

궤도-지반 상호작용 이론을 활용한 해저궤도차량의 구동성능 평가

Evaluation of Tractive Performance of an Underwater Tracked Vehicle Based on Soil-track Interaction Theory

백 성 하¹ Baek, Sung-Ha 신 규 범² Shin, Gyu-Beom
권 오 순³ Kwon, Osoon 정 충 기⁴ Chung, Choong-Ki

Abstract

Underwater tracked vehicle is employed to perform underwater heavy works on saturated seafloor. When an underwater tracked vehicle travels on the seafloor, shearing action and ground settlement take place on the soil-track interface, which develops the soil thrust and soil resistance, respectively, and they restrict the tractive performance of an underwater tracked vehicle. Thus, unlike the paved road, underwater tracked vehicle performance does not solely rely on its engine thrust, but also on the soil-track interaction. This paper aimed at evaluating the tractive performance of an underwater tracked vehicle with respect to ground conditions (soil type, and relative density or consistency) and vehicle conditions (weight of vehicle, and geometry of track system), based on the soil-track interaction theory. The results showed that sandy ground and silty sandy ground generally provide sufficient tractions for an underwater tracked vehicle whereas tractive performance is very much restricted on clayey ground, especially for a heavy-weighted underwater tracked vehicle. Thus, it is concluded that an underwater tracked vehicle needs additional equipment to enhance the tractive performance on the clayey ground.

요 지

해저궤도차량은 큰 중량을 가지고 포화된 해저지반 위를 구동하며 작업을 수행한다. 해저궤도차량 구동 시 궤도-지반 접지면에서는 지반의 전단 및 침하현상이 발생되며, 이로 인해 각각 지반추력 및 지반저항력이 발휘되어 구동성능을 제한한다. 즉, 일반적인 포장도로 주행차량과 달리, 해저궤도차량의 구동성능은 엔진성능뿐 아니라 주행하는 지반과 차량의 상호작용에 의해 결정되는 것이다. 본 연구에서는 궤도-지반 상호작용 이론을 바탕으로 해저궤도차량에 적용될 수 있는 다양한 지반특성(흙 종류, 상대밀도 혹은 경질도) 및 차량특성(차량중량 및 궤도시스템 제원)에 따른 구동성능 평가를 수행하였다. 그 결과, 해저궤도차량이 모래지반 및 실트질 모래지반에서 운용되는 경우에는 비교적 수월하게 구동성능을 확보할 수 있지만, 점성토 지반에서는 구동성능 확보에 어려움이 있을 것으로 나타났다. 특히, 점성토 지반에서 운용되는 해저궤도차량의 중량이 큰 경우 전반적인 구동성능 및 등판능력이 매우 떨어지는 것으로 평가되어, 구동성능을 확보하기 위한 추가적인 보안방안이 필요할 것으로 판단된다.

Keywords : Tractive performance, Underwater tracked vehicle, Seafloor, Soil thrust, Soil resistance

- 1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)
- 2 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)
- 3 정희원, 한국해양과학기술원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Coastal Disaster Prevention Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)
- 4 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ., Tel: +82-2-880-7347, Fax: +82-2-873-2684, geolabs@snu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2018 by the Korean Geotechnical Society

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

1. 서론

최근 가스 하이드레이트(gas hydrate) 및 망간단괴와 같은 해저광물자원이 미래 자원의 보고로 부상함에 따라, 세계적으로 해저자원의 개발이 확대되고 있다. 더불어 신재생에너지 확보에 대한 관심이 높아짐에 따라, 비교적 경제성이 우수하다고 평가받는 해양에너지의 개발 또한 활발히 이뤄지고 있다. 이러한 해저개발은 대부분 깊은 심도에서 수행되고 중작업이 포함되어 있기 때문에 유인(manpower)작업은 제한적이며, 대신 해저 중작업용 ROV(Remotely Operated Vehicle)가 널리 활용되고 있다(Ivanov and Karev, 1990). 국내에서도 심해저 광물자원 채집을 위한 “미네로”가 개발된 바 있으며(Hong et al., 2013), 현재는 해저 건설작업 수행을 위한 “URI-R”의 개발이 진행 중인 등(Jang et al., 2014) 해저 중작업용 ROV의 개발 및 활용이 확대되고 있는 추세이다. 해저 중작업용 ROV는 비교적 연약한 해저지반 위를 구동하며 작업을 수행하므로 넓은 접지면적을 가져 지면에 가하는 접지압을 낮춰줄 수 있는 해저궤도차량이 가장 적합한 형태로서 활용되고 있다(Yong et al., 1984).

지면의 강도가 충분하여 엔진의 출력을 모두 유용한 추진력으로 전환할 수 있는 포장도로와 달리, 해저궤도차량은 해저지반과 같이 포장되지 않은 야지(off-road)를 구동하기 때문에 궤도-지반 접지면에서 발생하는 지반의 전단 및 침하현상이 차량의 구동성능을 제한하는 요소로 작용한다(Wong, 1989). 즉, 해저궤도차량의 구동성능은 엔진성능 뿐 아니라 궤도차량이 주행하는 지반 및 차량특성(차량중량 및 궤도시스템 제원 등)에 영향을 받는다. 따라서 해저궤도차량의 효율적 활용을 위해서는 해저궤도차량에 적용될 수 있는 지반 및 차량특성에 따른 구동성능을 평가하는 것이 필수적 요소이다.

이에 궤도-지반 상호작용 관점에서 해저궤도차량과 같이 포장되지 않은 야지를 구동하는 궤도차량의 구동성능을 평가하기 위한 연구가 수행되어 왔다. 여러 연구자들은 실험적 방법 및 해석적 방법 등을 통해 야지궤도차량의 구동메커니즘을 평가하였으며, 구동성능 예측식을 제안하여 야지궤도차량의 구동성능을 정량적으로 평가할 수 있도록 하였다(Bekker, 1956; Wong, 1989; Park et al., 2000; Grecenko, 2007). Patal 등(2004)은 Bekker (1956)의 구동성능 예측식을 활용하여 건조한 모래지반에서 행성탐사로봇(planetary exploration rover)의 구동성능을 평가한 바 있다. 또한 Wong과 Huang(2006)은

10톤 이상의 중량을 가지는 바퀴차량 및 궤도차량을 대상으로 모래지반 및 점토지반에서의 구동성능을 평가하고 비교하는 연구를 수행하였다. 이들 연구는 궤도차량이 구동되는 지반종류 및 차량특성이 야지궤도차량의 구동성능에 미치는 영향을 평가하였지만, Patal 등(2004)의 연구는 느슨한 건조모래지반과 150kg 이하의 매우 가벼운 차량을 대상으로 수행되어 해저궤도차량의 구동조건과는 거리가 있고 Wong과 Huang(2006)은 한 가지 제원의 궤도차량만을 적용했다는 한계가 있다. 즉, 앞서 언급한 바와 같이 해저궤도차량의 효율적 활용을 위해서는 해저궤도차량에 적용될 수 있는 지반종류 및 차량특성에 따른 구동성능 평가가 선결되어야 하지만, 이를 종합적으로 연구한 결과는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 야지궤도차량 구동성능 평가에 가장 널리 활용되고 있는 Bekker(1956)의 예측식을 바탕으로 해저궤도차량에 적용될 수 있는 다양한 지반(흙 종류, 상대밀도 혹은 경질도) 및 차량특성(차량 중량 및 궤도시스템 제원에 따라 결정되는 차량의 접지압)에 따른 구동성능 평가를 수행하였다. 우선 궤도-지반 상호작용 관점에서 해저궤도차량의 구동성능을 평가하기 위한 이론 및 구체적인 평가 방법을 정리하고, 평가를 수행할 지반 및 차량특성을 결정하였다. 이를 바탕으로 지반 및 차량특성이 해저궤도차량의 구동성능에 미치는 영향을 종합적으로 평가하여 그 결과를 해저궤도차량 운용 시 활용 가능하도록 하였다.

2. 궤도-지반 상호작용을 고려한 해저궤도차량의 구동성능 평가 이론

2.1 해저궤도차량 구동메커니즘

궤도차량 구동 시, 주행장치인 궤도시스템은 차량의 엔진에서 발생된 추진력(이하 엔진추력) 및 차량중량을

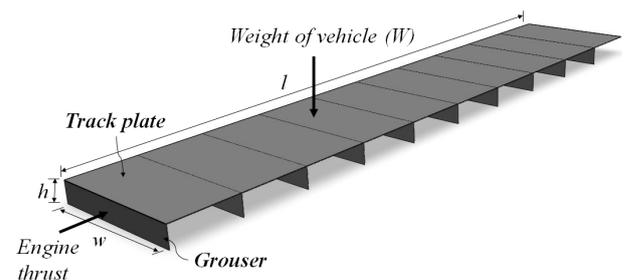


Fig. 1. Schematic diagram of the one continuous track system

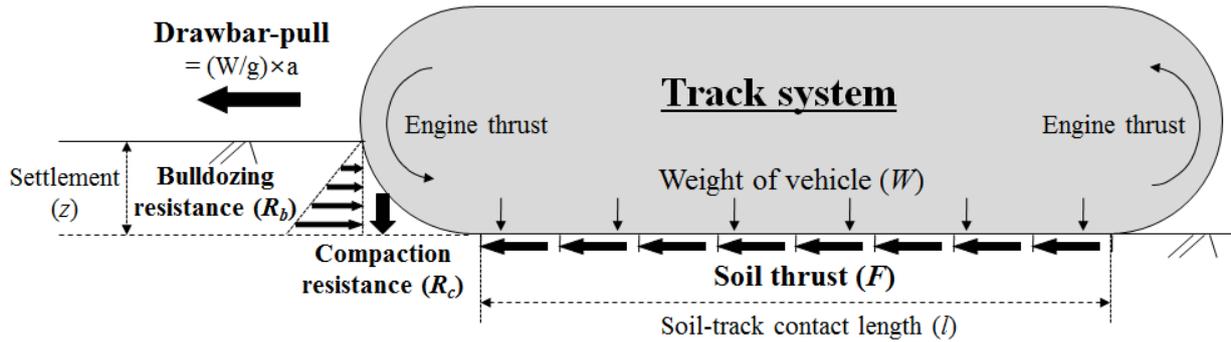


Fig. 2. Traction mechanism of an underwater tracked vehicle (g =acceleration of gravity, a =acceleration of a vehicle)

노면으로 전달하는 역할을 한다(Fig. 1). 노면의 강도가 충분한 포장도로를 주행하는 궤도차량의 경우 엔진추력을 모두 유용한 구동력으로 전환할 수 있어 엔진의 성능이 우수할수록 구동성능도 우수하다. 그러나 해저 궤도차량과 같이 야지를 구동하는 궤도차량의 경우, 구동성능은 지반의 강도에 따라 제한될 수 있다. 엔진성능이 우수하더라도 궤도시스템과 지반의 접지면에서 발생하는 지반의 전단 및 침하현상에 의해 엔진추력을 모두 유용한 구동력으로 전환할 수 없는 경우가 많기 때문이다.

Fig. 2 및 Fig. 3과 같이, 해저궤도차량의 구동 시 궤도와 지반의 접지면에서 발생하는 지반의 전단 및 침하현상에 따라 각각 지반추력과 지반저항력이 발생하여 해저궤도차량의 기계적 구동성능이 제한된다. 지반추력은 지반에서 발현될 수 있는 최대 추진력을 의미하며, 궤도-지반 접지면에서 발생하는 지반전단력의 반력과 같다. 아무리 큰 엔진추력이 지반에 전달되더라도 지반이 이를 지지하지 못하는 경우에는 전단파괴가 발생하며, 이에 따라 엔진추력이 실제 차량의 추진력으로 전환될 수 없다. 일반적인 경우 지반추력은 엔진추력에 비해 매우 작게 나타나므로 해저궤도차량의 추진력은 지반추력에 의해 결정된다(Kogure et al., 1983). 한편, 차량 하중에 의해 나타나는 지반의 침하현상은 다짐저항력 및 불도징저항력과 같은 지반저항력을 발생시켜 해저 궤도차량의 구동성능을 제한한다. 다짐저항력은 지반에 전달된 엔진추력의 일부가 지반을 침하시키는데 사용되기 때문에 발생되며, 불도징저항력은 침하로 인해 궤도시스템 전면에 쌓인 지반에서 작용하는 수동토압에 의해 발생된다(Fig. 2 참고). 즉, 해저궤도차량의 엔진추력 중 일부가 지반추력으로 발현되어 해저궤도차량의 추진력으로 활용되고, 이 추진력의 일부는 지반저항력을 극복하는데 사용되고 나머지가 차량을 구동시키는

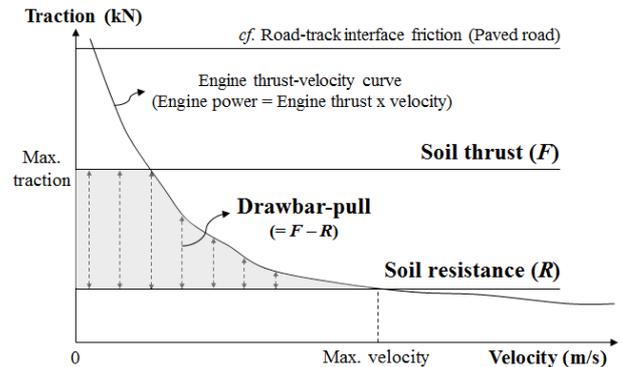


Fig. 3. Example of traction-velocity curve for an underwater tracked vehicle

데 사용되는 것이다. 이러한 관점에서 해저궤도차량의 구동성능은 엔진성능 자체보다는 지반추력과 지반저항력의 차이로 결정된다(Fig. 3 참고). Bekker(1956)는 지반추력과 지반저항력의 차이를 차량이 하중을 견인할 수 있는 능력으로 보아 견인력(drawbar-pull)이라 정의하였으며, 이는 해저궤도차량의 전반적인 구동성능을 나타내는 지표로써 활용되고 있다.

앞서 언급한바와 같이 지반추력 및 지반저항력은 궤도-지반 접지면에서 지반의 전단 및 침하현상에 의해 발생되기 때문에 해저궤도차량의 구동성능은 궤도-지반 상호작용 관점에서 평가되어야 한다. 실제로 궤도-지반 상호작용 관점에서 평가된 궤도차량의 구동메커니즘을 바탕으로 다양한 구동성능 평가 모델들이 제안되어 왔는데, 다음 장에서는 대표적인 모델을 소개하고 본 연구에서 활용된 해저궤도차량 구동성능 평가 방법을 정리하였다.

2.2 해저궤도차량 구동성능 평가 방법

2.2.1 견인력(drawbar-pull)

해저궤도차량과 같이 포장되지 않은 야지를 구동하

는 궤도차량의 전반적인 구동성능을 나타내는 견인력은 지반추력과 지반저항력의 차이로 결정된다. 궤도-지반 접지면에서 발생하는 지반 전단 및 침하 메커니즘을 바탕으로 지반추력과 지반저항력의 예측 모델이 각각 제안되어 왔다.

Fig. 4와 같이 엔진추력이 궤도시스템을 통해 지반에 전달되면 궤도시스템의 저면 및 측면지반을 따라 전단력이 발생된다. 지반추력은 발생된 전단력의 반력으로 작용하기 때문에 궤도-지반 접지면에서 발생되는 전단응력을 전단면적에 대해 적분하여 평가할 수 있다. 일반적으로 저면 및 측면전단력의 반력을 각각 저면지반추력(F_b)과 측면지반추력(F_s)으로 구분하여 평가하고 있으며, 전체지반추력(F)은 두 지반추력의 합으로 나타낼 수 있다(식 (1)).

$$F = F_b + F_s = \int \tau_b dA_b + \int \tau_s dA_s \quad (1)$$

여기서, τ_b 와 τ_s 는 각각 궤도시스템 저면 및 측면지반의 전단응력이며, A_b 와 A_s 는 각각 궤도시스템 저면 및 측면지반의 전단면적을 나타낸다.

여러 연구자들은 이론적 연구 및 실험적 연구를 수행

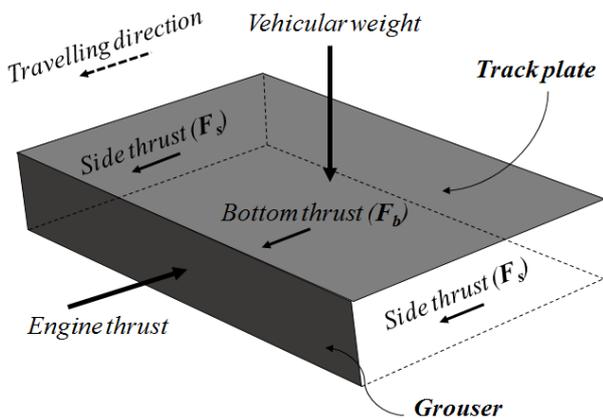


Fig. 4. Schematic diagram of soil thrust components of a track system

하여 궤도-지반의 저면 및 측면에서 발생하는 전단현상을 평가하였고, Mohr-Coulomb 파괴이론을 바탕으로 Table 1과 같이 지반추력 평가식을 제안하였다(Bekker, 1956; Park et al., 2000; Grecenko, 2007).

Table 1과 같이, 저면지반추력은 지반의 직접전단시험과 유사하게 궤도 저면에서 발생되는 전단응력을 궤도 저면면적으로 적분하여 평가된다. 측면지반추력은 각 연구에서 상이하게 정의하고 있는데, Bekker(1956)는 탄성이론을 바탕으로, Park 등(2000)은 주동파괴이론을 바탕으로 측면지반추력 평가식을 제안하였고, Grecenko(2007)는 지반의 점착력만을 고려했다. 본 연구에서는 다른 모델에 비해 그 적용성이 검증되었다고 알려져 있는 Bekker(1956)의 모델을 식 (1)에 대입하여 정리한 식 (2)를 통해 지반추력을 평가하였다.

$$F = wlc(1 + \frac{2h}{w}) + w\sigma'_v \tan\phi(1 + 0.64\frac{h}{w} \cot^{-1} \frac{h}{w}) \quad (2)$$

또한 지반저항력은 해저궤도차량의 추진력에 저항하는 힘으로, 궤도시스템을 통해 전달된 차량하중에 의해 지반이 침하되며 발생된다. Bekker(1956)는 궤도시스템을 통해 차량의 하중이 전달될 때 발생하는 지반의 반력이 평판재하시험 시 평판에 작용하는 지반의 반력과 유사하다고 가정하여, 차량의 하중에 대한 지반침하(z)를 식 (3)과 같이 나타내었다.

$$z = (\frac{W/wl}{k_c/w + k_\phi})^{\frac{1}{n}} = (\frac{\sigma_q}{k_c/w + k_\phi})^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

여기서, W 는 궤도시스템에 작용하는 차량의 하중, σ_q 는 궤도시스템에 작용하는 차량의 접지압력, w 와 l 은 각각 궤도시스템의 너비 및 길이이며, n 는 평판재하시험으로부터 구해지는 지반의 변형지수, k_c , k_ϕ 는 평판재하시험으로부터 구해지는 지반의 변형상수를 나타낸다. 지반저항력 중 다짐저항력(R_c)은 지반에 전달된 추진력

Table 1. Existing theoretical models of the soil thrust

Researcher	Bottom thrust (F_b)		Side thrust (F_s)	
	Shear strength (τ_b)	Shearing area (A_b)	Shear strength (τ_s)	Shearing area (A_s)
Bekker (1956)	$c + \sigma'_v \tan\phi$	wl	$c + 0.64 \frac{w}{2h} \sigma'_v \tan\phi [\frac{h}{w} \cot^{-1} \frac{h}{w}]$	$2hl$
Park et al. (2000)			$c + \sigma'_v K_a \tan\phi$	
Grecenko (2007)			c	

의 일부가 지반을 침하시키는데 사용되기 때문에 발생한다. 따라서 다짐저항력은 궤도시스템의 면적과 같은 지반을 침하시키는데 한 일과 궤도시스템을 수평으로 접지길이 만큼 견인할 때 다짐저항력이 한 일이 같다는 원리로 식 (4)와 같이 평가할 수 있다(Bekker, 1960).

$$R_c = \frac{w}{(n+1)(k_c/w + k_\phi)^{1/n}} \left(\frac{W}{wl}\right)^{\frac{n+1}{n}}$$

$$= \frac{w}{(n+1)(k_c/w + k_\phi)^{1/n}} (\sigma_q)^{\frac{n+1}{n}} \quad (4)$$

불도징저항력(R_b)은 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이, 궤도차량 주행 시 궤도시스템 전면에 쌓인 지반에 의한 저항으로 차량의 하중에 의해 지반침하가 발생하기 때문에 발생된다. 불도징저항력은 궤도시스템 폭과 같은 폭의 판을 이용하여 지반을 밀 때 소요되는 힘(즉, 수동토압을 극복하는데 필요한 힘)의 크기로 평가하는데, Hettiaratchi와 Reece(1974)이 반 경험적으로 제안한 식 (5)를 활용하여 평가할 수 있다.

$$R_b = 2w \cos^2 \phi [2z'c(N_c - \tan \phi) + \gamma' z^2 \left(\frac{2N_\gamma}{\tan \phi} + 1\right)] \quad (5)$$

여기서, γ' 는 지반의 유효단위중량, c 와 ϕ 는 각각 지반의 점착력 및 마찰각이며, N_c 와 N_ϕ 는 마찰각에 의하여 결정되는 지반의 지지력 상수를 의미한다. 해저궤도차량의 구동 시 작용하는 전체 지반저항력(R)은 식 (4)와 식 (5)의 합으로 평가할 수 있다. 최종적으로 해저궤도차량의 견인력(DP)은 식 (6)에 지반추력(식 (2)) 및 지반저항력(식 (3), (4), (5))을 대입하여 평가할 수 있다. 견인력이 0보다 큰 경우, 즉 지반추력이 지반저항력보다 큰 경우 궤도차량은 구동가능하며 견인력의 크기에 따라 해저궤도차량의 전반적인 구동성능이 결정된다. 특히 견인력은 평탄한 지반에서 해저궤도차량의 순구동력(net-traction force)를 나타내는 지표로서도 활용 가능하다.

$$\text{Drawbar-pull (DP)} = F - R = F - (R_c + R_b) \quad (6)$$

2.2.2 등판능력(slope climbing ability)

해저궤도차량이 구동하는 해저지반은 평탄하지 않으며 구배(slope)가 존재한다. 따라서 해저궤도차량의 원

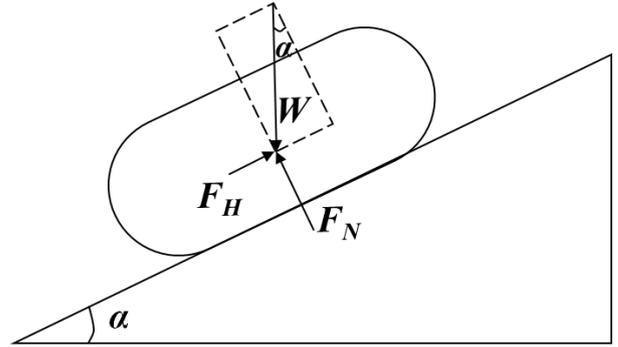


Fig. 5. Force diagram of a track system climbing up a slope

활한 구동을 위해서는 일정한 등판능력을 확보하는 것이 필수적이다. 실제로 건설기계 안전기준에 관한 규칙(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013)에서는 해저궤도차량과 유사한 육상용 궤도형 굴삭기와 궤도형 불도저의 최소 요구 야지 등판각을 각각 16.7°와 30°로 규정하여 장비 제작 시 고려하도록 하고 있다.

임의의 각도 α 를 가지는 경사를 등판하는 해저궤도차량에 작용하는 힘은 Fig. 5와 같으며, 이때 각 힘은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{F_H}{F_N} = \frac{W \sin \alpha}{W \cos \alpha} = \tan \alpha \quad (7)$$

여기서, F_H 와 F_N 은 각각 궤도-지반 접지면에 가해지는 수평력 및 연직력을 의미한다. 해저궤도차량의 구동 시 궤도-지반 접지면에서 발생할 수 있는 최대 수평력은 견인력과 같으므로($F_{H(\max)} = DP$), 궤도차량이 등판할 수 있는 최대각도(α_{\max})는 식 (8)과 같이 견인력과 연직력의 비(단위 연직력 당 발휘되는 견인력의 크기)로 평가할 수 있다. 이는 해저궤도차량이 평탄하지 않은 해저지반 위를 얼마나 자유롭게 구동할 수 있는지를 나타내며 원활한 작업수행을 위해서는 작업목표에 따라 16.7° 혹은 30° 이상이 되어야한다(육상용 야지궤도차량 기준).

$$\alpha_{\max} = \arctan\left(\frac{DP}{F_N}\right) = \arctan\left(\frac{F - R}{F_N}\right) \quad (8)$$

3. 해저궤도차량 구동성능 평가조건

3.1 지반조건

해저궤도차량은 모래에서 점성토까지 다양하게 구성

된 해저표층지반을 구동하며 작업을 수행한다. 해저표층 지반은 해수에 의해 포화된 상태로(Randolph와 Gourvenec, 2011), 대부분 느슨하거나 연약한 상태로 존재한다고 알려져 있다(Jang et al., 2007). 본 연구에서는 포화된 모래지반, 포화된 실트질 모래지반, 포화된 점성토 지반을 대상으로 해석을 수행하여 다양한 지반조건에서 해저 궤도차량의 구동성능을 평가하였다. 이를 위해 주문진 표준사, 관악산 풍화토, 카올리나이트의 물성값을 활용하였는데, 통일분류법에 의해 각각 SP(poorly graded sand), SM(silty sand), MH(silty clay)로 분류되어 모래지반, 실트질 모래지반, 점성토 지반을 대표하였다. 각 시료의 기본 물성값 및 입도분포곡선은 Table 2와 3 및 Fig. 6과 같다.

식 (1)~식 (6)을 통해 확인할 수 있듯이, 해저궤도차량 구동성능 평가를 위해서 필요한 지반의 물성값은 전단강도정수(c , ϕ 혹은 s_u), 건조단위중량(γ_d), 포화 시 함수비(w_{sat}), 마찰각에 의해 결정되는 지반의 지지력계수(N_c , N_γ), 평판재하시험으로부터 구해지는 지반의 변형지수(n) 및 변형상수(k_c , k_ϕ) 등이 있다. 이 중, 지반의

전단강도정수, 건조단위중량, 포화 시 함수비, 지지력계수는 주문진 표준사, 관악산 풍화토, 카올리나이트를 대상으로 시험을 수행하여 평가할 수 있었지만, 평판재하시험으로부터 구해지는 지반의 변형지수 및 변형상수는 직접 평가하지 못했다. 이에 여러 연구자들(Bekker, 1969; Dwyer et al., 1973; Wong, 1989; Wong and Huang, 2006)이 다양한 현장지반을 대상으로 제시하고 있는 변형지수 및 변형상수 중 평가대상지반의 조건(지반의 종류, 밀도 및 경질도, 전단강도정수 등을 기준으로 비교)

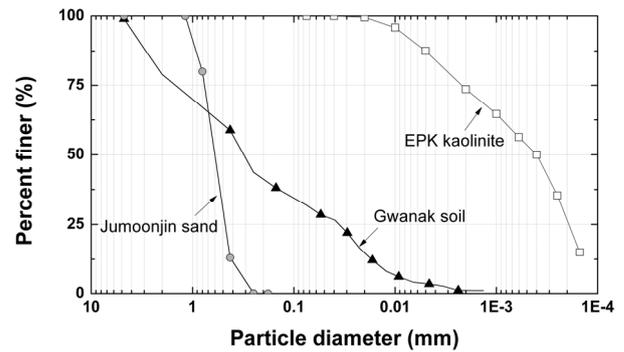


Fig. 6. Particle size distribution of the soil specimens

Table 2. Index properties of Jumoonjin sand and Gwanak soil

Soil type	USCS classification	Specific gravity, G_s	Coefficient of uniformity, C_u	Mean grain size, D_{50} (mm)	Maximum void ratio, e_{max}	Minimum void ratio, e_{min}
Jumoonjin sand	SP	2.65	1.7	0.58	0.99	0.63
Gwanak soil	SM	2.59	29.4	0.32	1.08	0.39

Table 3. Index properties of EPK kaolinite

USCS classification	Specific gravity, G_s	Liquid Limit, LL (%)	Plastic Limit, PL (%)	Plastic Index, PI (%)
MH	2.55	65.3	40.0	25.3

Table 4. Soil parameters for the assessment of underwater tracked vehicle performance

Soil type	Sand (Jumoonjin sand)		Silty sand (Gwanak soil)		Clay (EPK kaolinite)	
	Loose ($D_r = 40\%$)	Medium ($D_r = 60\%$)	Loose ($D_r = 40\%$)	Medium ($D_r = 60\%$)	Very soft ($s_u = 8.8$ kPa)	Soft ($s_u = 21.7$ kPa)
c or s_u (kPa)	0	0	5.9	8.1	8.8	21.7
ϕ ($^\circ$)	36.2	38.9	31.4	36.5	0	0
γ_d (t/m^3)	1.44	1.50	1.43	1.55	0.98	1.03
w_{sat}	0.32	0.29	0.31	0.26	0.63	0.58
N_c	64.8	85.1	41.9	66.8	5.7	5.7
N_γ	56.5	93.4	24.3	59.8	0	0
n	0.80	0.73	0.80	0.40	1.00	0.85
k_c	3.93	0	16.54	11.42	20.68	43.08
k_ϕ	599.5	1348.0	911.9	809.3	814.3	499.7

where, N_c and N_γ are Terzaghi's bearing capacity factors, and soil resistance parameters (i.e. n , k_c , and k_ϕ) of sand, silty sand, and clay are determined with reference to Wong (1989), Bekker (1969), and Wong and Huang (2006), respectively.

과 가장 유사한 값을 선정 및 활용하였다. 평가대상지반의 조건 및 해저궤도차량 구동성능 평가를 위해 필요한 지반의 물성값을 Table 4에 정리하여 나타냈다.

3.2 차량조건

해저궤도차량은 기술적 제약으로 인하여 선진 기술을 갖춘 일부 제작사(Helix Canyon, SMD, Deep Ocean 등)에서만 개발 및 운용되고 있다. 현재 운용되고 있는 해저궤도차량의 종류는 매우 제한적이며 그 제원 또한 일반적으로 공개되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 보다 다양한 차량조건에 따른 해저궤도차량의 구동성능을 평가하기 위해서 작업목표 및 형태가 유사한 육상 궤도형 건설중장비의 제원을 활용하여 해석을 수행하였다.

식 (1)~식 (7)을 통해 확인할 수 있듯이, 해저궤도차

량 구동성능 평가를 위하여 필요한 차량의 물성값은 지반에 접하는 궤도시스템의 너비(w)와 길이(l), 그라우저 높이(h), 수중중량($W_{in\ water}$) 등이 있다. 이 중, 그라우저 높이는 장비에 따라 고정되어 있지 않고 선택적으로 적용할 수 있도록 되어있는데, 본 연구에서는 연약지반에 널리 적용되고 있는 현대제철의 상용 단일그라우저($h=57.5\text{mm}$)가 부착되어 있다고 가정하고 평가에 활용하였다. 수중중량은 궤도형 건설중장비의 육상중량에 부력에 의한 무게 감소를 고려하여 산정하였다. 심해저 광물 자원 채집을 위해 개발된 “미네로”의 부피, 육상중량, 수중중량을 참고하여(Hong et al., 2013), 제시된 제원을 기준으로 장비를 직육면체로 보고 계산된 부피의 20%만큼 부력을 받는다고 가정하여 수중장비중량을 결정하였다(Fig. 7). 구동성능 평가 시 활용한 궤도형 건설중장비의 제조사 및 장비명과 각 장비별 물성값은 Table 5와 같다.

Table 5. Vehicle parameters for the assessment of underwater tracked vehicle performance

Manufacturer	Model	Dimension of the track system (m)		Weight of vehicle (ton)		Ground contact pressure in water, σ_q (kPa)
		w	l	$W_{in\ air}$	$W_{in\ water}$	
Doosan	DX530LC-5	4.47	0.60	52.1	43.1	78.7
	DX490LC-5	4.47	0.60	49.5	40.5	74.0
	DX180LC-5	3.28	0.60	18.5	13.7	34.1
	DX140LCR-5	3.04	0.60	15.4	10.8	29.0
Hyundai	R1200	5.01	0.71	118.0	104.1	143.7
	HX520	4.47	0.60	52.4	43.2	78.9
	HX145CR	3.62	0.50	15.2	10.9	29.5
	HX140	3.71	0.50	14.2	10.0	26.5
Zoomlion	ZE1250ESP	5.20	0.70	122.0	99.8	134.5
	ZE1250E	5.20	0.70	121.2	99.0	133.5
	ZE220ELC	3.65	0.60	22.0	16.3	36.6
	ZE210E	3.88	0.60	21.3	16.0	33.6
Volvo	EC480E	4.37	0.60	53.0	43.9	82.2
	EC380E	4.24	0.60	43.0	34.5	66.6
	EC145E	3.04	0.70	16.7	12.1	28.0
	EC140E	3.04	0.60	14.1	9.6	25.9
Sany	SY480LC-9H	4.41	0.60	45.5	37.1	68.7
	SY380LC-9	4.14	0.60	35.0	27.2	53.7
	SY215C	3.45	0.60	21.9	15.6	37.1
	SY210C	3.26	0.60	20.9	14.9	37.4
John Deere	870G LC	5.11	0.65	85.6	71.7	105.9
	670G LC	4.59	0.65	69.9	58.0	95.4
	135G LC	2.88	0.60	13.9	9.5	26.9
	130G LC	2.88	0.60	14.1	9.8	27.9
JCB	JS220LC	3.66	0.60	22.6	17.2	38.5
	JS205SC	3.37	0.70	21.0	15.7	32.6

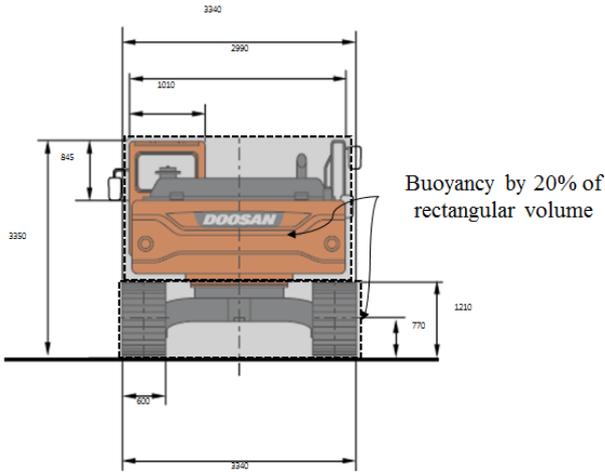


Fig. 7. Dimensions of DX530LC-5 (Doosan Infracore)

식 (2)~식 (7)에서 확인할 수 있듯이, 해저궤도차량의 구동성능에 직접적인 영향을 미치는 것은 수중중량 자체보다는 차량이 지반에 가하는 접지압(σ_q)이므로, 해저궤도차량의 구동성능 평가결과 분석 시 접지압을 비교기준으로 활용하였다.

4. 해저궤도차량 구동성능 평가결과 및 분석

4.1 견인력(drawbar-pull)

해저궤도차량의 전반적인 구동성능을 분석하기 위하여, 궤도-지반 상호작용이론을 바탕으로 정리된 식 (2),

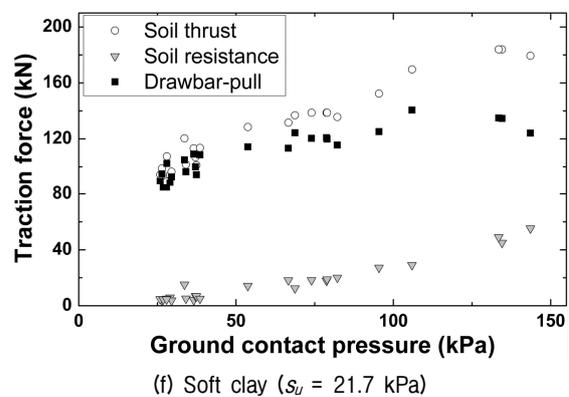
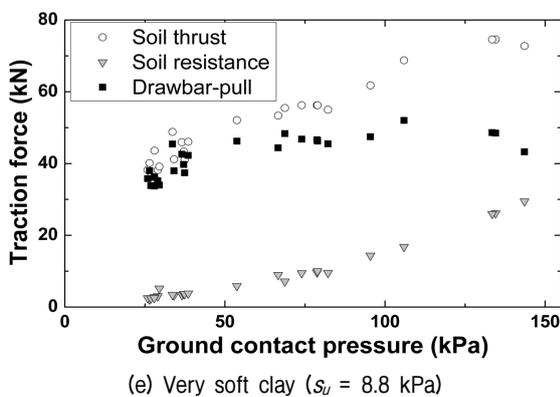
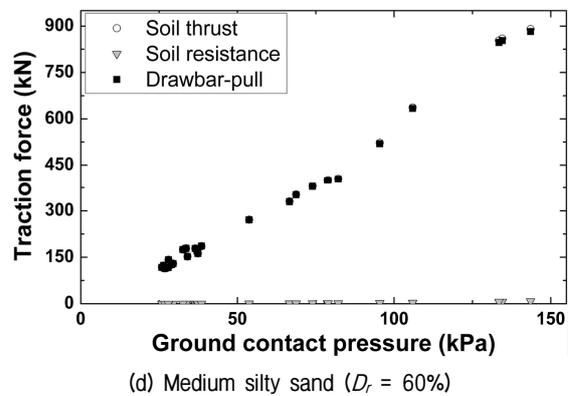
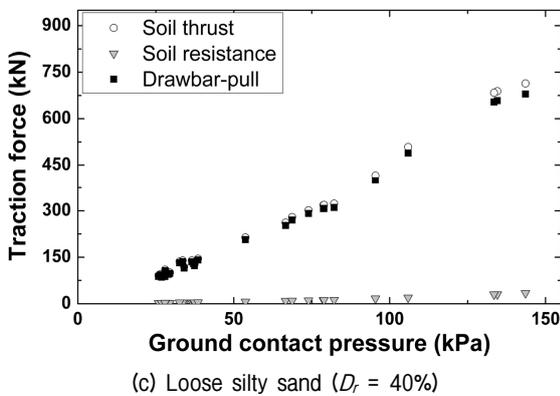
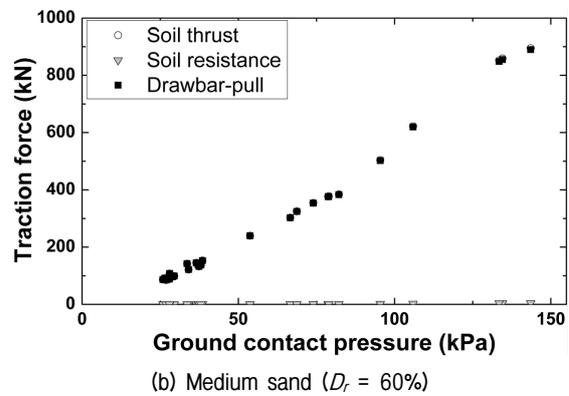
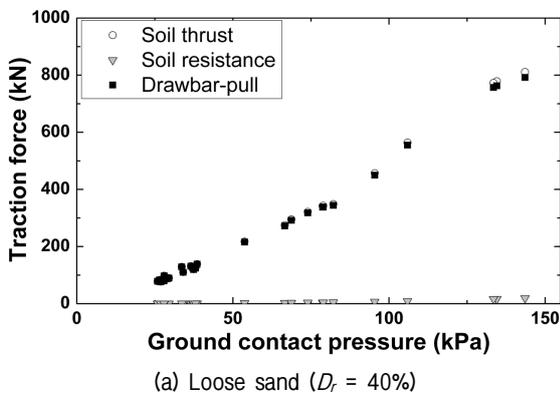


Fig. 8. Traction forces (soil thrust, soil resistance, and drawbar-pull) in terms of ground contact pressure

식 (4)와 (5) 및 식 (6)을 활용하여 각각 지반추력, 지반 저항력, 견인력을 평가하였다. Fig. 8은 포화된 모래지반, 포화된 실트질 모래지반, 포화된 점성토 지반에서 평가된 해저궤도차량의 지반추력, 지반저항력, 견인력을 평가대상 차량이 지반에 가하는 접지압에 대해 나타낸 것이다.

Fig. 8의 (a), (b), (c), (d)에서 확인할 수 있듯이, 모래지반 및 실트질 모래지반에서는 차량이 지반에 가하는 접지압이 증가할수록 해저궤도차량의 전반적인 구동성능이 좋아지는 것으로 나타났다. Table 5를 참고하면 접지압이 큰 차량일수록 대체적으로 전단응력이 발현되는 궤도시스템의 접지면적이 넓었으며, 식 (2)에 제시한 바와 같이 지반추력은 전단응력과 전단면적의 곱으로 나타나기 때문에 접지압이 증가함에 따라 전단응력의 마찰각 성분이 크게 발현되어 지반추력이 증가하였다. 접지압이 클수록 지반침하 또한 커져서 지반저항력이 증가했지만 지반추력의 크기 및 증가폭이 지반저항력에 비해 매우 컸기 때문에, 그 차이로 결정되는 견인력은 증가하는 경향을 보였다. 반면, Fig. 8의 (e), (f)와 같이, 점성토 지반에서는 차량이 지반에 가하는 접지압이 증가해도 해저궤도차량의 전반적인 구동성능에는 큰 변화가 없었다. 접지압이 증가함에 따라 지반추력과 지반 저항력이 증가하는 경향을 보였지만, 지반추력의 증가폭이 지반저항력과 큰 차이가 없어 견인력은 크게 증가하지 않았다. 이는, 점성토 지반에서도 다른 지반과 마찬가지로 접지압이 큰 차량일수록 전단응력이 발현되는 궤도시스템의 접지면적이 넓어 지반추력이 다소 증가했지만, 점성토 지반의 비배수전단 특성에 따라 접지압의 증가가 전단응력에 미치는 영향이 없었기 때문이다.

추가적으로, 궤도시스템의 접지면적에 따른 영향을 배제하고 접지압 및 차량조건이 해저궤도차량의 구동성능에 미치는 영향을 보다 명확하게 분석하기 위하여, 산정된 견인력을 각 차량의 궤도시스템 접지면적(wl)으로 정규화 시킨 단위접지면적 당 견인력을 평가하였다. Fig. 9에 나타낸바와 같이, 모래지반 및 실트질 모래지반에서는 차량의 접지압이 증가할수록 단위면적 당 견인력이 증가하고 점성토 지반에서는 단위면적 당 견인력이 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 8과 Fig. 9를 종합해 볼 때, 모래지반 및 실트질 모래지반에서는 동일한 궤도-지반 접지면적을 가지는 해저궤도차량의 중량이 커질수록, 점성토 지반에서는 작아질수록 전반적인 구동성능이 좋아지는 것을 확인

하였다. 또한, 동일한 중량을 가지는 해저궤도차량에 대해 궤도-지반 접지면적의 증가에 따른 구동성능 개선 효과는 모래지반 및 실트질 모래지반에 비해 점성토 지반에서 더 명확하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 동일한 차량에 대해 바퀴 및 궤도시스템을 적용하여 구동성능을 비교했던 Wong과 Huang(2006)의 연구와 일치하였다. 또한 동일한 지반종류 및 차량조건에서는 지반의 상대밀도 혹은 경질도가 클수록 전단강도가 증가하여 구동성능이 커지는 것으로 나타났고, 점성토 지반에서의 견인력이 모래지반 및 실트질 모래지반에 비해 매우 작아 구동성능 확보에 어려움이 있을 것으로

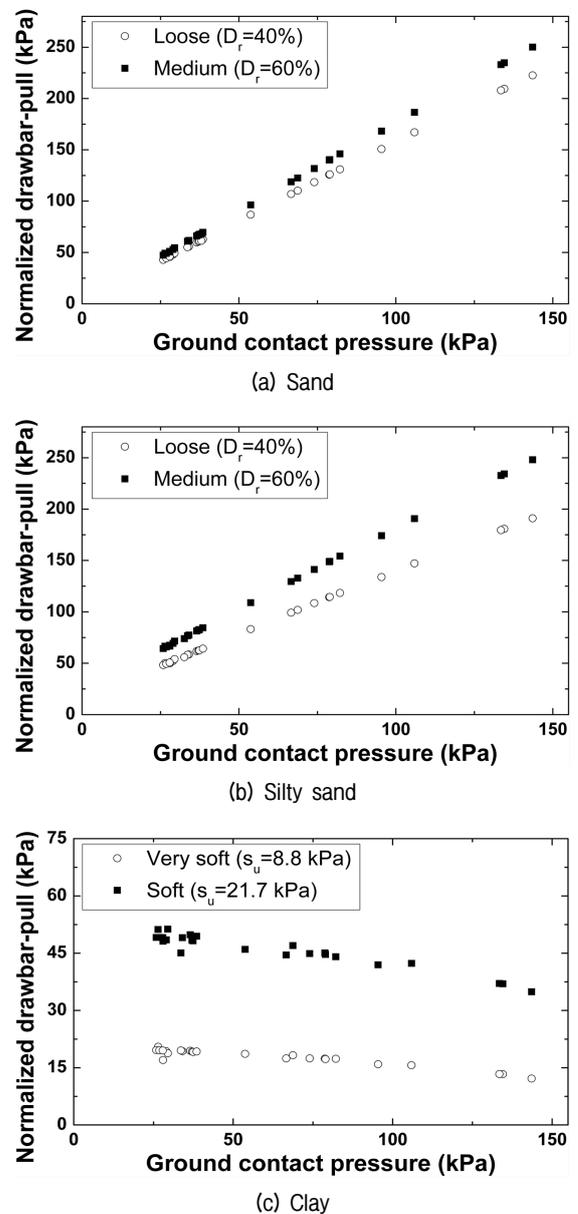


Fig. 9. Normalized drawbar-pull in terms of ground contact pressure

예상되었다. 이상의 견인력 평가 결과는 평탄한 지반에서 해저궤도차량의 순구동력을 나타내주므로, 구배가 없는 지반에서 구동성능 평가 시 직접적인 지표로 활용될 수 있을 것이다.

4.2 등판능력(slope climbing ability)

평탄하지 않은 해저지반 위를 구동하는 해저궤도차량의 구동성능을 평가하기 위하여, 식 (8)을 활용하여 해저궤도차량이 등판할 수 있는 최대각도를 평가하였다. Fig. 10은 포화된 모래지반, 포화된 실트질 모래지반, 포화된

점성토 지반에서 평가된 해저궤도차량의 최대 등판각을 지반에 가하는 접지압에 대해 나타낸 것이다.

Fig. 10의 (a)와 (b)에서 확인할 수 있듯이, 전단강도에서 마찰각 성분이 지배적이었던 모래지반 및 실트질 모래지반의 경우 접지압이 증가함에 따라 최대 등판각은 감소하며 지반의 마찰각 보다 다소 큰 값으로 수렴하였다. 식 (8)과 같이 해저궤도차량의 최대 등판각은 견인력과 연직력의 비(단위 연직력 당 발현되는 견인력의 크기)로 결정되는데, 접지압이 증가하면 견인력 및 연직력이 모두 증가하지만 연직력의 증가비율이 견인력에 비해 더 크게 나타나기 때문이다. 마찰각이 30° 이상이었던 평가대상 모래지반 및 실트질 모래지반의 경우, 건설기계 안전기준에 관한 규칙(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013)이 제시하는 궤도형 굴삭기 및 궤도형 불도저의 최소 요구 야지 등판각인 16.7° 및 30°을 모두 만족하였다.

한편, 점성토 지반의 경우 접지압이 증가하면 최대 등판각은 큰 폭으로 감소하여 0°에 가까워지는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 10의 (c)). 점성토 지반에서는 접지압의 증가에 따라 연직력이 증가하지만, Fig. 8에 나타난바와 같이 견인력은 증가하지 않기 때문이다. 특히, 점성토 지반에서는 육상용 궤도형 굴삭기 및 궤도형 불도저의 최소 요구 야지 등판각인 16.7° 및 30°를 만족하지 못하는 경우가 대부분으로 평가되어, 평탄하지 않은 점성토 지반에서 해저궤도차량의 구동성 확보에 어려움이 있을 것으로 예상되었다.

5. 결론

본 연구에서는 궤도-지반 상호작용 관점에서 해저궤도차량의 구동성능을 평가하기 위한 이론 및 구체적인 평가방법들을 정리하고, 이 중 가장 널리 활용되고 있는 Bekker(1956)의 예측식을 바탕으로 해저궤도차량의 구동성능을 평가하였다. 평가결과를 통해 지반종류 및 차량특성이 해저궤도차량의 구동성능에 미치는 영향을 종합적으로 분석하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 궤도-지반 접지면에서 발현되는 지반추력, 지반저항력, 견인력을 평가하여 해저궤도차량의 전반적인 구동성능을 분석하였다. 특히 견인력은 평탄한 지반에서 해저궤도차량의 순구동력을 나타내므로, 구배

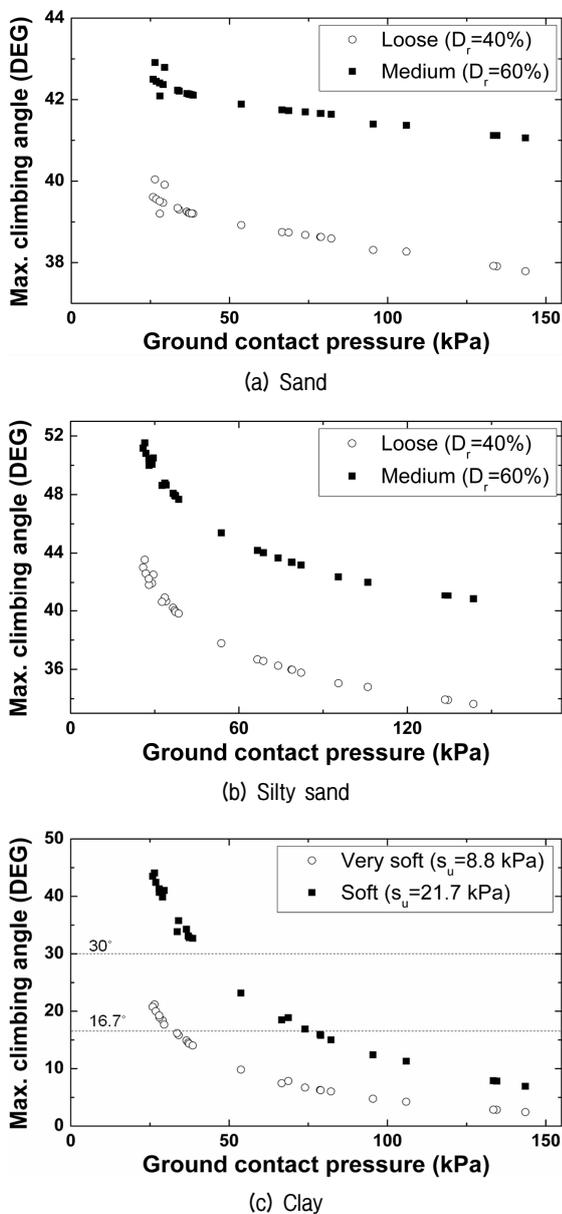


Fig. 10. Maximum climbing angle in terms of ground contact pressure

가 없는 지반에서 구동성능 평가 시 직접적인 지표로써 활용하였다. 모래지반, 실트질 모래지반의 경우 차량의 접지압이 증가할수록 해저궤도차량의 구동성능이 좋아지고, 점성토 지반에서는 접지압이 증가할수록 구동성능이 나빠지는 것으로 나타났다. 즉, 모래지반 및 실트질 모래지반에서는 동일한 궤도-지반 접지면적을 가지는 해저궤도차량의 중량이 커질수록, 점성토 지반에서는 작아질수록 전반적인 구동성능이 좋아졌다. 또한, 동일한 중량을 가지는 해저궤도차량에 대해 궤도-지반 접지면적의 증가에 따른 구동성능(특히, 평탄한 지반에서 해저궤도차량의 구동력) 개선 효과는 모래지반 및 실트질 모래지반에 비해 점성토 지반에서 더 명확하게 나타나는 것을 확인하였다.

- (2) 견인력과 연직력의 비(단위 연직력 당 발현되는 견인력의 크기)로 결정되는 최대 등판각을 평가하여 평탄하지 않은 지반에서 해저궤도차량의 구동성능을 분석하였다. 전단강도에서 마찰각 성분이 지배적이었던 모래지반 및 실트질 모래지반의 경우, 접지압이 증가함에 따라 최대 등판각이 다소 감소하지만 지반의 마찰각 보다 다소 큰 값으로 수렴하였다. 접지압이 증가하면 견인력 및 연직력이 모두 증가하지만, 연직력의 증가비율이 견인력에 비해 더 크게 나타났기 때문이다. 반면, 점성토 지반의 경우 접지압이 증가하면 최대 등판각은 큰 폭으로 감소하여 0°에 가까워지는 것으로 나타났는데, 점성토 지반에서는 접지압 증가에 따라 연직력만 증가할 뿐, 견인력은 증가하지 않았기 때문이다. 특히, 점성토 지반에서는 육상용 궤도형 굴삭기 및 궤도형 불도저의 최소 요구 야지 등판각인 16.7° 및 30°를 만족하지 못하는 경우가 대부분으로 평가되어, 평탄하지 않은 점성토 지반에서 해저궤도차량의 구동성 확보에 어려움이 있을 것으로 예상되었다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 해저궤도차량이 모래지반 및 실트질 모래지반에서 운용되는 경우 비교적 수월하게 구동성능을 확보할 수 있지만, 점성토 지반에서는 구동성능 확보에 어려움이 있을 것으로 판단된다. 점성토 지반에서 운용되는 해저궤도차량이 지반에 가하는 접지압이 큰 경우(즉, 차량의 중량이 큰 경우), 전반적인 구동성능은 매우 낮으며, 특히 평탄하지 않은 지반 위에서는 굴삭작업 및 불도징 작업을 위한 최소 등판능력을 확

보하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 해저궤도차량이 점성토 지반에서 구동하는 경우에는 구동성능을 보완하기 위한 추가 보완방안이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구결과는 지반종류 및 차량특성(차량중량, 궤도시스템 제원 등)에 따라 해저궤도차량의 전반적인 구동성능을 예측하기 위한 지표로써 활용될 수 있다. 단, 이상의 구동성능 평가결과는 궤도-지반 상호작용 관점에 따른 것으로, 해저궤도차량 구동 시 차량의 전면에서 작용하는 유체항력에 의한 저항 등을 고려하지 못했다. 실제로 유체항력이 고려되는 경우 해저궤도차량의 구동성능이 다소 감소될 것으로 예상되므로, 항력저항을 고려한 추가적인 평가를 수행하여 제시된 연구결과를 보완할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다(해양개발용 수중건설로봇 사업단, PJT200539). 또한 서울대학교 공학연구원의 지원에도 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Bekker, M.G. (1956), *Theory of Land Locomotion*, University of Michigan Press.
2. Bekker, M.G. (1960), *Off the Road Locomotion*, University of Michigan Press.
3. Bekker, M.G. (1969), *Introduction to Terrain-Vehicle Systems*, University of Michigan Press.
4. Dwyer, M.J., Comely, D.R., and Evernden, D.W. (1974), "The Field Performance of Some Tractor Tyres Related to Soil Mechanical Properties", *J. of Agricultural Engineering Research*, Vol.19, No.1, pp.35-50.
5. Grecenko, A. (2007), "Re-examined Principles of Thrust Generation by a Track on Soft Ground", *J. of Terramechanics*, Vol.44, No.1, pp.123-131.
6. Hettiaratchi, D.R.P. and Reece, A.R. (1974), "The Calculation of Passive Soil Resistance", *Geotechnique*, Vol.24, No.3, pp.289-310.
7. Hong, S., Kim, H.W., Yeu, T.K., Choi, J.S., Min, C.H., Yoon, S.M., Kim, J.H., Lee, M.U., Sung, K.Y., Lee, C.H., Oh, J.W., and Kim, S.S. (2013), "The Development of Pilot Mining Robot, MineRo, and sea Performance Tests", *Proceedings of the Korea Society of Ocean Engineers Conference*, Seoul, Korea, pp.60-63 (in Korean).
8. Ivanov, Y. and Karev, Y. (1990), "Major Principle to Develop Offshore Bottom ROV's", *International Society of Offshore and Polar Engineers*, Seoul, Korea, pp.141-146.
9. Jang, I.S., Kwon, O.S., and Chung, C.K. (2007), "Development of Unmanned Seabed Type Marine Cone Penetration Testing System",

- 2017 Fall Geotechnical Engineering Conference, pp.611-622.
10. Jang, I.S., Min, J.T., Do, H.J., and Kim, M.J. (2014), "Development Trends of Underwater Construction Robotics and R&D Strategies for Practical Use", *Proceedings of the Annual Autumn Meeting of Society of Unmanned Underwater Vehicle of Korea*, pp.55-58.
 11. Kogure, K., Ohira, Y., and Tamaguchi, H. (1983), "Prediction of Sinkage and Motion Resistance of a Tracked Vehicle Using Plate Penetration Test", *J. of Terramechanics*, Vol.20, No.3, pp.121-128.
 12. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013), Safety Standard for Construction Machinery, *Korea Ministry of Government Legislation*.
 13. Park, W., Lee, K., and Park, J. (2000), "The Prediction of Side Thrust Generated by Grousers under Track", *J. of Korean Society of Agricultural Machinery*, Vol.25, No.1, pp.1-10.
 14. Patal, N., Scott, P., and Ellery, A. (2004), "Application of Bekker Theory for Planetary Exploration through Wheeled, Tracked and Legged Vehicle Locomotion", *Space 2004 Conference and Exhibit*, San Diego, pp.1-9.
 15. Randolph, M. and Gourvenec, S. (2011), *Offshore Geotechnical Engineering*, Spon Press.
 16. Wong, J.Y. (1989), *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*, Elsevier.
 17. Wong, J.Y. and Huang, W. (2006), "Wheels vs. Tracks – A Fundamental Evaluation from the Traction Perspective", *J. of Terramechanics*, Vol.43, No.1, pp.27-42.
 18. Yong, R., Fattah, E., and Skiadas, N. (1984), *Vehicle Traction Mechanics*, Elsevier.

Received : December 7th, 2017

Revised : December 21st, 2017

Accepted : January 5th, 2018