F_{cx} \right], \quad (i = 1 \sim n) \quad (2)$$

여기서 F_{cx} 와 F_{cy} 는 x , y 방향의 관성력, H 는 무게중심의 높이, x_i 는 무게중심과 각 궤도요소간의 거리 그리고 b 는 부력이다.

2.2.2 토양모델

궤도가 회전함에 따라 궤도와 지반사이의 마찰에 의해 발생하는 전단력은 궤도차량을 구동시키는 구동력으로 작용한다. Wong(1993)은 궤도차량의 직진, 횡방향의 전단력을 아래 식 (3)과 같이 궤도 슬립과 토양의 특성의 함수로 제안하였다.

$$F_{ji} = A_{ji} (C + N_{ji} \tan \phi) \left[1 - \frac{k}{2Li_j} \left(1 - e^{-\frac{2Li_j}{k}} \right) \right] \cos \gamma_{ji}, \quad (i = 1 \sim n, j = l, r)$$

$$Q_{ji} = A_{ji} (C + N_{ji} \tan \phi) \left[1 - \frac{k}{2Li_j} \left(1 - e^{-\frac{2Li_j}{k}} \right) \right] \sin \gamma_{ji}, \quad (i = 1 \sim n, j = l, r) \quad (3)$$

여기서 C 는 지면의 점착도(Cohesion), ϕ 는 마찰각(Angle of internal friction), k 는 전단변형계수(Shear deformation modulus), γ 는 궤도 슬립각으로 차량의 동적 거동 변수들로부터 계산이 가능하다. 또한 i_i 는 궤도 슬립(Track slip)이며 식 (4)와 같이 차량과 궤도의 속력의 의해 정의된다(Yeu et al., 2007).

$$i_i = \frac{V_{track} - V_{vehide}}{V_{track}} \quad (4)$$

좌, 우 궤도의 스프라켓(Sprocket) 각속도를 w_l, w_r 이라 하고, rs 는 스프라켓의 반지름이라 하면 좌, 우 궤도 슬립 i_l, i_r 은 식 (5)와 같다.

$$i_l = \frac{rs \omega_l - (v_x - \frac{B}{2}r)}{rs \omega_l}$$

$$i_r = \frac{rs \omega_r - (v_x + \frac{B}{2}r)}{rs \omega_r} \quad (5)$$



2.2.3 유체 항력

일반적으로 항력은 정지해 있는 고체 물체 주위에 일정한 속도의 유체 흐름이 있을 때 또는 고체 물체가 유체 안에서 일정한 속도로 이동할 때 액체가 고체 물체에 작용하는 힘이다. 항력의 크기 F_d 는 유체에 대한 고체의 상대속력을 V , 유체의 밀도를 ρ , 물체의 단면적을 A 라고 할 때 식 (6)과 같이 표현된다.

$$F_d = \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 \quad (6)$$

여기서 C_d 는 물체형태나 표면의 상태에 의해서 결정되는 상수로 항력계수 (Drag coefficient)라 한다.

본 논문에서 개념 설계된 궤도차량의 경우 상당히 저속으로 주행하며, 가속도의 변화가 거의 없는 등속에 가까운 Trenching 작업 환경이라는 점에서 간단히 유체항력만을 고려하여, 차량의 진행방향의 항력 F_{dx} 와 선회운동에 따른 측면방향의 항력 F_{dy} 를 식 (6)을 이용하여 아래 식 (7)과 같이 궤도차량의 운동방정식에 외력으로 가하였다.

$$\begin{aligned} F_{dx} &= \frac{1}{2} \rho A_x C_{dx} V_x^2 \\ F_{dy} &= \frac{1}{2} \rho A_y C_{dy} V_y^2 \end{aligned} \quad (7)$$

2.3 MBD(Multi Body Dynamics) Model

2.3.1 궤도차량의 MBD 모델

본 논문에서 다물체 차량 모델 해석에는 상용 해석프로그램인 RecurDyn의 TrackLM Toolkit을 사용하였다. 모델링된 다물체 차량의 전체적인 구조는 개념 설계된 자료를 바탕으로 Fig. 8과 같이 하부에는 한 쌍의 궤도 모델이 좌, 우에 각각 배치되어 상부프레임과 결합되어있으며, 궤도 아래쪽에는 노면모델을 구성하였다.

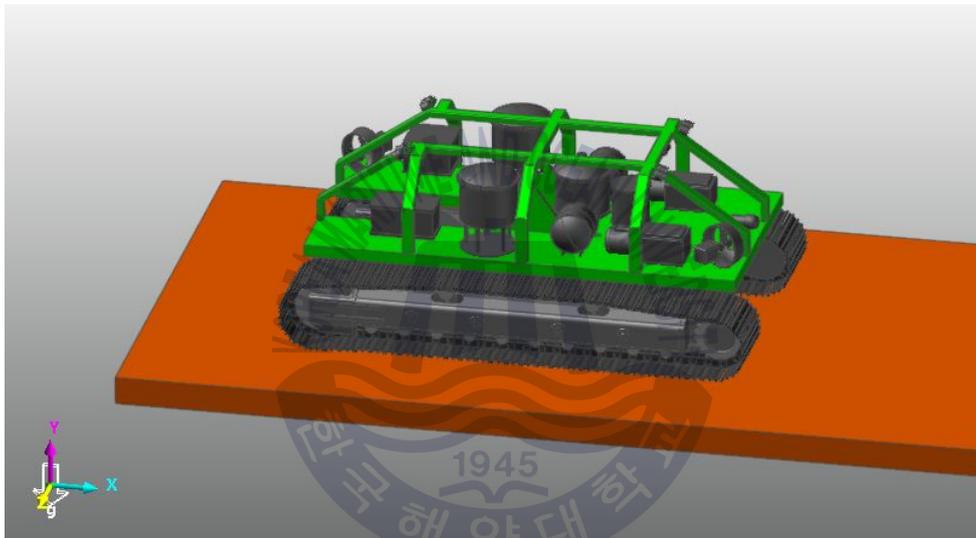


Fig. 8 Multi Body Vehicle Model using RecurDyn-TrackLM

2.3.2 궤도모델의 상세 제원

궤도 모델의 상세구성은 Fig. 9에서처럼 64개의 핀으로 연결된 궤도링크들과 스프라켓, 아이들러(Idler), 2개의 지지롤러(Support roller), 10개의 로드휠(Road wheel) 그리고 아이들러에 연결된 장력 조절장치로 구성되어있다. 이때 인접한 궤도링크들은 부싱으로 연결되었으며 나머지 회전부에는 회전조인트로 모델링하였고, 스프라켓의 회전조인트에는 모션을 입력하여 원하는 속도로 회전을 할 수 있도록 하였다.

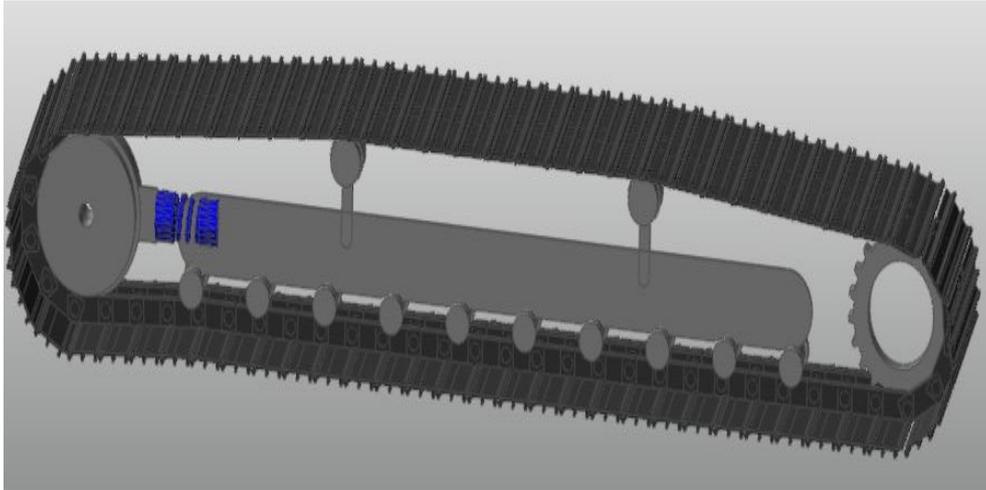


Fig. 9 Model of track

여기서 궤도를 구성하는 각 강체 및 궤도링크의 재질은 모두 Steel로 설정하였고 물성치는 Table 2와 같고, 각 강체의 외형과 상세 제원은 Fig. 10~13과 Table 3~6에 나타낸 바와 같다. 그리고 장력조절장치의 경우 Spring force로 구성하여 스프링계수 2600에 변형길이 200mm로 설정하여 일정한 장력을 유지하도록 구성하였다.

Table 2 Material properties

Body	Mass(kg)	Moment of inertia(kgmm ²)
Sprocket	84	2.8e6, 2.8e6, 5.58e6
Idler	494	1.4e7, 1.4e7, 2.47e7
Support roller	44.6	2.39e5, 2.39e5, 2.04e5
Road wheel	22	1.49e5, 1.49e5, 4.17e5
Track link	38	1.58e6, 1.74e5, 2.57e5

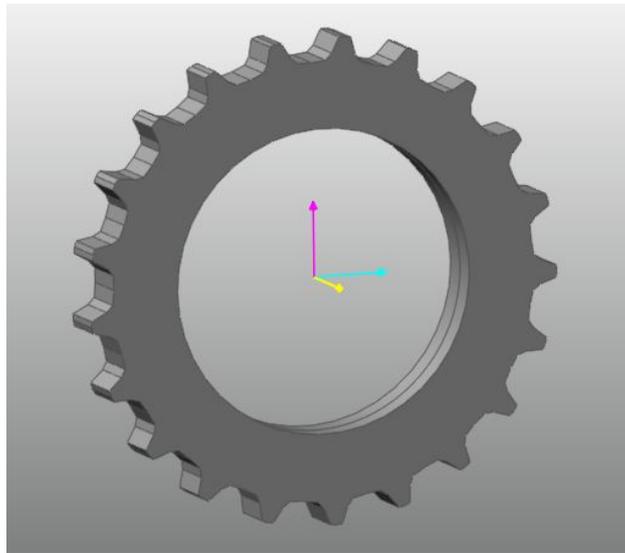


Fig. 10 Model of sprocket

Table 3 Dimension information of sprocket

Sprocket wheel radius(R_w)	202mm
Width of Teeth(W_t)	68mm
Dedendum Circle Radius(R_d)	290mm
Base Circle Radius(R_b)	316.85mm
Pitch Circle Radius(R_p)	322.9mm
Addendum Circle Radius(R_a)	330mm
Number of Teeth	21 ea

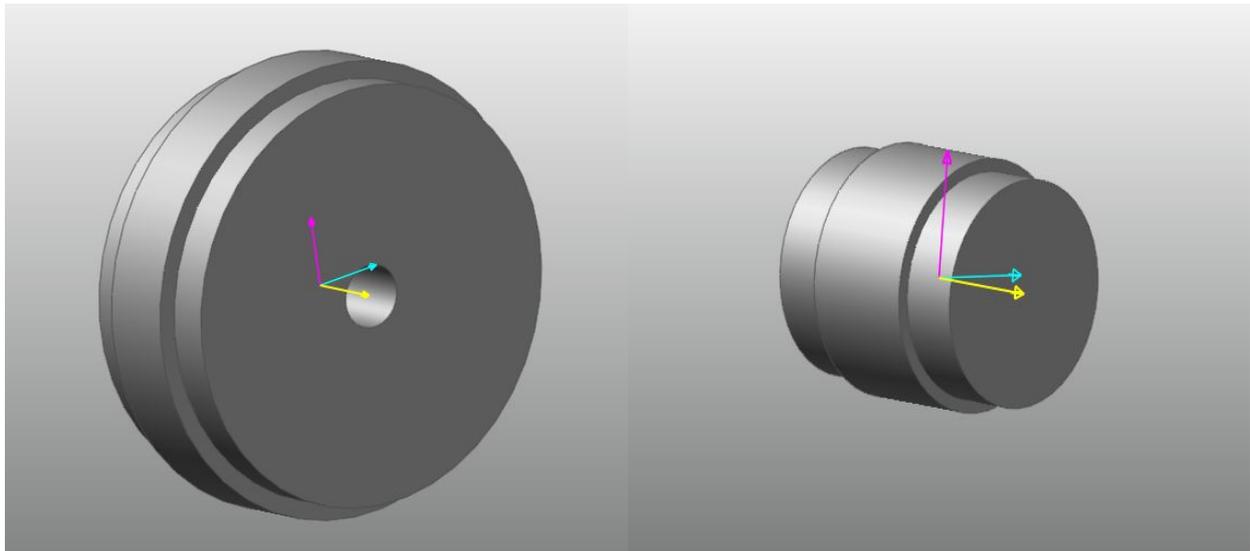


Fig. 11 Model of idler & support roller

Table 4 Dimension information of idler & support roller

Dimension	Idler	Support roller
Inner Flange Width(W_f)	100mm	100mm
Total Width(W_t)	210mm	200mm
Inner Flange Radius(F_f)	325mm	100mm
Wheel Radius(R_w)	300mm	90mm

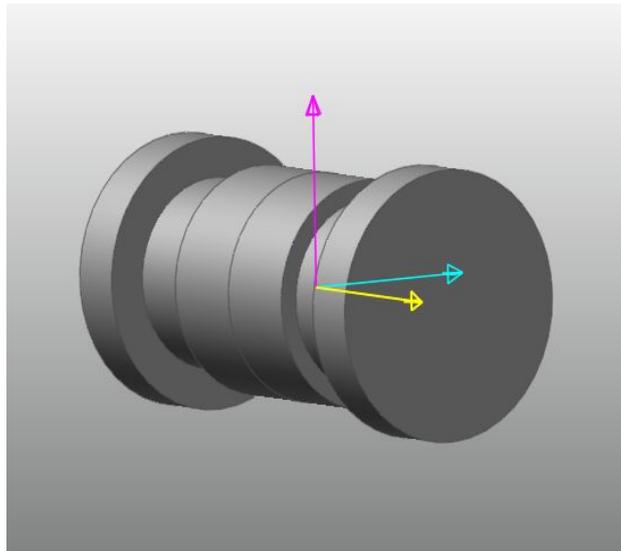


Fig. 12 Model of road wheel

Table 5 Dimension information of road wheel

Hub Width(W_h)	0.1mm
Hub and Inner Flange Width(W_{if})	100mm
Hub, Inner Flange and Wheel Width(W_w)	190mm
Total Width(W_t)	250mm
Hub Radius(R_h)	60mm
Inner Flange Radius(R_{if})	60mm
Wheel Radius(R_w)	50mm
Outer Flange Radius(R_{df})	71mm

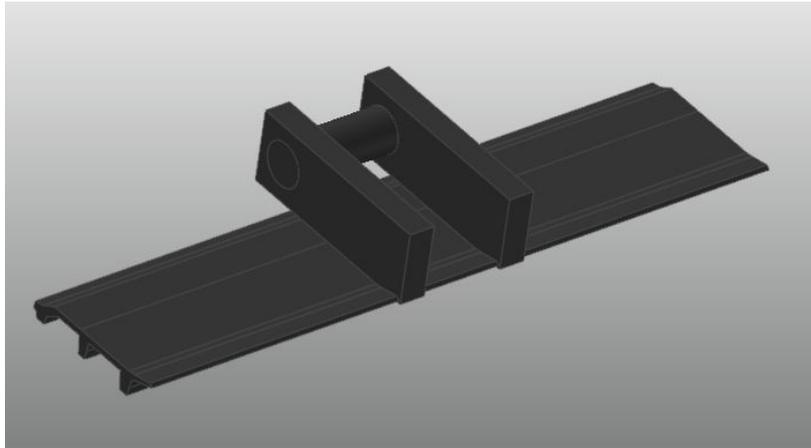


Fig. 13 Model of track link

Table 6 Dimension information of track link

Pin Radius(R_p)	29.5mm
Pin Length(L_p)	180mm
Track Link Inner Width(W_i)	110mm
Track Link Outer Width(W_o)	180mm
Track Link Left Length(L_l)	138.1mm
Track Link Right Length(L_r)	138.1mm
Track Link Height(H)	100mm
Left Pin Position(P_{lp})	-95, 50 (mm)
Right Pin Position(P_{rp})	95, 50 (mm)
Grouser Width(W_g)	900mm

2.3.3 토양모델

다물체 차량에 사용된 토양모델은 RecurDyn의 TrackLM Toolkit에 내장되어 있는 Bekker's theory을 이용하였다. Bekker는 수직압력-침하간의 관계를 아래 식 (8)과 같이 제안하였다.

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (8)$$

여기서 p 는 수직압력, b 는 압력이 작용하는 미소면적의 너비, z 는 침하량, 그리고 n , k_c , k_ϕ 는 토양의 특성에 따른 변수들이다.

궤도차량 같이 토양의 수직방향에 대한 반복하중이 작용할 경우, 침하에 대한 수직압력이 식 (8)과 같이 표현되지 않는다. Fig. 14는 반복하중이 작용하는 수직압력-침하 관계를 도식적으로 보여주고 있다. 하중이 작용하는 구간은 식 (8)에 의해 침하량에 대해 수직압력을 구할 수 있으며, 반복하중이 작용하는 unloading과 reloading 구간에 대한 수직압력-침하 곡선은 직선의 형태로 가정하여 Wong(1993)은 다음 식 (9)와 같이 정의 하였다.

$$p(z) = p_u - k_u (z_u - z) \quad (9)$$

여기서 $p(z)$ 는 수직압력, z 는 침하량, p_u 와 z_u 는 각각 unloading이 시작되는 지점에서의 수직압력과 침하를 나타내며 k_u 는 unloading, reloading 구간에서의 기울기로써 식 (10)과 같으며, r_s 는 Sinkage Ratio이다.

$$k_u = p_u / (z_n * r_s) \quad (10)$$

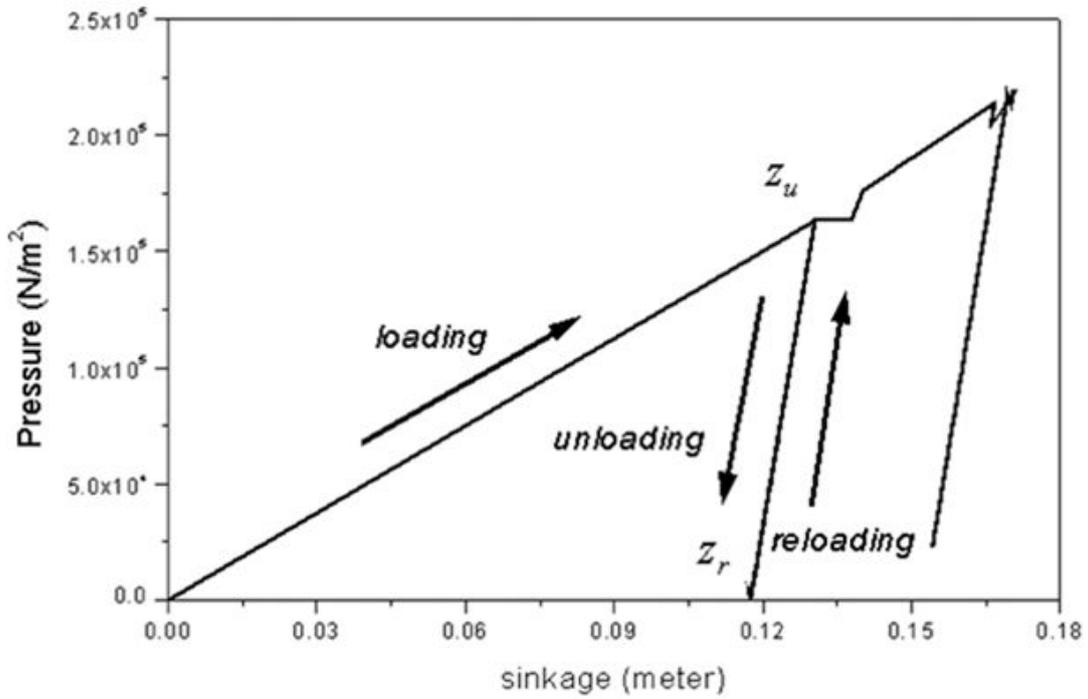


Fig. 14 Response to repetitive normal load

위에서 구한 수직압력과 지면의 특성 그리고 궤도가 회전함에 따라 지면과 궤도 사이에서 발생하는 전단변위 값들을 이용하여 궤도차량의 구동력인 전단 응력은 아래 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = (c + p \tan \phi) (1 - e^{-j/K}) \quad (11)$$

여기서 j 는 전단변위, C 는 토양의 점착력, ϕ 는 토양의 내부마찰각 그리고 K 는 전단변형계수이다.

2.4 Trencher 모델

궤도차량의 하단에 부착되어 케이블 및 파이프라인 매설을 위해 해저 바닥을 파내는데 사용하는 작업용 툴을 Trenching cutter 또는 Trencher라고 하며, 개념 설계된 Trencher의 외형과 제원은 각각 Fig. 15와 Table 7에 나타내고 있다. 또한 Fig. 16는 Trenching작업 시 cutter bar와 토양사이에서 발생하는 힘들을 나타내고 있으며, 이때 Trencher 모델에서 사용된 변수들은 Table 8와 같다.

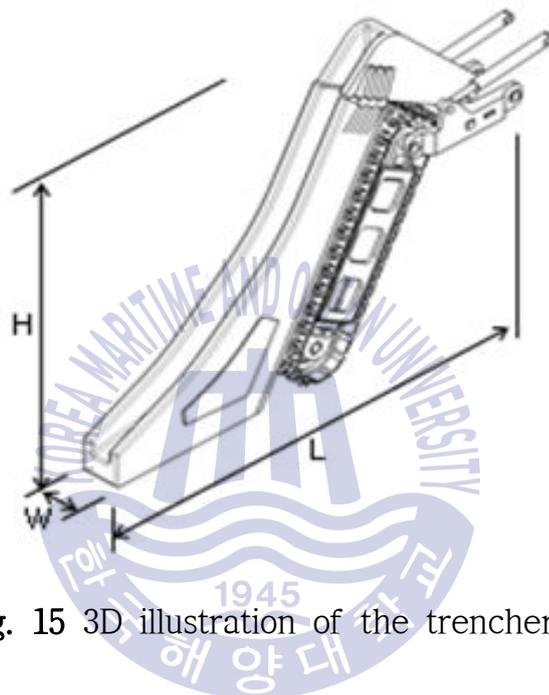


Fig. 15 3D illustration of the trencher

Table 7 Specifications of the Trencher

Parameters	Specification
Dimensions ($L \times W \times H$)	5700 × 500 × 4150 (mm)
Maximum trenching speed	300m/h
Maximum of cutting depth	2m
Trencher width	0.5m

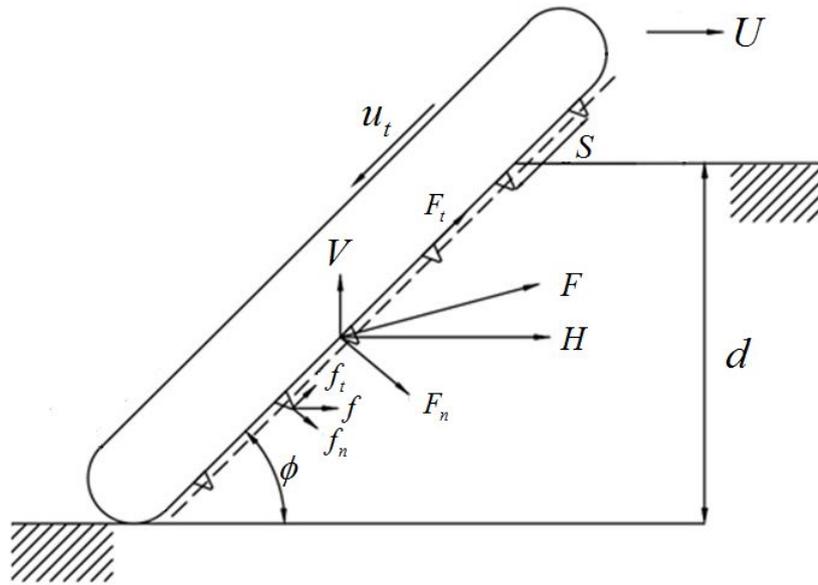


Fig. 16 Illustration of forces on the trenching cutter bar

Table 8 Definition of trencher's variables

Variables	Description	Values
k_n, k_t	The proportionality constants with dimensions of force(representing tool geometry and rock properties)	695
r	Bit radius	11mm
u_t	Belt speed	1m/s
ϕ	Belt angle	15° ~ 45°
S	Longitudinal bit spacing	0.15m
d	Cutting depth	0 ~ 2m
m	Number of cutting track	3
K	The coefficient of shape bit	1.8

Fig. 15에 보이는 Trencher에서 각각의 Bit와 토양과의 경계면에서 발생하는 수직, 수평방향의 힘인 f_n 과 f_t 은 아래의 식 (12)와 같이 토양의 특성과 Bit의 치수 그리고 Bit가 박히는 길이 l 의 함수로 표현할 수 있다.

$$f_n = k_n \frac{l}{r} \quad \left(l = \frac{U}{u_t} S \sin \phi \right)$$

$$f_t = k_t \frac{l}{r} \quad (12)$$

Trencher의 모든 Bit에서 발생하는 힘들의 합력은 식 (13)과 같이 하나의 Bit에서 발생하는 힘과 Bit의 총 개수 N_a 의 곱으로 나타낼 수 있다(Malcolm, 1978).

$$F_t = \sum f_t = N_a f_t = m k_t \frac{d}{r} \frac{U}{u_t} \quad \left(N_a \approx \frac{m d}{S \sin \phi} \right)$$

$$F_n = \sum f_n = N_a f_n = m k_n \frac{d}{r} \frac{U}{u_t} \quad (13)$$

식 (13)에서 구한 Trencher에서 발생하는 반력을 궤도차량의 차량고정좌표계의 x 축, z 축에 힘의 성분으로 대입하기 위해 좌표변환을 하면 아래 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$H = F_n \sin \phi + F_t \cos \phi = F_t (K \sin \phi + \cos \phi) \quad \left(K = \frac{F_n}{F_t} \right)$$

$$V = F_n \cos \phi - F_t \sin \phi = F_t (K \cos \phi - \sin \phi) \quad (14)$$

여기서 H 는 차량에 작용하는 수평 방향의 반력 그리고 V 는 수직 방향의 반력이 되겠으며, 목표성능으로 설정해둔 최대 Trenching 속도인 $300m/h$ 의 속도로 궤도차량이 견인할 경우 Trencher의 각도에 따른 수평, 수직 방향의 반력은 Fig. 17의 그래프와 같다.

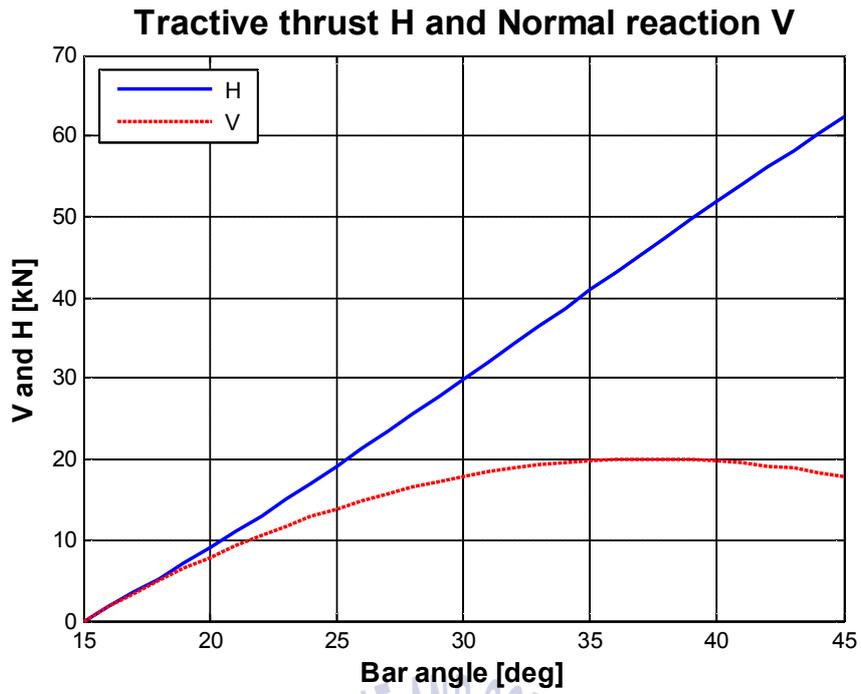
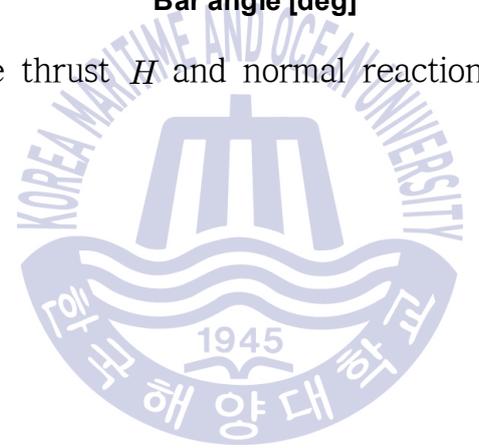


Fig. 17 Tractive thrust H and normal reaction V of trencher



제 3 장 수치 시뮬레이션을 이용한 운동성능 해석

3.1 궤도차량의 3자유도 운동 방정식의 시뮬레이션 및 해석

트랙기반 해저 중작업용 로봇의 작업용 틀인 Trencher와 부력 및 유체항력이 고려된 궤도차량의 3자유도 운동 방정식의 유효성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이터를 구성하였다. 입력은 좌, 우 궤도의 회전속도로 가하였고, 지반의 재질은 모래, 미사 그리고 점토로 구성된 사양토의 Parameter를 적용하였고, 노면은 굴곡 및 장애물이 없는 평탄한 지형으로 가정하였다.

3.1.1 시뮬레이터의 구성

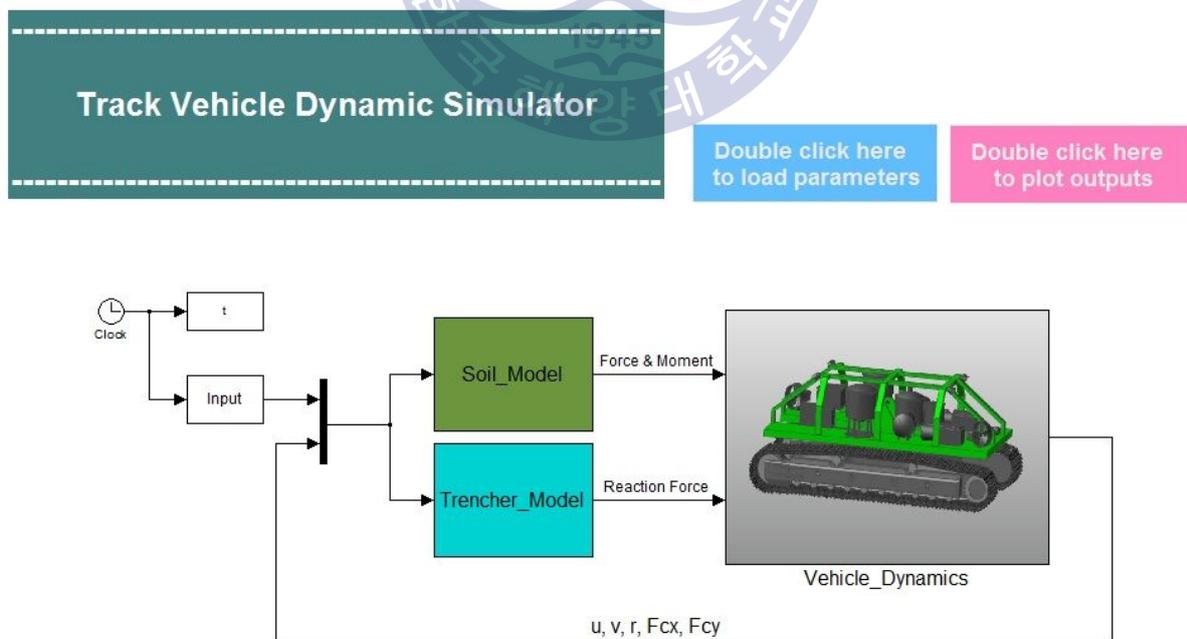


Fig. 18 Simulator using Matlab & Simulink

시뮬레이터의 구성은 위 Fig. 18과 같으며, Soil Model과 운동방정식을 이용하여 궤도차량의 위치, 속도, 가속도 및 방향각을 구하고 이를 다시 피드백 시켜 궤도와 토양사이에서 발생하는 전단력과 Trencher의 반력을 구할 수 있도록 구성하였다.

3.1.2 직진주행 시뮬레이션

직진주행 시뮬레이션의 경우 목표최고속도인 $0.56m/s(3km/h)$ 로 주행하도록 좌, 우 궤도에 같은 입력으로 Fig. 19에서처럼 0에서부터 목표속도에 도달할 때까지 증가시켜 최대 $95deg/s$ 로 회전하도록 하였다.

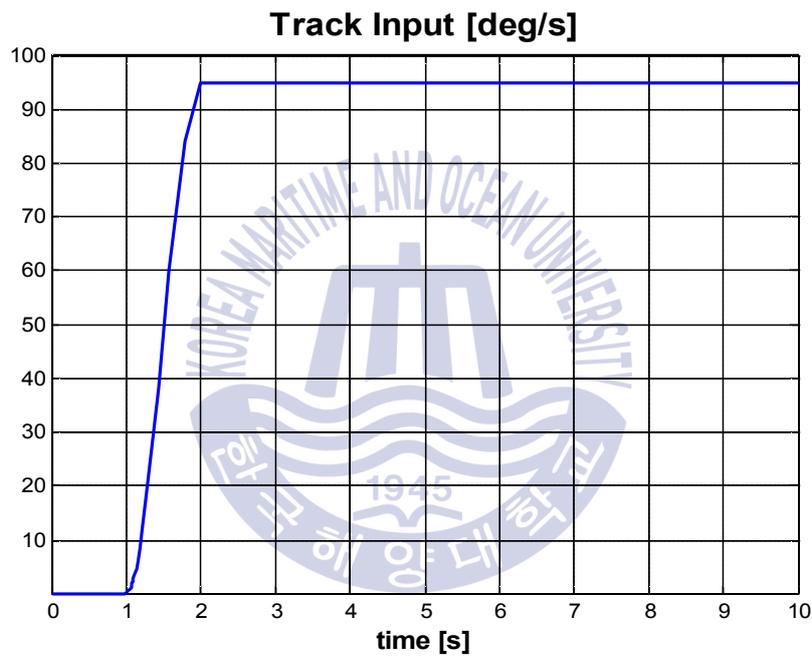


Fig. 19 Track input of longitudinal motion simulation

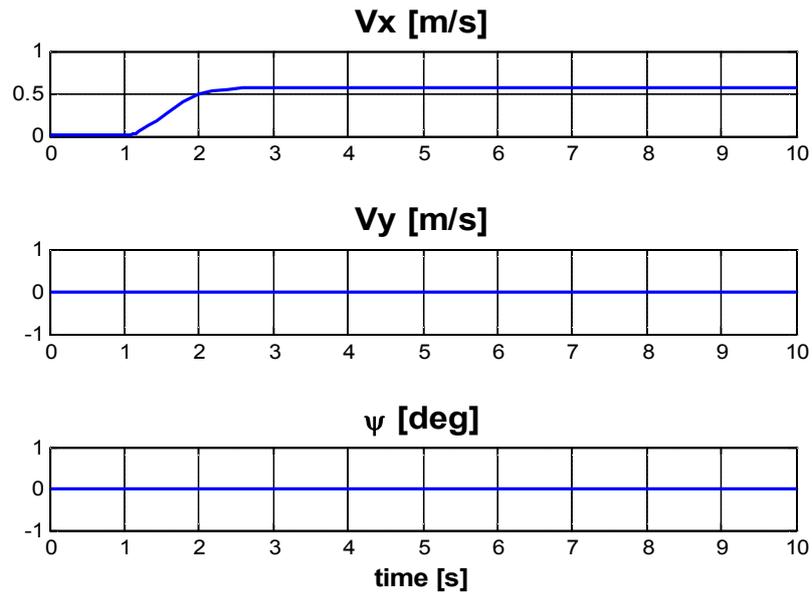


Fig. 20 Velocity and angle of longitudinal motion simulation

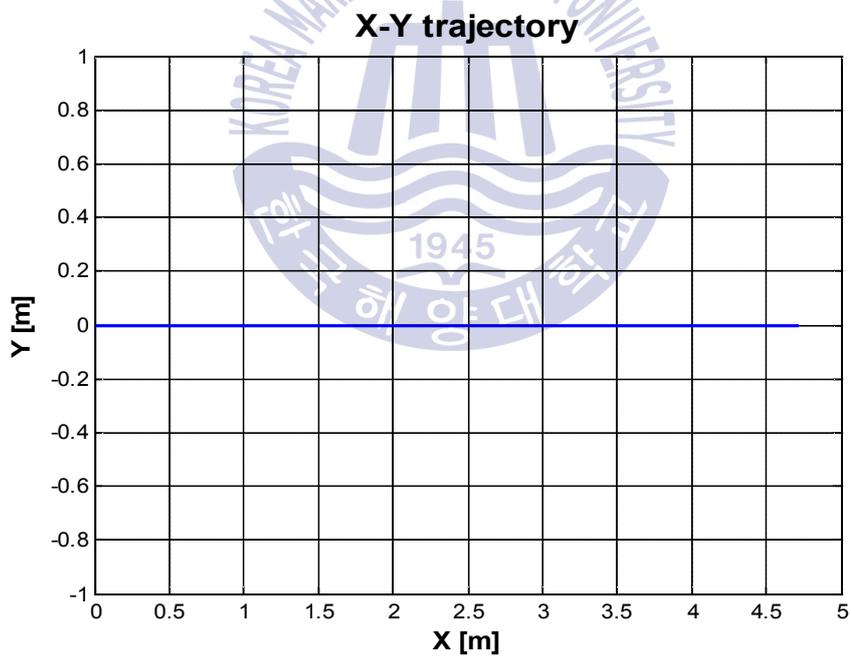


Fig. 21 X-Y plane motion of longitudinal motion simulation

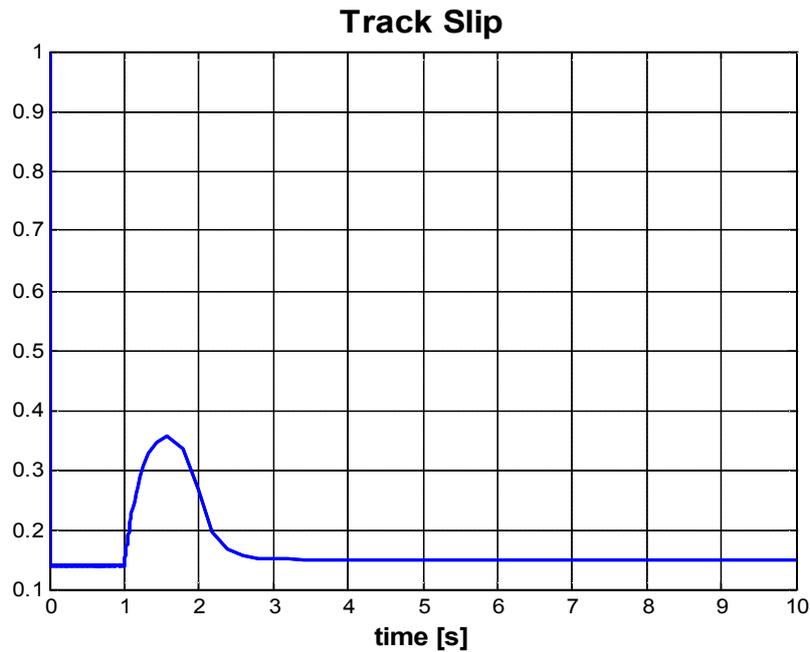


Fig. 22 Track slip of longitudinal motion simulation

이때 Fig. 20의 그래프에서 좌, 우 궤도의 회전속도가 같으므로 횡방향의 속도와 방향각이 생기지 않고 직진방향의 속력만 궤도 입력이 증가하고 일정해짐에 따라 가속과 등속운동이 이루어짐을 알 수 있다. Fig. 21은 차량이 주행한 궤적이며, Fig. 22은 궤도 슬립으로 입력이 증가함에 따라 슬립이 증가하고 차량이 가속이 붙으면서 다시 일정한 슬립으로 유지되는 모습을 볼 수 있다.

3.1.3 선회운동 시뮬레이션

선회운동 시뮬레이션에서는 양쪽 궤도의 입력은 Fig. 23에서처럼 좌, 우 궤도의 회전속도를 각각 80deg/s , 60deg/s 로 설정하여 50초간 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 직진주행과는 다르게 좌, 우 궤도의 속도차이가 있으므로 약 0.03m/s 의 횡방향속도와 320° 만큼의 방향각이 생김을 Fig. 24을 통해 알 수 있고, 그에 따른 선회운동 궤적은 Fig. 25에 나타나있고 약 7m 의 선회반경을 보인다. Fig. 26은 그때의 궤도슬립을 나타내고 있다.

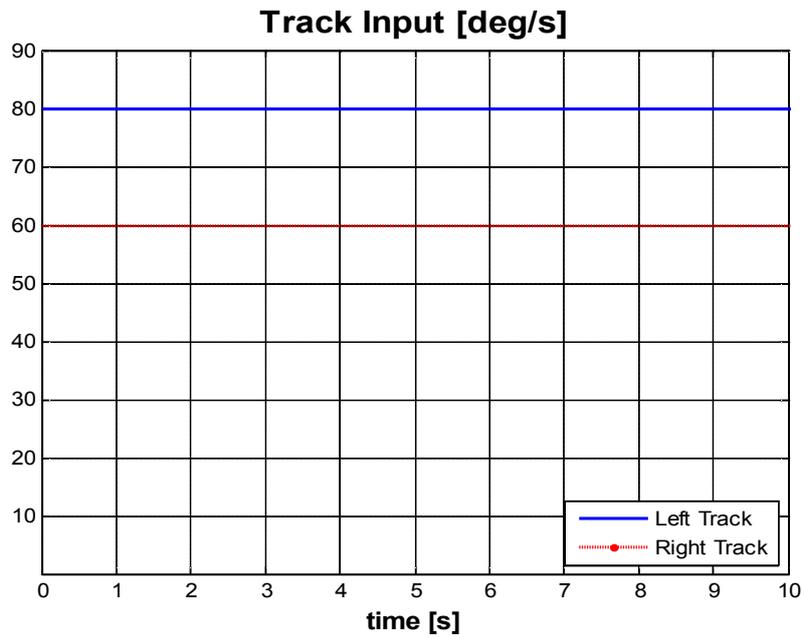


Fig. 23 Track input of turning motion simulation

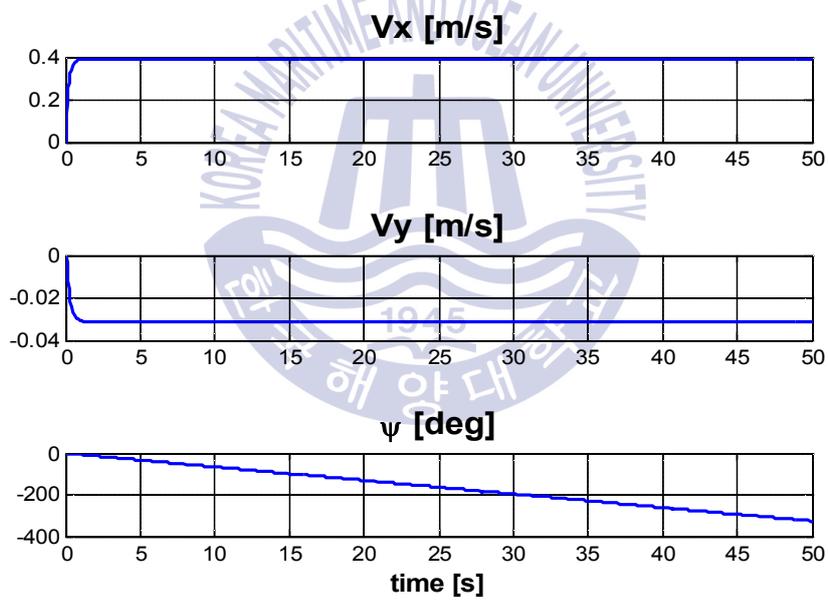


Fig. 24 Velocity and angle of turning motion simulation

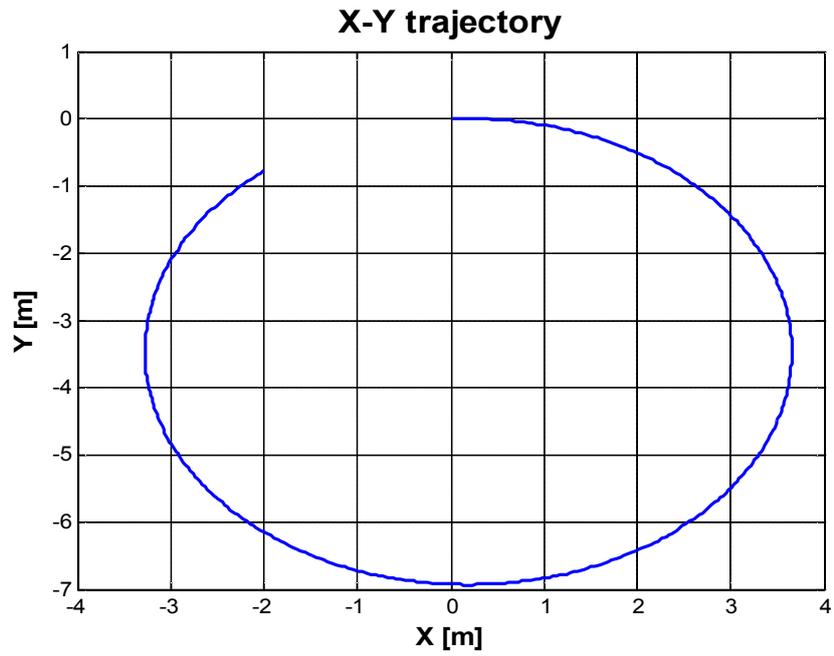


Fig. 25 X-Y plane motion of turning motion simulation

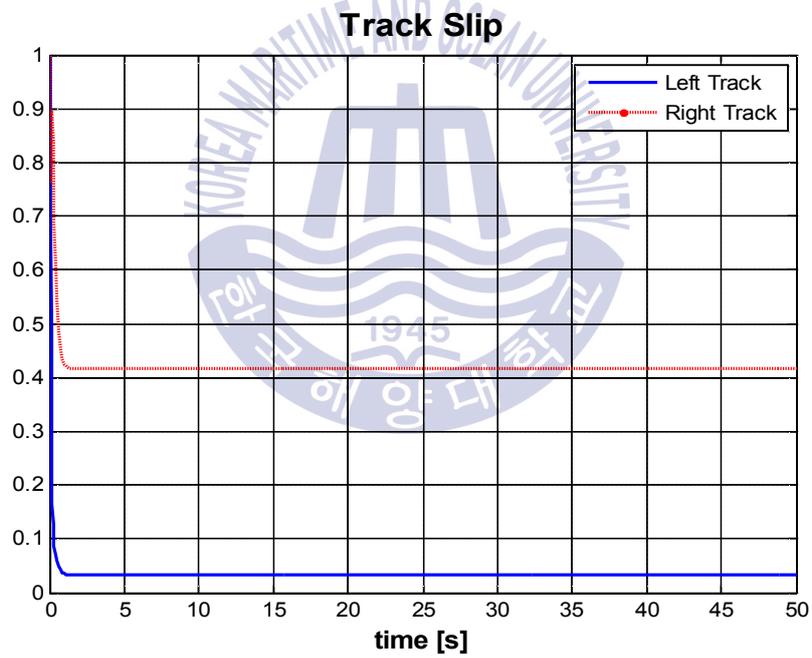


Fig. 26 Track slip of turning motion simulation

3.1.4 Trenching 작업 시 전진방향 운동에 필요한 견인력 분석

Trenching 작업 시 주행 시뮬레이션의 경우 목표한 최고 Trenching 작업속도인 $300m/h(0.08m/s)$ 의 성능이 나오도록 궤도 회전속도를 조절하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 Trencher의 회전각도 ϕ 는 $15^\circ \sim 45^\circ$ 에서 운용하도록 가정하였으며, 매우 저속의 작업속도인 $0.08m/s$ 로 운용하므로 직진 시뮬레이션만 수행하여 궤도차량의 스프라켓에서 걸리는 토크를 통해 필요 견인력을 해석하고자 한다.

Trenching 작업 시 시뮬레이션은 Trencher의 회전각도 ϕ 를 $20^\circ, 35^\circ, 45^\circ$ 로 조절하여 3가지 케이스에 대한 직진 시뮬레이션을 수행하였고 궤도의 입력은 ϕ 가 20° 일 때 차량의 속도가 목표 속도인 $0.08m/s$ 에 도달할 때 까지 1~3초 구간에 걸쳐 증가시켰다.

이때 Fig. 28의 궤도 슬립을 보면 같은 입력에 대해서 Trencher의 매설심도가 깊어질수록 저항력이 커지므로 궤도가 헛도는 현상인 슬립이 더 큰 것을 알 수가 있다.

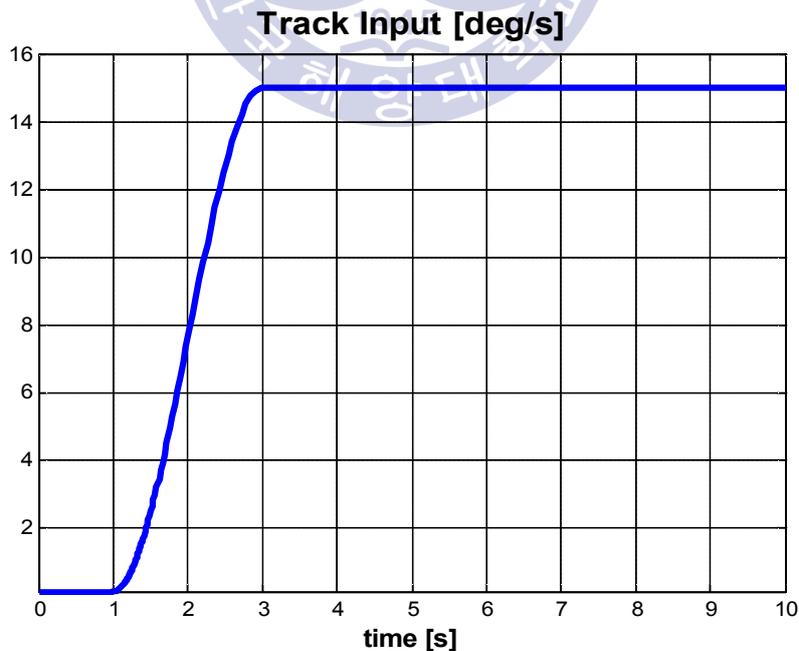


Fig. 27 Track input of longitudinal motion simulation on trenching

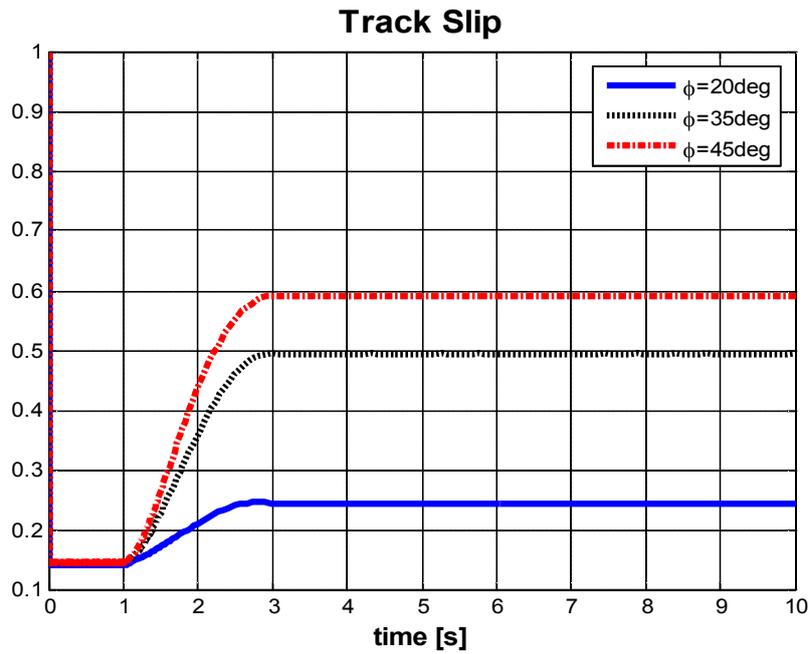


Fig. 28 Track slip of longitudinal motion simulation on trenching

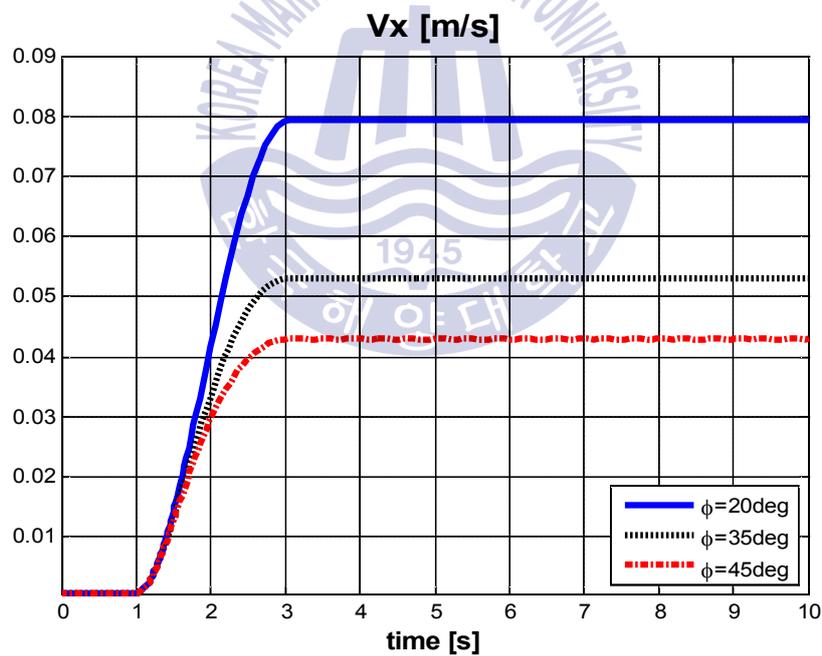


Fig. 29 Velocity of longitudinal motion simulation on trenching

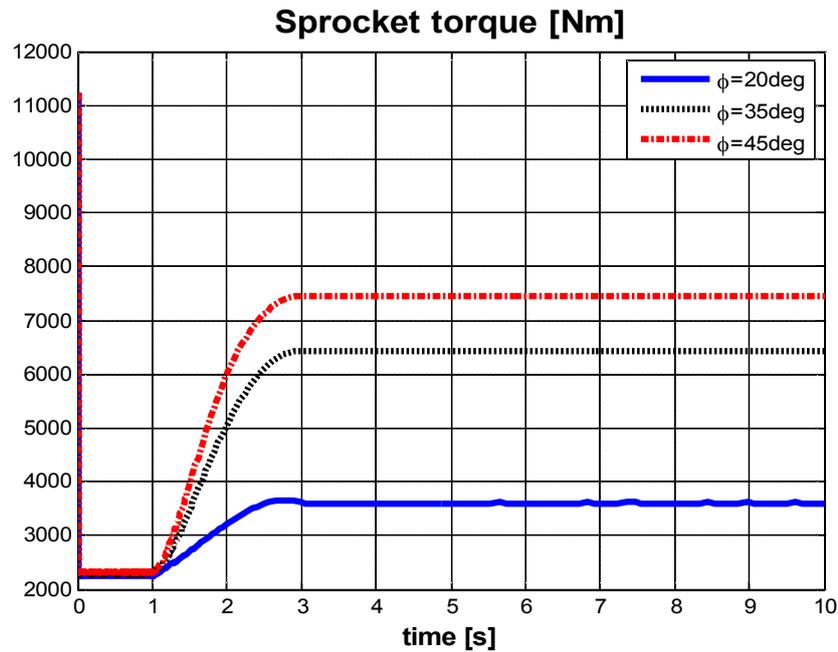


Fig. 30 Sprocket torque of vehicles

또한 같은 속도의 궤도 입력을 가했어도 궤도 슬립이 많이 일어날수록 진행 방향의 속력의 크기는 작음을 Fig. 29에 잘 표현되고 있다. 이를 통해 작업 부하가 클 경우에는 슬립 현상이 매우 크게 발생하기 때문에 궤도의 회전속도를 높여도 직진운동의 효율이 떨어지므로 저속으로 운용하거나 차량을 정지시켜 Trencher의 회전속도를 증가시켜 Trenching속도를 높이는 방법이 효과적임을 유추할 수 있다.

Fig. 30은 궤도 스프라켓의 걸리는 토크를 계산한 것이며, Trencher의 각도 ϕ 에 따라 $4371Nm$, $7783Nm$, $9046Nm$ 의 토크가 걸리는 것을 알 수 있다. 이때 토크는 궤도와 지면의 상호작용에 의해 발생하는 직진방향의 전단력과 궤도 스프라켓의 반경에 의해 구할 수 있고, 이를 통해 궤도차량과 Trencher를 구동하는데 필요한 구동 모터 용량의 설계에 필요한 자료를 제공할 수 있다.

3.2 MBD Model 시뮬레이션

본 논문에서 트랙기반 수중건설로봇의 운동성능을 해석하기 위하여 실제모델을 하나의 강체로 모델링한 강체 차량 모델과 실제모델과 유사하게 모든 구성요소가 모델링된 다물체 차량 모델을 이용하였고, 3.2절에서는 두 모델의 동역학 해석 결과를 비교, 분석 하고자 한다.

3.2.1 직진주행 시뮬레이션

직진주행 시뮬레이션의 입력으로는 좌, 우 스프라켓의 동일한 회전속도를 95deg/s와 70deg/s인 두 가지의 직진 주행 시뮬레이션을 수행하였으며, 0deg/s에서부터 시작하여 2~4초 구간에 서서히 증가시켜 원하는 회전 속도에 도달하도록 입력을 가하였다.

Fig. 31 ~ Fig.34는 해당 시뮬레이션 조건에 따른 차량의 직진방향 주행거리와 속도를 나타내고 있다. 그 결과 다물체 차량이 강체 차량에 비해 느린 것을 알 수 있으며, 다물체 차량의 운동은 진동이 발생함을 알 수 있다.

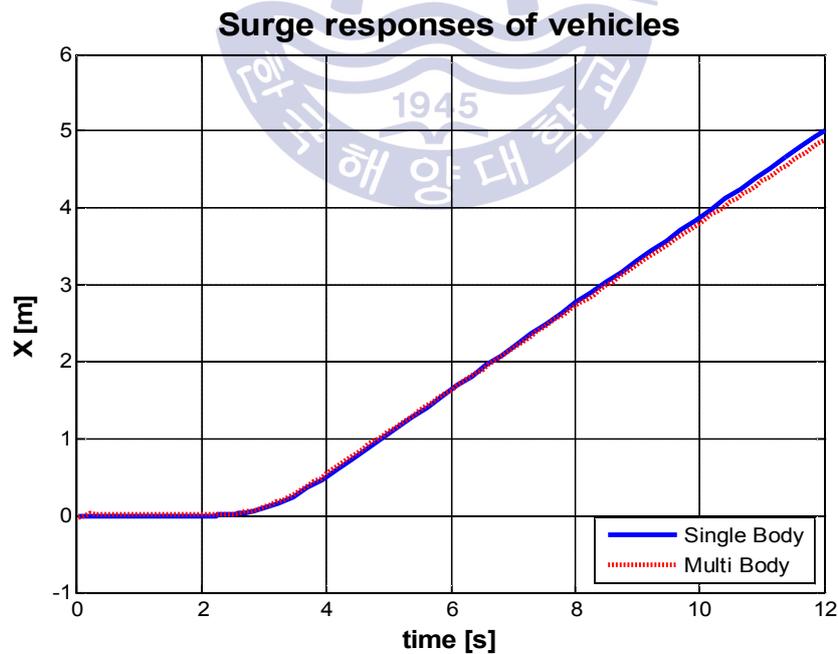


Fig. 31 Surge responses of vehicles at Input=95deg/s

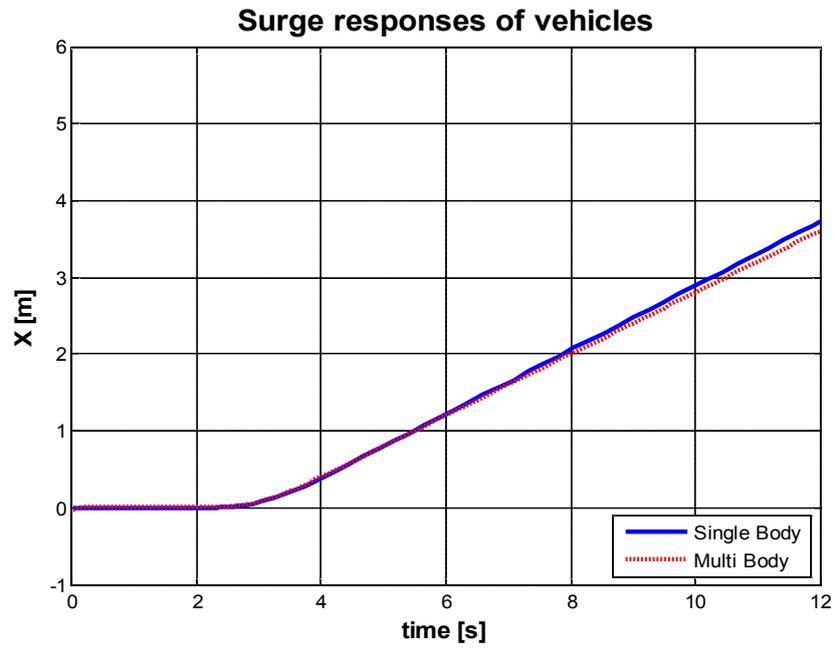


Fig. 32 Surge responses of vehicles at Input=70deg/s

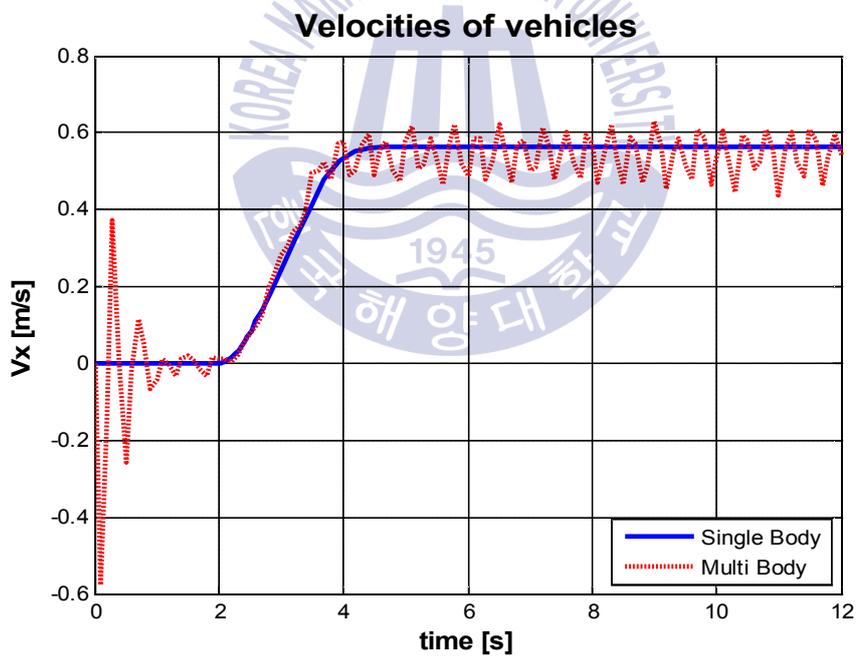


Fig. 33 Velocities of vehicles at Input=95deg/s

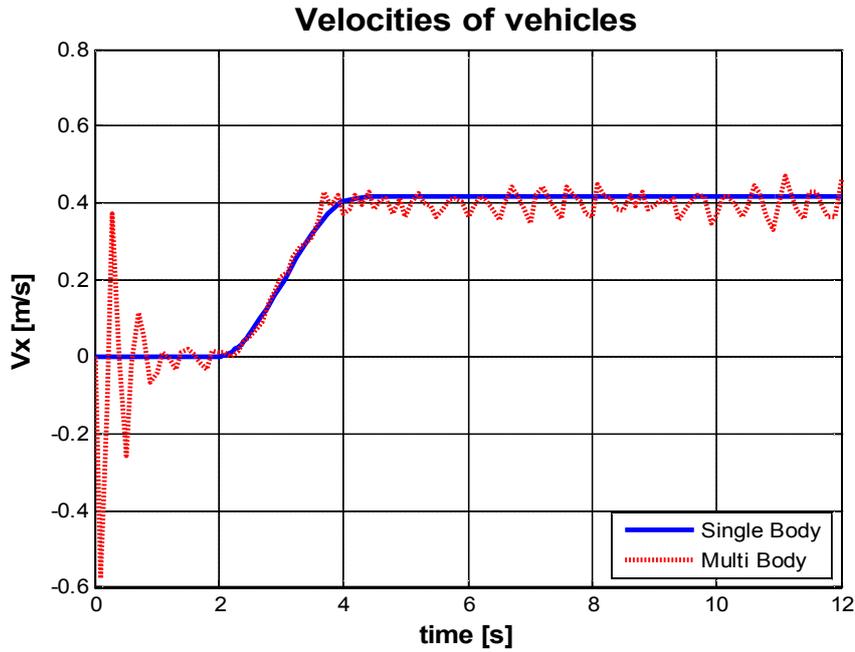


Fig. 34 Velocities of vehicles at Input=70deg/s

이는 다물체 차량의 경우 강체 차량과 다르게 무한개의 모든 구성요소가 상세 모델링 되어 있고, 그에 따라 모든 회전조인트(Support roller, Road wheel, Idler 등)에서 발생하는 반력들, 장력 조절 장치에서 생기는 Spring force 그리고 각각의 궤도링크가 스프라켓을 따라 회전하면서 최초로 지면과 접촉할 때마다 지면과 링크사이의 접촉각도에 따라 생기는 수평, 수직방향의 반력이 작용하게 된다. 이러한 요소들은 강체 차량에는 고려되지 않았기 때문에 실제 궤도차량과 다물체 차량 모델에서 발생하는 진동은 강체 차량에서는 나타나지 않는다.

그리고 Fig. 33~Fig. 34에서 다물체 차량이 초기 2초간 주행하지 않는 구간에서 진동이 발생하는 이유는 수직압력과 침하간의 관계식인 식 (8), (9)의 모델을 사용하면서 정적 평형상태에 놓일 때 까지 진동을 나타내고 있다.

3.2.2 선회운동 시뮬레이션

선회운동 시뮬레이션의 입력으로는 Fig. 35와 같이 좌, 우 궤도의 회전속도를 각각 80deg/s, 60deg/s에 도달하도록 2~4초 구간에 서서히 증가시키도록 하여 20초간 시뮬레이션을 수행하였다.

그 결과 Fig. 36과 Fig. 37을 통해 다물체 차량이 강체 차량에 비해 직진방향의 속도는 빠르고, 횡방향의 속도는 느린 경향을 보인다. 여기서 4초 이후 평균속력을 구해보면 직진방향은 0.0119m/s 횡방향은 0.0255m/s만큼 차이가 난다. 그 결과에 따라 Fig. 38의 그래프를 보면 강체 차량이 다물체 차량 보다 약 90° 만큼 방향각이 더 발생한 것을 알 수 있다.

이는 3.2.1절에서 설명한 바와 같이 다물체 차량은 강체 차량과는 다르게 무한궤도의 모든 구성요소들이 상세 모델링 되어있어 각각의 회전조인트에 반력들이 발생하게 된다. 특히 선회운동에서는 직진주행과는 다르게 직진방향 뿐만 아니라 횡방향의 반력도 생김으로써 차량이 조향하는데 있어 저항성분으로 작용하게 된다. 이때, 각각의 회전조인트에서 발생하는 반력의 크기는 Fig. 40과 같다.

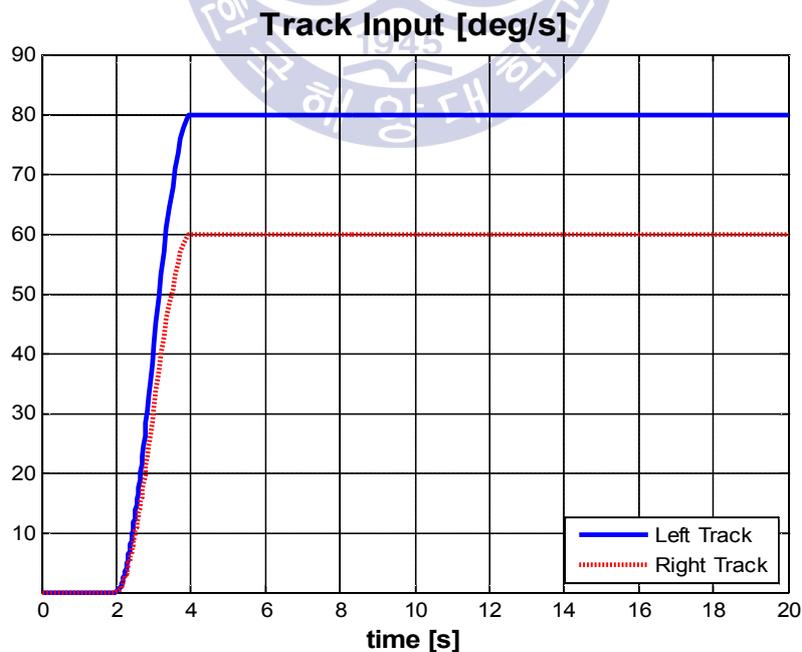


Fig. 35 Track input of turning motion simulation

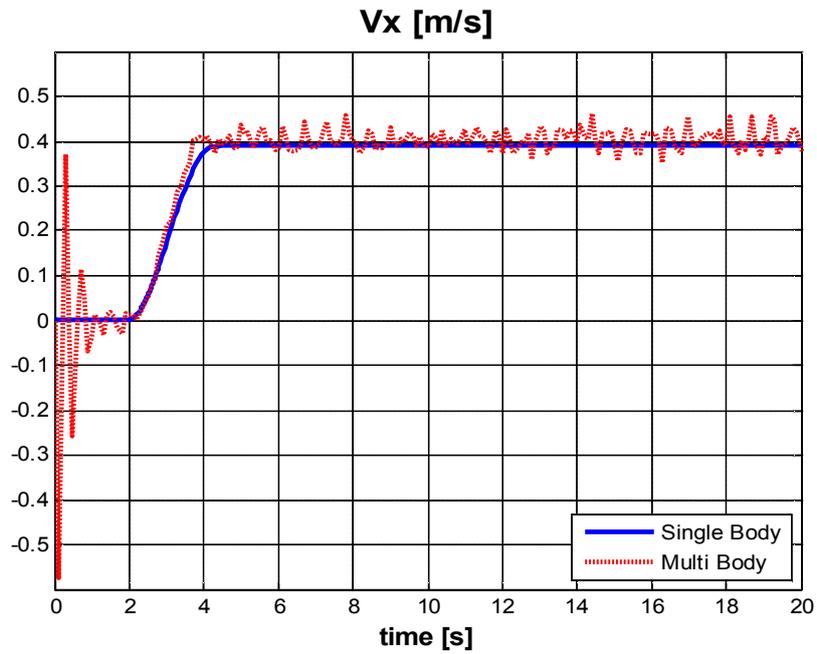


Fig. 36 Longitudinal velocity of turning motion simulation

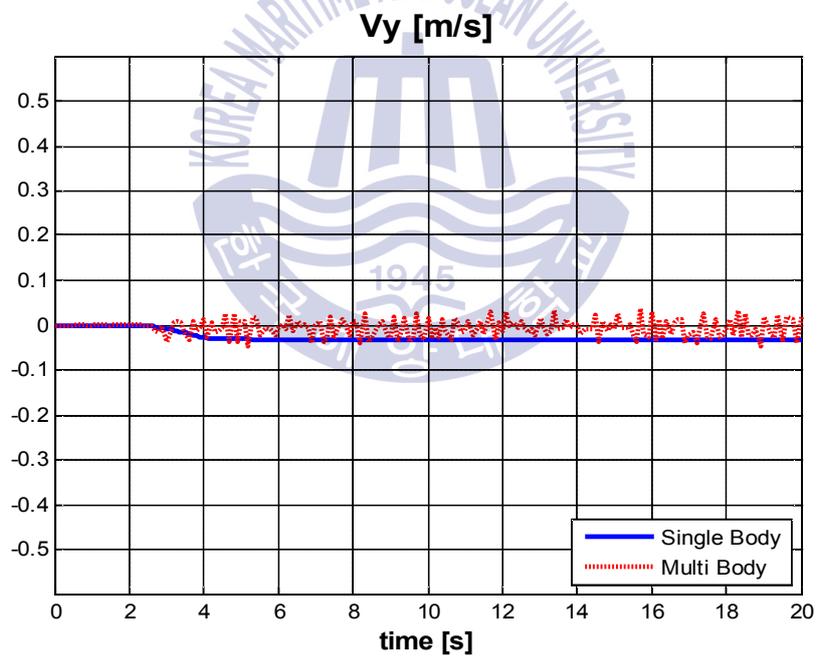


Fig. 37 Lateral velocity of turning motion simulation

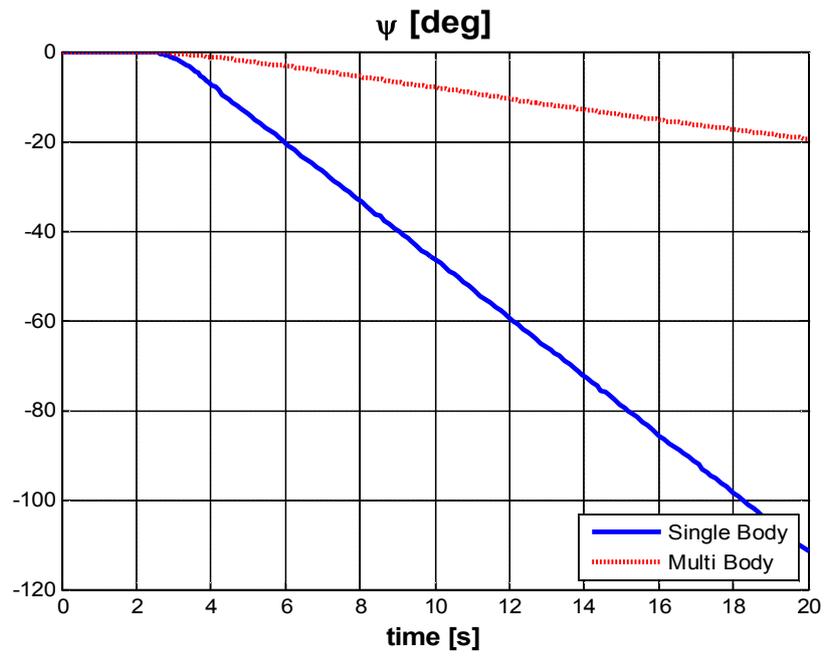


Fig. 38 Heading angle of turning motion simulation

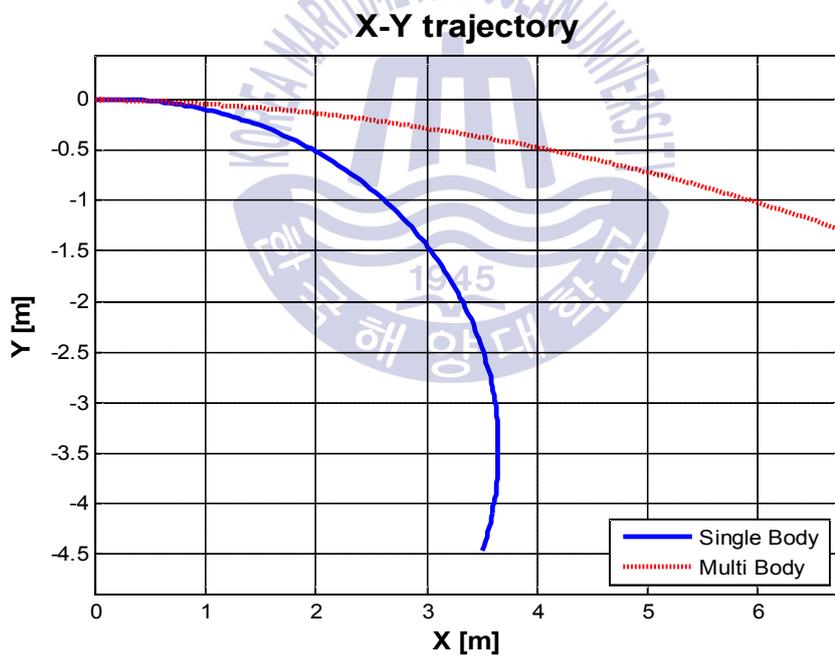
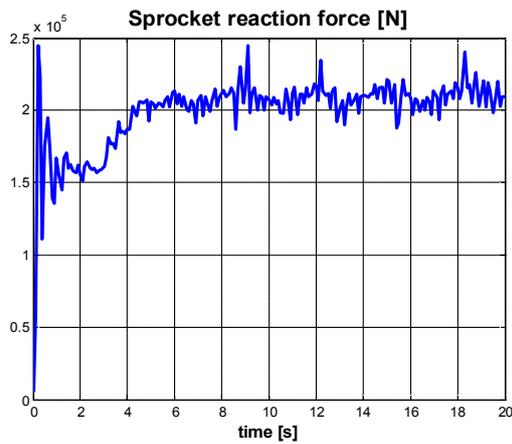
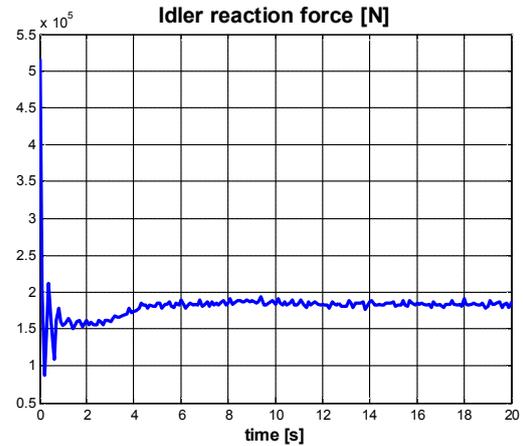


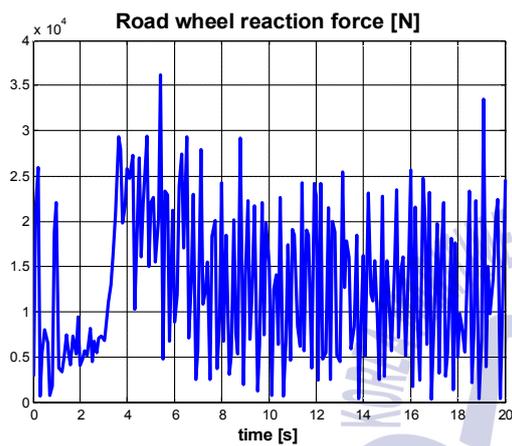
Fig. 39 X-Y plane motion of turning motion simulation



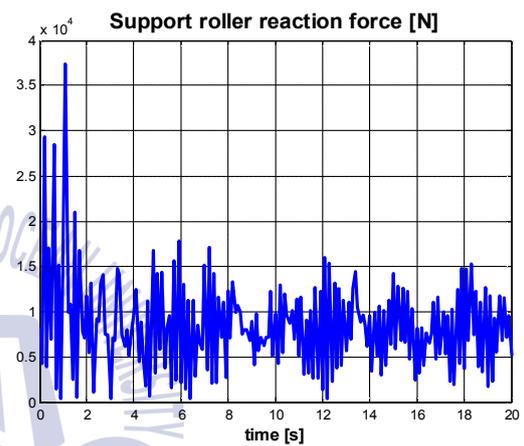
(a) Sprocket reaction force



(b) Idler reaction force



(a) Sprocket reaction force



(b) Idler reaction force

Fig. 40 Reaction forces of revolute joints

3.2.3 Trenching 작업 시 전진방향 운동에 필요한 견인력 분석

Fig. 41과 같이 좌, 우 궤도에 같은 입력을 가하여 직진 주행하도록 하고, Trencher의 각도를 35° , 45° 의 두 가지 경우에 대하여 직진 시뮬레이션을 수행하였다.

이때 Fig. 42~43은 궤도스프라켓의 걸리는 토크를 나타내고 있으며, 앞의 3.2.1~3.2.2절 에서 설명한 바와 같이 강체 차량에는 고려되지 않은 궤도 구성요소의 반력들에 의해 다물체 차량의 스프라켓의 걸리는 토크의 크기가 비교적 큰 것을 알 수 있고 앞선 시뮬레이션의 결과들과 같이 다물체 차량은 진동 운동을 하므로 토크 또한 진동이 있음을 알 수 있다.

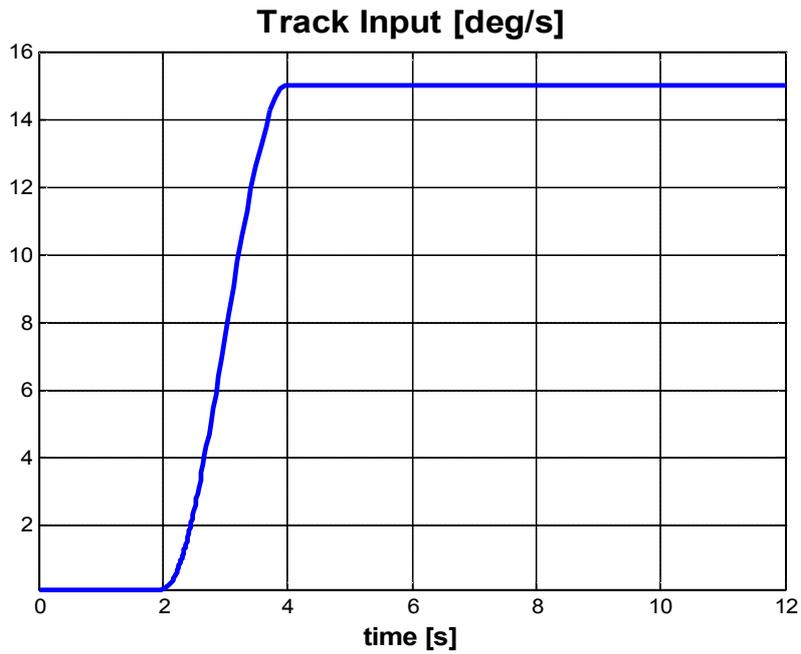


Fig. 41 Track input of longitudinal motion simulation on trenching

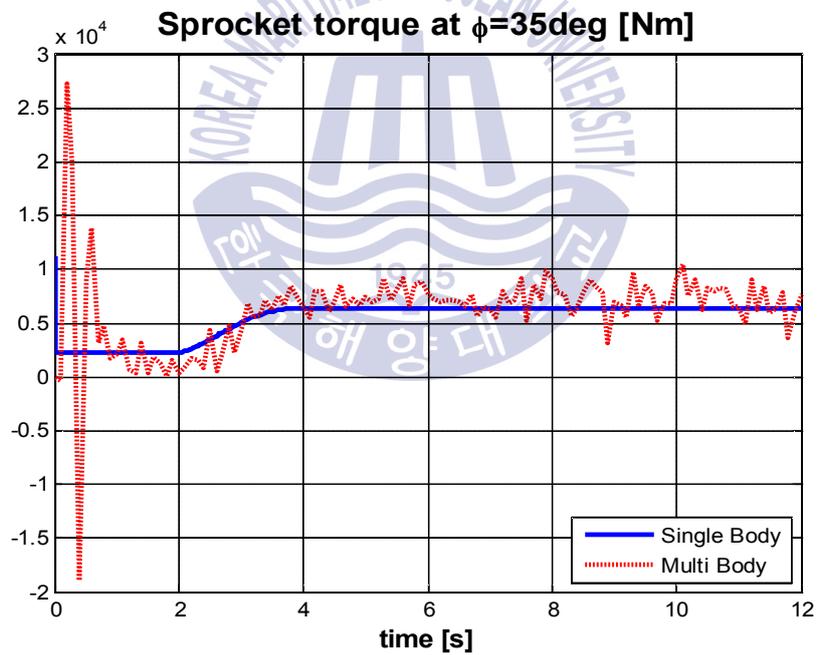


Fig. 42 Sprocket torque of vehicles at $\phi = 35^\circ$

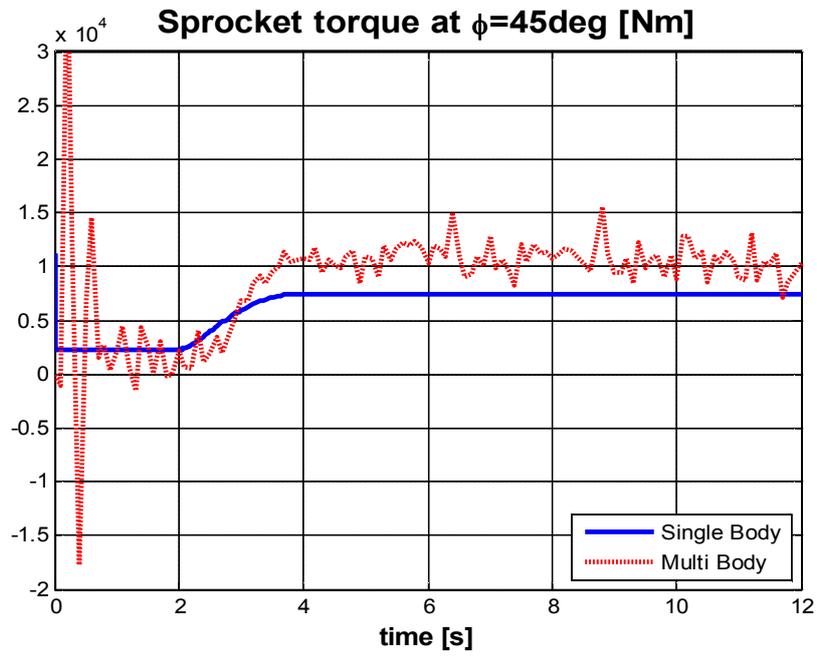


Fig. 43 Sprocket torque of vehicles at $\phi = 45^\circ$



제 4 장 결 론

4.1 결론

본 논문에서는 트랙기반 수중건설로봇의 차체인 궤도차량의 운동 모델링과 시뮬레이션을 통한 운동성능 해석에 관한 내용을 다루고 있다.

사용된 궤도차량의 모델은 실제모델과 유사하게 모든 구성요소가 모델링된 다물체 차량모델과 실제모델을 하나의 강체로 모델링한 강체 차량모델이며, 수중환경에 대해서는 부력 및 유체 항력을 고려하여 운동 모델링을 수행하였다.

또한 수치 시뮬레이션 프로그램인 RecurDyn과 MatLab/Simulink의 이용하여 모델링된 시스템의 운동특성 및 설계목표 성능을 확인하기 위한 동역학 해석을 수행하였다. 시뮬레이션 조건으로 입력은 좌, 우 궤도의 회전속도이며, 모래, 미사, 그리고 점토로 구성된 사양토의 Parameter를 이용하여 굴곡 및 경사가 없는 평탄한 노면모델을 적용하였다. 시뮬레이션 결과 다물체 차량과 실제 차량에서도 발생하는 진동이 강체 차량에서는 장력조절장치, 궤도링크와 지면과의 접촉 주기에 따른 반력 그리고 각 조인트에서 발생하는 반력들이 고려되지 않았기 때문에 진동이 발생하지 않음을 확인 하였다.

또한, 작업용 툴인 Trencher의 역학모델을 적용하여 Trenching 작업 시 차량이 주행할 때 스프라켓에 걸리는 최대토크를 계산함으로써 궤도차량과 Trencher를 구동하는데 필요한 구동 모터 용량의 설계에 필요한 자료를 제공할 수가 있으며, 궤도차량의 운동 모델을 이용하여 운동성능 해석은 물론 궤도차량의 자율이동을 위한 제어기 설계 모델로도 사용하고자 한다.

4.2 추후연구

추후 연구로는 해저지반에 대한 토양의 실험모델을 추가하여 시뮬레이션을 수행할 계획이며, 추가적으로 험지 및 장애물이 존재하는 노면에서도 Trenching 경로를 유지하도록 하는 직진주행 알고리즘을 개발해 나갈 계획이다. 또한 실제 플랫폼을 제작하여 실험적 연구를 통해 두 해석모델들의 검증작업을 수행할 계획이다.



참고문헌

- 이창호, 김형우, 홍섭, 2009. 연약지반 직렬 무한궤도 주행차량의 동적 거동 해석 프로그램 개발. *해양공학회 추계학술대회 논문집*, 삼성중공업 기술연수원, 거제, pp.316-321.
- Baladi, G.Y. & Rohani, B., 1979. *A terrain-vehicle interaction model for analysis of steering performance of track-laying vehicles*. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical report of GL-79-6.
- Choi, D.H. et al., 2015. *A Study on Dynamic Modeling for Underwater Tracked Vehicle*. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(5), pp.386-391.
- Le, A.T., Rye, D.C. and Durrant-Whyte, H.F., 1979. Estimation of Track-soil Interactions for Autonomous Tracked Vehicles. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation Albuquerque*, New Mexico, pp. 1388-1393.
- Malcolm, M., 1978. *Mechanics of cutting and boring*, Cold regions research and engineering laboratory, CRREL Report 78-11.
- Murakami, H., Watanebe, K. and Kitano, M., 1992. *A Mathematical Model for Spatial motion of Tracked Vehicles on Soft Ground*. *Journal of Terramechanics*, 29, pp.71-81
- Wong, J.Y, 1993. *Theory of Ground Vehicles*. 2th Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Yeu, T.K. et al., 2007. *An Experimental Study on Relationship of Tractive Force to Slip for Tracked Vehicle on Deep-sea Soft Sediment*. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 21(1), pp.75-80.

감사의 글

학위논문을 끝맺으며 생각해보니 실험실에 들어오고 어느덧 3년이 넘는 시간이 흐른 것 같습니다. 학업에 관심이 적고, 하고 싶은 것 없이 남들이 하는 것을 따라 세월 흐르듯이 살던 저는 우연한 기회로 실험실에 들어오면서 호기심과 열정을 가지고 생활할 수 있었던 지난 3년은 제 인생에 있어서 정말 큰 행운이며 감사한 시간들이었습니다.

우선 실험실에 들어와 공부를 할 수 있는 기회와 수중로봇 분야를 알게 해주신 김준영 교수님께 진심으로 감사드립니다. 항상 옆에서 믿어 주시고 자신감을 가질 수 있도록 격려 해주신 덕분에 책임감을 가지고 열심히 할 수 있었던 것 같습니다. 또한 연구에 있어 조언과 격려를 아낌없이 해주신 최형식 교수님께 감사드립니다. 그리고 바쁘신 와중에 부족한 저의 논문을 심사해주신 이성열 교수님께도 감사드립니다.

그리고 실험실 식구들 동희형, 승우형, 춘우형, 성협이형, 승민이형, 건석이형. 형들한테는 학문적인 배움과 여러 도움들도 물론 감사하지만, 늘 부족한 저에게 가족 같은 분위기로 동생으로서 대해주셔서 인간적인 고민도 같이 나눌 수 있었고, 여러 조언과 꾸지람도 서슴없이 해주셔서 정말로 감사했습니다. 그리고 실험실에 같이 들어와 연구생 1년, 석사과정 2년을 같이 보낸 동호, 함께 했기 때문에 겁 없이 도전할 수 있었고, 힘들 때 의지할 수 있어서 고마웠다. 그리고 실험실 동생 현석, 치호, 지학이. 형으로써 많은 도움을 주지 못한 것 같아서 미안하고 항상 옆에서 힘이 되어줘서 고맙다.

그리고 대학원 진학과 석사과정 생활을 하는데 있어 용기와 응원을 아낌없이 해준 내 친구 휘용이, 상훈이, 아람이, 창경이, 현수 등 일일이 거론하지 못한 구덕고 친구들과 학과 동기들 모두 고맙다.

마지막으로 대학원을 졸업하기까지 물심양면으로 항상 힘이 되어주신 부모님과 이쁜 내 동생 유진이, 항상 감사하고 사랑합니다.

이 외에도 도움을 주신 모든 분들에게 감사드리며, 받은 은혜에 보답할 수 있도록 열심히 노력하겠습니다.

2016년 1월

이영진

나에게 솔직해져 보십시오.

도대체 무엇이 나를 행복하게 하는지.

세상이 일방적으로 정해놓은 성공의 기준이 아닌

내안에서 무엇을 원하는지

남들에게 행복하게 보이는 것이 중요한 것이 아니고

나 자신이 정말로 행복한 것이 중요합니다.

- 헤민 스님의 《멈추면 비로소 보이는 것들》 중에서 -

